Sharif Civil Engineering Journal (2025), **41**(2), 114-123

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

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

Vahid Pesarakloo [1], Seyed Hamid Lajevardi [*1], Hosein MolaAbasi [2] and Seyed mohammad Mirhoseini

[1]Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
[2] Department of Civil Engineering, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Iran
* corresponding author:(Sh.lajevardi@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 15 April 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 7 July 2024

Keywords:

Loess stabilization,
Gorgan Gulf's sludge ash,
unconfined compressive strength,
shear strength,
consolidation properties.

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 (*Cc*), and recompression (*Cs*) index of the loess. Firstly, the sludge from a pond burned at 1000°C, which was the optimal temperature determined by X-ray fluorescence analysis (*XRF*), was added to the mixture as 0, 2, 4, 6, 8, and 10% 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 (16, 18.5, 21, 23.5, and 26%) and were tested in unconfined compressive strength, direct shear, and consolidation devices at 56 days of curing in a humid room with a temperature of 24$^{°C}$. It was found that adding *SPA* to the base soil increases the maximum strength measured in unconfined compressive strength, which is defined 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 2% of *SPA* to the loess caused a noticeable decrease in the amount of *Cc* of the sample under the test after processing. Increasing the amount of *SPA* up to 10% caused a further decrease in the *Cc* 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 *Cs* 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.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors contribution statement

Vahid Pesarakloo: Investigation, Methodology, Writing-Original draft, Experimentation, Data curation.
Seyed Hamid Lajevardi: Supervision, Conceptualization, Methodology, Technical support, Reviewing, Final Editing.
Hosein MolaAbasi: Methodology, Technical support, Reviewing.
S.M. Mirhoseini: Reviewing.

To Cite this article:
Pesarakloo, V., Lajevardi, S.H., Mola Abasi, H. and Mirhoseini, S.M. 2025. 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, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(2), 114-123. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64158.3314

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

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

وحید پسرکلو [۱]، سید حمید لاجوردی [*۱]، حسین ملاعباسی [۲] و سید محمد میرحسینی [۱]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

[۲] گروه مهندسی عمران، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، ایران

[*] نویسنده مسئول (Sh.lajevardi@iau.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

واژگان کلیدی:

تثبیت لس،

خاکستر لجن خلیج گرگان،

مقاومت فشاری محصورنشده،

مقاومت برشی،

خصوصیات تحکیمی.

چکیده

هدف از مطالعه‌ی حاضر، بررسی خواص مکانیکی خاک لس تثبیت‌شده با لجن سوزانده‌شده‌ی خلیج گرگان در دمای بهینه‌ی ۱۰۰۰ درجه‌ی 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 شده است. نمونه‌های مطالعه‌شده 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 بررسی شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن SPA سبب بهبود مقاومت فشاری محصورنشده و مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی) خاک لس شده است، که این بهبود در ۱۰٪ جایگزینی خاک با SPA، بیشترین مقدار بوده است. همچنین با افزودن SPA، شاخص‌های فشردگی و بازفشردگی خاک تثبیت‌شده به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به خاک پایه کاهش یافته است.

۱. مقدمه

خاک‌های فروریزشی و به خصوص 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 رطوبت باعث ایجاد انقباض در این خاک‌ها شده است؛ که نتیجه‌ی آن، وارد‌آمدن خسارت‌های جدی به سازه‌ها و صرف هزینه‌های هنگفت جهت تعمیر و بازسازی آن‌هاست. برای نمونه می‌توان به آسیب‌های وارده به شالوده‌ی ساختمان‌های مسکونی، سازه‌های سبک و مدفون، بزرگراه‌ها، روسازی باند فرودگاه‌ها، و خاکریزهای بناشده بر روی خاک‌های مذکور اشاره داشت. با وجود این، استعداد فروریزشی خاک‌های فروریزشی 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 خاک‌های فروریزشی است. در حال حاضر، تثبیت‌کننده‌های اصلی و عمده‌ی استفاده‌شده در راه‌سازی و کاربری‌های ژئوتکنیکی، آهک، سیمان پرتلند، و یا مخلوطی از آن‌ها با مواد افزودنی دیگر هستند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج پژوهشگران در زمینه‌ی استفاده از سیمان و آهک در تثبیت خاک لس ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج اضافه کردن افزودنی‌های مرسوم به خاک لس.

