

بررسی فرآیند اندرکنش خاکستر بادی و خاک‌های رسی با دامنه خمیری زیاد از دیدگاه ریزساختاری

وحیدرضا اوحدی*^۱، مرتضی دیرانلو^۲ و پوریا رسولی^۳

^۱ استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، و عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه

تهران

^۲ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(دریافت: ۹۷/۱۰/۲۹، پذیرش: ۹۸/۸/۱۲، نشر آنلاین: ۹۸/۸/۱۲)

چکیده

خاکستر بادی پسماند سوزاندن زغال سنگ در نیروگاه‌های برقی حرارتی است. تولید زیاد این پسماند معضلات زیست‌محیطی برای دفن ایمن آن را به‌همراه داشته است. خاکستر بادی به دلیل داشتن مقادیر زیادی سیلیسیوم و آلومینیوم دارای خواص پوزولانی است که استفاده از آن را در مباحث بتن، تثبیت خاک‌ها و تثبیت و جامدسازی آلاینده‌ها امکان‌پذیر می‌کند. با وجود انجام تحقیقات متعدد، همچنان نوع عملکرد فیزیکی و یا شیمیایی خاکستر بادی در ترکیب با خاک‌های رسی بخوبی مشخص نمی‌باشد. بر این اساس هدف این تحقیق بررسی نوع عملکرد خاکستر بادی کلاس F در رس متورم شونده بنتونیت است. خصوصیات مکانیکی ترکیبات بنتونیت و خاکستر بادی تا ۳۰٪ وزنی بنتونیت، با استفاده از آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده ارزیابی شده است. همچنین از مطالعات ریزساختاری هیدرومتری، XRD و مقادیر کاتیون‌های استخراج شده خاکستر بادی تحت شرایط محیطی اسیدی تا بازی، برای بررسی رفتار شیمیایی خاکستر بادی استفاده شده است. نتایج نشان داده است که مقادیر انحلال کاتیون‌های Si و Al خاکستر بادی تابع pH است و در pH حدود ۹ با استفاده از آزمایش استخراج به ترتیب ۰/۴ و ۰/۱ cmol/kg-soil به دست آمده است. به دلیل غلظت کم انحلال این کاتیون‌ها امکان شکل‌گیری واکنش پوزولانی وجود ندارد. همچنین مقاومت فشاری محدود نشده نمونه بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی با افزایش زمان مراقبت از ۷ تا ۹۰ روز با اندکی افزایش به ترتیب از ۴۴۴ به ۵۱۵ kPa رسیده است. نتایج بررسی XRD نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش زمان مراقبت نمونه بنتونیت -۳۰٪ خاکستر بادی، هیچ‌گونه محصولات پوزولانی تشکیل نشده است.

کلیدواژه‌ها: خاکستر بادی، بنتونیت، UCS، pH، اشعه ایکس.

۱- مقدمه

طبقه‌بندی شود (Hausmann, ۱۹۹۰). در میان بسیاری از روش‌های اصلاح فیزیکی و شیمیایی، تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مختلف با انواع متفاوت افزودنی مانند خاکستر بادی، آهک، سیمان (Estabragh و همکاران، ۲۰۱۳) و کلسیم کلرید نتایج موفقیت آمیزی در بسیاری از مطالعات داشته است (Garzon و همکاران، ۲۰۱۵).

سالانه حدود ۵۰۰ میلیون تن خاکستر بادی زغال سنگ در جهان تولید می‌شود (Ahmaruzzaman, ۲۰۱۰)، حال آن که تنها ۲۵ الی ۳۰ درصد از کل خاکستر تولید شده مجدد مورد استفاده قرار می‌گیرد و تقریباً ۷۰ الی ۷۵ درصد آن در مراکز دفن مدفون می‌شود. انجمن خاکستر زغال سنگ آمریکا بیان کرده است که

خاک‌های رسی با دامنه خمیری زیاد (مانند بنتونیت) پتانسیل تورم و جمع شونده‌گی زیاد دارند به طوری که، اگر درصد رطوبت خاک افزایش یابد، خاک تمایل به تورم و نرم‌شدگی دارد. همچنین هنگامی که درصد رطوبت کاهش یابد خاک دچار جمع‌شدگی و ترک‌های ناشی از خشک شدن می‌شود که هر دوی این عوامل می‌تواند منجر به تخریب سازه احداث شده بر روی آن شود (Mitchell, ۱۹۷۶). بنابراین اصلاح خاک‌های رسی با دامنه خمیری زیاد همواره مورد توجه محققان بوده است. شیوه‌های اصلاح خاک می‌تواند به روش‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۰۹۱۲۱۰۷۲۰۴۲

فرآیند انحلال کاتیون‌های موجود در فازهای آمورف و کریستالی خاکستر بادی زغال سنگ، استخراج نامیده می‌شود و عموماً توسط روش‌هایی بر پایه استفاده از محلول‌های قلیایی و یا اسیدی انجام می‌شود (Xu و همکاران، ۲۰۱۶). فاز مواد آمورف موجود در خاکستر بادی فعال است و در اسیدها و بازهای غیر آلی حل می‌شود. فاز کریستالی مانند مولیت و کوارتز ساختار شیمیایی پایدار و فعالیت شیمیایی کم دارد و برای حل شدن نیازمند پیش‌علاج‌بخشی و تغییر فاز است (Shemi و همکاران، ۲۰۱۵).

افزودن NaOH موجب انحلال SiO_2 از فازهای خاکستر بادی شده است در حالی که مقدار Al_2O_3 انحلال یافته بسیار اندک است (Sun و همکاران ۲۰۱۷).

NaOH موجب انحلال فاز آمورف SiO_2 در خاکستر بادی شده است و انحلال SiO_2 از فازهای کریستالی مولیت و کوارتز تحت دماهای کمتر از 70°C محلول آبشویی، بسیار اندک است (Guo، ۲۰۱۷). استفاده از محلول‌های اسیدی موجب تبدیل Al_2O_3 در خاکستر بادی به نمک‌های حاوی Al قابل حل می‌شود و این توسط آبشویی با اسیدهای غیر آلی (Yao و همکاران، ۲۰۱۴) مانند اسید هیدروکلریک، اسید سولفوریک و اسید نیتریک انجام می‌شود (Blissett and Rowson، ۲۰۱۲). در این شیوه فازهای غیر قابل حل مانند SiO_2 به عنوان ته‌نشین باقی خواهند ماند (Guo و همکاران، ۲۰۱۷). استخراج آلومینا از مولیت توسط استفاده مستقیم از آبشویی با اسید بسیار دشوار است (Zhang و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین افزودن فعال‌کننده‌هایی مانند، Na_2CO_3 فازهای غیر قابل حل آلومینا مانند مولیت را به محصولاتی آهکی حاوی نفلین ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) تغییر شکل خواهد داد که در اسید قابل حل می‌باشد (Guo و همکاران، ۲۰۱۳).

طی تحقیق انجام شده بر روی مخلوط خاک رس متورم شونده با خاکستر بادی کلاس F مشخص شد که افزودن خاکستر بادی ضمن کاهش پلاستیسیته خاک، طبقه‌بندی خاک را از CH به ML تغییر داده است. همچنین تورم‌پذیری خاک، طی زمان کاهش یافته و مقاومت فشاری محدود نشده (UCS^6) افزایش یافته است. این تغییرات به واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی که موجب تشکیل C-S-H و اترینگایت در نمونه‌ها می‌شود، نسبت داده شده است (Dayioglu و همکاران، ۲۰۱۷).

یافته‌های مطالعات انجام شده نشان داده است که افزودن خاکستر بادی کلاس F موجب بهبود خواص مکانیکی خاک متورم شونده شده است. برخی محققان دلیل این بهبود خواص را به دلیل اثرات اصلاح شیمیایی خاکستر بادی یعنی واکنش‌های پوزولانی بیان کرده‌اند و برخی نیز بیان کرده‌اند که خاکستر بادی تنها توسط

بین ۶ الی ۹ درصد زغال سنگ سوزانده شده توسط تأسیسات تولید نیرو به خاکستر بادی تبدیل می‌شود. مقدار خاکستر بادی زغال سنگ تولیدی در ایالات متحده آمریکا، سالیانه حدود ۵۰ میلیون تن برآورد شده است. در ایران نیز این رقم در حدود ۱۰۰ هزار تن است (UNESY^۱، ۲۰۱۴) و با راه‌اندازی نیروگاه برقی حرارتی در طبس پیش‌بینی می‌شود، خاکستر بادی تولید شده با ۵ برابر رشد به حدود ۰/۵ میلیون تن در سال افزایش یابد. سوزاندن زغال سنگ آنتراسیت^۲ یا بیتومینه^۳ خاکستر بادی تولید می‌کند که درصد سیلیسیوم و آلومینیوم زیاد و درصد کلسیم کمی دارد و به نام خاکستر بادی کلاس F شناخته می‌شود. سوزاندن زغال سنگ لیگنیت^۴ یا ساب‌بیتومینه^۵ خاکستر بادی تولید می‌کند که حاوی درصد کلسیم زیادی است (خاکستر بادی کلاس C (ATMC618، ۲۰۱۶). تحقیقات زیادی برای استفاده از خاکستر بادی زغال سنگ در پروژه‌های عمرانی انجام شده است. خاکستر بادی به عنوان مواد پوزولانی برای افزایش مقاومت مصالح و سازه‌های مهندسی مانند خاکیزهای سبک (Rajakumar و Meenambal، ۲۰۱۵) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از خاکستر بادی با میزان درصد کلسیم کم (Class F) به صورت گسترده به جای بخشی از سیمان در ساخت بتن‌های متداول و پر مقاومت مورد استفاده قرار می‌گیرد (ACI Committee 211، ۱۹۹۳). از دیگر کاربردهای خاکستر بادی می‌توان در بستر مراکز مهندسی دفن زباله‌های شهری و صنعتی (Edil و همکاران، ۱۹۸۷)، به استفاده از آن در آستر رسی مراکز دفن زباله (Phanikumar و Shankar، ۲۰۱۷)، به عنوان مصالح پرکننده و به عنوان مصالح تثبیت کننده در اساس و زیراساس لایه‌های روسازی (Phummiphan و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره نمود.

