

# بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان بر پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم یکسان

وحید پسرکلو<sup>۱</sup>، سید حمید لاجوردی<sup>۲\*</sup>، حسین ملاعباسی<sup>۳</sup>، سید محمد میرحسینی<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۳- استادیار، دانشکده فنی مهندسی مینودشت، دانشگاه گنبدکاووس و استاد مدعو دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- [prv\\_237@iaiu.ac.ir](mailto:prv_237@iaiu.ac.ir)

۲- [Sh.lajevardi@iaiu.ac.ir](mailto:Sh.lajevardi@iaiu.ac.ir)

۳- [hma@gonbad.ac.ir](mailto:hma@gonbad.ac.ir)

۴- [Mo.mirhosseini@iaiu.ac.ir](mailto:Mo.mirhosseini@iaiu.ac.ir)

چکیده:

هدف از این مطالعه بررسی خواص مکانیکی خاک لس تثبیت‌شده با لجن سوزانده‌شده خلیج گرگان در دمای بهینه ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (SPA) است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا SPA به ترتیب ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن خشک خاک لس جایگزین شد. نمونه‌های مورد مطالعه با انرژی یکسان (معادل آزمون پروکتور استاندارد) در درصد رطوبت‌های مختلف تهیه و بعد از ۵۶ روز عمل‌آوری در دستگاه‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم و تحکیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که افزودن SPA سبب بهبود مقاومت فشاری محصورنشده و مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خاک لس شد که این بهبود در ۱۰ درصد جایگزینی خاک با SPA بیشترین مقدار بوده است. همچنین با افزودن SPA، شاخص‌های فشردگی و بازفشرده‌گی خاک تثبیت‌شده به صورت قابل ملاحظه‌ای نسبت به خاک پایه کاهش یافته است.

واژگان کلیدی:

تثبیت لس، خاکستر لجن خلیج گرگان، مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت برشی، خصوصیات تحکیمی.

\* سید حمید لاجوردی، استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک.

ایمیل: [Sh.lajevardi@iaiu.ac.ir](mailto:Sh.lajevardi@iaiu.ac.ir) (نویسنده مسئول مقاله)

# Investigating the effect of Gorgan Bay's sludge ash on the mechanical parameters of Gorgan loess soil at different moisture content and the same compaction energy

V. Pesarakloo <sup>۱</sup>, S.H. Lajevardi <sup>۲</sup>, H. MolaAbasi <sup>۳</sup>, S.M. Mirhoseini <sup>۴</sup>

۱- PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran.

۲- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran.

۳- Assistant Prof., Faculty of Minoodasht Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran;

Invited Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran.

۴- Assistant Prof., Faculty of Civil Engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran.

## Abstract:

The objective of this study is to examine the mechanical properties of Gorgan loess enhanced with sludge pond ash (*SPA*) from Gorgan Gulf under different conditions. To achieve this, different proportions of *SPA* were mixed with the loess to obtain accurate findings on the efficacy of *SPA* addition on the unconfined compressive strength (*UCS*), cohesion (*C*), friction angle (*f*) compression (*C<sub>c</sub>*) and recompression (*C<sub>s</sub>*) index of the loess. Firstly, the sludge from a pond burned at ۱۰۰۰°C which was the optimal temperature determined by X-ray fluorescence analysis (*XRF*) was added to the mixture as ۰, ۲, ۴, ۶, ۸ and ۱۰% of the soil's dry weight, respectively. The studied samples were prepared with the same energy (equivalent to the standard Proctor test) at different moisture contents (۱۶, ۱۸, ۲۰, ۲۲, ۲۴, and ۲۶%) and were tested in unconfined compressive strength, direct shear and consolidation devices at ۵۶ days of curing in humid room with temperature ۲۴°C. It was found that adding *SPA* to the base soil increase the maximum strength measured in unconfined compressive strength which is define as unconfined compressive strength (*UCS*). On the other hand, it decreased with increasing moisture content. The addition of *SPA* as an additive material to the loess mixture was found to exert a significant effect on the shear strength properties (*C* and *f*) of the loess. The changes in moisture percentage for this test were not specific due to soil saturation and consolidation and did not have a great effect on the increase of shear strength parameters with the increase of *SPA*. Examining the graphs of the consolidation test shows that the addition of ۲% of *SPA* to the loess caused a noticeable decrease in the amount of *C<sub>c</sub>* of the sample under the test after processing. Increasing the amount of *SPA* up to ۱۰% caused a further decrease in the *C<sub>c</sub>* value of the samples. This trend is also noticeable for the re-compression index, which showed a greater intensity with the increase in the amount of *SPA*. Accordingly, adding *SPA* to the soil caused a sharp decrease in *C<sub>s</sub>* in the samples compared to the base soil. At the end, the results of macro -scale analyses collectively confirm the superior efficacy of the *SPA* replacement in enhancing various strength and stiffness properties of the loess.

**Keywords:** Loess stabilization, Gorgan Gulf's sludge ash, Unconfined compressive strength, Shear strength, Consolidation properties.

## ۱ - مقدمه

جدول ۱: خلاصه از نتایج اضافه کردن افزودنی‌های مرسوم به خاک لس

خلاصه نتایج	ماده افزودنی	محقق (مرجع)
افزایش سختی نمونه‌ها تا ۳ درصد افزودنی	آهک	حائری و همکاران [۲]، (۲۰۱۹)
افزایش مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌های ۳۰ روزه	سیمان	آنگلوا (۲۰۰۷)، [۳]
افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه	سیمان	ژنگ و همکاران [۴] (۲۰۱۷)
کارایی بیشتر سیمان نسبت به آهک	سیمان و آهک	وکیلی و همکاران [۵]

از دلایل تولید و انتشار زیاد  $CO_2$  این است که سنگ‌آهک و آلومینیوم سیلیکات، باید در دمای بسیار بالا قرار گیرد تا کلینگر تشکیل شود. یکی از عوامل اصلی این موضوع الیت ( $Ca_3SiO_5$ ) است که یک ماده معدنی و از فاکتورهای اصلی مقاومت اولیه سیمان است و در پروسه تشکیل کلینگر باید تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت ببیند که دمای بسیار زیادی است. [۸] از این‌رو، لزوم پژوهش بر روی تثبیت‌کننده‌های نوین و موادی که ضمن بر خورداری از کارایی لازم، دارای کم‌ترین اثرات مخرب زیست‌محیطی نیز باشند، بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از مصالح نوین که در طرح‌های بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از ماده دورریز خاکستر لجن رسوبات است. تولید خاکستر لجن رسوبات و سیمان در روند احتراق ناشی از سوخت فسیلی و تشکیل گاز  $CO_2$  مشترک بوده اما لجن رسوبات عموماً در زمان و دمایی کمتر از دمای تولید سیمان سوزانده می‌شوند. [۹] بنابراین جایگزینی سیمان با خاکستر لجن می‌تواند ردپای  $CO_2$  را کاهش دهد. در تحقیق حاضر، از خاکستر

خاک‌های فروریزشی و بخصوص خاک لسی، یکی از انواع گوناگون خاک‌های مسئله‌داری هستند که وجود آنها در برخی از مناطق کشور، از جمله استان‌های گلستان، سمنان، همدان، سیستان و بلوچستان و بخش‌هایی از خراسان و مازندران گزارش شده است. تغییرات فصلی رطوبت باعث ایجاد انقباض در این خاک‌ها شده که نتیجه آن، وارد آمدن خسارات جدی به سازه‌ها و صرف هزینه‌های هنگفت جهت تعمیر و بازسازی آنها است. برای نمونه می‌توان به آسیب‌های وارده به شالوده ساختمان‌های مسکونی، سازه‌های سبک و مدفون، بزرگراه‌ها، روسازی باند فرودگاه‌ها و خاکریزهای بناشده بر روی این خاک‌ها اشاره داشت.