Researcher (reference)	Summary of results	Additive
Haeri et al. (2019),[2]	Increasing the stiffness of samples by up to 3% additive	Lime
Angelova (2007),[3]	Increase in unconfined compressive strength of 30-day specimens	Cement
Zhang et al. (2017),[4]	California's bearing capacity increases in 14-day during time	Cement
Vakili et al. (2013),[5]	More efficiency of cement than lime	Lime & Cement

استناد به این مقاله:

پسرکلو، وحید، لاجوردی، سیدحمید، ملاعباسی، حسین و میرحسینی، سیدمحمد، ۱۴۰۴. بررسی اثر خاکستر لجن خلیج گرگان در پارامترهای مکانیکی خاک لس گرگان در درصد رطوبت‌های متفاوت و انرژی تراکم یکسان. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۲)، صص.۱۱۴-۱۲۳. https://doi.org/10.24200/j30.2024.64158.3314

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

از دلایل تولید و انتشار زیاد CO_2 این است که سنگ‌آهک و آلومینیوم سیلیکات، باید در دمای بسیار بالا قرار گیرند، تا کلینکر تشکیل شود؛ که یکی از عوامل اصلی آن، الیت (Ca_3SiO_5) است، که یک ماده‌ی معدنی و از عوامل اصلی مقاومت اولیه‌ی سیمان است و در پروسه‌ی تشکیل کلینکر باید تا ۱۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حرارت ببینند، که دمای بسیار زیادی است.[۸] لذا، لزوم پژوهش بر روی تثبیت‌کننده‌های نوین و موادی که ضمن داشتن کارایی لازم، کمترین آثار مخرب زیست‌محیطی را نیز داشته باشند، بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از مصالح نوین، که در طرح‌های بهسازی استفاده می‌شود، به‌کارگیری ماده‌ی دورریز خاکستر لجن رسوب‌هاست. تولید خاکستر لجن رسوب‌ها و سیمان در روند احتراق ناشی از سوخت فسیلی و تشکیل گاز CO_2 مشترک بوده است، اما لجن رسوب‌ها 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 پژوهش حاضر، از خاکستر حاصل از پسماند رسوب‌های خلیج گرگان (SPA)[1]، به عنوان ماده‌ی جدید افزودنی به خاک لس استفاده شده است. به‌صورت خلاصه می‌توان مطالعات پیشین آثار مربوط به استفاده از خاکستر لجن به همراه سایر مواد افزودنی بر خاک‌های ریزدانه را در جدول ۲ خلاصه کرد.

یادداشت: (+) (روند افزایشی)، (-) (روند کاهشی)، OMC (درصد رطوبت بهینه)، MDD (بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک)، UCS (مقاومت فشاری محصورنشده)، STS (مقاومت کششی دونیم‌شدن)، CBR (ظرفیت باربری کالیفرنیا)، LL (حد روانی)، PI (شاخص خمیری)، q_u (ظرفیت باربری نهایی)، Mr (مدول برجهندگی)، LWFM (مصالح پُرکننده‌ی سبک)، وSF (کرنش گسیختگی).

امروزه نگرانی‌ها در ارتباط با ذخیره‌ی انرژی و منابع طبیعی، انتشار گاز دی‌اکسیدکربن (CO_2)، همچنین مدیریت تجمع رسوب‌ها در تالاب‌ها، مخزن سدها، و مجاری رودخانه‌های بزرگ در حال افزایش است. برای کاهش این نگرانی‌ها، تمامی حوزه‌های اقتصادی از جمله صنعت مصالح ساختمانی باید در راستای تحقق اهداف اشاره‌شده عمل کنند.

رسوب نهشته‌های خاکی در خلیج گرگان، همچنین تولیدات روزافزون آن‌ها، موجب تجمع این لجن‌ها شده است. حجم بالای لجن‌ها، همچنین خطرهایی که آن‌ها برای محیط‌زیست و حیات جانداران ایجاد کرده‌اند، توجه زیادی را از جانب گروه‌های مختلف جهت یافتن روشی مناسب برای دفع و یا استفاده‌ی مجدد از آن‌ها را به خود جلب کرده است.