خاکستر بادی در تثبیت شیروانی‌های خاکی، بدون سیمان و یا آهک (Prabakar و همکاران، ۲۰۰۴) و یا همراه با سیمان (Kaniraj و Havanagi، ۲۰۰۱) و در تثبیت خاک‌های متورم شونده (Cokca، ۲۰۰۱) و نیز در ترکیب با ماسه برای افزایش مقاومت در برابر روانگرایی (Keramatikerman و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شده است.

همچنین خاکستر بادی منبع مناسب سیلیسیوم و آلومینیوم برای تهیه ژئوپلیمر است (Fan و همکاران، ۲۰۱۵) ژئوپلیمر دارای مقاومت قابل توجهی است (Song و همکاران، ۲۰۱۸) و همچنین می‌تواند فلزات سنگین مانند سرب را جامدسازی کند (Nikolić و همکاران، ۲۰۱۸). بخشی از خاکستر بادی به عنوان منبع عناصری مانند آهن و آلومینیوم (Yao و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شده است.

4. Lignite Coals
5. Subbituminous Coals
6. Unconfined compressive strength

1. United Nations Energy Statistics Yearbook
2. Anthracite
3. Bituminous Coals

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۲)، بخش قابل توجه نمونه خاکستر بادی از ترکیبات سیلیس و آلومینا تشکیل شده است. وجود درصدهایی از فلزات سنگین لزوم توجه به استفاده بهینه از خاکستر بادی به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی آن را تأیید می‌کند.

بر اساس درصد عناصر به دست آمده از آزمایش XRF و بر طبق استاندارد ASTM C618، خاکستر بادی استفاده شده در این تحقیق به عنوان کلاس F طبقه‌بندی می‌شود. در این تحقیق خاکستر بادی به اختصار با FA نشان داده شده است. همچنین برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست

محیطی نمونه بنتونیت		
خواص فیزیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی	بنتونیت	مرجع روش اندازه‌گیری
pH (آب به جامد ۱:۱۰)	۹/۹	ASTM D4972
درصد کربنات	۱۰	BS 1377-3
مساحت سطح ویژه (SSA)	۴۱۸	Eltantawy و Arnold ۱۹۷۳
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	۶۲/۳	Ouhadi و Goodarzi ۲۰۰۳
طبقه‌بندی	CH	ASTM D3282
حد روانی	۳۱۹	ASTM D4318
دامنه خمیری	۲۷۵	ASTM D4318
ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده نمونه	مونت‌موریلونیت، کوارتز، کلسیت	ASTM D3282

اصلاح فیزیکی موجب بهبود خواص مکانیکی خاک شده است (Rao and Subbarao, ۲۰۱۲). با توجه به عدم صراحت تحقیقات قبلی در خصوص مکانیزم اصلی و نحوه اندرکنش خاکستر بادی و خاک‌های رسی، هدف اصلی این تحقیق تعیین مکانیزم اندرکنش خاکستر بادی و خاک رس با دامنه خمیری زیاد در راستای تعیین فیزیکی یا شیمیایی بودن این فرآیند می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد مورد استفاده

در این تحقیق از خاک رسی بنتونیت حاوی کانی غالب اسمکتیت استفاده شده است. اسمکتیت به عنوان یکی از کانی‌های رسی با ضریب فعالیت و دامنه خمیری زیاد بوده که به عنوان یک خاک متورم شونده شناخته شده است. خاک بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق از "شرکت ایران باریت" تهیه شده است. در آزمایش‌های این تحقیق از خاک خشک شده در هوا و با اندازه ذرات $> 2\text{mm}$ استفاده شده است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۰۷). درصد مواد آلی مطابق روش استاندارد ASTM تعیین شده است (ASTM، ۲۰۱۶). مساحت ویژه (SSA) با استفاده از روش اتیل گلیکل مونو اتیل اتر (EGME) اندازه‌گیری شد (Eltantawy and Arnold، ۱۹۷۳). درصد کربنات خاک نیز با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شده است (BS 1377-3، ۱۹۹۰). در جدول (۱) برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست‌محیطی نمونه بنتونیت ارائه شده است.

خاکستر بادی استفاده شده در این تحقیق با نام تجاری Pozzoceret 100 محصول نیروگاه برقی حرارتی هند می‌باشد. نتایج آزمایش XRF نمونه خاکستر بادی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- درصد عناصر مختلف موجود در خاکستر بادی با استفاده از XRF

عناصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Zn, Pb, Rb, Sr	Total
درصد	۵۵/۴	۳۴/۵	۳/۴	۱/۷	۱/۶	۱/۲	۰/۸	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۷	۱۰۰

جدول ۳- برخی از خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه خاکستر بادی

خواص فیزیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی	خاکستر بادی	مرجع روش اندازه‌گیری
pH (آب به جامد ۱:۱۰)	۸/۷	ASTM D6276
درصد کربنات	۰	BS 1377-3
چگالی ویژه (Gs)	۲/۲	ASTM C188
ذرات هم اندازه رس (/)	۹	ASTM D7928
افت ناشی از احتراق (L.O.I.)	۰/۶۲	ASTM C114
دامنه خمیری (PI)	NP	ASTM D4318

۲-۲- تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های مورد آزمایش از افزودن درصد‌های وزنی مختلف خاکستر بادی به نمونه خاک بنتونیت به دست آمده است. با توجه به درصد‌های مورد استفاده خاکستر بادی در پروژه‌های اجرائی و براساس نتایج آزمایش تراکم، در این تحقیق مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی خاکستر بادی به خاک بنتونیت افزوده شده و نمونه‌ها برای رسیدن به حالت یکنواخت در حالت خشک به مقدار کافی هم‌زده شده است. همچنین نمونه‌هایی از بنتونیت و خاکستر بادی بدون اختلاط با یکدیگر و به عنوان نمونه‌های کنترلی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

برای بررسی اندرکنش خاکستر بادی با خاک بنتونیت از منظر ریزساختاری، آزمایش‌های هیدرومتری، استخراج و XRD و همچنین از منظر درشت ساختاری، آزمایش‌های حدود اتربرگ و مقاومت تک محوری UCS با سه بار تکرار بر نمونه‌های بنتونیت مخلوط شده با درصد‌های مختلف خاکستر بادی انجام شد. آزمایش استخراج به منظور ارزیابی شرایط دسترسی شکل‌های یونی موجود در کریستال‌های خاکستر بادی برای اندرکنش با نمونه رسی انجام شده است. همچنین آزمایش هیدرومتری تأثیر شکل‌گیری احتمالی واکنش‌های پوزولانی در تغییر ابعاد بنتونیت تثبیت شده را نشان می‌دهد. در صورتی که فرایند اندرکنش خاکستر بادی با بنتونیت به صورت یونی باشد، انتظار تغییرات قابل توجه و غیرخطی در مقادیر دامنه خمیری و حد روانی ترکیب بنتونیت و خاکستر بادی مورد انتظار است. در همین راستا، در صورت وقوع واکنش‌های پوزولانی، مقاومت تک محوری UCS نمونه‌های مخلوط بنتونیت و خاکستر بادی، در طی زمان تغییرات افزایشی قابل توجهی خواهند داشت.

۲-۳- آزمایش استخراج

اندرکنش خاکستر بادی با خاک از طریق اندرکنش یون‌های آلومینیوم، سیلیسیم، کلسیم، منیزیم و آهن موجود در خاکستر بادی است. از سوی دیگر، حلالیت خاکستر بادی و تبدیل اجزای آن به صورت یونی تابع pH سیال حفره‌ای است. بر این اساس اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌های قابل حل خاکستر بادی در شرایط pH متفاوت و طی زمان که با آزمایش استخراج انجام می‌شود به درک فرایند اندرکنش خاکستر بادی و خاک کمک ویژه‌ای می‌کند. در این راستا تحقیقات نشان داده است که اکسید سه عنصر اصلی Si، Al و Ca مطابق نتایج XRF بیش از ۹۰٪ خاکستر بادی را تشکیل می‌دهند و انحلال آنها برای انجام واکنش‌های پوزولانی خاکستر بادی ضروری است. با توجه به نکات فوق، در این تحقیق حلالیت اجزای خاکستر بادی به صورت تابعی از pH مورد آزمایش قرار گرفته است. بدین منظور، برای تعیین غلظت عناصر قابل

انحلال از فازهای خاکستر بادی (به خصوص فاز آمورف) تحت شرایط محیطی اسیدی شدید تا بازی شدید ابتدا، سوسپانسیون خاکستر بادی - آب مقطر با نسبت محلول به جامد ۱ به ۱۰ تهیه شد. سپس با افزودن مقادیر مختلف اسید نیتریک (HNO₃) ۱M و هیدروکسید سدیم (NaOH) ۱M، تیتراسیون سوسپانسیون تهیه شده انجام شده است. pH نمونه‌های فوق در مدت زمان ۱۴ تا ۹۰ روز بین pH ۲ الی ۱۳/۵ تنظیم شده است. در انتها، مقدار کاتیون‌های استخراج شده با استفاده از دستگاه ICP محصول شرکت VISTA-PRO VARIAN اندازه‌گیری شده است.

۲-۴- آزمایش هیدرومتری

برای رسم منحنی‌های دانه‌بندی نمونه بنتونیت و مخلوط آن با درصد‌های مختلف خاکستر بادی، و همچنین ترسیم منحنی دانه‌بندی خاکستر بادی از آزمایش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTM D7928 استفاده شده است. در این آزمایش هگزا متافسفات سدیم به اختصار با SHMP نشان داده شده است.

۲-۵- آنالیز XRD

به منظور مطالعه فرآیند اندرکنش خاکستر بادی و کانی‌های رسی بنتونیت از منظر ریزساختاری، یکسری آزمایش‌های اشعه ایکس انجام شده است. برای تهیه نمونه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) یک گرم خاک خشک از ترکیب خاک بنتونیت با درصد‌های متفاوت خاکستر بادی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوپ سانتیفیوژ ۵۰ میلی لیتر ریخته شد. پس از اضافه نمودن ۴۰ میلی لیتر از الکترولیت مورد نظر (آب مقطر) به خاک، این سوسپانسیون به مدت ۳ ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی هم زده شد. پس از نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با هدف اطمینان از به دست آمدن شرایط تعادل، این سوسپانسیون دوباره به مدت ۳ ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی هم زده شد، و نمونه‌ها حدود ۴۸ ساعت دیگر نگهداری شده تا سیستم همگن شود. سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه به وسیله لرزاننده دوباره هم زده شدند. در نهایت ۱۰ قطره از این سوسپانسیون بر روی اسلاید شیشه‌ای ریخته شد (Yong و همکاران ۱۹۹۶). و پس از خشک شدن، با دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Siemens-Diffract meter آزمایش شد (Ouhadi و همکاران ۲۰۱۴).