متأسفانه، دانش امروزی در ارتباط با خاک‌های فروریزشی هنوز به مرحله‌ای نرسیده است که رویکردهای منطقی به مشکلات این خاک‌ها اختصاص داده شود. با این وجود، استعداد فروریزشی این خاک‌ها را می‌توان با به‌کارگیری روش‌هایی چون کنترل رطوبت، جایگزینی خاک مناسب، تثبیت شیمیایی و یا استفاده از شالوده‌های گسترده، نیمه‌عمیق و عمیق کاهش داد. [۱]

از میان روش‌های گوناگون اشاره‌شده، تثبیت شیمیایی یکی از بهترین و مؤثرترین شیوه‌های شناخته‌شده جهت تثبیت این خاک‌ها است. در حال حاضر تثبیت‌کننده‌های اصلی و عمده مورد استفاده در راه‌سازی و کاربری‌های ژئوتکنیکی، آهک و سیمان پرتلند و یا مخلوطی از آنها با مواد افزودنی دیگر است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج محققین در زمینه استفاده از سیمان و آهک در تثبیت خاک لس ارائه شده است.

تولید سیمان از منظر آلودگی زیست‌محیطی در رتبه دوم در بخش صنعت در جهان قرار دارد. تولید سیمان و آهک، ضمن مصرف مقادیر زیاد انرژی از اصلی‌ترین منابع تولید و انتشار مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن ( $CO_2$ ) است که حدود ۵ تا ۸ درصد از کل  $CO_2$  تولید شده ناشی از فعالیت صنعتی را تشکیل می‌دهد. [۶] برای ساخت هر تن سیمان، ۹۰۰ کیلوگرم  $CO_2$  تولید می‌شود که از این مقدار گاز تولیدشده، ۶۰ درصد آن سهم فرایند تولید و مابقی ۴۰ درصد آن سهم انرژی احتراق ناشی از سوختن سوخت فسیلی است. [۷]

حاصل از پسماند رسوبات خلیج گرگان (SPA)<sup>۱</sup>، به عنوان ماده جدید افزودنی به خاک لس، استفاده گردید.

به صورت خلاصه می توان مطالعات پیشین اثرات مربوط به استفاده از خاکستر لجن به همراه سایر مواد افزودنی بر خاک های ریزدانه را در جدول (۲) خلاصه کرد.

جدول ۲: مشخصات خاک تثبیت شده با خاکستر لجن و سایر افزودنی ها

نوع ماده افزودنی	خاک پایه	ملاحظات	منبع
خاکستر لجن	رس با خاصیت خمیری کم	OMC (+), MDD (-), UCS and STS up to PA=۴۰% (+), LWFMM (+), SF (-),	کومار و گوپتا [۱۰]، (۲۰۱۶)
خاکستر لجن و سیمان	رس با خاصیت خمیری کم	MDD (-), OMC (+), CBR up to PA=۴۰% (+)	گوپتا و کومار [۱۱]، (۲۰۱۷)
خاکستر لجن مسلح شده با الیاف	رس نرم	qu (+)	آرور و کومار [۱۲]، (۲۰۱۹)
خاکستر لجن	کائولین	OMC (+), MDD (-), UCS up to PA=۳۰% (+)	گوپتا و همکاران [۱۳]، (۲۰۱۹)
خاکستر لجن و ذرات آجر خرد شده	رس با خاصیت خمیری کم	LL (-), PI (-), MDD (-), OMC (+), CBR up to PA=۳۰% (+), Mr (+)	گوپتا و همکاران [۱۴]، (۲۰۲۰)
خاکستر لجن مخلوط شده با الیاف و آهک	خاکستر معدنی	CBR (+), Mr (+)	مویلی و همکاران [۱۵]، (۲۰۲۱)
خاکستر لجن	رس با خاصیت خمیری کم	OMC (+), MDD (-), UCS up to PA=۱۰% (+)	پسرکلو و همکاران [۱۶]، (۲۰۲۴)

یادداشت: (+) روند افزایشی، (-) روند کاهش، OMC (درصد رطوبت بهینه، MDD (بیشینه وزن مخصوص خشک، UCS (مقاومت فشاری محصور نشده)، STS (مقاومت کششی دو نیم شدن)، CBR (ظرفیت باربری کالیفرنیا)، LL (حد روانی)، PI (شاخص خمیری)، qu (ظرفیت باربری نهایی)، Mr (مدول بر جهندگی)، LWFMM (مصالح پرکننده سبک) و SF (کرنش گسیختگی).

امروزه نگرانی ها در ارتباط با ذخیره انرژی و منابع طبیعی، انتشار گاز دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>)، همچنین مدیریت تجمع رسوبات در تالاب ها، مخزن سدها و مجاری رودخانه های بزرگ در حال افزایش است. برای کاهش این نگرانی ها، تمامی حوزه های اقتصادی از جمله صنعت مصالح ساختمانی باید در راستای تحقق اهداف اشاره شده عمل نمایند.

رسوب نهشته های خاکی در خلیج گرگان، همچنین تولیدات روزافزون آن ها، موجب تجمع این لجن ها شده است. حجم بالای لجن ها، همچنین خطرهایی که این مواد برای محیط زیست و حیات جلنداران ایجاد کرده اند، توجه زیادی را از جلب گروه های مختلف جهت یافتن روشی مناسب برای دفع و یا استفاده مجدد از این مواد به خود جلب کرده است.

یکی از روش های مورد استفاده جهت کاهش حجم لجن های استخراجی از خلیج گرگان سوزاندن آن ها است. از مزایای سوزاندن این مواد، نه تنها تولید خاکستر قابل استفاده به عنوان مصالح ساختمانی است، بلکه از بین بردن آلاینده های آلی و تجمع آلاینده های غیر آلی در حجم محدود نیز است. این اقدام به حل مشکلات زیست محیطی ناشی از انباشته شدن این لجن ها کمک می کند.

در شکل (۱) به محدوده مطالعاتی شامل موقعیت خلیج گرگان و رسوبات نهشته شده اشاره شده است. خلیج گرگان بزرگ ترین خلیج دریای خزر است که بر اثر پیش روی و گسترش شرقی رشته ساحلی شبه جزیره ای میانکاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. وسعت خلیج گرگان حدود ۴۰۰ کیلومتر مربع است. خلیج گرگان کم عمق است به طوری که با در نظر گرفتن بالآمدگی آب، حداکثر عمق آن به ۴ متر و بطور متوسط حدود ۳ متر می رسد و از غرب به شرق تا حوالی ضلع جنوبی آشوراده به عمق آب افزوده می شود. فرایندهای فرسایش، انتقال رسوب و رسوب گذاری توسط عوامل هیدرودینامیکی نظیر امواج و نوسان های تراز دریا از یک طرف و آورد رسوب رودخانه ای و بادی از دیگر سو اهمیت خاصی به خلیج گرگان داده است. چهار گروه اصلی رسوب های ماسه ای، گلی،

۱ از این به بعد بجای عبارت خاکستر حاصل از پسماند رسوبات خلیج گرگان بدلیل اختصار از واژه خاکستر پسماند تالاب با نماد (SPA) استفاده می گردد.