یکی از روش‌های استفاده‌شده جهت کاهش حجم لجن‌های استخراجی از خلیج گرگان، سوزاندن آن‌هاست. از مزایای سوزاندن این مواد، نه فقط تولید خاکستر قابل‌استفاده به‌عنوان مصالح ساختمانی است، بلکه از بین‌بردن آلاینده‌های آلی و تجمع آلاینده‌های غیرآلی در حجم محدود نیز است. این اقدام به حل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انباشته‌شدن لجن‌های مذکور کمک می‌کند.

در شکل ۱، به محدوده‌ی مطالعاتی شامل موقعیت خلیج گرگان و رسوب‌های نهشته‌شده اشاره شده است. خلیج گرگان بزرگ‌ترین خلیج دریای خزر است،

جدول ۲. مشخصات خاک تثبیت‌شده با خاکستر لجن و سایر افزودنی‌ها.

Researcher (reference)	Summary of results	Base soil	Additive
Kumar & Gupta (2016),[10]	OMC(+), MDD(-), UCS and STS up to PA=40%(+), LWFM(+), SF(-)	CL-ML	Sludge ash
Gupta & Kumar (2017),[11]	MDD(-), OMC(+), CBR up to PA=40%(+)	CL-ML	Sludge ash & cement
Arora & Kumar (2019),[12]	q_u(+)	CL	Fiber-reinforced sludge ash
Gupta et al. (2019),[13]	OMC(+), MDD(-), UCS up to PA=30%(+)	CL	Sludge ash
Gupta et al. (2020),[14]	LL(-), PI(-), MDD(-), OMC(+), CBR up to PA=30%(+), Mr(+)	CL-ML	Sludge ash & crushed brick pieces
Mogili et al. (2021),[15]	CBR(+), Mr(+)	Coal Ash	Fiber & Lime
Pesarakloo et al. (2024),[16]	OMC(+), MDD(-), UCS up to PA=10%(+)	CL-ML	Sludge ash



شکل ۱. (الف) محدوده‌ی جغرافیایی پژوهش حاضر، (ب) کاهش عمق خلیج به‌دلیل رسوب‌گذاری، (ج) لایروبی خلیج.

[1] از این به بعد به جای عبارت خاکستر حاصل از پسماند رسوب‌های خلیج گرگان به‌دلیل اختصار از واژه‌ی خاکستر پسماند تالاب با نماد (SPA) استفاده می‌شود.

که بر اثر پیشروی و گسترش شرقی رشته‌ی ساحلی شبه جزیره‌ی میانکاله در جنوب شرقی دریای خزر تشکیل شده است. وسعت خلیج گرگان حدود ۴۰۰ کیلومترمربع است. خلیج گرگان کم‌عمق است، به‌طوری‌که با درنظرگرفتن بالاآمدگی آب، بیشینه‌ی عمق آن به ۴ متر و به‌طور متوسط حدود ۳ متر می‌رسد و از غرب به شرق تا حوالی ضلع جنوبی آشوراده به عمق آب افزوده می‌شود. فرایندهای فرسایش، انتقال رسوب، و رسوب‌گذاری توسط عوامل هیدرودینامیکی نظیر امواج و نوسان‌های تراز دریا از یک طرف و آورد رسوب رودخانه‌ای و بادی از دیگر سو، اهمیت خاصی به خلیج گرگان داده است. چهار گروه اصلی رسوب‌های ماسه‌ای، گلی، گل ماسه‌ای، و ماسه‌ی گلی در خلیج گرگان انباشته شده‌اند (شکل ۱- الف)، که موجب بسته‌شدن کانال‌های انتقال آب در دهانه‌ی ورودی خلیج و پسروی آب و درنهایت خشکی دائمی خلیج گرگان شده‌اند. به‌دلیل رسوب‌گذاری‌های صورت‌گرفته، عمق خلیج گرگان در نقاط عمیق از بیشینه‌ی ۳ متر به ۱/۵ متر کاهش یافته است (شکل ۱- ب و ج).

