

## تأثیر ترکیب پسماندهای صنعتی و آهک بر رفتار هیدرومکانیکی رس‌ها

امیررضا گودرزی\*<sup>۱</sup> و حمیدرضا اکبری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

(دریافت: ۹۵/۱۱/۵، پذیرش: ۹۶/۷/۱۷، نشر آنلاین: ۹۶/۷/۱۸)

### چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر استفاده توأم از ترکیب پسماندهای صنعت فولادسازی (شامل سرباره GGBS و BOFS) و آهک در شدت بخشی فرآیند بهبود خصوصیات مهندسی مصالح رسی بررسی شد. بدین منظور مقادیر صفر تا ۳۰ درصد وزنی آهک، سرباره و مخلوط آهک-سرباره، هریک به طور جداگانه به یک نمونه خاک نرم (عمدتاً کائولینیت) اضافه و پس از عمل‌آوری، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مختلف بزرگ‌ساختاری و ریزساختاری صورت گرفت. نتایج به دست آمده مؤید آن است که در مقایسه با آهک، حضور سرباره به ویژه GGBS تأثیر اندکی بر مشخصات ژئومکانیکی خاک دارد. از طرفی، مشخص شد ترکیب آهک و سرباره (LAS) موجب کاهش شدید پتانسیل نگهداشت آب و کنترل نشست خاک شده و ظرفیت باربری را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. به نحوی که مقاومت فشاری این سری از نمونه‌ها بیش از ۱۵ برابر رشد داشته و رفتار آنها به ویژه در زمان‌های محدود نگهداری (کمتر از ۷ روز) حتی نسبت به تثبیت با آهک تنها، تا ۱۵۰٪ بهبود می‌یابد. با استناد به طیف‌های اشعه ایکس و آنالیزهای SEM-EDX، علت عملکرد مطلوب LAS به دلیل مصرف بهینه آهک برای رشد نانو ساختارهای سیمانی در سیستم خاک-افزودنی ارزیابی شد. در مجموع نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از ترکیب آهک و سرباره (به خصوص BOFS) گزینه مناسبی برای بهسازی رفتار رس‌ها بوده که علاوه بر کاهش ۷۵ درصدی مصرف آهک، زمان عمل‌آوری را بیش از سه برابر کم کرده و کمک مؤثری به پسمانداری زائدات صنعتی در راستای حفظ محیط‌زیست می‌نماید.

**کلیدواژه‌ها:** رس نرم، آهک، پسماند فولادسازی، خصوصیات هیدرومکانیکی، ریزساختار.

### ۱- مقدمه

مشخصات تشکیل‌دهنده اجزاء و شرایط محیطی است (Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۰).

معمولاً تبادل کاتیونی (ناشی از جایگزینی یون‌های با ظرفیت بیشتر ماده اصلاح‌کننده به جای کاتیون‌های با ظرفیت کمتر خاک) و همچنین افزایش غلظت املاح مجاور ذرات رسی بر اثر انحلال افزودنی، سبب تشکیل ساختار مجتمع و بهبود رفتار خاک ریزدانه می‌شود. بعضی از افزودنی‌ها (مانند آهک) نیز با افزایش pH محیط، باعث انحلال سطوح رسی شده که در صورت ترکیب با یون کلسیم آزاد در سیستم می‌تواند از طریق فعالیت پوزولانی سبب تشکیل ترکیبات با خاصیت سیمانی مانند ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) و کلسیم آلومینات هیدراته (CAH)، شود که تأثیر بسزایی در بهبود رفتار ژئومکانیکی مصالح دارد (Chemeda و همکاران، ۲۰۱۵؛ Shibi و Kamei، ۲۰۱۴).

اگرچه وجود برخی محدودیت‌های اجرایی در زمینه کاربرد این گونه از تثبیت‌کننده‌ها (مانند اثر مخرب سولفات و مواد آلی) و همچنین افزایش قیمت آنها موجب شده که محققین به دنبال

نتایج حاصل از مطالعات قبلی نشان می‌دهد حضور رس‌های نرم در بستر و یا اطراف سازه‌های مهندسی می‌تواند به دلیل امکان تغییر شکل زیاد، مقاومت اندک و قابلیت شدید آبستنگی، موجب آسیب و یا تخریب کامل طرح شود (Do و همکاران، ۲۰۱۶؛ Cong و همکاران، ۲۰۱۴؛ Ahmed و Issa، ۲۰۱۴).

بر این اساس تاکنون روش‌های متنوعی مانند تعویض با مصالح مناسب، بهسازی حرارتی و اصلاح شیمیایی برای مواجهه با مشکلات خاک‌های نرم ارائه شده است (Lam و همکاران، ۲۰۱۵؛ Yi و همکاران، ۲۰۱۵).

به نحوی که اصلاح شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی متداولی مانند آهک و سیمان، جزء راهکارهای رایج برای تثبیت این قبیل از خاک‌ها می‌باشد (Ahmed، ۲۰۱۵؛ Kamei و همکاران، ۲۰۱۳؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۲). به طور کلی، فرآیند بهسازی خاک پس از اندرکنش با ماده افزودنی، وابسته به

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۶۳۶۲۰۷۳۳

آنها با یکدیگر، از دیدگاه بزرگساختاری و ریزساختاری صورت گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

نمونه خاک مورد استفاده در این تحقیق، یک رس تقریباً خالص (عمدتاً حاوی کانی کائولینیت) بوده که پس از انجام آزمایش‌های اولیه شناسایی مطابق آئین‌نامه ASTM (۲۰۰۶) و دستورالعمل EPA<sup>۵</sup> (۱۹۸۳)، مشخصات رفتاری این خاک مطابق جدول (۱) به دست آمد. با توجه به نتایج ارائه شده، این نمونه پتانسیل نشست‌پذیری زیاد و مقاومت اندکی داشته و حتی در شرایط دانسیته خشک بیشینه (با فرض بهسازی مکانیکی)، ظرفیت باربری مجاز آن بسیار اندک خواهد بود. بنابراین به عنوان یک خاک نرم رسی مسئله‌دار در نظر گرفته شد.

سرباره‌های فولادسازی استفاده شده در این تحقیق مربوط به محصولات فرعی کارخانه ذوب آهن اصفهان بوده که ترکیبات تشکیل‌دهنده آنها بر اساس نتایج آزمایش XRF<sup>۴</sup> تعیین و در جدول (۲) ارائه شد. با توجه به نتایج مطالعات قبلی و حضور سیلیس آزاد موجود در سرباره‌های مورد مطالعه، انتظار می‌رود از اندرکنش مناسبی با آهک برای انجام فعالیت پوزولانی و تولید ژل‌های سیمانی برخوردار باشند (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۲؛ Cokca و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس اهداف تحقیق حاضر، از آهک هیدراته خالص (مرک آلمان) برای بهسازی خاک و ترکیب با سرباره‌ها استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات رفتاری خاک مورد مطالعه

مشخصه	مقدار اندازه‌گیری شده
اجزای کانی ساخت	بیش از ۷۵٪ کائولینیت
ظرفیت تبادل کاتیونی، cmol/kg	۲۸
نوع کاتیون تبدالی	عمدتاً سدیم
نشانه خمیری، %	۲۷/۴
طبقه‌بندی براساس روش متحد	CH
دانسیته خشک در محل، g/cm <sup>3</sup>	۱/۲۱
رطوبت در محل، %	۳۴
مقاومت برشی زهکشی نشده*، MPa	۰/۰۴
نشانه فشردگی، C <sub>c</sub>	۰/۵
دانسیته خشک بیشینه، g/cm <sup>3</sup>	۱/۴۸
مقاومت برشی زهکشی نشده**، MPa	۰/۱

\* در شرایط دانسیته در محل، \*\* در شرایط دانسیته خشک بیشینه

مواد جایگزین با هزینه کمتر و تأثیرگذاری بیشتر باشند (Yi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۲؛ Seco و همکاران، ۲۰۱۱؛ Cokca و همکاران، ۲۰۰۹).

به عنوان مثال مطالعه Goodarzi و همکاران (۲۰۱۵)، نشان داد افزودن سیلیکافوم به خاک تورمی اصلاح شده با آهک باعث بهبود قابل ملاحظه مقاومت فشاری، افزایش تراکم ریزساختار و کاهش هدایت هیدرولیکی مصالح شده که این تغییرات، در اصلاح خصوصیات ژئو-زیست‌محیطی و جلوگیری از تهاجم شیمیایی به خاک بسیار مؤثر است.