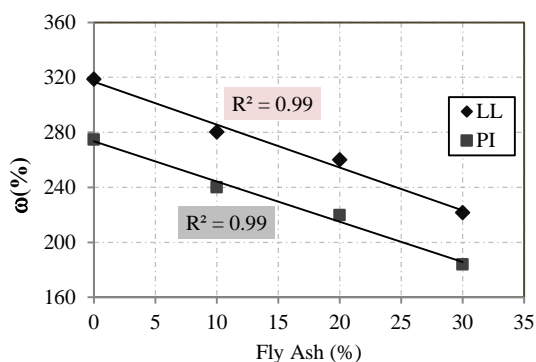
به منظور ارزیابی تأثیر خاکستر بادی بر خصوصیات فیزیکی و مقاومتی خاک بنتونیت آزمایش‌های ذیل بر روی نمونه‌های تهیه شده انجام شده است و رفتار خاکستر بادی در خاک بنتونیت از منظر درشت ساختاری بررسی شده است.

۲-۶- حدود اتربرگ

(PI) نمونه‌ها محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری حد روانی و دامنه خمیری نمونه‌ها پس از ۴ روز مراقبت، در شکل (۱) مشاهده می‌شود. همانطور که از نتایج شکل (۱) مشخص است با افزایش درصد خاکستر بادی، حد روانی و دامنه خمیری کاهش یافته است. ولی مقادیر حد خمیری تغییر قابل توجهی نداشته است که این مطابق با یافته‌های محققین پیشین در این زمینه است (Mohanty و همکاران، ۲۰۱۶).

با افزایش خاکستر بادی حد روانی خاک به صورت خطی کاهش یافته و این کاهش متناسب با میزان افزایش خاکستر بادی ادامه داشته است. به طوری که به عنوان مثال، حد روانی بنتونیت پس از ۴ روز اندرکنش با آب مقطر ۳۱۹ اندازه‌گیری شده است و با افزودن ۳۰٪ خاکستر بادی به بنتونیت، مقدار حد روانی مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی با ۳۰٪ کاهش ۲۲۲ به دست آمده است. در مقابل با افزایش درصد خاکستر بادی در نمونه‌های مورد مطالعه، حد خمیری نمونه‌ها کاهش ناچیزی داشته است. به طوری که برآیند این تغییرات (دامنه خمیری خاک) نیز با شیبی تقریباً معادل شیب تغییرات حد روانی، روندی کاهشی داشته است.

کاهش حد روانی و دامنه خمیری مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی می‌تواند ناشی از کاهش بخش رسی نمونه‌ها، که دارای حد روانی و دامنه خمیری زیادی است، باشد. همچنین، واکنش‌های پوزولانی نیز در صورت وقوع، با انحلال بخشی از رس و ایجاد پیوند سیمانی بین ذرات رسی، موجب کاهش سطح مخصوص، در نتیجه کاهش حد روانی می‌شود. از آنجایی که، اگر کاهش در نتیجه واکنش‌های پوزولانی باشد، حد روانی و دامنه خمیری بایستی با گذشت زمان با شدت بیشتری کاهش یابد. بنابراین تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌های مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی پس از ۹۰ روز مراقبت اندازه‌گیری شد و نتایج در شکل (۲) ارائه شده است. همان طور که از نتایج شکل (۲) مشاهده می‌شود با افزایش درصد خاکستر بادی، تغییرات خصوصیات خمیری روند کاهشی داشته است.



شکل ۱- نمودار تغییرات حد روانی و دامنه خمیری نمونه‌های بنتونیت با افزایش درصد خاکستر بادی، پس از ۴ روز

برای انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ پس از مخلوط کردن بنتونیت با درصدهای مختلف خاکستر بادی، به نمونه‌ها تا رسیدن به میزان رطوبت بیشتر از حد روانی، آب افزوده شده و هم‌زمان خاک برای رسیدن به حالت رطوبت یکنواخت مخلوط شده است. سپس نمونه‌ها به مدت ۴ و ۹۰ روز در محفظه‌های پلاستیکی سربسته نگهداری شده است. پس از این مدت حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و دامنه خمیری (PI) نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D4318 اندازه‌گیری شده است.

۲-۷- تراکم

آزمایش تراکم برای به دست آوردن رابطه رطوبت- دانسیته نمونه‌های بنتونیت و ترکیب بنتونیت- خاکستر بادی با استفاده از دستگاه و قالب هاروارد مینیچر مطابق استاندارد ASTM D4609 انجام شده است.

۲-۸- مقاومت فشاری محدود نشده (UCS)

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، آب در دو درصد متفاوت یعنی به میزان رطوبت بهینه و ۱/۳ برابر رطوبت بهینه به ترکیبات مختلف بنتونیت- خاکستر بادی افزوده شده و تا رسیدن به همگنی کامل، هم زده شده است. نمونه‌ها سپس به مدت ۱ روز در محفظه پلاستیکی نگهداری شدند و قبل از کوبیدن با استفاده از همزن مکانیکی، نمونه به طور کامل همگن شده است. پس از آن نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه هاروارد مینیچر در قالب کوبیده شده‌اند. نمونه‌های تک محوری تهیه شده داخل محفظه پلاستیکی قرار داده شده و تحت دما و رطوبت ثابت به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نگهداری شده‌اند. در انتها مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D2166 اندازه‌گیری شده است.

۳- بحث و بررسی

۳-۱- تغییرات حدود اتربرگ

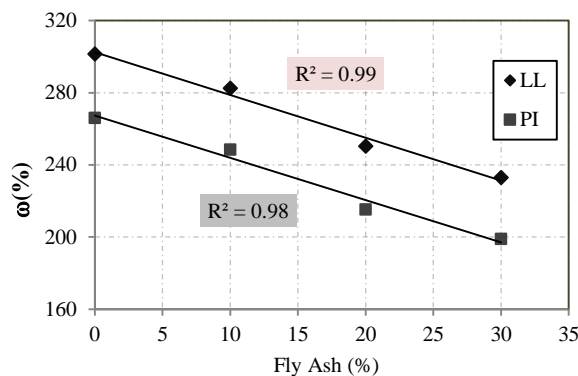
به منظور مطالعه تغییرات خصوصیات پلاستیسیته، تعدادی آزمایش حدود اتربرگ برای نمونه‌های بنتونیت حاوی درصدهای مختلف خاکستر بادی انجام شد. نتایج آزمایشات حدود اتربرگ همچنین ایده مناسبی را از خصوصیات تورمی خاک بیان می‌کند. در راستای تعیین و مقایسه اندرکنش کوتاه مدت و دراز مدت بنتونیت و خاکستر بادی، این آزمایش‌ها در مدت زمان‌های ۴ و ۹۰ روز مراقبت انجام شده است. حد روانی (LL)، و حد خمیری (PL) مخلوط بنتونیت با درصدهای مختلف خاکستر بادی مطابق با استاندارد ASTM D4318 اندازه‌گیری شد و سپس دامنه خمیری

که علت این افزایش در ارزیابی ریزساختاری نمونه‌ها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

از سوی دیگر، محصولات ناشی از واکنش‌های پوزولانی می‌تواند با ایجاد پیوند بین ذرات موجب تغییر ماهیت خاک و حتی تغییر طبقه‌بندی خاک از CH به MH شود (Dayioglu و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین به منظور بررسی روند تغییرات طبقه‌بندی خاک، موقعیت حدود اتربرگ نمونه‌ها در نمودار کاساگرانده مشخص شد (شکل (۳)). بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳)، با وجود تغییرات خصوصیات خمیری خاک خصوصاً تغییرات قابل توجه دامنه خمیری با افزایش درصد خاکستر بادی، برای همه نمونه‌های مورد آزمایش موقعیت نظیر نمونه همواره در محدوده CH و در مجاورت خط U باقی‌مانده است. حتی در نمونه‌های با ۹۰ روز مراقبت، موقعیت نقاط اندکی به خط U نزدیک‌تر شده است (نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۳۰٪ خاکستر بادی) و این می‌تواند به دلیل تغییرات تقریباً یکسان حدروانی و دامنه خمیری خاک متناسب با افزایش درصد خاکستر بادی و همچنین افزایش مدت مراقبت نمونه‌ها باشد. باقی‌ماندن موقعیت نمونه‌های حاوی بنتونیت در نمودار کاساگرانده نزدیک خط U بیانگر عدم تغییر ماهیت بنتونیت است (Casagrande, ۱۹۴۸). به طوری که می‌توان نتیجه‌گیری نمود حضور خاکستر بادی تأثیر قابل توجهی بر کاهش خصوصیات توری خاک نیز نداشته است.