بزرگ‌ترین معضل جمع‌آوری و رسوب‌زدایی خلیج گرگان، در وهله‌ی اول، حجم زیاد رسوب‌هاست، که باید در مکانی مناسب تخلیه شوند. جمع‌آوری و حمل رسوب‌ها، هزینه‌های بسیار زیادی در پی خواهد داشت. به دلیل هزینه‌های بسیار زیاد، رسوب‌ها باید پس از جمع‌آوری و حمل دریایی، به فاصله‌ای نزدیک از محل جمع‌آوری حمل و تخلیه شوند. بنابراین، پس از مدت کوتاهی به‌واسطه‌ی 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 دردسترس 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 اشاره‌شده‌ی رسوب‌های خلیج گرگان، سوزاندن آن‌هاست، که سبب کاهش حجم قابل‌ملاحظه‌ای در رسوب‌ها می‌شود.

از سویی دیگر، نواحی جنوبی و غربی شهرستان گرگان، سرشار از تپه‌های لسی هستند، که عموماً مناسب ساخت‌وساز نیستند و بهتر است قبل از ساخت بنا روی این نوع خاک‌ها، تثبیت بستر صورت پذیرد. بنابراین، در پژوهش حاضر به‌عنوان یک راهکار، از خاکستر به‌جامانده از سوختن رسوب‌های لجن خلیج گرگان، به‌عنوان یک ماده‌ی 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 به‌کارگیری رسوب‌های لجن، ضمن اینکه نیاز به استفاده از منابع طبیعی به‌عنوان ماده‌ی اولیه‌ی تولید محصول را کاهش خواهد داد، از انباشت مواد زائد و آلودگی‌های ناشی از این نهشته‌ها، جلوگیری به‌عمل خواهد آورد. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار مقاومتی برشی خاک لس تثبیت‌شده با SPA در طرح‌های بهسازی لایه‌های سطحی است، که کاربرد زیادی در راه‌سازی (لایه‌ی اساس و زیراساس) دارد.. در این راستا، از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم بر روی مخلوط خاک و SPA با انرژی تراکم یکسان (با توجه به کاربرد در راه‌سازی) و درصد رطوبت‌های متفاوت استفاده شده است. به‌صورت کلی، این موارد به‌عنوان نوآوری پژوهش در ارتباط با استفاده‌کردن از SPA مدنظر هستند:

- 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 چرخه‌ی محیط‌زیست.
- ارائه‌ی راهکار برای کاهش هزینه‌های لایروبی به واسطه‌ی کاهش هزینه‌های حمل و نیز استفاده‌ی مجدد مصالح فرآوری‌شده برای کاربرد در اهداف بهسازی خاک‌های لسی منطقه‌ی گرگان.
- امکان‌سنجی استفاده از مصالح فرآوری‌شده‌ی بازیافتی در پروژه‌های بهسازی خاک، مانند: ساخت خاکریز، بسترسازی و نظایر آن.

۲. معرفی مصالح استفاده‌شده و روش انجام آزمون

در بخش حاضر، به معرفی مصالح استفاده‌شده، روند نمونه‌سازی و نحوه‌ی انجام آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم پرداخته شده است.