از سوی دیگر، امروزه همراستا با پیشرفت جامعه، بحث مدیریت بهینه و امکان استفاده دوباره از پسماندهای صنعتی در راستای توسعه پایدار (با هدف حفظ منابع و کاهش آلودگی محیط‌زیست) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است (Jeong و همکاران، ۲۰۱۶). به طوری که نظر به گسترش جهانی صنعت فولاد و حجم زیاد ترکیبات زائد تولید شده در این فرآیند، امکان بکارگیری این مواد در بخش‌های مختلف مانند پروژه‌های عمرانی مورد توجه خاص می‌باشد (Wang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Tsai و همکاران، ۲۰۱۴). در این راستا بررسی‌های صورت گرفته توسط Yi و همکاران (۲۰۱۵)، Gu و همکاران (۲۰۱۵)، Obuzr و همکاران (۲۰۱۱) و Cokca و همکاران (۲۰۰۹) نشان می‌دهد استفاده از ترکیب سرباره‌های فولادسازی مانند سرباره کوره بلند (GGBS)<sup>۱</sup> و مواد قلیایی موجب کاهش پتانسیل فرسایش‌پذیری، افزایش مقاومت و بهبود کارپذیری خاک‌های ریزدانه خواهد شد. به نحوی که مطالعات موجود عمدتاً در زمینه کاربرد GGBS بوده، و بررسی‌ها در مورد تأثیر سرباره کنورتور (BOFS)<sup>۲</sup> بر رفتار خاک بسیار محدود (Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵؛ Poh و همکاران، ۲۰۰۶) و البته در مورد رس‌های نرم نیست. همچنین به موضوع مقایسه عملکرد این سرباره‌ها و امکان استفاده از آنها و یا ترکیب با آهک برای اصلاح خصوصیات هیدرومکانیکی رس‌های نرم کمتر پرداخته شده است. علاوه بر این در بسیاری از پژوهش‌های گذشته، در مطالعه فرآیند بهسازی خاک با سرباره به طور هم‌زمان به اندرکنش‌های شیمیایی و تغییرات ریزساختاری توجه زیادی نشده است. بنابراین در تحقیق حاضر با افزودن آهک و دو نوع سرباره GGBS و BOFS به خاک تحت زمان‌های عمل‌آوری متفاوت، مجموعه‌ای گسترده از آزمایش‌های مختلف شامل تعیین هدایت الکتریکی، pH، مقاومت فشاری، تحکیم، ارزیابی منحنی قابلیت نگهداشت آب، تهیه طیف‌های اشعه ایکس (XRD)<sup>۳</sup> و عکس‌برداری الکترونی به همراه آنالیز عنصری (EDX)<sup>۴</sup> با هدف بررسی ساز و کار اندرکنش خاک با مواد افزودنی مورد مطالعه و مقایسه عملکرد

4. Energy-dispersive X-ray spectroscopy  
 5. Environmental protection agency  
 6. X-ray fluorescence

1. Ground granulated blast furnace slag  
 2. Basic oxygen furnace slag  
 3. X-ray diffraction

جدول ۲- اجزای مهم سرباره‌های مورد استفاده

ترکیبات	مقدار اندازه‌گیری شده (%)	
	BOFS	GGBS
SiO <sub>2</sub>	۲۷/۱	۴۸/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶/۴	۱۵/۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵/۳	۴/۱
CaO	۴۴/۲	۲۲/۳
MgO	۳/۷	۷/۴
K <sub>2</sub> O	۲	۱

مواد افزودنی مورد نظر شامل سرباره‌ها، آهک و ترکیب آهک و سرباره (LAS) به تفکیک در یک بازه گسترده برابر با صفر تا ۳۰ درصد وزنی به خاک اضافه شدند. لازم به ذکر است ترکیب آهک با سرباره‌ها در نسبت وزنی ۱ به ۴ انتخاب شد. زیرا بر اساس نتایج حاصل از مطالعات گذشته (Gu و همکاران، ۲۰۱۵؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۵) و بررسی آزمایشگاهی پژوهش حاضر، در نسبت‌های کمتر فعالیت سرباره محدود خواهد شد.

### ۲-۲- انجام آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی تأثیر مواد افزودنی بر خصوصیات شیمیایی خاک، ابتدا مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن خشک هر نمونه، مواد اصلاح‌کننده مورد نظر به طور مجزا به آنها اضافه و سپس سوسپانسیون‌های خاک به همراه افزودنی با نسبت ۱ به ۲۰ (خاک- آب مقطر) در تیوپ‌های سانتریفیوژ تهیه شدند. بعد از ایجاد تعادل (قرارگیری به مدت ۲ ساعت بر روی دستگاه لرزاننده)، مقدار pH و هدایت الکتریکی هر نمونه پس از گذشت زمان‌های ۲ ساعت تا ۲۸ روز تعیین گردید. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)<sup>۸</sup> خاک در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با افزودنی، مطابق دستورالعمل ASTM-D2166 نیز اندازه‌گیری شد. در این روش، ابتدا درصد‌های مورد نظر از مواد افزودنی مورد مطالعه به صورت جداگانه و بر حسب درصد وزن خشک به خاک اضافه و با یکدیگر مخلوط شدند. پس از آن هر یک از نمونه‌های همگن خاک- افزودنی با وزن مخصوص و رطوبت در محل (جدول ۱) درون استوانه فلزی به ارتفاع ۷۰ و قطر ۳۵ mm به وسیله جک هیدرولیکی به صورت استاتیکی متراکم شدند. در ادامه پس از بیرون آوردن هر نمونه از قالب، آن را به وسیله پارافیلیم پوشش داده و در ژرminatور تحت دمای ۲۵ °C و رطوبت محیطی ۸۵٪ بر حسب دوره‌های زمانی مورد نیاز (تا ۲۸ روز) نگهداری گردید. در نهایت مقاومت فشاری هر نمونه با استفاده از دستگاه تک‌محوری و با سرعت بارگذاری ۱/۲ mm/min تعیین شد. برای اندازه‌گیری پتانسیل نشست‌پذیری نمونه‌ها، آزمایش تحکیم مطابق روش ASTM-D2435 صورت گرفت. به این منظور، پس از تهیه مخلوط

همگن خاک به همراه افزودنی طبق روش آزمایش مقاومت، نمونه‌ها درون رینگ برنجی دستگاه ادنومتر به ارتفاع ۲ و قطر ۵cm با وزن مخصوص و رطوبت در محل (جدول ۱) متراکم و پس از عمل‌آوری، مشخصات تحکیمی آنها تعیین گردید. بر اساس کارهای گذشته (Lu و همکاران، ۲۰۱۷؛ Wijaya و همکاران، ۲۰۱۶؛ Hillel، ۲۰۰۴) با انجام آزمایش مکش با استفاده از دستگاه صفحه فشار مطابق دستورالعمل ASTM-D1699، میزان رطوبت هر نمونه متناسب با سطح فشار اندازه‌گیری و با ترسیم منحنی نگهداشت آب توسط خاک (SWRC)، قابلیت نگهداری رطوبت در نمونه‌ها بررسی شد. با هدف بررسی تغییر آرایش سطوح رسی و کانی‌ساخت خاک در اثر اندرکنش با مواد افزودنی، آزمایش‌های ریزساختاری نیز انجام شدند. نمونه‌های لازم برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی از تکه‌های باقی‌مانده آزمایش مقاومت فشاری اخذ و با استفاده از دستگاه مدل VEGA3-TESCAN مجهز به EDX در بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر عکس‌برداری شده و هم‌زمان آنالیز عنصری بر روی آنها صورت گرفت. در ادامه، این نمونه‌ها را کاملاً پودر کرده و سپس با استفاده از دستگاه XRD مدل بروکر D8، طیف پراش اشعه ایکس آنها تهیه گردید.

### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- تغییرات قابلیت نگهداشت رطوبت

یکی از مشکلات رس‌های نرم ظرفیت زیاد نگهداشت آب در فضای مابین ذرات آنها بوده که عملاً باعث افزایش شکل‌پذیری و کاهش ظرفیت باربری خاک می‌شود. بر این اساس و با توجه به اهداف پژوهش حاضر، تغییرات منحنی مشخصه خاک- آب نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با مواد افزودنی از طریق انجام آزمایش‌های مکش ارزیابی شد. با توجه به نتایج آنالیز XRF، ترکیبات موجود در سرباره‌های مورد استفاده دارای کاتیون‌های چند ظرفیتی است. همچنین نظر به انحلال‌پذیری نسبتاً مناسب آهک، افزودن آن به خاک سبب افزایش غلظت یون دو ظرفیتی کلسیم در سیستم خواهد شد (Chemeda و همکاران، ۲۰۱۵؛ Eisazadeh و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین با اضافه کردن این افزودنی‌ها (شامل سرباره‌ها، آهک و یا ترکیب آهک- سرباره (LAS) به خاک مورد مطالعه که کاتیون تبادلی غالب آن سدیم است، بر پایه روابط تئوریک گوی- چپمن انتظار می‌رود در اثر جایگزینی کاتیون‌های چند ظرفیتی مواد افزودنی با کاتیون Na<sup>+</sup>، ضخامت لایه دوگانه اطراف سطوح رسی کاهش و با نزدیک شدن ذرات به یکدیگر قابلیت هیدراته شدن و حضور آب در فضای مابین آنها محدود شود (Seco و همکاران، ۲۰۱۱؛ Obuzr و همکاران، ۲۰۱۱). به نحوی که این تغییر رفتار مبنی بر کاهش پتانسیل