۳-۲- منحنی تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده

به منظور ارزیابی تأثیر خاکستر بادی بر خصوصیات مکانیکی نمونه بنتونیت، نمونه‌هایی از بنتونیت و درصد‌های مختلف خاکستر بادی برای تعیین مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) تهیه شدند. ابتدا درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر برای هر مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی با استفاده از آزمایش تراکم توسط دستگاه هاروارد مینیچر^۱ تعیین شده است (ASTM D4609). نتایج آزمایش‌های تراکم نمونه‌های بنتونیت- خاکستر بادی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش میزان خاکستر بادی تا ۳۰٪، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش یافته است که این نشان دهنده افزایش قابلیت کارپذیری خاک بنتونیت با افزودن خاکستر بادی است. تغییرات مشاهده شده با نتایج محققین قبلی در این زمینه مطابقت دارد (Reddy و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه با نتایج کاهش دامنه خمیری نمونه‌ها (شکل‌های (۱) و (۲)) انطباق مناسبی دارد. کاهش درصد رطوبت بهینه خاک را می‌توان به کاهش درصد رس و در نتیجه کاهش مساحت سطح مخصوص



شکل ۲- نمودار تغییرات حد روانی و دامنه خمیری نمونه‌های بنتونیت با افزایش درصد خاکستر بادی، پس از ۹۰ روز

نتایج اندازه‌گیری حدود اتربرگ طی ۴ و ۹۰ روز مراقبت نشان می‌دهد، حد روانی نمونه بنتونیت با افزایش زمان نگهداری از ۴ به ۹۰ روز در شرایط اشباع، حدود ۶٪ کاهش یافته است و به ترتیب از ۳۱۹ به ۳۰۱ طی این مدت رسیده است. ولی حد روانی نمونه مخلوط بنتونیت - ۳۰٪ خاکستر بادی با افزایش مدت نگهداری حدود ۵٪ افزایش یافته است. کاهش حد روانی بنتونیت می‌تواند به دلیل انحلال نمک‌های قابل حل خاک و جانشینی کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم در لایه دوگانه خاک باشد. از سوی دیگر افزایش ۵٪ حد روانی نمونه بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی بعد از ۹۰ روز نگهداری، با احتساب ۶٪ کاهش حد روانی نمونه بنتونیت بیانگر افزایش ۱۱٪ حد روانی نمونه بوده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، دامنه خمیری خاک با افزایش درصد خاکستر بادی به دلیل ماهیت غیر پلاستیک خاکستر بادی، کاهش می‌یابد. با افزایش مدت زمان مراقبت، دامنه خمیری بنتونیت تحت تأثیر کاهش حد روانی و حد خمیری، حدود ۳٪ کاهش یافته است. در حالیکه طی همین مدت مراقبت، دامنه خمیری نمونه بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی تحت تأثیر افزایش حد روانی و کاهش حد خمیری از ۱۸۴ در ۴ روز با حدود ۸٪ افزایش به ۱۹۸ در ۹۰ روز رسیده است. با احتساب ۳٪ کاهش دامنه خمیری نمونه بنتونیت، میزان افزایش دامنه خمیری نمونه بنتونیت - ۳۰٪ خاکستر بادی ۱۱٪ است و این مشابه با درصد تغییرات حد روانی این نمونه است. واکنش‌های پوزولانی با تشکیل محصولاتی مانند C-S-H و C-A-H و در نتیجه ایجاد پیوندهای سیمانی بین ذرات خاک (Mitchell و El Jack, ۱۹۹۶) موجب کاهش حدروانی و دامنه خمیری خاک می‌شود. بنابراین، افزایش مشاهده شده در دامنه خمیری نمونه ۹۰ روزه نسبت به نمونه ۴ روزه در نمونه‌های حاوی خاکستر بادی طی زمان، دلیلی به غیر از واکنش‌های پوزولانی دارد

1. Harvard Miniature Compaction Apparatus

به نظر می‌رسد که افزودن مقادیر بیش از ۳۰٪ خاکستر بادی به خاک بنتونیت موجب می‌شود که دانسیته خاکستر بادی غالب شود، که این امر موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر شده است. همچنین با افزایش حضور ذرات خاکستر بادی پیوستگی ذرات رس تا اندازه‌ای کاهش یافته است که این، احتمالاً با افزایش حفرات خاک ضمن کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر، رطوبت بهینه خاک را نیز اندکی افزایش داده است. بنابراین افزودن تا حداکثر ۳۰٪ خاکستر بادی می‌تواند به عنوان حد بالای درصد مناسب برای تثبیت این خاک با دامنه خمیری زیاد در نظر گرفته شود.

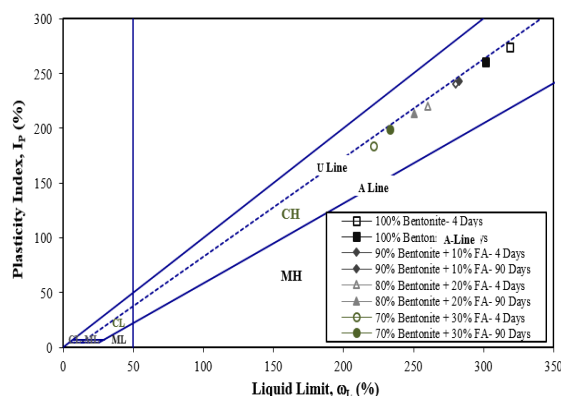
برای بررسی جامع‌تر فرآیند اندرکنش بنتونیت-خاکستر بادی تعدادی آزمایش هیدرومتری روی نمونه‌های بنتونیت-خاکستر بادی انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به این که در صورت وقوع واکنش‌های شیمیایی در فرآیند اندرکنش بنتونیت-خاکستر بادی بیشترین تأثیر بر بخش رسی خاک خواهد بود، ارزیابی تغییرات درصد اندازه ذرات ۲ میکرون مخلوط بنتونیت-خاکستر بادی به درک دقیق‌تر نحوه و مکانیزم این اندرکنش کمک و افری می‌کند. بر این اساس، در صورتی که مکانیزم اندرکنش فوق یک مکانیزم فیزیکی باشد انتظار می‌رود که با افزایش درصد خاکستر بادی، درصد هم اندازه ۲ میکرون خاک به صورت خطی کاهش یابد. ضمن آن که در صورتی که مکانیزم اندرکنش بنتونیت و خاکستر بادی یک مکانیزم شیمیایی باشد، با توجه به تبادل کاتیونی و کاهش ضخامت لایه دوگانه بخش رسی و تجمع پولک‌های رسی، انتظار می‌رود که با افزایش درصد خاکستر بادی کاهش ریزدانه ۲ میکرون با شیب قابل توجهی کاهش یابد.

نتایج توزیع اندازه ذرات نمونه‌های بنتونیت با افزایش درصد خاکستر بادی و همچنین نمونه خاکستر بادی در جدول (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج نشان داده شده مشخص است، درصد ذرات کمتر از ۲ میکرون با افزایش درصد خاکستر بادی کاهش می‌یابد. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان می‌دهد، افزایش درصد خاکستر بادی کلاس F به رس، منجر به درشت‌تر شدن ساختار ذرات و کاهش درصد ذرات ریزتر از ۲ میکرون در نتایج به دست آمده از آزمایش هیدرومتری شده است (Bryson و همکاران، ۲۰۱۷).

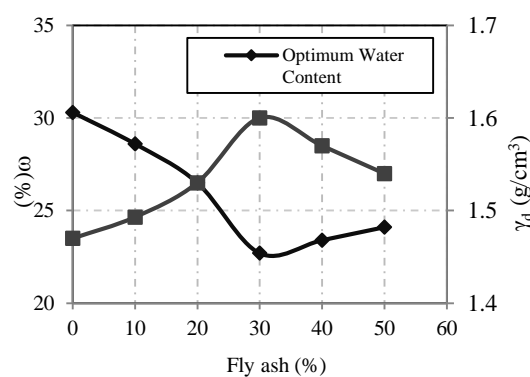
نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که روند کاهشی درصد ذرات کوچکتر از ۲ میکرون، با شیب کم و به صورت متناسب با کاهش درصد رس بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد، مکانیزم اندرکنش بنتونیت و خاکستر بادی صرفاً به صورت فیزیکی بوده و این رفتار مشاهده شده در مقادیر تغییرات نتایج حدود اتربرگ و تراکم نیز مطابقت دارد.

خاک در نمونه‌ها، با افزایش درصد خاکستر بادی نسبت داد. به طوری که به علت خصوصیات غیر پلاستیک خاکستر بادی، افزایش درصد خاکستر بادی در نمونه سبب کاهش قابلیت نگهداری رطوبت نمونه شده، همچنین موجب می‌شود که مقدار آب مورد نیاز برای جهت‌گیری ذرات طی فرآیند تراکم کاهش یابد، که این موضوع باعث کاهش درصد رطوبت بهینه نمونه‌های بنتونیت با افزایش درصد خاکستر بادی تا ۳۰٪، شده است. همچنین حضور خاکستر بادی با خواص غیر پلاستیک سبب فشردگی پذیری بهتر نمونه‌ها و افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها شده است (Phanikumar و Sharma، ۲۰۰۷).

تغییرات نسبتاً خطی منحنی تغییرات درصد رطوبت با افزایش درصد خاکستر بادی، حاکم بودن فرآیند اندرکنش فیزیکی خاکستر بادی با بنتونیت را تأیید می‌کند. این نتیجه، با وجود کاهش چگالی ویژه (G_s) نمونه‌ها با افزایش درصد خاکستر بادی به دلیل چگالی ویژه کمتر خاکستر بادی، است. افزایش مقدار خاکستر بادی در ترکیبات به میزان بیشتر از ۳۰٪ وزنی خاک بنتونیت، موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه شده است.



شکل ۳- موقعیت نمونه‌های خاک با تغییرات درصد خاکستر بادی و مدت زمان اختلاط ۴ و ۹۰ روز، در نمودار کاساگرانده



شکل ۴- تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه برای نمونه‌های بنتونیت حاوی درصد‌های مختلف خاکستر بادی

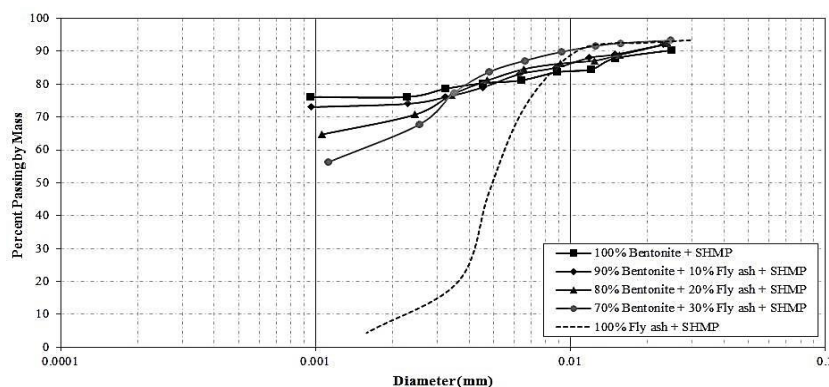
و با کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر، مقاومت فشاری محدود نشده نیز کاهش یافته است (Phanikumar و Sharma، ۲۰۰۷). نتایج محققین مختلف نیز نشان دهنده افزایش مقدار مقاومت فشاری محدود نشده خاک متورم شونده با افزایش درصد خاکستر بادی کلاس F در نمونه‌های مورد مطالعه (Zha و همکاران، ۲۰۰۸) تا یک نسبت بهینه بوده است (Indiramma و Sudharani، ۲۰۱۸).