جمع‌آوری حمل و تخلیه گردد؛ بنابراین پس از مدت کوتاهی به واسطه‌ی جریان‌های هیدرودینامیکی، مجدداً به خلیج برگشته و راهکار رسوب‌زدایی، تقریباً بی‌اثر بوده و نیازمند تکرار این عملیات خواهد بود. بارگیری و حمل زمینی نیز، نیازمند دسترسی به زمین‌های وسیع و در دسترس محل رسوب‌زدایی خواهد بود؛ بنابراین با توجه به عدم دسترسی به چنین مکان‌هایی، این روش هم روش مناسبی نخواهد بود و سبب بروز ریزگردها در منطقه خواهد شد. یکی از راه‌حل‌های ارائه‌شده در رفع مشکل‌های ناشی اشاره شده رسوب‌های خلیج گرگان، سوزاندن آن‌ها است. این روش باعث کاهش حجم قابل‌ملاحظه‌ای در رسوب‌ها می‌شود.

گل ماسه‌ای و ماسه گلی در خلیج گرگان انباشته شده‌است (شکل ۱ الف)). این انباشت رسوب‌ها، موجب بسته شدن کانال‌های انتقال آب در دهانه ورودی خلیج و پس‌روی آب و در نهایت خشکی دائمی خلیج گرگان شده است. به دلیل رسوب‌گذاری‌های صورت‌گرفته عمق خلیج گرگان در نقاط عمیق از حداکثر سه متر به یک و نیم متر کاهش یافته است (شکل ۱ پ، ت، ث و ج)).

بزرگ‌ترین معضل جمع‌آوری و رسوب‌زدایی خلیج گرگان، در وهله‌ی اول، حجم زیاد رسوب‌ها است که باید در مکانی مناسب تخلیه گردد. جمع‌آوری و حمل رسوب‌ها، هزینه‌های بسیار زیادی در پی خواهد داشت. به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد، این رسوب‌ها باید پس از جمع‌آوری و حمل دریایی، به فاصله‌ای نزدیک از محل



شکل ۱: محدوده تحقیق در این مقاله

## ۲- معرفی مصالح مورد استفاده و روش انجام آزمون

در این بخش به معرفی مصالح مورد استفاده، روند نمونه‌سازی و نحوه انجام آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم و تحکیم پرداخته شده است.

### ۲-۱- خصوصیات مواد و مصالح مورد استفاده

#### • لس گرگان

خاک مورد بررسی در این پژوهش از نوع لس بوده که از جنوب شهر گرگان تهیه گردید (شکل ۲ الف)). برای تعیین دانه‌بندی خاک مورد نظر، بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۲<sup>[۱۷]</sup> از روش تر استفاده شد، به این صورت که جهت تعیین درصد وزنی خاک عبور کرده از الک ۲۰۰ و تشخیص اولیه‌ی ریزدانه و یا درشت‌دانه بودن آن، ابتدا ۵۰۰ گرم خاک خشک روی الک ۲۰۰ با فشار مستقیم آب شسته شده تا جایی که آب خارج‌شده کاملاً شفاف گردید. در ادامه خاک به‌جای‌مانده بر الک ۲۰۰ در گرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۱۰ خشک و سپس وزن شد. نتیجه‌ی حاصله از آزمون بر خاک پلایه حاکی از آن است که بیش از ۹۷ درصد ذرات خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده است. منحنی حاصل از آزمون دانه‌بندی و هیدرومتری در شکل (۳) ارائه‌شده است. همچنین آزمون‌های حدود اتربرگ بر روی خاک پایه بر اساس استاندارد ASTM D۴۳۱۸<sup>[۱۸]</sup> انجام گردید که نتایج آن حاکی از حد روانی ۲۱ و شاخص خمیری ۶/۷ درصد است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون‌ها طبقه‌بندی خاک پایه باتوجه‌به روش متحد، طبق استاندارد ASTM D۲۴۸۷<sup>[۱۹]</sup> رس و لای با پلاستیسیته کم (CL-ML) است.

آزمون تراکم پروکتور استاندارد به روش A بر اساس استاندارد ASTM D۶۹۸<sup>[۲۰]</sup> جهت حصول منحنی تراکم نمونه خاک لس و تعیین درصد رطوبت بهینه و مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه خاک مورد استفاده در آزمون، انجام پذیرفت. نتایج آزمون تراکم استاندارد خاک پایه (لس) انجام‌شده در شکل (۴) ارائه‌شده و درصد رطوبت بهینه ۱۸ درصد و مقدار تراکم بیشینه خشک آن ۱۶/۷۷ کیلونیوتن بر مترمکعب بدست آمده است.

از سویی دیگر نواحی جنوبی و غربی شهرستان گرگان، سرشار از تپه‌های لسی است که عموماً مناسب ساخت‌وساز نبوده و بهتر است قبل از ساخت بنا روی این نوع خاک‌ها، تثبیت بستر صورت پذیرد (شکل ۱ ب))؛ بنابراین در این پژوهش به‌عنوان یک راهکار، از خاکستر به‌جامانده از سوختن رسوب‌های لجن خلیج گرگان، به‌عنوان یک ماده افزودنی جهت افزایش پارامترهای مقاومتی خاک لسی استفاده شده است. استفاده از مواد افزودنی نظیر سیمان و آهک، مستلزم استخراج منابع طبیعی است که پس از استخراج معادن، فرایند تولید این محصولات، نیازمند صرف انرژی، زمان و نیروی انسانی و به‌تبع آن ایجاد آلودگی زیست‌محیطی است؛ بنابراین با بکارگیری این رسوب‌ها، ضمن این که نیاز به استفاده از منابع طبیعی به‌عنوان ماده اولیه‌ی تولید محصول را کاهش خواهد داد، از انباشت مواد زاید و آلودگی‌های ناشی از این نهشته‌ها، جلوگیری به‌عمل خواهد آورد. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی رفتار مقاومتی برشی خاک لس تثبیت‌شده با SPA در طرح‌های بهسازی لایه‌های سطحی که کاربرد زیادی در راه‌سازی (لایه اساس و زیراساس) دارد، است. در این راستا از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم و تحکیم بروی مخلوط خاک و SPA با انرژی تراکم یکسان (باتوجه‌به کاربرد در راه‌سازی) و درصد رطوبت‌های متفاوت استفاده شده است. به‌صورت کلی موارد زیر را به‌عنوان نوآوری تحقیق در ارتباط با استفاده کردن SPA مدنظر است:

- معرفی SPA به‌عنوان جایگزین مواد افزودنی سنتی از جمله سیمان با توجه کاهش تولید گاز  $CO_2$ ، و در نتیجه کاهش اثر ردپای کربن در چرخه محیط‌زیست.
- ارائه راهکار برای کاهش هزینه‌های لایروبی به واسطه‌ی کاهش هزینه‌های حمل و نیز استفاده مجدد مصالح فراوری‌شده برای کاربرد در اهداف بهسازی خاک‌های لسی منطقه گرگان.
- امکان‌سنجی استفاده از مصالح فراوری‌شده‌ی بازیافتی در پروژه‌های بهسازی خاک مانند ساخت خاکریز، بسترسازی و نظایر آن.