8. Unconfined compression strength

7. Lime activated slag: LAS

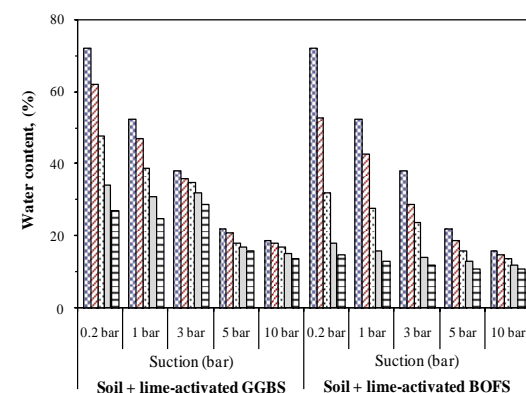
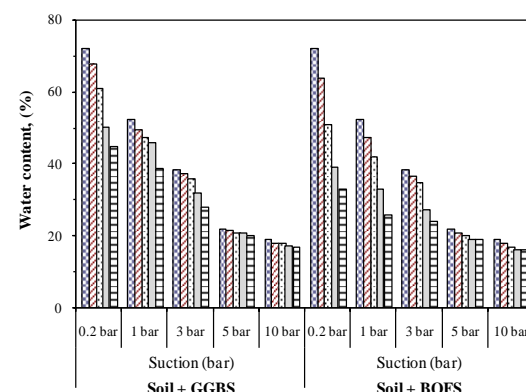
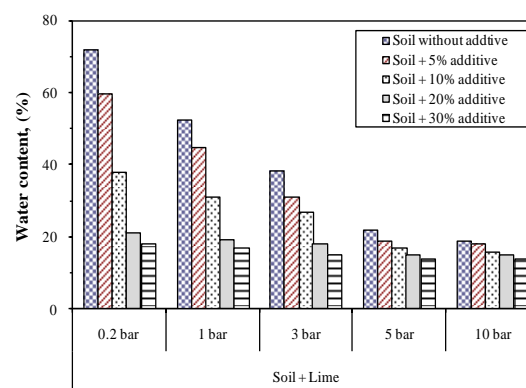
از سوی دیگر بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱) ملاحظه می‌شود در شرایط یکسان، استفاده از ترکیب آهک به ویژه با سرپاره BOFS، تأثیر بسزایی در اصلاح رفتار خاک دارد. به طوری که کاهش نگهداشت آب در نمونه‌های حاوی BOFS فعال شده با آهک با نمونه‌های دارای آهک تنها تقریباً مشابه بوده؛ اگرچه مصرف آهک در آنها حدود ۷۵٪ کمتر است. به بیان دیگر، بر اساس نتایج آزمایش‌های مکش می‌توان گفت استفاده از LAS ضمن بهبود عملکرد سرپاره، سبب کاهش مصرف آهک برای اصلاح خاک می‌گردد. با توجه نتایج آنالیز XRF و مشخصات اجزاء تشکیل دهنده سرپاره‌ها (جدول (۲))، تأثیر قابل ملاحظه مخلوط آهک-سرپاره را می‌توان به تشدید واکنش‌های پوزولانی و شکل‌گیری بیشتر نانو ساختارهای سیمانی مانند CSH خصوصاً در حضور سرپاره کنورتور (به دلیل تناسب بهتر ترکیب کلسیم و سیلیس موجود در این سرپاره و فراهم شدن شرایط لازم برای اندرکنش مستقیم آنها با یون کلسیم آزاد شده از آهک) نسبت داد که صحت این واکنش و تشکیل ثانویه مواد سیمانی ناشی از آن در ادامه با آزمایش‌های شیمیایی و ریزساختاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این شرایط و بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱)، حضور LAS حتی نسبت به آهک تنها، سبب کاهش بیشتر قابلیت نگهداشت آب در مصالح رسی شده است. بر اساس مطالعات قبلی (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۵) علت شکل‌گیری CSH، یونیزه شدن آهک هیدراته (رابطه (۱)) بوده که در این شرایط و بر اثر افزایش pH محیط، ترکیب یون‌های کلسیم، هیدرواکسید و سیلیس (رابطه (۲)) سبب تشکیل این نوع از نانوساختارهای سیمانی خواهد شد.



### ۳-۲- نتایج آزمایش‌های pH و EC

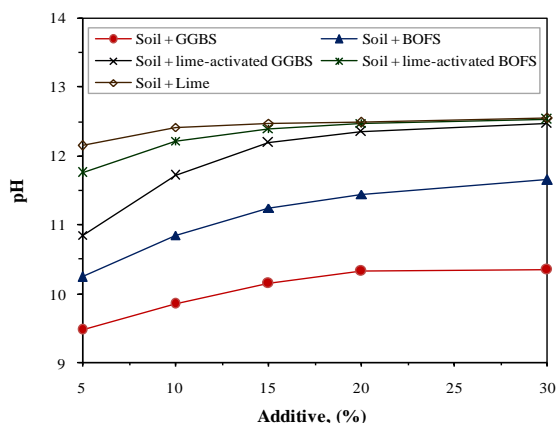
همان‌طور که مطرح شد علت رفتار بهتر نمونه‌های حاوی LAS نسبت به سرپاره تنها را می‌توان به افزایش فعالیت شیمیایی آن (واکنش بیشتر با خاک) نسبت داد. در این راستا نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد بلافاصله (۲ ساعت) پس از افزودن آهک به سیستم خاک-سرپاره، هدایت الکتریکی (EC) و به عبارتی قابلیت انحلال افزودنی افزایش یافته و بیشتر از نمونه‌های حاوی سرپاره تنها است. با استناد به مطالعات گذشته (Chemeda و همکاران، ۲۰۱۵؛ Jafari و همکاران، ۲۰۱۲)، رشد مقدار EC ناشی از افزایش غلظت املاح افزودنی در مایع منفذی مجاور سطوح رسی، شرایط لازم برای انجام واکنش‌های کوتاه‌مدت (تبادل کاتیونی و افزایش فشار اسمزی) و در نتیجه ایجاد ساختار مجتمع را فراهم‌تر کرده که این تغییرات بر اساس نتایج شکل (۱) باعث کاهش بیشتر قابلیت

نگهداشت آب در حضور مواد افزودنی، بر اساس نتایج شکل (۱) مورد تأیید قرار گرفت. نکته حائز اهمیت در این شکل، تأثیر به مراتب ضعیف‌تر سرپاره کوره بلند نسبت به سایر ترکیبات بوده که با نتایج حاصل از سایر پژوهشگران (Jeong و همکاران، ۲۰۱۶؛ Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵؛ Cokca و همکاران، ۲۰۰۹) نیز انطباق دارد. این عملکرد را با توجه به نتایج آزمایش‌های شیمیایی در شکل (۲)، می‌توان به انحلال‌پذیری اندک سرپاره کوره بلند و در نتیجه محدودیت وجود کاتیون تبادل پس از افزودن آن به خاک نسبت داد.



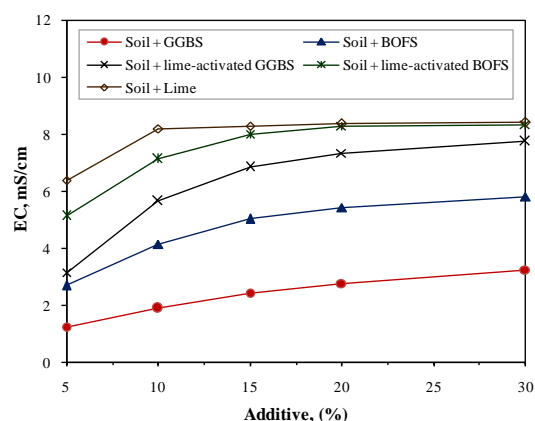
شکل ۱- تغییرات قابلیت نگهداشت آب توسط خاک در حضور مواد اصلاح‌کننده مختلف پس از ۲۸ روز عمل‌آوری

در واقع با توجه به انحلال نسبتاً مناسب آهک و پس از افزودن آن به سیستم، ابتدا غلظت املاح در مایع منفذی اطراف خاک زیاد شده که سبب افزایش EC می‌گردد. با گذشت زمان و تکمیل واکنش‌های پوزولانی، ترکیبات موجود در ماده افزودنی به تدریج مصرف و در نتیجه غلظت املاح و به تبع آن مقدار EC کاهش یافته است. از طرفی، مقایسه نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از واکنش‌ها در نمونه حاوی ترکیب آهک-سرباره، پس از ۷ روز تکمیل و با گذشت بیشتر زمان، تغییرات EC و به عبارتی میزان اندرکنش شیمیایی خاک و افزودنی به شدت کاهش یافته است. در صورتی که برای نمونه تثبیت شده با آهک تنها، تغییرات نزولی EC پس از ۲۰ روز تقریباً به تعادل می‌رسد. به بیان دیگر، نتایج نشان دهنده آن است که سرعت مصرف یون‌ها و در نتیجه شکل‌گیری مواد سیمانی در حضور LAS حدود ۳ برابر بیشتر است. علاوه بر تغییرات EC و مشاهده تأثیر مثبت افزودن آهک به سیستم خاک-سرباره برای انجام واکنش‌ها، شکل (۴) نشان می‌دهد بلافاصله (۲ ساعت) پس از افزودن آهک، pH نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. از طرفی رشد مقدار pH، انجام واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه توسعه ایجاد مواد سیمانی را به شدت بیشتر کرده (Wang و همکاران، ۲۰۱۵؛ Obuzor و همکاران، ۲۰۱۱) که بر اثر آن و با اتصال ذرات به یکدیگر انتظار می‌رود تمایل خاک برای نگهداشت آب کاهش یابد. این یافته با نتایج ارائه شده در شکل (۱)، مبنی بر افت بیشتر (بیش از ۵۰٪) قابلیت نگهداشت آب در حضور LAS نسبت به سرباره تنها، همخوانی دارد. بر این اساس و با فرض شدت بخشی فعالیت پوزولانی سیستم خاک-افزودنی، پیش‌بینی می‌شود سایر خصوصیات مکانیکی نمونه‌های حاوی آهک-سرباره نیز در مقایسه با سرباره تنها، به طور مؤثری افزایش یابند. لذا در ادامه، مقاومت فشاری محدود نشده و پتانسیل نشست‌پذیری نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از تثبیت، نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

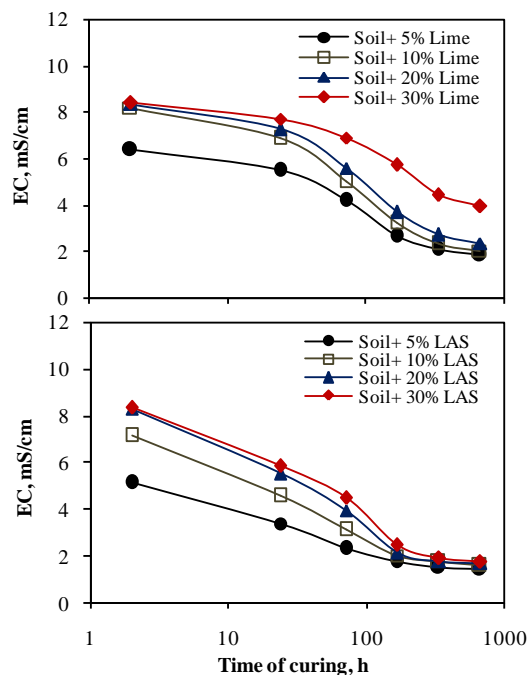


شکل ۴- تغییرات pH نمونه‌ها بر اثر اندرکنش خاک با مواد اصلاح‌کننده مورد مطالعه

نگهداشت آب در حضور LAS نسبت به سرباره تنها شده است. از سوی دیگر به منظور تأیید این یافته مبنی بر انجام سریع‌تر واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب آهک و سرباره، تغییرات هدایت الکتریکی با گذشت زمان نیز اندازه‌گیری شد. شکل (۳) نشان می‌دهد با افزایش زمان عمل‌آوری، هدایت الکتریکی خاک کاهش یافته است؛ طبق نتایج مطالعات قبلی (Goodarzi و Salimi، ۲۰۱۵؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۲)، علت این تغییرات را می‌توان به کامل شدن واکنش‌های پوزولانی نسبت داد.