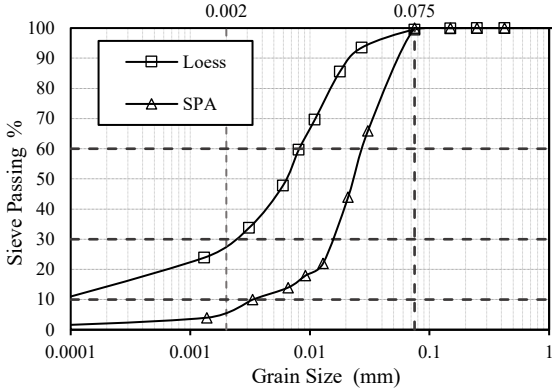
۱.۲. خصوصیات مواد و مصالح استفاده‌شده

- **لس گرگان**

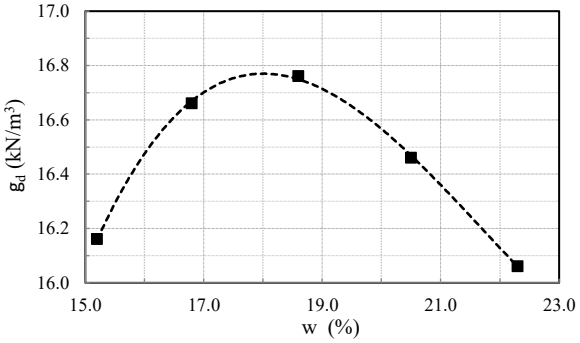
خاک بررسی‌شده در پژوهش حاضر از نوع لس بوده است، که از جنوب شهر گرگان تهیه شده است (شکل ۲- الف). برای تعیین دانه‌بندی خاک موردنظر، براساس استاندارد ASTM D۴۲۲،[۱۷] از روش تر استفاده شده است، به این صورت که جهت تعیین درصد وزنی خاک عبورکرده از الک ۲۰۰ و تشخیص اولیه‌ی ریزدانه و یا درشت‌دانه‌بودن آن، ابتدا ۵۰۰ گرم خاک خشک روی الک ۲۰۰ با فشار مستقیم آب شسته شده است، تا جایی که آب خارج‌شده کاملاً شفاف شود. در ادامه، خاک به‌جای‌مانده بر الک ۲۰۰ در گرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۱۰ خشک و سپس وزن شد. نتیجه‌ی حاصل از آزمون بر خاک پایه حاکی از آن است که بیش از ۹۷٪ ذرات خاک از الک ۲۰۰ عبور کرده‌اند. منحنی حاصل از آزمون دانه‌بندی و هیدرومتری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همچنین آزمون‌های حدود اتربرگ بر روی خاک پایه براساس استاندارد ASTM D۴۳۱۸،[۱۸] انجام شده است، که نتایج آن حاکی از حد



شکل ۲. (الف) خاک لس، (ب) لجن، (پ) کوره‌ی سوزاندن لجن، (ت) تراکم نمونه‌ها، (ث) عمل‌آوری نمونه‌ها.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک لس.



شکل ۴. نتایج تراکم خاک پایه.

روانی ۲۱٪ و شاخص خمیری ۶/۷٪ است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های اخیر، طبقه‌بندی خاک پایه با توجه به روش متحد، طبق استاندارد ASTM D۲۴۸۷،[۱۹] رس و لای با حالت خمیری کم (CL-ML) بوده است.

آزمون تراکم پروکتور استاندارد به روش A براساس استاندارد ASTM D۶۹۸،[۲۰] جهت حصول منحنی تراکم نمونه‌ی خاک لس و تعیین درصد رطوبت بهینه و مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک استفاده‌شده در آزمون انجام پذیرفته است. نتایج آزمون تراکم استاندارد خاک پایه (لس) انجام‌شده در شکل ۴ مشاهده می‌شود. درصد رطوبت بهینه ۱۸٪ و مقدار تراکم بیشینه‌ی خشک آن ۱۶/۷۷ کیلونیوتن بر مترمکعب به‌دست آمده است.

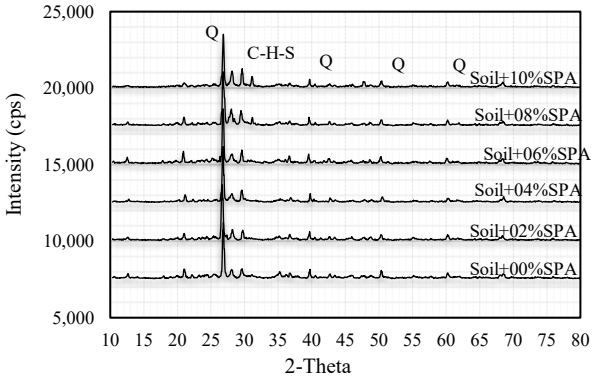
- **خاکستر لجن گرگان**

در شکل (۲- ب)، لجن خلیج گرگان جمع‌آوری‌شده مشاهده می‌شود. یکی از اهداف مطالعه‌ی حاضر، تعیین دمای بهینه‌ای است که بیشتر محصولات فرعی سیمانی حاصل از سوختن مواد معدنی و آلی را تولید می‌کند. بنابراین لجن گرفته‌شده از محل خلیج گرگان، ابتدا در هوای آزاد خشک و سپس در کوره‌ی صنعتی در دماهای مختلف ۱۰۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد سوزانده شده است. برای سوزاندن نمونه‌های لجن از یک کوره‌ی صنعتی ۱۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مجهز به کنترل دمای کوره (شکل ۲- پ) استفاده شده است. پس از خنک‌شدن لجن سوزانده‌شده، SPA در یک کیسه‌ی پلاستیکی دو زیپ قرار گرفت تا از تبادل رطوبت با محیط جلوگیری شود. ذرات SPA کوچک‌تر از الک ۲۰۰ بودند و طبق سیستم طبقه‌بندی یکپارچه‌ی ASTM D۲۴۸۷،[۱۹] به‌عنوان لای با خاصیت خمیری کم (ML) طبقه‌بندی شده‌اند.