نتایج ارائه شده در شکل (۶-ب) نشان می‌دهد، افزایش مدت زمان مراقبت از ۷ تا ۹۰ روز، تغییر قابل توجهی را در نتایج UCS نمونه‌های بنتونیت در درصد‌های مختلف خاکستر بادی ایجاد نکرده است. همچنین افزایش زمان مراقبت از ۷ تا ۹۰ روز در نمونه‌های کوبیده شده تحت رطوبت بهینه (شکل (۶-الف)) موجب اندکی کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی خاکستر بادی شده است. اما، مقادیر UCS نمونه حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی در هر دو رطوبت با افزایش زمان مراقبت افزایش یافته است. با افزایش غلظت نمک‌های محلول در سیال حفره‌ای، تبادل کاتیونی نمک-های محلول بخش بنتونیتی با پولک‌های رسی افزایش می‌یابد. فرآیند فوق، می‌تواند دلیل افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌های ۹۰ روز در مقایسه با نمونه‌های ۷ روز باشد. این در حالی است که در صورت وقوع واکنش‌های پوزولانی بین خاکستر بادی و بنتونیت، افزایش قابل توجه در مقاومت تک محوری نمونه‌ها مورد انتظار خواهد بود.

واکنش‌های پوزولانی با ایجاد محصولات سیمانی C-S-H و C-A-H و ایجاد پیوند بین ذرات خاک (Raj و همکاران، ۲۰۱۸) موجب افزایش مقاومت فشاری محدود نشده خاک به ویژه با افزایش زمان نگهداری می‌شود (Behnood، ۲۰۱۸). همچنین نتایج تحقیقات سایر محققین نشان می‌دهد که محدوده تغییرات درصد رطوبت ω_{opt} الی $1.3\omega_{opt}$ مناسب‌ترین شرایط برای وقوع واکنش‌های پوزولانی و در عین حال حصول تراکم مطلوب را در آزمایش UCS فراهم می‌کند (Horpibulsuk و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین، برای تهیه نمونه‌های UCS، مخلوط بنتونیت-خاکستر بادی با رطوبت بهینه و حدود ۱/۳ برابر رطوبت بهینه هر مخلوط (سمت تر منحنی تراکم) با استفاده از دستگاه هاروارد مینیچر کوبیده شده‌اند. نتایج مقاومت فشاری محدود نشده ۲۸، ۷، ۹۰ روزه نمونه‌های تک محوری کوبیده شده تحت رطوبت بهینه در شکل (۶-الف) و ۱/۳ رطوبت بهینه در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. همان طور که از نتایج ارائه شده در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) مشخص است، مقادیر UCS نمونه‌ها با افزایش درصد خاکستر بادی تا ۳۰٪، افزایش یافته است و با افزودن ۵۰٪ خاکستر بادی مقاومت کاهش یافته است. افزایش مقادیر UCS نمونه‌ها با افزایش درصد خاکستر بادی تا ۳۰٪ را می‌توان به تراکم بهتر نمونه‌ها در کاهش بخش رسی نمونه نسبت داد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان داده است که روند افزایش مقاومت فشاری محدود نشده در نمونه‌های رسی حاوی خاکستر بادی مطابق با افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها بوده است

جدول ۴- توزیع اندازه ذرات نمونه‌های بنتونیت با افزایش درصد خاکستر بادی توسط آزمایش هیدرومتری

توزیع اندازه ذرات (%)			ترکیب خاک
< ۰/۰۰۲ mm	۰/۰۰۲-۰/۰۰۵ mm	> ۰/۰۰۵ mm	
۷۶	۳	۲۱	۱۰۰٪ بنتونیت
۷۳	۷	۲۰	۹۰٪ بنتونیت + ۱۰٪ FA
۶۹	۱۲	۱۹	۸۰٪ بنتونیت + ۲۰٪ FA
۶۳	۲۲	۱۵	۷۰٪ بنتونیت + ۳۰٪ FA
۹	۴۱	۵۰	۱۰۰٪ FA



شکل ۵- منحنی‌های دانه‌بندی خاک بنتونیت با تغییرات درصد خاکستر بادی

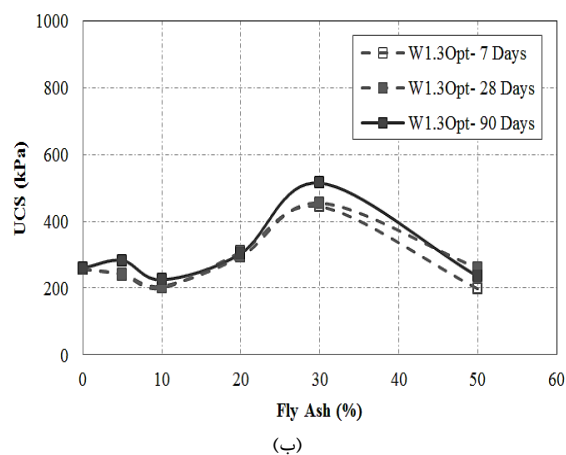
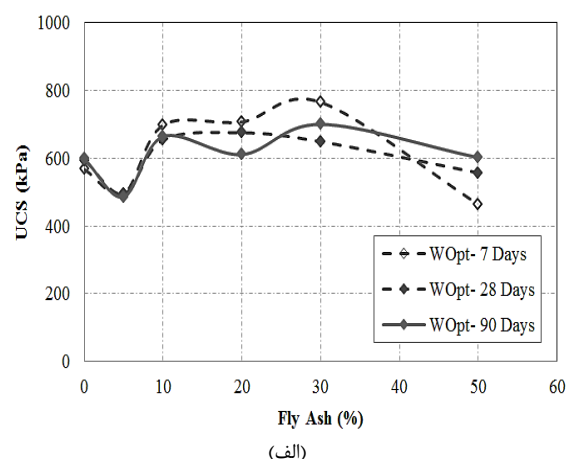
اما مقادیر UCS ۷ روزه مخلوط بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی در رطوبت بهینه نسبت به نمونه بنتونیت ۲۸٪ افزایش داشته است. اگر این افزایش مقاومت همراه با واکنش‌های پوزولانی باشد UCS به مقدار قابل توجهی، با افزایش زمان نگهداری افزایش می‌یابد. چنین افزایش قابل توجهی در نتایج شکل (۶) مشاهده نمی‌شود.

۳-۳- استخراج کاتیون‌های خاکستر بادی

تشکیل محصولات پوزولانی نیازمند شرایطی است که مهمترین این شرایط، انحلال Si و Al از ساختار ماده با خواص پوزولانی در محدوده pH قلیایی (عموماً مقادیر pH بزرگتر از ۱۱/۹) است (Zhou و Stegemann, ۲۰۰۹). شرط دیگر، انحلال مقدار زیادی کاتیون کلسیم در آب حفره‌ای است که کلسیم نیز می‌تواند از خاکستر بادی، و یا کربنات کلسیم و یا در صورت حضور سیمان از آن تأمین شود. لازم است که انحلال کلسیم به مقدار زیاد انجام شود زیرا ابتدا جذب کلسیم به سایت‌های تبادل‌ی خاک صورت می‌گیرد و پس از آن کلسیم اضافی در واکنش‌های پوزولانی شرکت می‌کند (Ouhadi و همکاران ۲۰۱۴). بنابراین به منظور ارزیابی میزان انحلال کاتیون‌های Si, Al و Ca آزمایش استخراج خاکستر بادی انجام شده است. با انجام آزمایش استخراج خاکستر بادی طی زمان، انحلال‌پذیری کاتیون‌های Si, Al, Ca, Fe و Mg در مقادیر pH های اسیدی تا قلیایی سوسپانسیون خاکستر بادی اندازه‌گیری و گزارش شده است. مقادیر غلظت کاتیون‌ها برحسب pH، طی زمان در شکل (۷) و جدول (۵) نشان داده شده است. همان طور که از نتایج شکل (۷) مشخص است میزان انحلال کاتیون‌ها تابع pH است. غلظت کاتیون‌های Ca و Mg با کاهش pH سوسپانسیون افزایش یافته است. همچنین Fe از ساختار خاکستر بادی تنها در pH کمتر از ۳ شروع به انحلال کرده است. اما کاتیون‌های Si و Al در pH های قلیایی زیاد و اسیدی زیاد انحلال بیشتر و در pH های نزدیک به خنثی کمترین انحلال را نشان می‌دهند. در pH نزدیک ۹ (pH طبیعی خاکستر بادی مورد مطالعه) کمترین انحلال کاتیون‌های غالب موجود در خاکستر بادی (Al, Si) رخ داده است. بنابراین با توجه به مقادیر بدست آمده از شکل (۷) می‌توان بیان کرد که کمترین انحلال Ca در محدوده pH بیشتر از ۱۲ بوده است. همچنین انحلال‌پذیری کاتیون‌های Si و Al را می‌توان به سه ناحیه تقسیم‌بندی کرد. برای کاتیون Si در محدوده pH ۷ تا ۱۰ کمترین انحلال رخ داده است و با افزایش pH به مقادیر بیشتر از ۱۰ و کاهش به مقادیر کمتر از ۷، انحلال Si به شدت افزایش یافته است. همچنین برای Al کمترین انحلال در محدوده pH ۵ الی ۱۰ مشاهده شده و در مقادیر pH بیشتر از ۱۰ و کمتر از ۵ انحلال به شدت افزایش یافته است.

از سوی دیگر، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش درصد خاکستر بادی تقریباً به صورت خطی بوده است (شکل (۵)). اما افزایش مقاومت فشاری محدود نشده با افزایش درصد خاکستر بادی به صورت غیر خطی است و با افزایش درصد خاکستر بادی به مقادیر بیش از ۱۰٪ روند افزایشی مقاومت فشاری محدود نشده در نمونه‌های کوبیده شده با رطوبت بهینه کندتر بوده است. مقادیر بیشتر از ۱۰٪ خاکستر بادی مانند ذرات لای پیوند نخورده رفتار می‌کند که اصطکاک محسوس و چسبندگی صفر دارد (Kate, ۲۰۰۵) که موجب کاهش قابل توجه مقاومت می‌شود (Bell, ۱۹۹۶).