شکل ۲- تأثیر نوع و مقدار ماده افزودنی بر مقدار هدایت الکتریکی (EC) خاک تثبیت شده

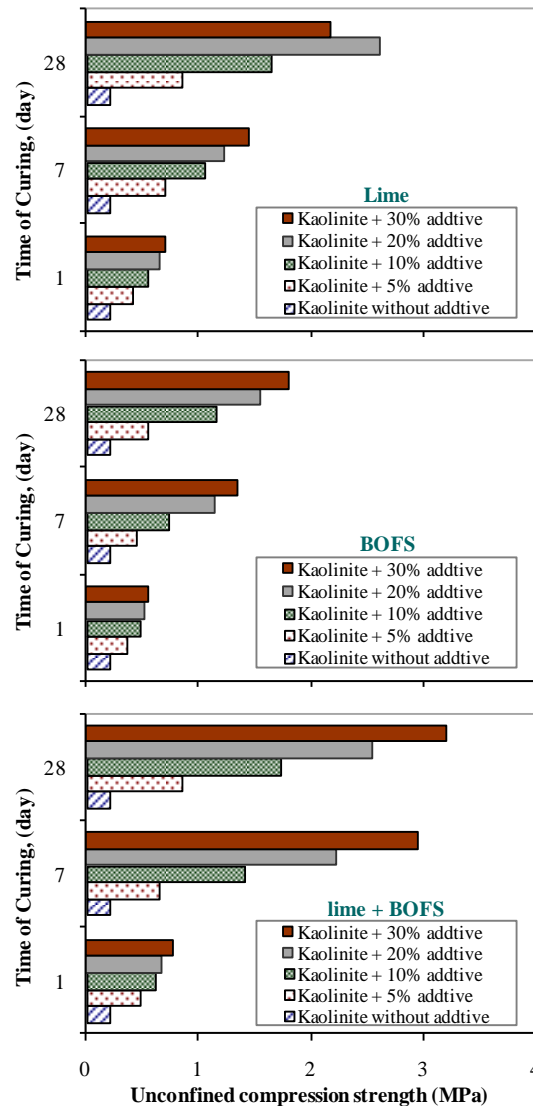


شکل ۳- تغییرات هدایت الکتریکی (EC) خاک در حضور آهک، سرباره کنورتور و زمان‌های متفاوت عمل‌آوری

(۳) و (۴) و مطالعات گذشته (Ahmed، ۲۰۱۵؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۲)، می‌تواند ناشی از رشد فعالیت پوزولانی سیستم خاک- سرباره در حضور آهک و در نتیجه شکل‌گیری بیشتر مواد سیمانی باشد که در ادامه صحت آن با انجام آزمایش‌های ریزساختاری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از طرفی، نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که مقاومت نمونه‌های اصلاح شده با آهک تنها، ابتدا روند صعودی داشته و سپس کاهش یافته است. علت کاهش مقاومت در حضور مقادیر زیاد آهک (بیش از ۲۰٪)، ناشی از انحلال کامل ذرات رسی و عدم وجود سیلیکا و آلومینای کافی در محیط برای تداوم واکنش‌های پوزولانی ارزیابی می‌شود (Yi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۵). در این شرایط، آهک اضافه شده به خاک، به صورت آزاد باقی‌مانده و ناشی از اصطکاک و چسبندگی کم آن، سبب کاهش مقاومت خاک می‌شود. به عبارت دیگر، این نتیجه بیانگر آن است که افزایش مقاومت نمونه تثبیت شده با آهک تنها، عملاً تا یک مرز مشخص امکان‌پذیر بوده و با افزایش آهک، رشد مقاومت تداوم نخواهد یافت. در صورتی که در نمونه‌های حاوی مخلوط آهک و سرباره و به دلیل وجود مقادیر کافی ترکیبات سیلیس و آلومینیوم در سرباره (جدول (۲)) و در نتیجه امکان مصرف پیوسته آهک، محدودیت مربوط به کاهش مقاومت خاک پس از افزایش افزودنی، مشاهده نمی‌شود. این یافته با نتایج سایر تحقیقات مشابه (Yim و همکاران، ۲۰۱۵؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۴) مبنی بر مصرف آهک آزاد، در حضور مواد با خاصیت پوزولانی هم‌خوانی دارد. بر این اساس، قابلیت مصرف بهینه آهک برای تشکیل مواد سیمانی و اتصال ذرات به یکدیگر باعث شده در مقادیر یکسان افزودنی، پس از ۷ روز نگهداری و در حضور LAS، روند افزایش مقاومت خاک حتی بعضاً نسبت به نمونه حاوی آهک تنها با ۲۸ روز عمل‌آوری بیشتر شود. ضمن آن که مقدار آهک در نمونه‌های تثبیت شده با LAS نیز به مراتب کم‌تر است. به عبارت دیگر افزودن آهک به سیستم خاک- سرباره سبب بهبود رفتار خاک با کاهش حدود ۷۵ درصدی مصرف آهک و کاهش زمان عمل‌آوری (حدود ۳ برابر) شده است. از سوی دیگر، علاوه بر تغییرات نهایی UCS و به منظور درک بهتری از تغییر رفتار خاک در حضور مواد افزودنی مختلف، نمودار تنش- کرنش تعدادی از نمونه‌ها نیز در شکل (۶) ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آهک و گذشت زمان، مقاومت فشاری خاک افزایش، کرنش گسیختگی آن کاهش، مدول ارتجاعی (شیب قسمت خطی منحنی تنش- کرنش) افزایش و رفتار شکننده (ترد و سخت) شده است. علت این تغییرات ناشی از تشکیل ساختار مجتمع و رشد مواد سیمانی قابل ارزیابی می‌باشد (Yoobanpot و همکاران، ۲۰۱۵؛ Gu و همکاران، ۲۰۱۵؛ Kamei و همکاران، ۲۰۱۲). از سوی دیگر، استفاده از ترکیب آهک- سرباره، علاوه بر بهبود بیشتر مقاومت خاک نسبت به آهک

### ۳-۳- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

نتایج شکل (۵) بیانگر آنست که تغییرات مقاومت خاک تابعی از زمان نگهداری، نوع و مقدار افزودنی می‌باشد. به طوری که ترکیب سرباره و آهک در مقایسه با سرباره تنها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت نمونه‌ها نشان می‌دهد. به عنوان مثال، UCS نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره فعال شده با آهک پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، حدود ۱۵ برابر بیشتر از نمونه اولیه می‌باشد.



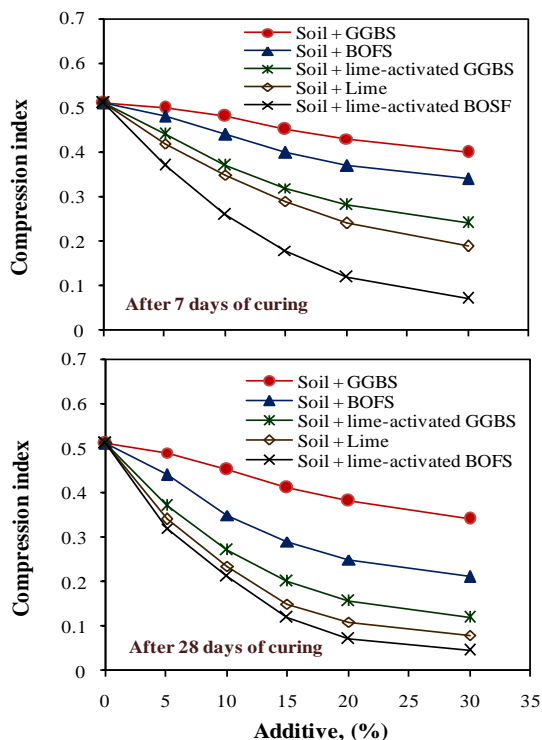
شکل ۵- تأثیر زمان نگهداری، نوع و مقدار افزودنی بر مقاومت فشاری محدود نشده مصالح نرم رسی

نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد در شرایط یکسان، افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی LAS خصوصاً در زمان‌های محدود عمل‌آوری (کمتر از ۷ روز) حتی نسبت به آهک تنها بیشتر است. علت این رفتار طبق نتایج آزمایش‌های شیمیایی (شکل‌های (۲)،

همچنین با توجه به مصرف کمتر ذرات رسی در واکنش‌های پوزولانی و توزیع یکنواخت‌تری از مواد سیمانی (شکل (۱۰))، عملاً قابلیت جذب انرژی در این نمونه‌ها بیشتر و شکل‌پذیری بهتر می‌باشد.