با استفاده از تجزیه‌وتحلیل طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF)، اجزاء شیمیایی ذرات بررسی‌شده در جدول ۳ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن،

جدول۳. مشخصات اجزاء شیمیایی مصالح- نتایج آزمون XRF.

	SPA	Loess
Temp (º)	1000ºC	100ºC
P_2O_5	0.41	0.24
TiO_2	0.82	1.14
SiO_2	48.8	50.85
CaO	18	8.22
Al_2O_3	13.9	4.69
K_2O	1.7	4.33
MgO	4	5.25
Cl	0.16	0.1
Na_2O	1.3	1.54
S	1.7	1.1
Fe_2O_3	8.8	8.41
L.O.I	0.41	14.13



شکل ۵. نتایج آزمون XRD.

تغییرات ذرات مؤثر در واکنش‌های سیمان و پوزولانی تولیدشده از ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد ناچیز بوده است. با این حال، از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار CaO و SiO_2 به ترتیب از ۱۱ و ۴۳ درصد به ۱۸ و ۴۹ درصد افزایش یافته است. بنابراین، دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌عنوان دمای بهینه در نظر گرفته شده و تمام لجن‌ها در این دما سوزانده شده‌اند. با بررسی دقیق‌تر اطلاعات ارائه‌شده در جدول ۳ برای نمونه‌ی سوخته‌شده‌ی لجن در دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که مقدار CaO حدود ۱۸٪ است و امکان انجام واکنش‌های سیمانی و در نتیجه تشکیل محصولات C-S-H را دارد. همچنین، به‌دلیل وجود SiO_2 و 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 اشعه‌ی ایکس (XRD) مشاهده می‌شود. قله‌های نمودار مربوط به ژل C-S-H بوده و با افزایش دما، مقادیر C-S-H موجود در SPA، که محصولات سیمانی در جهت افزایش مقاومت است، بیشتر شده است.

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، روش SPA مؤثر خواهد بود. ترکیب‌های شیمیایی SPA (ذرات SiO_2، Al_2O_3، و CaO) باعث توسعه‌ی فعالیت پوزولانی می‌شوند. تمام پارامترهای در نظر گرفته‌شده در فرایند نمونه‌سازی و آزمون‌ها در جدول ۴ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، درصد

جدول ۴. مشخصات پارامترهای اندازه گیری‌شده.

Parameter	Values
SPA	0, 2, 4, 6, 8 & 10%
Water content	16, 18.5, 21, 23.5 & 26%
Processing time	56 days
Laboratory test	Unconfined compressive strength, direct shear and consolidation
Dimensions of the intact samples resulting from the compaction of the samples in the Proctor mold	Unconfined compressive strength (38 mm diameter and 76 mm height), direct shear (100 x 100 mm by 20 mm height) and consolidation (50 mm diameter and 20 mm height)
Processing conditions	Controlled at 24 degrees

SPA ها ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد متغیر و درصدهای رطوبت نمونه‌ها از ۱۶ تا ۲۶ درصد بوده است، که مطابق با مطالعات پیشین پسرکلو و همکاران ۲۰۲۴،[۱۶] مد نظر قرار گرفته است. همچنین شایان ذکر 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.[۱۱ و ۱۶] بنابراین برای اطمینان از اتمام فعالیت‌های پوزولانی، زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه ملاک قرار گرفته است.