• خاکستر لجن گرگان

در هوای آزاد خشک شده و سپس در کوره صنعتی در دماهای مختلف ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد سوزانده شد. برای سوزاندن نمونه‌های لجن از یک کوره صنعتی ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مجهز به کنترل دمای کوره (شکل ۲ پ)) استفاده شد.

شکل (۲ ب) لجن خلیج گرگان جمع‌آوری شده را نشان می‌دهد. یکی از اهداف این مطالعه تعیین دمای بهینه‌ای است که اکثر محصولات فرعی سیمانی حاصل از سوختن مواد معدنی و آلی را تولید می‌کند. بنابراین لجن گرفته‌شده از محل خلیج گرگان ابتدا



پ

ب

الف

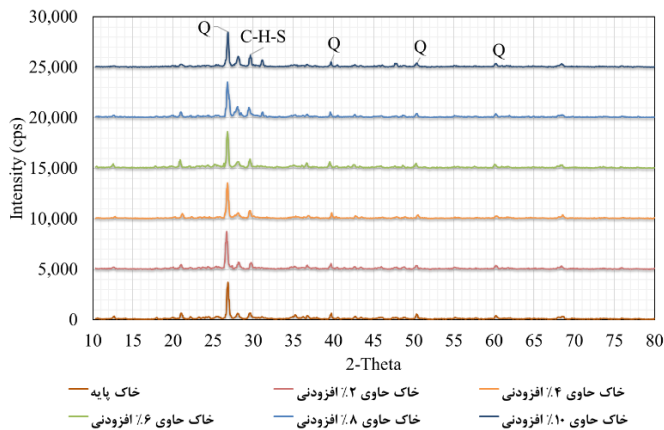


ث

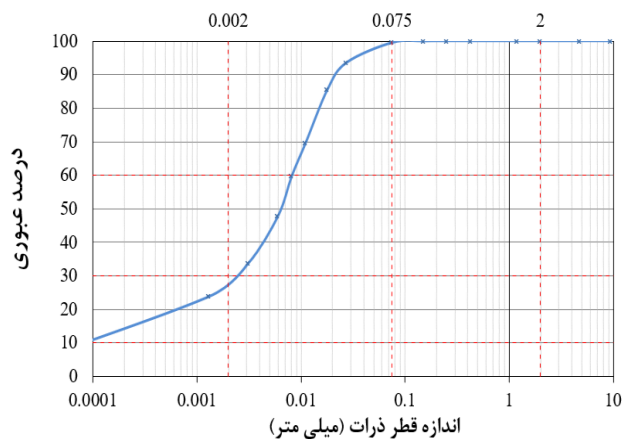
ت

شکل ۲: الف) خاک لس جمع‌آوری شده، ب) لجن‌های مورد استفاده، پ) کوره سوزاندن لجن، ت) تراکم نمونه‌ها، ث) عمل‌آوری نمونه‌ها

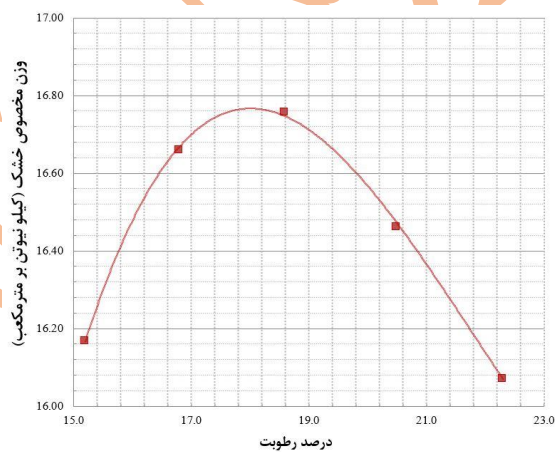
$Al_2O_3$  می‌توان انتظار داشت که واکنش‌های پوزولانی وابسته به زمان در مخلوط رخ دهد که باعث بهبود خواص مقاومتی خاک رس می‌شود. در این راستا در شکل (۵) منحنی آزمون طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس ( $XRD$ ) ارائه شده است. قله‌های نمودار مربوط به ژل  $C-S-H$  است و با افزایش دما مقادیر  $C-S-H$  موجود در  $SPA$  که محصولات سیمانی در جهت افزایش مقاومت است، بیشتر شده است.



شکل ۵: نتایج آزمون  $XRD$



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی خاک لس



شکل ۴: نتایج تراکم خاک پایه

جدول ۳: مشخصات اجزای شیمیایی مصالح- نتایج آزمون  $XRF$

	خاکستر		خاک لس
	لیجن	لیجن	
	۱۰۰۰°C	۵۰۰۰°C	۱۰۰۰°C
$P_2O_5$	۰,۳۳	۰,۳۲	۰,۲۴
$TiO_2$	۰,۷۷	۰,۸	۱,۱۴
$SiO_2$	۴۳,۵	۴۳,۳	۵۰,۸۵
$CaO$	۱۱	۱۰,۹	۸,۲۲
$Al_2O_3$	۱۳,۲۵	۱۴,۳۱	۴,۶۹
$K_2O$	۱,۸	۱,۹	۴,۳۳
$MgO$	۲,۸	۳,۱	۵,۲۵
$Cl$	۰,۳۲	۰,۳۱	۰,۱
$Na_2O$	۱,۳	۱,۲	۱,۵۴
$S$	۱,۶	۱,۷	۱,۱
$Fe_2O_3$	۸,۵	۹,۴	۸,۴۱
L.O.I	۱۴,۸۳	۱۲,۷۶	۱۴,۱۳

با استفاده از تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس ( $XRF$ )، اجزای شیمیایی ذرات مورد بررسی قرار گرفته و در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، تغییرات ذرات موثر در واکنش‌های سیمان و پوزولانی تولید شده از ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ناچیز بود با این حال، از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار  $CaO$  و  $SiO_2$  به ترتیب از ۱۱٪ و ۴۳٪ به ۱۸٪ و ۴۹٪ افزایش یافته است. بنابراین دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بهینه در نظر گرفته شد و تمام لجن‌ها در این دما سوزانده شده‌اند. با بررسی دقیق‌تر اطلاعات ارائه شده در جدول (۳) برای نمونه سوخته‌شده لجن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، مشاهده می‌شود که مقدار  $CaO$  حدود ۱۸ درصد است و امکان انجام واکنش‌های سیمانی و در نتیجه تشکیل محصولات  $C-S-H$  را دارد. همچنین، به دلیل وجود  $SiO_2$



دست‌نخورده با مشخصات اشاره‌شده در جدول (۴) برای هر آزمون پس از زمان عمل‌آوری مشخص شده، گرفته شد.