### ۳-۴- نتایج آزمایش‌های تحکیم

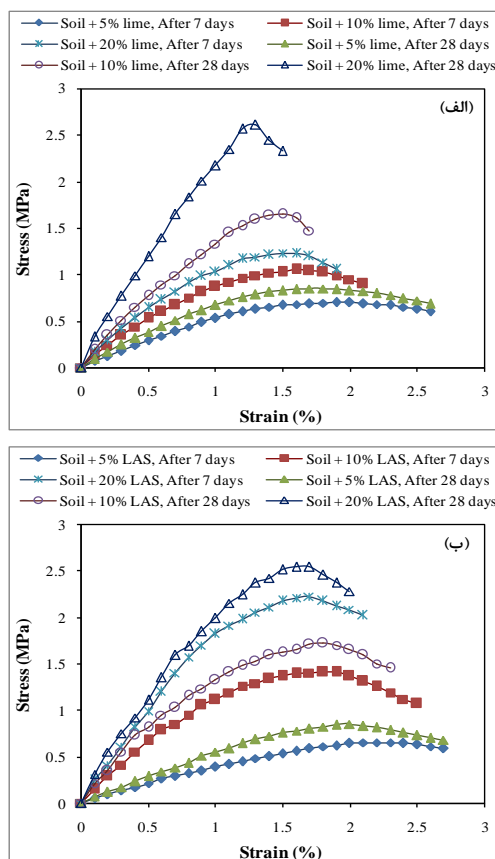
علاوه بر شاخص مقاومت، قابلیت فشردگی خاک پس از تثبیت، تأثیر زیادی بر پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی ساخته شده بر روی آن دارد (Goodarzi و Movahedrad، ۲۰۱۷). لذا در ادامه پژوهش حاضر تغییرات نشانه فشردگی (Cc) نمونه‌ها در شرایط قبل و بعد از اندرکنش با مواد افزودنی از روی نمودارهای  $e-v$   $\sigma'$  محاسبه و نتایج آن در شکل (۷) ارائه گردید. نتایج بیانگر آن است که با افزودن آهک و گذشت زمان (عمدتاً ناشی از فعالیت پوزولانی، ایجاد ترکیبات سیمانی و در نتیجه اتصال ذرات رسی به یکدیگر)، نشست خاک کاهش یافته که روند تغییر با نتایج گزارش شده توسط سایر پژوهشگران (Bian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Jha و Sivapullaiah، ۲۰۱۵؛ Celike و Nalbantoglu، ۲۰۱۳؛ Horpibulsuk و همکاران، ۲۰۱۳) همپوشانی دارد. از طرفی، افزودن سرباره تنها تأثیر محدودی بر رفتار تراکم‌پذیری خاک داشته که با توجه به نتایج آزمایش‌های شیمیایی، علت آن را می‌توان به محدودیت کاتیون تبدیلی (برای ایجاد ساختار مجتمع) و عدم رشد مناسب مواد سیمانی در حضور سرباره نسبت داد.



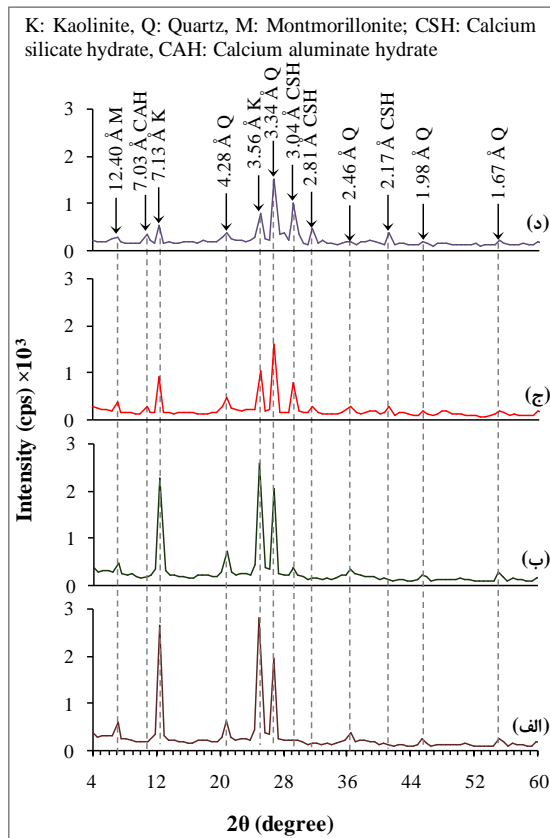
شکل ۷- تأثیر زمان نگهداری، نوع و مقدار ماده اصلاح‌کننده بر قابلیت فشردگی مصالح نرم رسی

تنها به ویژه در زمان‌های کم نگهداری، سبب افزایش جذب انرژی (مقاومت پس ماند و پایداری بیشتر) و به عبارتی شکل‌پذیری بهتر مصالح شده که مؤید ارتقاء عملکرد تثبیت در این نمونه‌ها است (Jafari و همکاران، ۲۰۱۲).

رفتار مناسب‌تر خاک اصلاح شده با ترکیب LAS را می‌توان به مصرف بهینه آهک بر اثر اندرکنش با سرباره و تغییر در ساز و کار واکنش‌های پوزولانی نسبت داد. در واقع، برای نمونه‌های حاوی آهک تنها، رشد مواد سیمانی بر اثر انحلال تدریجی ذرات رسی رخ داده (Gu و همکاران، ۲۰۱۵؛ Chemedā و همکاران، ۲۰۱۵) که این شرایط ضمن افزایش زمان مورد نیاز برای تکمیل اندرکنش خاک-افزودنی و بهبود خواص ژئوتکنیکی، باعث تشدید تردشکنی مصالح (به دلیل مصرف ذرات رسی در واکنش‌ها و در نتیجه کاهش سطوح شکل‌پذیر رسی در سیستم) شده و همچنین بخشی از آهک را صرف واکنش‌های کوتاه‌مدت (مانند تبادل کاتیونی) خواهد کرد. در صورتی که برای نمونه حاوی آهک-سرباره، انتظار می‌رود مجاورت مستقیم آهک با سرباره موجب تسریع در تولید مواد سیمانی و رشد بیشتر آنها می‌شود.



شکل ۶- تغییرات نمودار تنش- کرنش خاک در حضور مواد افزودنی مختلف و زمان‌های متفاوت نگهداری (الف) نمونه تثبیت شده با آهک، (ب) نمونه حاوی آهک-سرباره کنورتور



شکل ۸- طیف‌های XRD بعد از ۷ روز عمل‌آوری: الف) نمونه خاک طبیعی، ب) نمونه حاوی ۲۰٪ GGBS، ج) نمونه حاوی ۲۰٪ CAH، د) نمونه حاوی ۲۰٪ ترکیب آهک- سرباره کنورتور

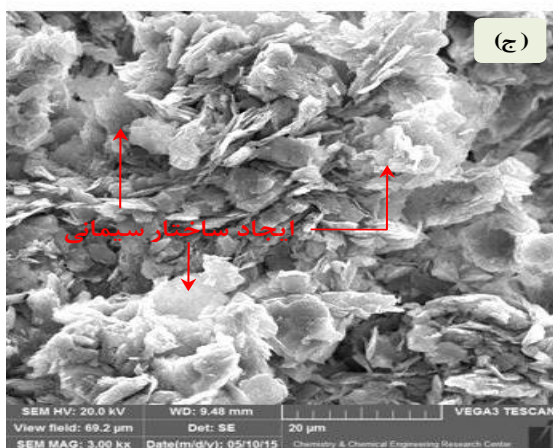
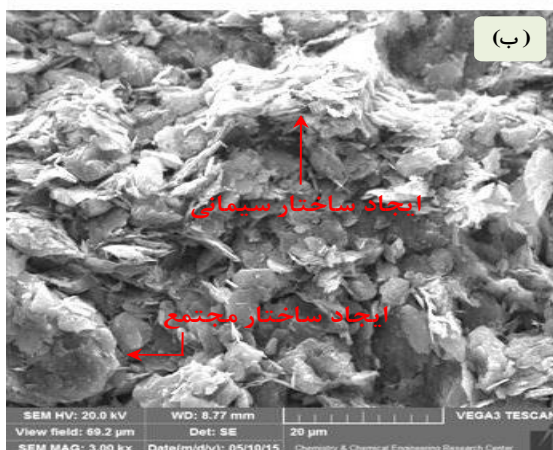
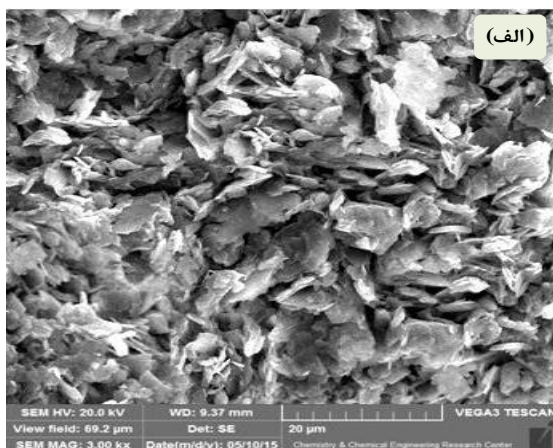
از طرفی، با توجه به توضیحات قبل و انتظار رشد بیشتر مواد سیمانی در نمونه‌های حاوی آهک و سرباره، روند ایجاد مواد سیمانی (به طور خاص پیک  $3.04 \text{ \AA}$ ) بر اساس طیف‌های پراش اشعه ایکس نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه و تغییرات آنها در شکل (۹) ارائه گردید. نتایج شکل (۹) نشان می‌دهد که حضور آهک باعث رشد مواد سیمانی شده که در نتیجه آن خصوصیات ژئومکانیکی خاک بهبود می‌یابد (شکل‌های (۱)، (۵) و (۷)). مشاهده می‌شود با افزودن سرباره تنها، فرآیند سیمانی شدن به مراتب از آهک کمتر است. این نتیجه بیانگر محدودیت اندرکنش خاک و سرباره بوده که بر اساس آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری، مانع از بهبود قابل ملاحظه مشخصات مهندسی مصالح رسی پس از افزودن سرباره (خصوصاً GGBS) می‌گردد. از سوی دیگر، مقایسه مقدار تشکیل ساختار سیمانی کلسیم سیلیکات هیدراته در نمونه‌های حاوی مخلوط آهک- سرباره نسبت به آهک تنها، مؤید تأثیر مثبت LAS در تشدید سیمان‌شدگی ذرات است. به طوری که در شرایط یکسان بر اساس نتایج شکل (۹)، مقدار ژل CSH در نمونه تثبیت شده با ترکیب آهک و کنورتور به طور متوسط بیش از ۳۰٪ نمونه حاوی آهک تنها می‌باشد.