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۶) مقادیر UCS ۷ روزه مخلوط بنتونیت -۳۰٪ خاکستر بادی در رطوبت ۱/۳ برابر رطوبت بهینه، با ۷۱٪ افزایش نسبت به نمونه بنتونیت از ۲۶۰ به مقدار ۴۴۴ kPa رسیده است.



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری با افزایش خاکستر بادی برای نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز: الف) رطوبت بهینه، ب) ۱/۳ برابر رطوبت بهینه

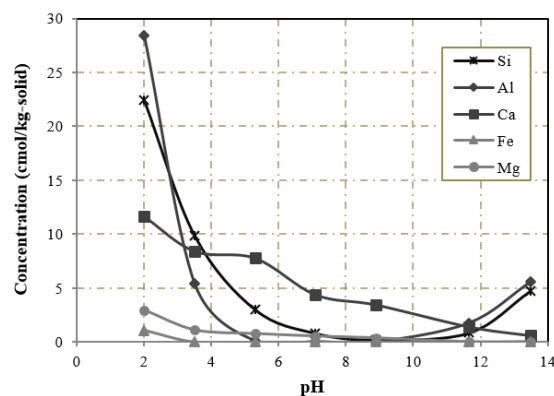
جدول ۵- غلظت عناصر مختلف استخراج شده از خاکستر بادی در pH مختلف

غلظت یون (cmol/kg-solid)									pH
Ca			Al			Si			
۹۰	۵۰	۱۴	۹۰	۵۰	۱۴	۹۰	۵۰	۱۴	
روز نگهداری			روز نگهداری			روز نگهداری			
۱۷/۲	۱۷/۱	۱۰/۹	۷۳	۴۷/۸	۲۳/۷	۲۴/۱	۲۳	۱۹/۵	۲/۳
۱۲	۱۱/۹	۸/۸	۱۲/۱	۱۰/۶	۷	۱۴/۳	۱۴/۱	۱۱/۲	۳/۳
۸	۸/۱	۷/۶	۰/۱	۰/۱	۰/۰۸	۵	۳/۶	۳	۵/۳
۵/۹	۵/۹	۴/۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۱/۸	۱	۰/۸	۷
۳/۱	۳/۲	۲/۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۴	۰/۴	۰/۲	۹
۰/۳	۰/۲	۰/۲	۷/۷	۴/۱	۲/۶	۱۴	۴/۳	۱/۳	۱۲
۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۲۶/۳	۸/۳	۵/۴	۴۰/۱	۱۸	۴/۶	۱۳/۴

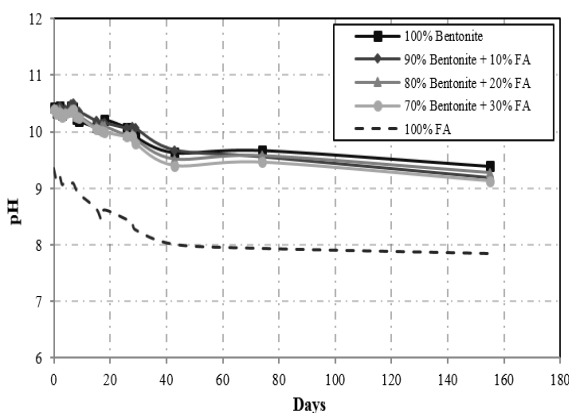
انحلال خاکستر بادی فرآیندی تدریجی و طی زمان است بنابراین در این مطالعه انحلال پذیری کاتیون‌ها طی زمان نیز بررسی شده است. انحلال Fe و Mg حتی در pHهای اسیدی شدید نیز بسیار اندک است. به طوری که، غلظت کاتیون‌های Fe و Mg در pH ۲ به ترتیب حدود ۱ و ۳ cmol/kg-solid بوده است. بنابراین، انحلال پذیری آنها طی زمان بررسی نشده است و تنها غلظت کاتیون‌های Si، Al و Ca طی زمان ارزیابی شده است (جدول ۵)). نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که در pH اسیدی شدید، مقدار کاتیون انحلال یافته Si طی زمان تغییر زیادی نداشته است ولی انحلال کاتیون Al با زمان افزایش یافته است. به طوری که پس از ۹۰ روز حدود ۷/۵٪ از Al موجود در خاکستر بادی تحت pH برابر با ۲/۳ حل شده است. همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است که در محلول اسیدی، Al بیشتر از ساختارهای آمورف خاکستر بادی حل می‌شود ولی انحلال Si تنها از ترکیبات سیلیسیوم سریع قابل حل موجود در خاکستر بادی است (Guo و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، تحقیقات نشان داده است که در محلول قلیایی شدید، انحلال Si بسیار بیشتر از Al است (Sun و همکاران، و ۲۰۱۷). به طوری که، غلظت کاتیون Si حل شده در pH ۱۳/۴ طی ۱۴ و ۹۰ روز تنظیم pH به ترتیب از ۴/۶ به ۴۰/۱ cmol/kg-solid افزایش یافته است.

به منظور ارزیابی حصول و یا عدم حصول شرایط مناسب برای وقوع واکنش‌های پوزولانی، تغییرات pH سوسپانسیون نمونه‌های مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی با نسبت S:W (آب: مواد جامد) برابر با ۱:۱۰ طی زمان، اندازه‌گیری شد (شکل ۸).

نتایج ارائه شده در شکل (۸) نشان می‌دهد که در کلیه نمونه‌های مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی، پس از ۴۰ روز، pH با تقریباً



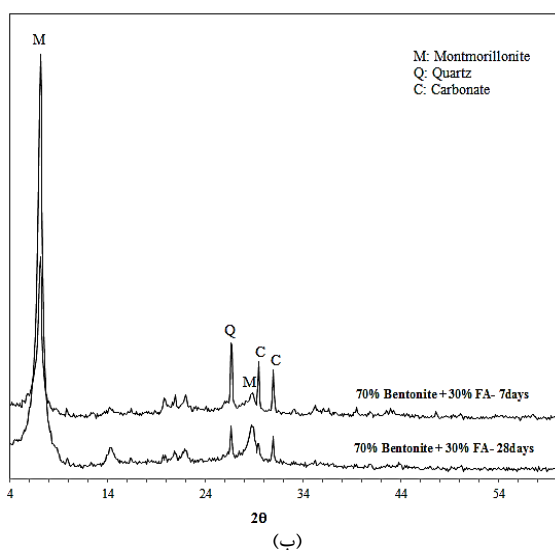
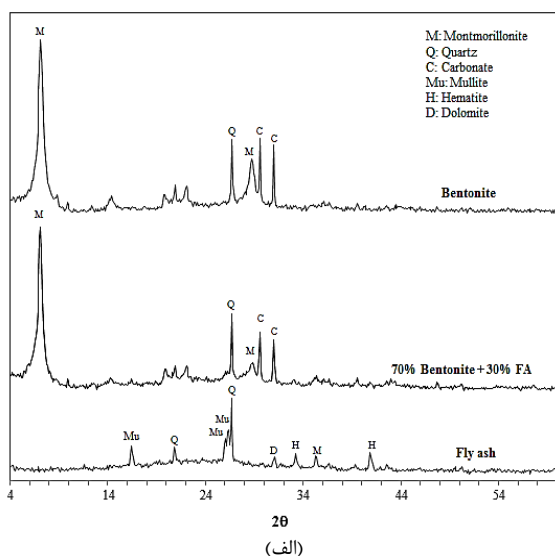
شکل ۷- تغییرات غلظت کاتیون‌های استخراج شده از خاکستر بادی تحت pH های متفاوت سوسپانسیون در مدت ۱۴ روز



شکل ۸- تغییرات pH سوسپانسیون ترکیبات مختلف بنتونیت- خاکستر بادی با زمان

ایکس بر روی نمونه حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی طی زمان‌های ۷ و ۲۸ روز انجام شده است و نتایج آن در شکل (۹-ب) نشان داده شده است.

مقایسه طی زمان پراش پرتوهای XRD نمونه حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی نشان می‌دهد که محصول پوزولانی با افزایش زمان مراقبت تا ۲۸ روز، تشکیل نشده است و اساساً پراش پرتو XRD نمونه‌ها طی زمان، مشابه بوده است و فقط شدت نظیر قله‌ها تغییر کرده است. بنابراین نتایج XRD نیز نتایج آزمایش استخراج تحت pH، نزدیک به pH طبیعی خاکستر بادی را تایید می‌کند. نتایج XRD تحقیقات محققین نیز نشان داده است که افزایش مدت مراقبت ترکیبات خاک مونت‌موریلونیت و خاکستر بادی کلاس F، هیچ گونه محصولات سیمانی مانند C-S-H را نشان نمی‌دهد (Dayioglu و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۹- منحنی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بنتونیت، خاکستر بادی و مخلوط بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی

یک واحد کاهش در مقدار ۹/۴ ثابت شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۸)، تغییرات pH نمونه بنتونیت فاقد خاکستر بادی طی زمان بر منحنی تغییرات pH نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف خاکستر بادی منطبق است. از سوی دیگر مقادیر pH نمونه خاکستر بادی در همه زمان‌های مورد اندازه‌گیری تقریباً به اندازه ۱/۲ واحد کوچکتر از نمونه‌های بنتونیت حاوی درصد‌های مختلف خاکستر بادی بوده است. این رفتار مشاهده شده را می‌توان به نقش کنترل کننده ظرفیت بافرینگ بنتونیت در درصد‌های مختلف خاکستر بادی نسبت داد. به بیان دیگر به دلیل ظرفیت بافرینگ بسیار زیاد بنتونیت نسبت به خاکستر بادی، تغییرات pH نمونه‌های مختلف بنتونیت-خاکستر بادی تابع تغییرات pH نمونه بنتونیت بوده است و مقادیر pH بین ۹/۱ تا ۹/۶ به ترتیب برای خاک حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی و بنتونیت فاقد خاکستر بادی تغییر کرده است. اما این محدوده pH تقریباً نزدیک به مقادیر pH طبیعی خاکستر بادی است. بنابراین همان طور که در شکل (۷) نیز نشان داده شد در این محدوده pH کمترین مقادیر انحلال کاتیون‌ها از خاکستر بادی انجام شده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که، در محدوده pH مخلوط‌های بنتونیت-خاکستر بادی مورد آزمایش، خاکستر بادی انحلالی نداشته است و انحلال ناچیز مشاهده شده احتمالاً به دلیل هیدرولیز ترکیبات سطحی خاکستر بادی بوده است. با این وجود، pH خاک نسبت به حالت طبیعی اولیه کمی کاهش یافته است که این امر می‌تواند ناشی از حلالیت بخشی از کربنات کلسیم موجود در خاک باشد. همچنین، انحلال CaO از خاکستر بادی کلاس F بسیار اندک است (جدول ۵)، بنابراین افزایش درصد خاکستر بادی و زمان مراقبت تأثیری بر تشکیل واکنش‌های پوزولانی نداشته است. بنابراین می‌توان گفت طی این مدت احتمالاً هیچ گونه واکنش پوزولانی که منجر به تشکیل محصولات سیمانی شود، بین بنتونیت و خاکستر بادی رخ نداده است.