## ۲-۴- آزمون‌های آزمایشگاهی

### • مقاومت فشاری محصور نشده

این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D۲۱۶۶ [۲۱] انجام شده که نوع بخصوصی از آزمون سه‌محوری است. هدف از این آزمون تعیین مقاومت فشاری نمونه تحت فشار همه‌جانبه صفر است. سرعت بارگذاری در این آزمون به‌گونه‌ای تنظیم شد که در هر دقیقه ۱ درصد کرنش محوری در نمونه ایجاد گردد. به‌ازای تغییر شکل‌های معین، مقدار نیروی وارده یادداشت گردید. بارگذاری نیز تا زمانی که کرنش نمونه، به ۱۵٪ برسد ادامه یافت. در انتها بیشینه تنش فشاری اعمال شده به نمونه، به‌عنوان مقاومت فشاری محصورنشده تعیین گردید.

جدول ۴: مشخصات پارامترهای اندازه‌گیری شده

پارامتر	مقادیر
SPA	۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد
درصد رطوبت	۱۶، ۱۸/۵، ۲۱، ۲۳/۵ و ۲۶
زمان عمل‌آوری	۵۶ روزه
آزمون آزمایشگاهی	مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم و تحکیم
ابعاد نمونه‌ها به‌صورت دست‌نخورده حاصل از تراکم نمونه‌ها در قالب پروکتور	مقاومت فشاری محصورنشده (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر)، برش مستقیم (۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر به ارتفاع ۲۰ میلی‌متر) و تحکیم (قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر)
شرایط عمل‌آوری	کنترل‌شده در دمای ۲۴ درجه

### • برش مستقیم

آزمون برش مستقیم از جمله آزمون‌هایی است که برای تعیین پارامترهای مورد نیاز طراحی پی‌های سطحی تعیین مقاومت برشی منابع قرضه مصالح، بررسی لغزش و پایداری شیروانی‌ها و طراحی

پس از خنک‌شدن SPA، آن را در یک کیسه پلاستیکی دو زیپ قرار داده تا از تبادل رطوبت با محیط جلوگیری گردد. ذرات SPA کوچک‌تر از الک ۲۰۰ بوده و طبق سیستم طبقه‌بندی یکپارچه ASTM D۲۴۸۷ [۱۹] به‌عنوان لای با خاصیت خمیری کم (ML) طبقه‌بندی می‌شوند.

## ۲-۲- طرح اختلاط

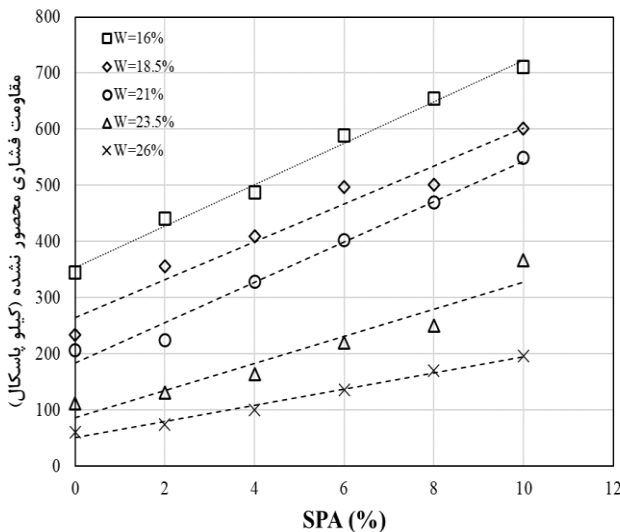
استفاده از SPA به‌عنوان جایگزین بخشی از خاک لس منجر به واکنش‌های شیمیایی می‌شود. اگر زمان عمل‌آوری در نظر گرفته شود، این تکنیک مؤثر خواهد بود. ترکیب‌های شیمیایی SPA (ذرات  $SiO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $CaO$ ) باعث توسعه فعالیت پوزولانی می‌شود. تمام پارامترهای در نظر گرفته‌شده در فرایند نمونه‌سازی و آزمون‌ها در جدول (۴) فهرست شده است. همان‌طوری که در جدول (۴) مشخص است درصد SPA ها ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد متغیر و درصدهای رطوبت نمونه‌ها از ۱۶ درصد تا ۲۶ درصد بوده که مطابق با مطالعات پیشین پسرک‌لو و همکاران ۲۰۲۴، [۱۶] مدنظر قرار گرفته است. همچنین شایان‌ذکر است که مطابق ادبیات فنی، بهترین زمان عمل‌آوری محصولات حاوی SPA، بین ۱۴ تا ۵۶ روز، بسته به درصد اختلاط و شرایط عمل‌آوری، متغیر است. [۱۶، ۱۱] بنابراین برای اطمینان از اتمام فعالیت‌های پوزولانی زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه ملاک قرار گرفته است.

## ۲-۳- روش ساخت نمونه

برای تولید نمونه‌های همگن، خاک طبیعی به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار داده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس از الک شماره ۴ عبور داده شد. خاک خشک شده طبق طرح اختلاط ذکر شده در جدول (۴) با آب و SPA مخلوط شد تا نمونه‌ای یکنواخت از نظر رنگ بدست آید. در این تحقیق فرض بر این است که انرژی تراکم نمونه‌ها یکسان است. بنابراین، تمام نمونه‌ها در قالب یک آزمون پروکتور استاندارد مطابق با انرژی آزمون اشاره‌شده متراکم شدند (شکل ۲ت). نمونه‌ها چندین بار با چسب ۵ سانتی‌متری پیچیده و در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (شکل ۲ث). نمونه‌های

### ۳- بحث و نتایج

نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌های متراکم شده با انرژی در شکل (۶) ارائه شده است. براین اساس، استحکام نمونه‌ها با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. میزان رطوبت خاک کمتر از رطوبت بهینه نمونه را می‌توان به غیراشباع بودن خاک و پتانسیل ماتریکی خاک نسبت داد که باعث افزایش مقاومت نمونه در خاک‌های رسی می‌شود. شایان ذکر است که بر اساس مطالعات قبلی پسرک‌لو و همکاران ۲۰۲۴، محدوده درصد رطوبت بهینه حاصل از آزمون تراکم استاندارد محدوده ۱۸ تا ۲۱ درصد است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۶) کاهش مشاهده شده در مقاومت فشاری محصورنشده با افزایش رطوبت با مطالعات قبلی خاک رسی توسط سنگ و تاناکا در سال ۲۰۱۱ مطابقت دارد. [۲۴] همچنین همانطور که خواجه و همکاران توضیح دادند، در رطوبت کمتر از حد رطوبت بهینه، مکش ماتریک خاک باعث افزایش تنش‌های تماس بین ذرات می‌شود که باعث افزایش استحکام می‌شود. [۲۵] همچنین شکل (۶) نشان می‌دهد که با افزایش *SPA* مقاومت فشاری محصورنشده افزایش می‌یابد که حاکی از تولید محصولات سیمانی و ایجاد پیوندهای سیمانی است.



شکل ۶: مقاومت فشاری محصورنشده لس بهسازی شده با SPA در درصد رطوبت‌های متفاوت

آزمون برش مستقیم از رایج‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی از جمله چسبندگی (C) و زاویه

دیوارهای حائل می‌توان از نتایج این آزمون بهره گرفت. این آزمون از لحاظ تئوری، برای به‌دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، از مدل موهر-کولمب بهره گرفته و با چند ساده‌سازی، به‌عنوان معیار گسیختگی برای خاک‌ها استفاده می‌شود.