به نحوی که پس از افزودن ۳۰٪ سرباره کوره بلند و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، میزان کاهش تراکم‌پذیری خاک حدود ۲۰ درصد بوده، که در شرایط مشابه و حضور آهک مقدار کاهش نشانه فشرده‌گی بیش از سه برابر و حدود ۶۰٪ است. از سوی دیگر بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) ملاحظه می‌شود در شرایط یکسان، ترکیب آهک به ویژه با سرباره BOFS، تأثیر بسزایی در کاهش نشست دارد. به طوری که در نمونه‌های حاوی BOFS و آهک خصوصاً در زمان‌های محدود نگهداری (کمتر از ۷ روز) حتی در مقایسه با آهک تنها، تا ۱۵۰ درصد کمتر است. در واقع همانطور که قبلاً مطرح شد ترکیب آهک- سرباره می‌تواند سبب رشد سریع‌تر و بیشتر مواد سیمانی مابین سطوح رسی و در نتیجه افزایش تراکم ساختار خاک شده (صحت این رفتار بر اساس تصاویر SEM تأیید شد) که در نهایت، نشست نمونه‌های حاوی LAS نسبت به سرباره و حتی آهک تنها کمتر می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر در شکل (۷) آن است که مطالعات قبلی تثبیت خاک (مانند Ahmed, ۲۰۱۳؛ Eisazadeh و همکاران، ۲۰۱۲) به مسئله پتانسیل نشست (به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مشکلات ناشی از حضور نهشته- های نرم) کم‌تر توجه شده و عمدتاً برای تعیین مقدار بهینه افزودنی از نتایج مقاومتی استفاده کرده‌اند. به نحوی که با افزودن حدود ۱۰٪ آهک، مقاومت مصالح نزدیک ۸ برابر افزایش یافته (شکل (۵))، ولی برای کنترل نشست خاک، آهک زیادی (بیش از ۲۰٪) لازم است.

### ۳-۵- نتایج آزمایش‌های ریزساختاری

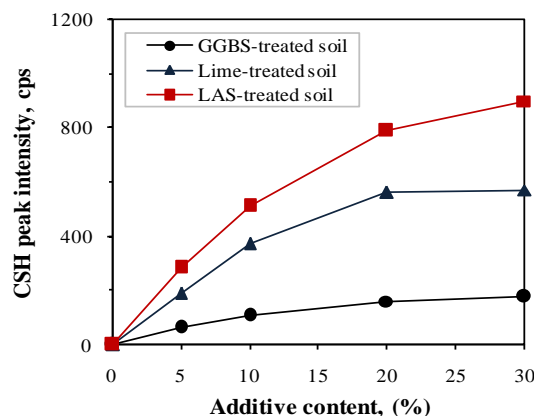
همراستا با آزمایش‌های مکانیکی و شیمیایی و به منظور شناخت دقیق‌تر از تفاوت سطح اندرکنش خاک با مواد افزودنی، تغییر ریزساختار نمونه‌ها نیز بر اساس طیف‌های XRD بررسی شد. به عنوان مثال طیف اشعه ایکس نمونه اولیه (بدون افزودنی) در شکل (۸-الف) و شکل‌های (۸-ب) تا (۸-د) به ترتیب مربوط به خاک اصلاح شده با سرباره، آهک و مخلوط آهک- سرباره است. نتایج ارائه شده در شکل (۸) بیانگر کاهش پیک‌های اصلی مربوط به کانی‌های رسی و ایجاد یک سری ترکیبات جدید سیمانی (مانند نانو ساختارهای CAH و GSH) در سیستم خاک- افزودنی است. بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته (Goodarzi و همکاران، ۲۰۱۶؛ Al-Mukhtar و همکاران، ۲۰۱۰)، علت کاهش شدت پیک‌ها را می‌توان به دلیل اثر واکنش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت ارزیابی کرد. در واقع تشکیل ساختار مجتمع و همچنین مصرف ذرات رسی در واکنش‌های پوزولانی و پوشیده شدن آنها توسط مواد سیمانی تولید شده در محیط، میزان بازتابش اشعه را کاهش داده که در نهایت شدت پیک کانی‌های رسی نسبت به نمونه اولیه کاهش یافته است.





شکل ۱۰- تصاویر SEM بعد از ۷ روز عمل آوری، الف) نمونه خاک طبیعی، ب) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ آهک، ج) نمونه حاوی ۲۰٪ ترکیب آهک- سرباره کنورتور

در این شرایط، پیش‌بینی می‌شود ناشی از تکمیل بهتر واکنش‌های پوزولانی و توسعه جامدشدگی ذرات رسی، مشخصات مهندسی نمونه تثبیت شده بهبود بیشتری نشان دهد؛ که این تغییرات با نتایج حاصل از آزمایش‌های بزرگ‌ساختاری هم‌پوشانی کامل دارد.



شکل ۹- مقایسه تغییرات پیک CSH بعد از ۷ روز عمل آوری در خاک حاوی GGBS، آهک و ترکیب آهک- کنورتور

روند این تغییرات با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و تحکیم کاملاً مطابقت دارد. در واقع بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل، مجاورت مستقیم آهک با سرباره موجب تسریع در ایجاد نانو ساختارهای سیمانی در خاک حتی نسبت به آهک تنها می‌شود. زیرا در نمونه‌های حاوی آهک تنها، بخشی از ماده افزودنی صرف واکنش‌های کوتاه‌مدت شده و همچنین فعالیت پوزولانی (رشد ترکیبات سیمانی) وابسته به انحلال واحدهای سازنده رسی است (Salimi و Goodarzi، ۲۰۱۵؛ Yi و همکاران، ۲۰۱۵). به نحوی که این شرایط، ضمن نیاز به آهک بیشتر برای تکمیل فرآیند اندرکنش خاک-افزودنی، زمان لازم برای انجام واکنش‌ها را نیز افزایش خواهد داد. بنابراین می‌توان گفت مخلوط آهک- سرباره از طریق مصرف بهینه آهک، روند جامدشدگی ذرات رسی را شدت بخشیده که تأثیر آن در بهبود خصوصیات ژئومکانیکی مصالح خصوصاً برای زمان‌های محدود عمل‌آوری، کاملاً مشهود است.

در ادامه علاوه بر آنالیزهای XRD، با هدف مطالعه بیشتر بر فرآیند شدت‌بخشی تأثیر آهک در حضور سرباره، تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های خاک قبل و بعد از تثبیت در بزرگ‌نمایی یکسان (به منظور امکان مقایسه آرایش ذرات با یکدیگر) تهیه و در شکل (۱۰) ارائه شد. تصاویر SEM بیانگر آن است که حضور آهک سبب اتصال ذرات به یکدیگر شده که بر اثر آن خصوصیات هیدرومکانیکی مصالح رسی بهبود قابل ملاحظه‌ای نشان داد (شکل‌های (۱)، (۵) و (۷)).

از سوی دیگر، با توجه به تحلیل‌های مربوط به عملکرد بهتر LAS، انتظار می‌رود نمونه حاوی مخلوط آهک- سرباره به دلیل رشد بیشتر و سریع‌تر مواد سیمانی، از ساختار متراکم‌تری برخوردار باشد. به طوری که تصاویر SEM مربوط به نمونه تثبیت شده با ترکیب LAS (شکل (۱۰-ج)) در مقایسه با آهک تنها (شکل (۱۰-ب))، به وضوح این نتیجه را تأیید می‌نماید.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- مطالعه حاضر نشان داد توانایی سرباره‌های فولادسازی به ویژه GGBS برای ارتقاء خصوصیات ژئومکانیکی مصالح نرم رسی، به مراتب کمتر از آهک تنها است. از طرفی، در شرایط محدود عمل‌آوری و عدم تکمیل واکنش‌های پوزولانی و فرآیند جامدشدگی ذرات؛ تأثیر آهک نیز اندک خواهد بود.

- مشخص شد ساز و کار اصلاح خاک با آهک تا مرز مشخصی امکان‌پذیر بوده و حضور مقادیر بیشتر افزودنی، عملاً باعث تأثیر منفی و کاهش مقاومت فشاری خاک خواهد شد. علاوه بر این، افزودن آهک سبب کاهش کرنش گسیختگی و رفتار تردشکن در مصالح می‌شود. همچنین برای کنترل نشست خاک (به عنوان یکی از عوامل مؤثر در مشکلات ناشی از حضور نهشته‌های نرم) آهک زیادی لازم است.