به منظور تفسیر رفتار مشاهده شده از دیدگاه ریزساختاری، پراش پرتو اشعه ایکس نمونه‌های بنتونیت، خاکستر بادی و مخلوط بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۹). نتایج آنالیز XRD خاکستر بادی (شکل ۹-الف) نشان می‌دهد که خاکستر بادی غنی در کانی‌های کوارتز، مولیت و دولومیت است. همچنین، در تفسیر پراش پرتو ایکس نمونه تثبیت شده با خاکستر بادی می‌توان اینگونه استدلال کرد که در مخلوط بنتونیت-۳۰٪ خاکستر بادی هیچ محصول پوزولانی مانند C-S-H، C-A-H تشکیل نشده است. همانطور که نتایج جدول (۵) نشان داده است، رفتار حل شونده‌گی خاکستر بادی طی زمان به صورت افزایشی است. به طوری که غلظت کاتیون‌های Al، Si و Ca حل شده طی زمان افزایش یافته است. بنابراین برای بررسی امکان تشکیل محصولات پوزولانی طی زمان، آزمایش پراش پرتو

مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی کمی بیشتر از pH طبیعی خاکستر بادی یعنی حدود ۹ است. همچنین، نتایج آزمایش استخراج خاکستر بادی با تغییر pH نشان داد که در pH نزدیک ۹ تقریباً مقادیر بسیار ناچیزی از کاتیون‌های Si، Al می‌شود که به ترتیب ۰/۲ و ۰/۱ cmol/kg-soil بوده است. بنابراین شرایط اولیه برای فعال شدن خواص پوزولانی خاکستر بادی فراهم نشده است.

۵) صحت نتایج بدست آمده با استفاده از داده‌های آنالیز XRD تأیید شده است. به طوری که، مقایسه طی زمان پراش پرتوهای XRD نمونه‌ها نشان داده است که، محصولات پوزولانی مانند C-S-H و H و C-A-H با افزایش زمان مراقبت، تشکیل نشده است. همگی این نتایج بیانگر تأثیر رفتار فیزیکی خاکستر بادی در خاک رسی بنتونیت مطالعه شده تحت شرایط pH محیطی موجود، است. به بیان دیگر تا زمانی که شرایط قلیائی لازم برای حل شدن کاتیون‌های موجود در خاکستر بادی فراهم نشود، اندرکنش خاکستر بادی و خاک رسی صرفاً فرایند فیزیکی و غیرپوزولانی خواهد بود.

۵- مراجع

- ACI Committee 211, "Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash", ACI Mater Journal, 1993, 272-283.
- Ahmaruzzaman M, "A review on the utilization of fly ash", Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36, 327-363.
- American Society for Testing Materials, C618, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", ASTM International, 2015.
- ASTM, "Annual book of ASTM standard, American Society for Testing of Materials", Pennsylvania, 2016.
- Behnood A, "Soil and clay stabilization with calcium and non-calcium-based additives: A state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques", Transportation Geotechnics, 2018, 17, 14-32.
- Bell FG, "Lime stabilization of clay minerals and soils", Engineering Geology, 1996, 42, 223-237.
- Blissett RS, Rowson NA, "A review of the multi-component utilisation of coal fly ash", Fuel, 2012, 97, 1-23.
- British Standard, BS 1377-3, "Methods of test for Soils for civil engineering purposes- Part 3: Chemical and electro-chemical tests", British Standards Institution, 1990.
- Bryson LS, Mahmoodabadi M, Adu-Gyamfi K, "Prediction of consolidation and shear behavior of fly ash-soil mixtures using mixture theory", Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29 (11).
- Casagrande A, "Classification and identification of soils", Transactions, ASCE, 1948, 113, 901-930.
- Cokca E, "Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil", Journal of Geotechnical and

بنابراین به طور کلی می‌توان بیان نمود که رفتار ماده پوزولانی خاکستر بادی تابع شرایط pH متغیر است به طوری که در pH های نزدیک طبیعی و خنثی صرفاً مانند مصالح دانه‌ای ریز، رفتار کرده و رفتار فیزیکی از خود نشان می‌دهد. ولی با تغییرات قابل توجه pH مانند افزایش pH به مقادیر بیشتر از ۱۲، مانند شرایطی که در حضور سیمان رخ می‌دهد، با حل شدن ذرات خاکستر بادی، یون‌های Si و Al از خاکستر بادی وارد فاز محلول شده و در حضور کلسیم شرایط لازم برای واکنش‌های پوزولانی فراهم خواهد شد. در این حال در میان مدت رفتار خاکستر بادی متأثر از تغییر اندازه ذرات احتمالاً به سمت رفتار شیمیایی صرف حرکت کرده و اثر خواص پوزولانی در درازمدت غالب خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی نقش خاکستر بادی به عنوان پسماند دارای خواص پوزولانی در خاک متورم شونده بنتونیت پرداخته است. ماهیت رفتاری خاکستر بادی با توجه مطالعات ریز ساختاری و بررسی نحوه تغییرات نتایج مطالعات درشت ساختاری، ارزیابی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

- ۱) افزایش درصد خاکستر بادی در مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی موجب کاهش تقریباً خطی حد روانی شده است. به طوری که، با افزایش ۳۰٪ خاکستر بادی حد روانی نیز تقریباً با ۳۰٪ کاهش به ۲۲۱ رسیده است. همچنین بررسی تغییرات حدود اتزبرگ نمونه‌ها در نمودار کاساگرانده نشان داده است که افزودن خاکستر بادی به خاک بنتونیت موجب تغییر ماهیت بنتونیت نشده است. این نرخ تغییرات تأیید کننده عدم وقوع واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی است.
- ۲) بر اساس نتایج آزمایشات هیدرومتری، ذرات کوچکتر از ۲ میکرون ترکیبات بنتونیت- خاکستر بادی، متناسب با افزایش درصد خاکستر بادی به بنتونیت کاهش یافته است و کاهش قابل توجهی که ناشی از پیوند خوردن ذرات در نتیجه محصولات پوزولانی C-S-H و C-A-H باشد مشاهده نشده است.
- ۳) با افزودن خاکستر بادی تا ۳۰٪، مقادیر UCS ۷روزه نمونه‌ها با حداکثر ۷۱٪ افزایش نسبت به نمونه بنتونیت از ۲۶۰ به ۴۴۴ kPa رسیده است. افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل قابلیت تراکمی بهتر نمونه حاوی خاکستر بادی نسبت به نمونه بنتونیت و چسبندگی ظاهری خاکستر بادی، که در رطوبت‌های بیشتر از رطوبت‌های بهینه قابل توجه است، باشد. اگر واکنش‌های پوزولانی در مخلوط بنتونیت- خاکستر بادی رخ داده بود انتظار می‌رفت که UCS به مقادیر بسیار زیادتری طی زمان افزایش یابد.
- ۴) مقادیر pH تعادلی ترکیبات نقش به سزایی در نحوه عملکرد خاکستر بادی دارد. بطوریکه pH تعادلی سوسپانسیون