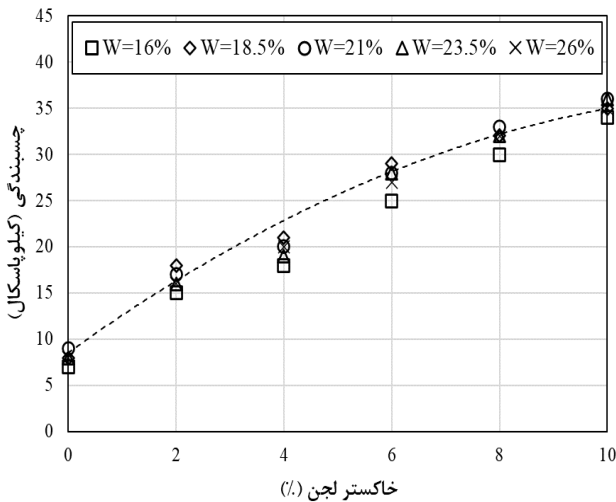
جهت انجام آزمون برش مستقیم بر اساس ASTM D3080، [۲۲] پس از اشباع‌سازی نمونه‌ها به مدت حداقل ۲۴ ساعت، تحت اثر سربرار نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و نیروی افقی به‌صورت آهسته و با سرعت ثابت ۰/۰۰۷ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه‌ها اعمال شد.

#### • تحکیم یک‌بعدی

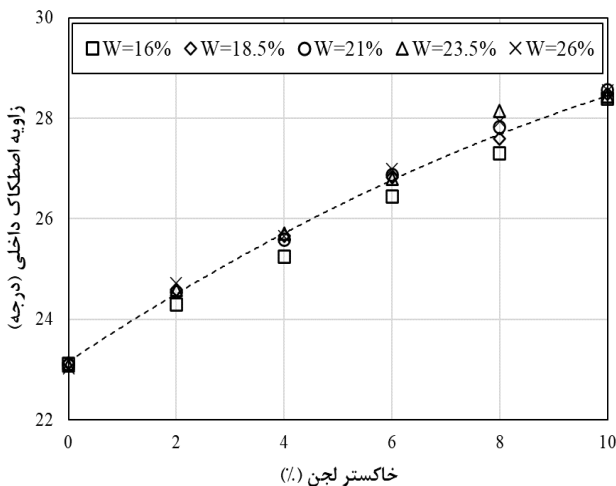
در هنگام بارگذاری خاک اشباع، تمام بار وارده به‌وسیله‌ی آب حفره‌ای تحمل می‌گردد که در نتیجه سبب افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. اما به‌مرور زمان حجم خاک به دلیل زایل شدن فشار آب حفره‌ای، حجم خاک کاهش می‌یابد. مقدار این تغییر حجم خاک بر اثر بارگذاری به پارامتر نفوذپذیری خاک مرتبط است که به همین دلیل عموماً آزمون تحکیم بر خاک‌های ریزدانه که نفوذپذیری کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارند، انجام می‌پذیرد. این آزمون روشی برای به‌دست آوردن و ارزیابی پارامترهای تحکیم تک‌بعدی ترزاقی مانند نشانه فشردگی ( $C_c$ ) و بازفشرده‌گی ( $C_s$ ) انجام می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که پتانسیل فروریزی خاک لس در این تحقیق مورد مطالعه قرار نگرفته است. دلیل این مطلب این است که *SPA* به روش اختلاط مکانیکی با خاک لس مخلوط شده و ساختار خاک فروریزی لس در اثر اختلاط و تراکم، از بین می‌رود.

برای آزمون تحکیم بر اساس استاندارد ASTM D2435، [۲۳] نمونه بین دولایه سنگ متخلخل در استوانه اشباع قرار گرفته و درون آن از آب پر می‌گردد. پس از اشباع‌سازی نمونه‌ها درون استوانه دستگاه تحت بارگذاری‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۶۰۰ و باربرداری‌های ۴۰۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفتند که تغییر حجم‌های حاصله در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ... دقیقه تا ۲۴ ساعت قرائت گردید.

اصطکاک داخلی ذرات خاک (f) است. در شکل‌های (۷ و ۸) تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس تغییرات رطوبت آمده است. چنانچه از شکل‌ها مشخص است تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با درصد رطوبت محسوس نیست که مزید بر علت آن مقاومت یکسان پیوندهای تشکیل‌شده در درصد رطوبت‌های متفاوت به واسطه اشباع‌سازی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون است. شکل‌های (۹ و ۱۰) نیز تغییرات مقادیر  $C$  و  $f$  نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف SPA را نشان می‌دهند.

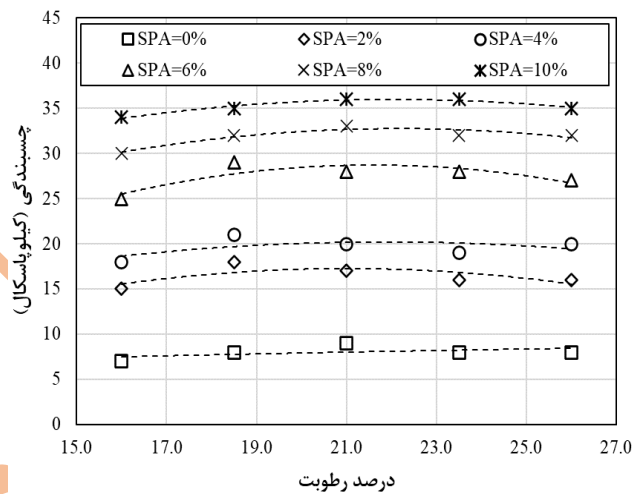


شکل ۹: تغییرات چسبندگی در ازای SPA های مختلف

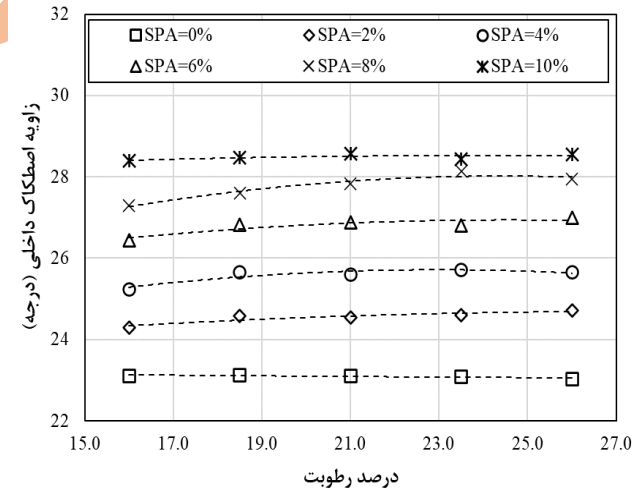


شکل ۱۰: تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در ازای SPA های مختلف

باتوجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که افزایش مقدار SPA سبب به‌وجود آمدن روندی افزایشی در مقدار  $C$  نمونه‌های تثبیت‌شده گردید. با مشاهده و ارزیابی شکل (۱۰) نشان می‌دهد که تغییرات پارامتر  $f$  در نمونه‌های تثبیت‌شده روندی مشابه تغییرات پارامتر  $C$  را از خود نشان دادند، اما شدت این تغییرات به‌مراتب کمتر از پارامتر  $C$  بود. رفتار مشابه روند افزایشی در پارامترهای  $C$  و  $f$  با افزودن مواد پوزولانی خاکستر سبوس برنج و ضایعات کرید کلسیم به خاک رس در پژوهش بابو و همکارانش نیز مشاهده گردیده است. افزایش مقادیر پارامترهای  $C$  و  $f$  با افزودن و افزایش

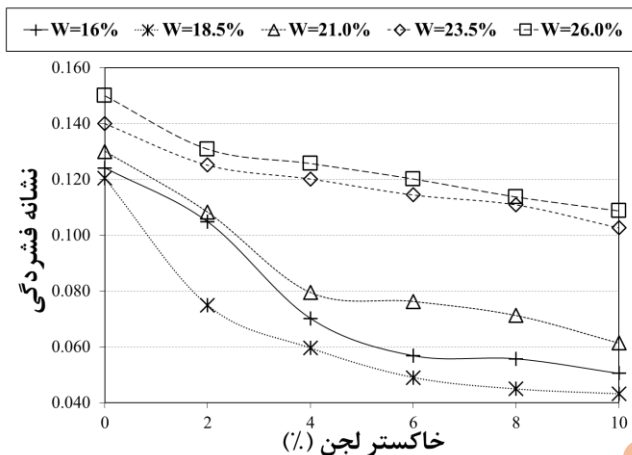


شکل ۷: تغییرات چسبندگی در ازای درصد رطوبت‌های مختلف

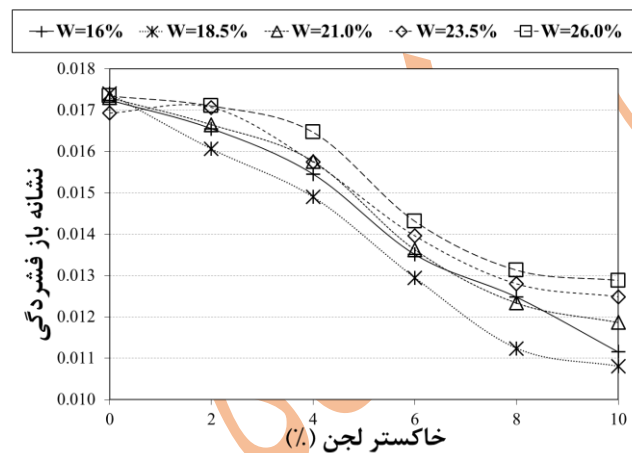


شکل ۸: تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک در ازای رطوبت‌های مختلف

بررسی این شکل نشان می‌دهد که افزودن ۲ درصد SPA به خاک لس سبب کاهش محسوس در مقدار  $Cc$  نمونه تحت آزمون پس از عمل‌آوری گردید. افزایش مقدار SPA تا مقدار ۱۰ درصد سبب کاهش بیشتر مقدار  $Cc$  نمونه‌ها شد. خواجه و همکارانش نیز کاهش شاخص فشردگی در خاک رس نرم تثبیت‌شده با سیمان را گزارش نمودند. در پژوهش آن‌ها، افزایش مقدار سیمان نیز سبب کاهش بیشتر شاخص فشردگی گردید.



شکل ۱۲: تغییرات شاخص فشردگی با درصد SPA

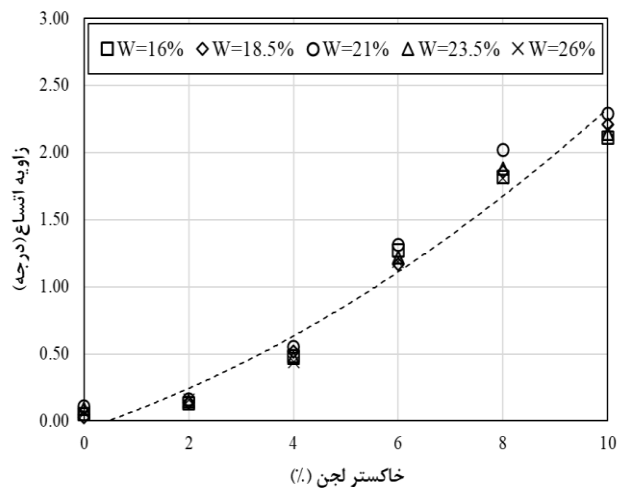


شکل ۱۳: تغییرات شاخص بازفشردگی با درصد SPA

شکل (۱۳) تغییرات شاخص تورم ( $C_s$ ) نمونه‌های تثبیت‌شده با SPA و درصد رطوبت را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، پارامتر  $C_s$  در نمونه‌های تثبیت‌شده با SPA کاهش یافت. این کاهش با افزایش مقدار SPA شدت بیشتری از خود نشان داد.

در مقدار SPA پس از عمل‌آوری به دلیل تولید ژل‌های  $C-S-H$  در فرایند هیدراتاسیون و افزایش مقدار آن به نسبت افزایش مقدار این افزودنی است. [۲۶]

همچنین در شکل (۱۱) تغییرات زاویه اتساع که حاصل تفاضل زاویه اصطکاک بیشینه و حالت بحرانی است ارائه شده است. به عبارت دیگر زاویه اصطکاک بحرانی، از تنش برشی مربوط به گام‌های آخر بارگذاری در آزمون برش مستقیم (جایی که تقریباً ضمن اعمال کرنش ثابت، تنش برشی مقداری تقریباً ثابت دارد) تعیین گردیده است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است با افزایش درصد SPA مقدار زاویه اتساع افزایش یافته که نشان از رفتار ترد و شکننده نمونه‌ها است. به بیانی دیگر، با افزایش میزان SPA هم زاویه اصطکاک بیشینه و هم زاویه اصطکاک حالت بحرانی افزایش می‌یابند ولی سرعت افزایش زاویه اصطکاک داخلی بیشینه نسبت به حالت بحرانی بیشتر است. همچنین باید اضافه کرد که درصد رطوبت، پارامتر بسیار تعیین‌کننده‌ای در رفتار اتساعی خاک تثبیت شده با SPA نیست.



شکل ۱۱: تغییرات زاویه اتساع در برابر مقادیر مختلف SPA

از آزمون تحکیم جهت ارزیابی پارامترهای سختی و سرعت نشست سازه‌ها بهره‌گیری می‌شود. این نتایج تابعی از مقدار بارگذاری و چگونگی گام‌های آن و تداوم زمانی این بارگذاری‌ها است. شکل (۱۲) تغییرات شاخص فشردگی ( $C_c$ ) را برحسب تغییرات SPA و مقدار درصد رطوبت‌های گوناگون نشان می‌دهد.