- با استناد به نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی- شیمیایی، طیف‌های اشعه ایکس و آنالیزهای SEM-EDX، عملکرد ترکیب آهک- سرباره (LAS) در کاهش پتانسیل نگهداشت آب، کنترل نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک به دلیل فراهم شدن شرایط لازم برای توسعه واکنش‌های پوزولانی و تسریع در ایجاد نانو ساختارهای سیمانی حتی نسبت به آهک تنها، مؤثرتر ارزیابی شد. به نحوی که با افزودن ۲۰ درصد LAS و پس از ۷ روز نگهداری، قابلیت فشردگی رس نرم بیش از ۹۰٪ کاهش یافته و مقاومت فشاری آن به حد مطلوب ( $\geq 2 \text{ kg/cm}^2$ ) برای سازه‌های متداول می‌رسد که در صورت لزوم و با افزایش افزودنی، رشد مشخصات مهندسی ادامه می‌یابد.

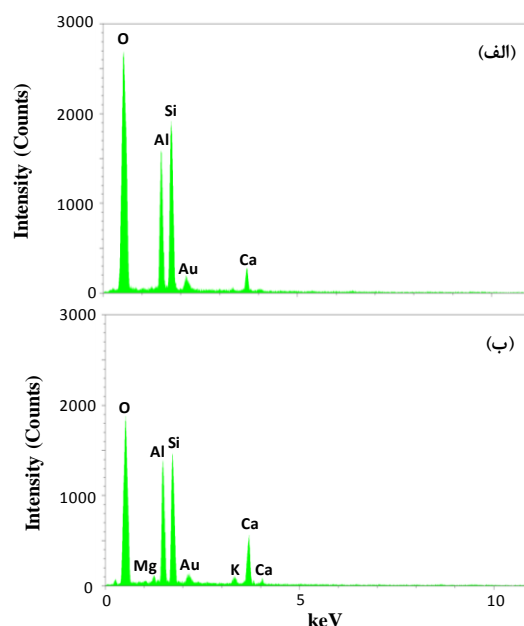
- بر اساس مجموع نتایج این پژوهش، استفاده از مخلوط آهک و سرباره (خصوصاً BOFS) ضمن شدت‌بخشی فرآیند تثبیت و کاهش ۷۵ درصدی مصرف آهک، زمان لازم برای عمل‌آوری را بیش از سه برابر کم می‌نماید. همچنین نمونه‌های حاوی LAS به دلیل قابلیت جذب انرژی بهتر دارای مقاومت پسماند و پایداری بیشتری می‌باشند. در کنار مزایای فوق، استفاده از مخلوط سرباره- آهک راهکاری مناسب برای پسمانداری زائدات صنعت فولادسازی است.

#### ۵- مراجع

- Ahmed A, "Compressive strength and microstructure of soft clay soil stabilized with recycled bassanite", *Applied Clay Science*, 2015, 104, 27-35.
- Ahmed A, Issa UH, "Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment", *Soils and Foundations*, 2014, 54, 405-416.
- Al-Mukhtar M, Khattab S, Alcover JF, "Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil", *Engineering Geology*, 2012, 139, 17-27.

هم‌زمان با تصویربرداری الکترونی، آنالیزهای عنصری نیز به منظور مقایسه دقیق‌تر عملکرد LAS و آهک در تغییر مشخصات کانی ساخت مصالح صورت پذیرفت؛ که نتایج آن در شکل (۱۱) ارائه گردیده است. در این شکل مشاهده می‌شود در شرایط یکسان و بعد از ۷ روز نگهداری، نسبت پیک کلسیم به سیلیس (Ca:Si) در نمونه حاوی مخلوط آهک- سرباره حدود ۳۵٪ بیشتر از نمونه اصلاح شده با آهک تنها است. این تغییرات با توجه به نتایج مطالعات قبلی (Goodarzi و Movahedrad، ۲۰۱۷؛ Eisazadeh و همکاران، ۲۰۱۵) بیانگر تأثیر مناسب مخلوط LAS در تولید بیشتر ترکیبات سیمانی و به عبارتی تشدید واکنش‌های پوزولانی بوده که با نتایج طیف‌های پراش اشعه ایکس (شکل‌های (۸) و (۹)) انطباق کامل دارد.

در واقع، مجاورت مستقیم آهک و سرباره و در نتیجه فعالیت پوزولانی بیشتر در این نمونه (شکل (۱۱-ب)) عملاً با پوشاندن بخش وسیع‌تری از سطوح رسی، باعث کاهش شدت پیک سیلیس (Si) نسبت به نمونه اصلاح شده با آهک تنها (شکل (۱۱-الف)) شده است. بلعکس ناشی از حضور بیشتر و مجاورت بهتر مواد سیمانی در مقابل پرتو اشعه، شدت پیک کلسیم (Ca) در شکل (۱۱-ب) افزایش نشان می‌دهد. بنابراین نسبت Ca:Si در حضور LAS به مراتب بزرگ‌تر از نمونه حاوی آهک بوده که اثرات آن بر ارتقاء فرآیند بهسازی خاک از طریق نتایج آزمایش‌های بزرگ-ساختاری (به صورت بهبود در مشخصات مهندسی) مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۱۱- طیف‌های EDX بعد از ۷ روز عمل‌آوری:

(الف) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ آهک، (ب) نمونه تثبیت شده با ۲۰٪ ترکیب آهک- سرباره کنورتور

- in sustainable binders for soil stabilization", *Engineering Geology*, 2015, 195, 53-62.
- Hillel D, "Introduction to Environmental Soil Physics", Elsevier, 2004, p. 494.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Suddepong A, Liu M, Du YJ, "Compressibility of lightweight cemented clays", *Engineering Geology*, 2013, 159, 59-66.
- Jafari M, Esna-ashari M, "Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition", *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 82, 21-29.
- Jeong Y, Oh JE, Jun Y, Park J, Ha JH, Sohn SG, "Influence of four additional activators on hydrated-lime [Ca(OH)<sub>2</sub>] activated ground granulated blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65, 1-10.
- Jha AK, Sivapullaiah PV, "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil", *Engineering Geology*, 2015, 198, 53-64.
- Kamei T, Ahmed A, Ugai K, "Durability of soft clay soil stabilized with recycled Bassanite and furnace cement mixtures", *Soils and Foundations*, 2013, 53, 155-165.
- Lam LG, Bergado DT, Hino T, "PVD improvement of soft Bangkok clay with and without vacuum preloading using analytical and numerical analyses", *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43, 547-557.
- Lu Y, Abuel-Naga H, Bouazza A, "Water retention curve of GCLs using a modified sample holder in a chilled-mirror dew-point device", *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45 (1), 23-28.
- Obuzor GN, Kinuthia JM, Robinson RB, "Enhancing the durability of flooded low-capacity soils by utilizing lime-activated ground granulated blastfurnace slag (GGBS)", *Engineering Geology*, 2011, 123, 179-186.
- Poh HY, Ghataora GS, Ghazireh N, "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18, 229-240.
- Seco A, Ramírez F, Miqueleiz L, García B, "Stabilization of expansive soils for use in construction", *Applied Clay Science*, 2011, 51, 348-352.
- Shibi T, Kamei T, "Effect of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash", *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106, 36-45.
- Tsai CJ, Huang R, Lin WT, Wang HN, "Mechanical and cementitious characteristics of ground granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag blended mortar", *Materials & Design*, 2014, 60, 267-273.
- Wang F, Wang H, Jin F, Al-Tabbaa, A, "The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilization solidification of a contaminated site soil", *Journal of hazardous materials*, 2015, 285, 46-52.
- Wijaya M, Leong EC, "Equation for unimodal and bimodal soil-water characteristic curves", *Soils and Foundations*, 2016, 56, 291-300.
- Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF, "Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 C", *Applied clay science*, 2010, 50, 199-203.
- ASTM, "Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, 2006, 4.08.
- Bian X, Wang ZF, Ding GQ, Cao YP, "Compressibility of cemented dredged clay at high water content with super-absorbent polymer", *Engineering Geology*, 2016, 208, 198-205.
- Celik E, Nalbantoglu Z, "Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils", *Engineering Geology*, 2013, 163, 20-25.
- Chemeda YC, Deneele D, Christidis GE, Ouvrard G, "Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles", *Applied Clay Science*, 2015, 107, 1-13.
- Chen Z, Xie J, Xiao Y, Chen J, Wu S, "Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder", *Construction and Building Materials*, 2014, 64, 60-66.
- Cokca E, Yazici V, Ozaydin V, "Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27, 489-499.
- Cong M, Longzhu C, Bing C, "Analysis of strength development in soft clay stabilized with cement-based stabilizer", *Construction and Building Materials*, 2014, 71, 354-362.
- Do TN, Ou CY, Chen RP, "A study of failure mechanisms of deep excavations in soft clay using the finite element method", *Computers and Geotechnics*, 2016, 73, 153-163.
- Eisazadeh A, Kassim KA, Nur H, "Stabilization of tropical kaolin soil with phosphoric acid and lime", *Natural hazards*, 2012, 61, 931-942.
- EPA, "Process design manual: land application of municipal sludge, Municipal Environ", Research laboratory, EPA-625/1-83-016, 1983.
- Goodarzi AR, Akbari HR, Salimi M, "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume", *Applied Clay Science*, 2016, 132, 675-684.
- Goodarzi AR, Goodarzi S, Akbari HR, "Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2015, 39, 333-350.
- Goodarzi AR, Movahedrad M, "Stabilization/solidification of zinc-contaminated kaolin clay using ground granulated blast-furnace slag and different types of activators", *Applied Geochemistry*, 2017, 81, 155-165.
- 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.
- Gu K, Jin F, Al-Tabbaa A, Shi B, Liu C, Gao L, "Incorporation of reactive magnesia and quicklime

- Yi Y, Gu L, Liu S, "Microstructural and mechanical properties of marine soft clay stabilized by lime-activated ground granulated blastfurnace slag", *Applied Clay Science*, 2015, 103, 71-76.
- Yim HJ, Kim JH, Han SH, Kwak HG, "Influence of Portland cement and ground-granulated blast-furnace slag on bleeding of fresh mix", *Construction and Building Materials*, 2015, 80, 132-140.
- Yoobanpot N, Jamsawang P, Horpibulsuk S, "Strength behavior and microstructural characteristics of soft clay stabilized with cement kiln dust and fly ash residue", *Applied Clay Science*, 2017, 141, 146-156.