- Mitchell JK and El Jack S, "The Fabric of Soil-Cement and Its Formation", 1966.
- Mitchell JK, "Fundamentals of soil behavior", John Wiley and Sons Incorporated, New York, 1976, 422 p.
- Mir BA, Sridharan A, "Volume change behavior of clayey soil-fly ash mixtures", International Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 8 (1), 72-83.
- Mohanty SK, Pradhan PK, Mohanty CR, "Consolidation and drainage characteristics of expansive soil stabilized with fly ash and dolochar", Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34 (5), 1435-1451.
- Nikolić V, Komljenović M, Džunuzović N, Miladinović Z, "The influence of Pb addition on the properties of fly ash-based geopolymers", Journal of Hazardous Materials, 2018, 350, 98-107.
- Ouhadi VR, Yong R, Amiri M, Ouhadi M, "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays", Applied Clay Science, 2014, 95, 111-118.
- Ouhadi VR, Yong RN, Bayesteh, H, "Influence of potential determining ions on the microstructural performance and contaminant adsorption of a homoionic illitic clay", Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 184, 77-93.
- Ouhadi, VR, Goodarzi, AR, "Pore fluid characteristics effect on the dispersivity behaviour of soils from macro and micro structure aspects", Proceedings of the 2nd international symposium on contaminated sediments, 2003, 200-206.
- Phanikumar BR, Sharma SR, "Volume change behavior of fly ash-stabilized clays", Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (1), 67-74.
- Phanikumar BR, Shankar MU, "Heave studies on fly ash-stabilised expansive clay liners", Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35 (1), 111-120.
- Phummiphan I, Horpibulsuk S, Rachan R, Arulrajah A, Shen S, Chindaprasirt P, "High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material", Journal of Hazardous Materials, 2018, 341, 257-267.
- Prabakar J, Dendorkar N, Morchhale R, "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils", Construction and Building Materials, 2004, 18 (4), 263-267.
- Raj SS, Sharma AK, Anand KB, "Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth", Journal of Building Engineering, 2018, 18, 51-57.
- Rajakumar C, Meenambal T, "Effect of coal ash in the stabilization of expansive soil for the pavement", International Journal of Chemical Technology Research, 2015, 8 (1), 170-177.
- Rao KM, Subbarao GVR, "Optimum fly ash for mechanical stabilization of expansive soils using 22 factorial experimental design", Nat Hazards, 2012, 60, 703-713.
- Reddy NG, Tahasildar J, Rao BH, "Evaluating the influence of additives on swelling characteristics of expansive soils", International Journal of Geosynth and Ground Engineering, 2015, 1 (7).
- Shemi A, Ndlovu S, Sibanda V, Van Dyk LD, "Extraction of alumina from coal fly ash using an acid leach-sinter-acid leach technique", Hydrometallurgy, 2015, 157, 348-355.
- Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (7), 568-573.
- Dayioglu M, Cetin B, Nam S, "Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives", Applied Clay Science, 2017, 146, 56-69.
- Edil TB, Berthouex PM, Vesperman KD, "Fly ash as a potential waste liner", ASCE, 1987, 447-461.
- Eltantawy IN, Arnold PW, "Reappraisal of ethylene glycol mono-ethyl ether, (EGME) method for surface area estimation of clays", Soil Science, 1973, 24, 232-238.
- Estabragh AR, Pereshkafti MRS, Parsaei B, Javadi AA, "Stabilized expansive soil behavior during wetting and drying", International Journal of Pavement Engineering, 2013, 4 (4), 418-427.
- Fan F, Liu Z, Xu G, Peng H, Cai CS, "Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers", Construction and Building Materials, 2018, 160, 66-81.
- Garzon E, Cano M, O'Kelly BCO, Sanchez-Soto PJ, "Phyllite clay-cement composites having improved engineering properties and material applications", Applied Clay Science, 2015, 114, 229-233.
- Guo B, Pan D, Liu B, Volinsky AA, Mustafa Fincan, Jinfeng Du, Shengen Zhang, "Immobilization mechanism of Pb in fly ash-based geopolymer", Construction and Building Materials, 2017, 134, 123-130.
- Guo Y, Li Y, Cheng F, Wang M, Wang X, "Role of additives in improved thermal activation of coal fly ash for alumina extraction", Fuel Process Technol, 2013, 110, 114-121.
- Guo Y, Zhao Z, Zhao Q, Cheng F, "Novel process of alumina extraction from coal fly ash by pre-desilicating-Na₂CO₃ activation-Acid leaching technique", Hydrometallurgy, 2017, 169, 418-425.
- Hausmann MR, "Engineering Principles of Ground Modification", McGraw-Hill, New York, 1990, 632p.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y, "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", Soils and Foundations, 2009, 49(1), 85-98.
- Indiramma P, Sudharani C, "Scanning electron microscope analysis of fly ash", quarry dust stabilized soil. In: Frikha, W., Varaksin, S., Viana da Fonseca, A. (eds) Soil Testing, Soil Stability and Ground Improvement. GeoMEast 2017, Sustainable Civil Infrastructures, Springer, Cham, 2018.
- Kaniraj SR, Havanagi VG, "Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (7), 574-584.
- Kate JM, "Strength and volume change behavior of expansive soils treated with fly ash", Geo-Frontiers Congress, ASCE, Geotechnical Special Publication, Austin, United States, 2005.
- Keramatikerman M, Chegenizadeh A, Nikraz H, "Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 93, 1-6.

- Show KY, Tay JH, Goh AT, "Reuse of incinerator fly ash in soft soil stabilization", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15 (4), 335-343.
- Stegemann JA, Zhou Q, "Screening tests for assessing treatability of inorganic industrial wastes by stabilisation/solidification with cement", *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161, 300-306.
- Song H, Wei L, Ji Y, Cao L, Cheng F, "Heavy metal fixing and heat resistance abilities of coal fly ash-waste glass based geopolymers by hydrothermal hot pressing", *Advanced Powder Technology*, 2018, 29, 1487-1492.
- Sun L, Luo K, Fan J, Lu H, "Experimental study of extracting alumina from coal fly ash using fluidized beds at high temperature", *Fuel*, 2017, 199, 22-27.
- Xu D, Li H, Bao W, Wang C, 2016, "A new process of extracting alumina from high-alumina coal fly ash in $\text{NH}_4\text{HSO}_4+\text{H}_2\text{SO}_4$ mixed solution", *Hydrometallurgy*, 2016, 165, 336-344.
- Yao ZT, Xia MS, Sarker PK, "A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China", *Fuel*, 2014, 120, 74-85.
- Yao ZT, Ji XS, Sarker PK, Tang JH, Ge LQ, Xia MS, Xi YQ, "A comprehensive review on the applications of coal fly ash", *Earth Science Reviews*, 2015, 141, 105-121.
- Yong, RN, Ouhadi, VR, Mohamed, AMO, "Physicochemical evaluation of failure of stabilized marl soil", *Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference Frontiers in Geotechnology*, 1996.
- Zha F, Liu S, Du Y, Cui K, "Behavior of expansive soils stabilized with fly ash", *Natural Hazards*, 2008, 47 (3), 509-523.
- Zhang Z, Qiao X, Yu J, "Aluminum release from microwave-assisted reaction of coal fly ash with calcium carbonate", *Fuel Process, Technology*, 2015, 134, 303-309.

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Interaction Process of Fly Ash and Clayey Soils with High Plasticity Index from Micro- Structural Point of View

Vahid Reza Ouhadi^{a,*}, Morteza Deiranlou^b, Pooria Rasouli^b

^a Faculty of Civil Engineering, Bu- Ali Sina University and School of Civil Eng., University of Tehran, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Bu- Ali Sina University, Iran

Received: 19 January 2019; **Accepted:** 040 November 2018

Keywords:

Fly Ash, Bentonite, USC, pH, XRD.

1. Introduction

Fly ash is a coal combustion product that is composed of the particulates (fine particles of burned fuel) (Dayioglul et al., 2017). In many countries fly ash is placed in landfills. Due to the vast production of this type of waste, the safe disposal of fly ash is one of the major concerns. One of the best methods to reduce the side effects of fly ash production is to re-use it in civil engineering projects (Horpibulsuk, et al., 2009). Due to the presence of Al and Si in fly ash, it shows pozzolanic properties (Phanikumar and Shankar, 2017). Therefore, in the recent years fly ash has been used in many soil stabilization or cement production projects. In spite of many researches which have focused on application of fly ash in soil stabilization, there are very limited attentions on the type of mechanism of soil- fly ash interaction (i.e. chemical or physical type). Therefore, the main objective of this paper is to investigate the interaction process of fly ash and clayey coils with high plasticity index from micro structural point of view. In other words, this paper aims to investigate on the dominant type of soil-fly ash interaction and to examine that in what extent this interaction is physical or chemical process. To achieve the above mentioned objectives series of Atterberg limits test, unconfined compression experiments, XRD testing, and digestion test were performed to address the above mentioned objectives.

2. Methodology

The bentonite sample is used in this research as the soil sample to investigate its interaction with fly ash. The fly ash sample of this study has the commercial name of Pozzoceret 100 which has obtained from India. The results of XRF analysis of fly ash are presented in Table 1.

Table 1. XRF analysis of fly ash.

Total	Zn, Pb, Rb, Sr,	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Component
100	0.7	0.3	0.2	0.2	0.8	1.2	1.6	1.7	3.4	34.5	55.4	%

Based on the results of Table 1, the alumina and silica are the dominant components of fly ash. In addition based on the ASTM standard (ASTM, 2015), the fly ash sample is classified as F type.

* Corresponding Author

E-mail addresses: vahidouhadi@yahoo.ca (Vahid Reza Ouhadi), m.deiranlou@yahoo.com (Morteza Diranlou), p.rasouliiii@gmail.com (Pooria Rasouli).

3. Results and discussion

Evaluation of the effect of fly ash on liquid limits and plasticity index variations of mixture of fly ash and bentonite shows that with an increase in fly ash content, the liquid limits and plasticity index of samples decreases. However, this reduction has a liner pattern and is a liner function of fly ash content. The evaluation of the results in 90 indicates that there has not been any noticeable change in atterberg limits of samples. Therefore, one may conclude that the pozzolanic interaction has not happened.

Fig. 1 indicates the variation of soluble cations concentrations extracted from fly ash at different pH. According to the results of this Figure, there are some specific environmental conditions in which the fly ash will be soluble. In such a case there is the required condition for formation of pozzolanic interaction. Otherwise, due to the insolubility of fly ash components, the impact of fly ash on soil performance will be only physical phenomenon.

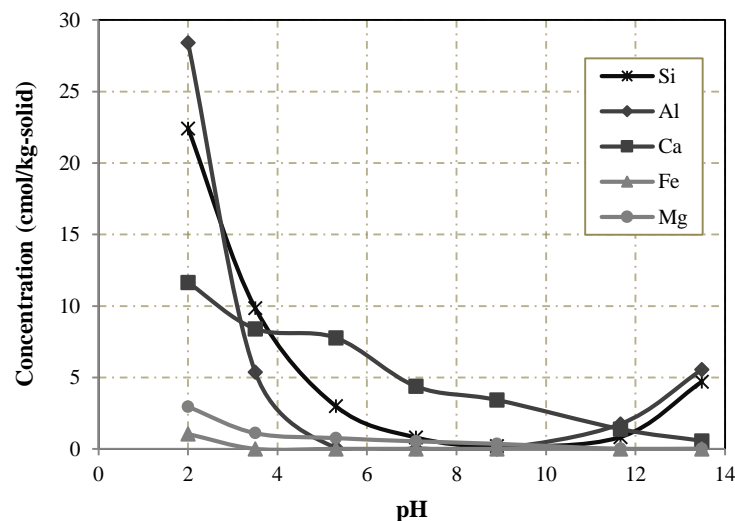


Fig. 1. Variation of soluble cations concentrations extracted from fly ash at different pH

4. Conclusions

Based on the experimental results of this research it is concluded that the extent of solubility of fly ash is dependent to pH variations. Therefore, at pH in which the quantity of dissolved ions is low, there is not any possibility for pozzolanic interaction. The results of XRD analysis also confirms that at this magnitude of pH in which no solubility of ions happens, the pozzolanic products such as CAH and CSH have not formed.

5. References

- American Society for Testing Materials, C618, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", ASTM International, 2015.
- Dayioglu M, Cetin B, Nam S, "Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives", Applied Clay Science, 2017, 146, 56-69.
- Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y, "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay", Soils and Foundations, 2009, 49 (1), 85-98.
- Phanikumar BR, Shankar MU, "Heave studies on fly ash-stabilized expansive clay liners", Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35 (1), 111-120.