#### ۴ - نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از ماده بازیافتی خاکستر لجن بدست آمده از خلیج گرگان به عنوان جایگزین بخشی از خاک پایه در بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک لس گرگان پرداخته شده است. استفاده از این ماده ی آهکی خاکستر لجن سبب کاهش مصرف سیمان در طرح های بهسازی خاک های لسی می گردد که هم از لحاظ زیست محیطی و هم از جنبه ی اقتصادی حائز اهمیت است. جهت بررسی تأثیرات جایگزینی خاکستر لجن در رفتار ژئوتکنیکی خاک لس فروریزشی از آزمون های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم و تحکیم بهره گرفته شد. در ادامه نتایج حاصل از این آزمون ها ارائه می گردد.

- با افزایش درصد رطوبت، مقاومت فشاری محصورنشده نمونه کاهش می یابد.

- افزایش افزودنی تا ۱۰ درصد سبب بروز روند افزایشی محسوس در مقدار  $C$  پس از ۵۶ روز عمل آوری شد.

- زاویه اصطکاک داخلی در این نمونه ها نیز روندی مشابه تغییرات پارامتر چسبندگی در زمان های عمل آوری ۵۶ روزه از خود نشان داد، اما شدت تغییرات آن کمتر از چسبندگی بود.

- افزایش ماده افزودنی در خاک لس سبب کاهش محسوس در مقدار  $C_c$  و  $C_s$  نمونه ها پس از ۵۶ روز عمل آوری شد.

- در مقایسه با نمونه ی پایه، به طور کلی حضور خاکستر لجن خلیج گرگان در ترکیب، سبب کاهش مشهود شاخص فشردگی گردید.

در انتها انجام سایر آزمون های استاتیکی و دینامیکی مقاومتی از جمله سه محوری و برش ساده برای بررسی دقیق تر اثر افزودن SPA به خاک لسی پیشنهاد می شود.

#### منابع

- collapsible loess. I: experimental investigations. International journal of geomechanics, ۱۹(۴), pp. ۰۴۰۱۹۰۰۶. doi.org/۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)GM.۱۹۴۳-۵۶۲۲,۰۰۰۱۳۶۴.
۳. Angelova, R.N., ۲۰۰۷. Loess-cement long-term strength-a facilitating factor for loess improvement applications. *Geologica Balcanica*, ۳۶(۳-۴), pp. ۲۱-۲۴. doi.org/۱۰.۵۲۳۲۱/GeolBalc.۳۶,۳-۴,۲۱
۴. Zhang, C.L., Jiang, G.L., Su, L.J. and Zhou, G.D., ۲۰۱۷. Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science*, ۱۴(۱۱), pp. ۲۳۲۵-۲۳۳۶. doi.org/۱۰.۳۳۹۰/geotechnics۳۰۲۰۰۱۰.
۵. Vakili, A.H., Selamat, M.R. and Moayedi, H., ۲۰۱۳. Effects of using pozzolan and portland cement in the treatment of dispersive clay. *The Scientific World Journal*, ۲۰۱۳. doi.org/۱۰.۱۱۵۵/۲۰۱۳/۵۴۷۶۱۵.
۶. Boden, T., Marland, G. and Andres, R.J. ۲۰۱۸ Global carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement production. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), OKA Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. <https://energy.appstate.edu/CDIAC>. doi.org/۱۰.۵۱۹۴/essd-۱۳-۱۶۶۷-۲۰۲۱.
۷. Ke, J., McNeil, M., Price, L., Khanna, N.Z. and Zhou, N. ۲۰۱۳. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions from China's cement production: methodologies and uncertainties. *Energy Policy* ۵۷: PP. ۱۷۲-۱۸۱. doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.enpol.۲۰۱۳.۰۱.۰۲۸.
۸. Amato, I. ۲۰۱۳. Green cement: Concrete solutions. *Nature*. ۴۹۴ (۷۴۳۷): PP. ۳۰۰-۳۰۱. doi: ۱۰.۱۰۳۸/۴۹۴۳۰۰a. PMID ۲۳۴۲۶۳۰۷.
۹. Alijani, R. A., and Noorzad, R. ۲۰۱۹. Effectiveness of sludge ash of wood and paper mill as nontraditional additive for clayey soil treatment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۳۱(۱۰), ۰۴۰۱۹۲۳۰. doi.org/۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)MT.۱۹۴۳-۵۵۳۳,۰۰۰۲۸۷.
۱۰. Kumar, A. and Gupta, D., ۲۰۱۶. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes*, ۴۴(۳), pp. ۴۶۶-۴۷۴.

18. ASTM, D 4318-10, 2005. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. doi.org/10.1520/D4318-10E.1.
19. ASTM, D2487-17, 2017, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). doi.org/10.1520/D2487-17.
20. ASTM, D698 - 12, 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (900 kN-m/m<sup>3</sup>)). doi.org/10.1520/D698-12R21.
21. ASTM, D2166-06, 2006, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. doi.org/10.1520/D2166-06.
22. ASTM, D3080-04, 2004, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. doi.org/10.1520/D3080\_D3080M-11.
23. ASTM, D2435, 2004, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. doi.org/10.1520/D2435-04.
24. Seng, S. and Tanaka, H., 2012. Properties of very soft clays: A study of thixotropic hardening and behavior under low consolidation pressure. *Soils and Foundations*, 52(2), pp.335-345. doi.org/10.1016/j.sandf.2012.02.010.
25. Khajeh, A., Chenari, R.J., Payan, M. and MolaAbasi, H., 2023. Assessing the effect of lime-zeolite on geotechnical properties and microstructure of reconstituted clay used as a subgrade soil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 132, p.103501. doi.org/10.1016/j.pce.2023.103501.
26. Babu, J.S., Thimothy, R.S.W., Shantharam, Y., Arun, M. and Sivakumar, T., 2023, June. Enhancing the compaction properties of frictional-cohesive soil by adding the industrial ash products. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2782, No. 1). AIP Publishing. doi.org/10.1063/5,0155191.
- doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.07.010.
11. Gupta, D. and Kumar, A., 2017. Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ash-clay mixture as a highway construction material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(1), pp.159-169. doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010.
12. Arora, S. and Kumar, A., 2019. Bearing capacity of square footing resting on fibre-reinforced pond ash overlying soft clay. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, pp.1-11. doi.org/10.1007/s40891-019-0155-0.
13. Gupta, D., Kumar, A., Kumar, V., Priyadarshee, A. and Sharma, V., 2019. Performance of pond ash and rice husk ash in clay: a comparative study. In *Recycled Waste Materials: Proceedings of EGRWSE 2018* (pp. 145-153). Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-13-7017-5\_17.
14. Gupta, G., Sood, H. and Gupta, P., 2020. Performance evaluation of pavement geomaterials stabilized with pond ash and brick kiln dust using advanced cyclic triaxial testing. *Materials*, 13(3), p.553. doi.org/10.3390/ma13030553.
15. Mogili, S., Mudavath, H. and Gonavaram, K.K., 2021. Effect of Stabilization on Geomechanical Properties of Pond Ash for Pavement Subbase Application. In *Transportation, Water and Environmental Geotechnics: Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020 Volume 4* (pp. 177-187). Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-16-2260-1\_17.
16. Pesarakloo, V., Lajevardi, S.H., MolaAbasi, H. and Mirhosseini, S.M., 2024. Potential application of sludge pond ash as a novel additive for clay stabilization. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 133, p.103534. doi.org/10.1016/j.pce.2023.103534.
17. ASTM, D422. 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils. doi.org/10.1520/D422-07R09E.1.