**EXTENDED ABSTRACT**

**Impact of Lime-Slags Combination on the Hydro-Mechanical Behavior of Clayey Soils**

Amirreza Goodarzi \*, Hamidreza Akbari

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan

Received: 24 January 2017; Accepted: 09 October 2017

**Keywords:**

Clayey soil, lime, slag, hydro-mechanical properties, micro-structure.

**1. Introduction**

In this study, the effects of two types of by-product materials resulting from the manufacture of iron including GGBS and BOFS on the hydro-mechanical performance of a lime-stabilized clayey soil were investigated. The results indicate that the addition of slag particularly of GGBS has a less impact on the soil engineering properties as compared to lime treatment. It was found that the lime-slag (LAS) combination decreases the water retention potential, controls the soil settlement and causes a considerable increase in the mechanical capacity. The composite clay sample containing LAS exhibits a better performance than that of lime-treated soil particularly at short time of curing.

**2. Materials and methods**

*2.1. Materials*

As summarized in Table 1, the engineering properties of the used soil sample were determined in accordance with ASTM methods (ASTM, 2006) and the Environmental Protection Agency (EPA) manual. The ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and Basic oxygen furnace slag (BOFS) were obtained from Esfahan Steel Co., Esfahan, Iran. Lime was used as the slags activator. The reasons for selecting lime were its reasonable cost and its good potential in activating furnace slag as shown in other studies (Wang et al., 2015). The main chemical compositions of the used slags are SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and MgO.

**Table 1.** Engineering properties of soil sample

Characteristics	Quantity measured
Mineral composition in decreasing amount	kaolinite (≈75%), Quartz
Cation exchange capacity (CEC), cmol/kg	28
Exchangeable cation	Mainly Na <sup>+</sup>
Plasticity index (PI), %	27.4
Soil classification	CH
Dry density, gr/cm <sup>3</sup>	1.21
Moisture content, %	34
Unconfined shear strength, MPa (in situ)	0.04
Compression index (C <sub>c</sub> )	0.5
Maximum dry density, gr/cm <sup>3</sup>	1.48
Unconfined shear strength, MPa	0.1

\* Corresponding Author

E-mail addresses: amir\_r\_goodarzi@yahoo.co.uk (Amirreza Goodarzi), akbari\_hamid@ymail.com (Hamidreza Akbari).

### 2.2. Sample preparation

To achieve the research objectives, lime, slags and lime-slag mixture were separately added (ranging from 0 to 30%) to the soil sample and a set of experiments were performed at different curing period (i.e. 1, 7, 28 days) to study the macro and microstructural changes of the stabilized soil. To determine the pH and EC of the soil samples, a series of batch equilibrium tests were performed. Following preparation and equilibration of the soil-electrolyte suspensions at a 1:20 solid-solution ratio, they were centrifuged for 15 min at 5000 rpm. Prior to being centrifuged, the pH and EC of the soil-solutions were recorded. As in many previous works (Wang et al. 2015; Goodarzi and Movahedrad, 2017), the unconfined compression strength (UCS) test was used to study the mechanical performance of un-treated and stabilized soil sample. The UCS values of samples were determined according to ASTM D-2166.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Effect of additives on the UCS

To investigate the effectiveness of binders, the UCS of the composite soil samples was measured. As shown in Fig. 1, the soil exhibited a gradual trend of strength development with the addition of curing time and agent. This can be explained by the higher rate of hydration as well as formation of more new cementing phases, leading to interlocking of the clay particles, and thus, a significant strength gained (Jeong et al., 2016). As can be seen in Fig. 1, particularly at the short time of curing, the addition of sole lime has relatively lower effects on the mechanical capacity as compared to LAS blend. This suggests that the latter agent has a higher activity to produce cementing materials.

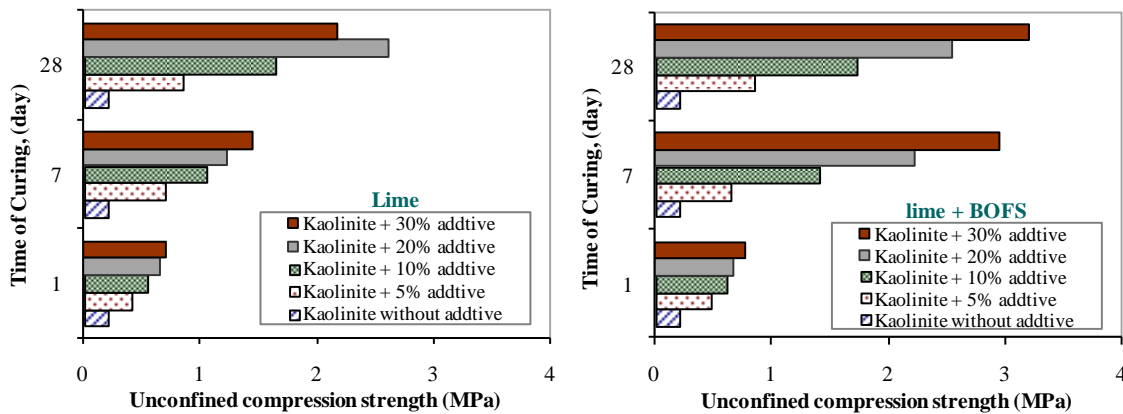


Fig. 1. UCS variation of treated soil with different binders and ages of curing

### 3.2. Effect of additives on the micro-structural properties of soil

As illustrated in Fig. 2, the clay fabric at presence of additives is different compared to the natural soil. The weak bonding between the clay particles was prominently observed in the case of untreated sample; however, such phenomena were almost invisible for the LAS treated sample. With the addition of binder, the surface of particles has been generally covered by the new cementitious compounds, leading to an increase in the UCS value, as reported in Fig. 1.

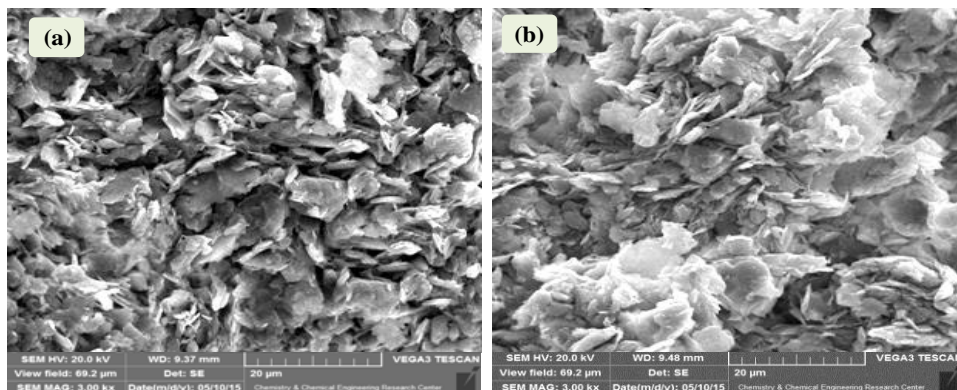


Fig. 2. SEM images: a) natural soil, b) soil with 20% lime-slag (LAS) combination

#### 4. Conclusions

The obtained results indicate that the addition of slag particularly of GGBS has a less impact on the soil engineering properties as compared to lime treatment. It was found that the lime-slag (LAS) combination significantly decreases the water retention potential, controls the soil settlement and causes a considerable increase in the soil mechanical capacity. The sample containing LAS shows a development in the strength up to 15 times and exhibits a better performance than that of stabilized sample with lime alone particularly at short ages of curing ( $\leq 7$  days). Based on the X-ray graphs and SEM-EDX analyses, the superior influences of LAS can be ascribed to the higher pozzolanic activity and faster formation of new cementitious compounds in the LAS binary system. Overall, the combination of lime and slag could be successfully utilized as an additive to increase the efficiency of soil stabilization with a lower percentage of lime (approximately by 75%) and shorter time of curing (up to 3 times). This also provides a reliable data for recycling the industrial by-product materials.

#### 5. References

- ASTM, "Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials", Philadelphia, 2006, 4.08.
- Wang F, Wang H, Jin F, Al-Tabbaa A, "The performance of blended conventional and novel binders in the in-situ stabilization solidification of a contaminated site soil", *Journal of hazardous materials*, 2015, 285, 46-52.
- Goodarzi AR, Movahedrad M, "Stabilization/solidification of zinc-contaminated kaolin clay using ground granulated blast-furnace slag and different types of activators", *Applied Geochemistry*, 2017, 81, 155-165.
- Jeong Y, Oh JE, Jun Y, Park J, Ha JH, Sohn SG, "Influence of four additional activators on hydrated-lime [Ca(OH)<sub>2</sub>] activated ground granulated blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65, 1-10.