۳.۲. روش ساخت نمونه

برای تولید نمونه‌های همگن، خاک طبیعی به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزاد قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک و سپس از الک شماره ۴ عبور داده شده است. خاک خشک‌شده طبق طرح اختلاط ذکرشده در جدول ۴ با آب و SPA مخلوط شده است، تا نمونه‌ای یکنواخت از نظر رنگ به‌دست آید. در پژوهش حاضر فرض بر این است که انرژی تراکم نمونه‌ها یکسان بوده است. بنابراین، تمام نمونه‌ها در قالب یک آزمون پروکتور استاندارد مطابق با انرژی آزمون اشاره‌شده متراکم شده‌اند (شکل ۲- ت). نمونه‌ها چند بار با چسب ۵ سانتی‌متری پیچیده و در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شده‌اند (شکل ۲- ث). نمونه‌های دست‌نخورده با مشخصات اشاره‌شده در جدول ۴، برای هر آزمون پس از زمان عمل‌آوری مشخص‌شده گرفته شده‌اند.

۴.۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

- **مقاومت فشاری محصورنشده**

آزمون مقاومت فشاری ذکرشده براساس استاندارد ASTM D۲۱۶۶،[۲۱] انجام شده است، که نوع بخصوصی از آزمون سه‌محوری است و هدف از آن، تعیین مقاومت فشاری نمونه تحت فشار همه‌جانبه‌ی صفر است. سرعت بارگذاری در آزمون اخیر به‌گونه‌ای تنظیم شده است که در هر دقیقه، ۱٪ کرنش محوری در نمونه ایجاد شود. به ازاء تغییرشکل‌های معین، مقدار نیروی وارده یادداشت شده است. بارگذاری نیز تا زمانی که کرنش نمونه، به ۱۵٪ برسد، ادامه یافته است. در انتها، بیشینه‌ی تنش فشاری اعمال‌شده به نمونه، به‌عنوان مقاومت فشاری محصورنشده تعیین شده است.

- **برش مستقیم**

آزمون برش مستقیم از جمله آزمون‌هایی است که برای تعیین پارامترهای موردنیاز طراحی پی‌های سطحی، تعیین مقاومت برشی منابع قرضه‌ی مصالح، بررسی لغزش، و پایداری شیروانی‌ها، و طراحی دیوارهای حائل می‌توان از نتایج آن بهره گرفت. در آزمون برش مستقیم از لحاظ تئوری، برای به‌دست‌آوردن زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی، از مدل موهر-کلمب استفاده می‌شود. همچنین، با چند ساده‌سازی، به‌عنوان معیار گسیختگی برای خاک‌ها استفاده می‌شود.

جهت انجام آزمون برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D۳۰۸۰،[۲۲] پس از اشباع‌سازی، نمونه‌ها به مدت دست‌کم ۲۴ ساعت تحت اثر سربار 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 شده است.

- **تحکیم یک‌بُعدی**

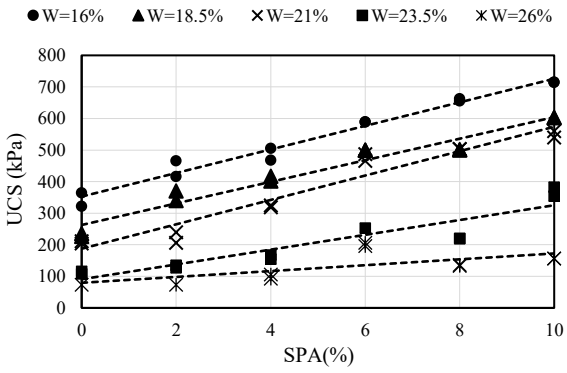
در هنگام بارگذاری خاک اشباع، تمام بار وارده به‌وسیله‌ی آب حفره‌ای تحمل می‌شود، که سبب افزایش فشار آب حفره‌ای می‌شود. اما به مرور زمان، حجم خاک به‌دلیل زائل‌شدن فشار آب حفره‌ای، حجم خاک کاهش می‌یابد. مقدار این تغییر حجم خاک در اثر بارگذاری به پارامتر نفوذپذیری خاک مرتبط است، که به همین دلیل عموماً آزمون تحکیم بر خاک‌های ریزدانه، که نفوذپذیری کمتری نسبت به سایر خاک‌ها دارند، انجام می‌پذیرد. آزمون مذکور، روشی برای به‌دست‌آوردن و ارزیابی پارامترهای تحکیم تک‌بُعدی ترزاقی، مانند نشانه‌ی فشردگی (C_c) و بازفشردگی (C_s) انجام می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که پتانسیل فروریزشی خاک لس در پژوهش حاضر مطالعه نشده است؛ زیرا SPA به روش اختلاط مکانیکی با خاک لس مخلوط می‌شود و ساختار خاک فروریزشی لس در اثر اختلاط و تراکم از بین می‌رود.

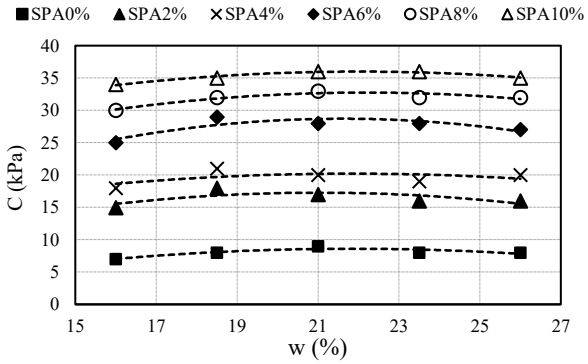
برای آزمون تحکیم براساس استاندارد ASTM D۲۴۳۵،[۲۳] نمونه بین دو لایه سنگ متخلخل در استوانه‌ی اشباع قرار گرفته و درون آن از آب پُر شده است. پس از اشباع‌سازی نمونه‌ها درون استوانه، دستگاه تحت بارگذاری‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۶۰۰ و باربرداری‌های ۴۰۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت، که تغییر حجم‌های حاصل در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ... دقیقه تا ۲۴ ساعت قرائت شده است.

۳. بحث و نتایج

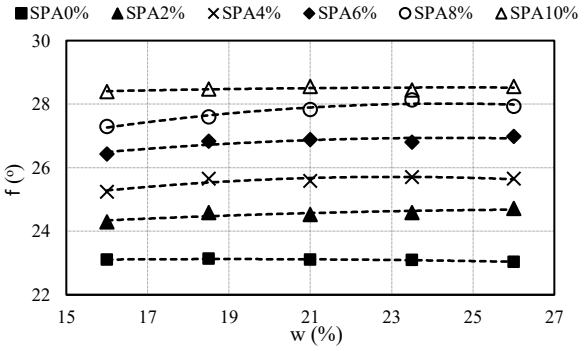
نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌های متراکم‌شده با انرژی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. بر این اساس، استحکام نمونه‌ها با افزایش رطوبت کاهش یافته است. میزان رطوبت خاک کمتر از رطوبت بهینه‌ی نمونه را می‌توان به غیراشباع‌بودن خاک و پتانسیل ماتریکی خاک نسبت داد، که باعث افزایش مقاومت نمونه در خاک‌های رسی می‌شود. شایان ذکر است که براساس مطالعات قبلی پسرکلو و همکاران (۲۰۲۴)، محدوده‌ی درصد رطوبت بهینه‌ی حاصل از آزمون تراکم استاندارد، محدوده‌ی ۱۸ تا ۲۱ درصد است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۶، کاهش مشاهده‌شده در مقاومت فشاری محصورنشده با افزایش رطوبت با مطالعات پیشین خاک رسی توسط سنگ و



شکل۶. مقاومت فشاری محصورنشده‌ی لس بهسازی‌شده با SPA در درصد رطوبت‌های متفاوت.



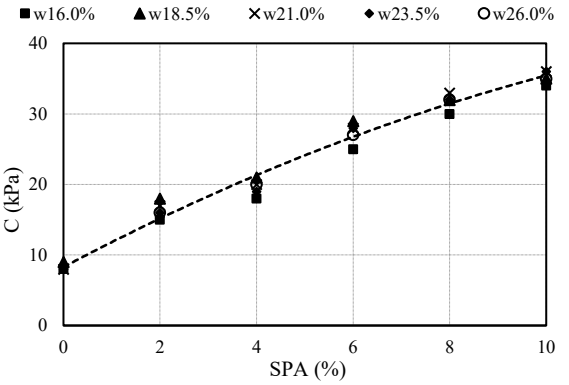
شکل ۷. تغییرات چسبندگی در ازاء درصد رطوبت‌های مختلف.



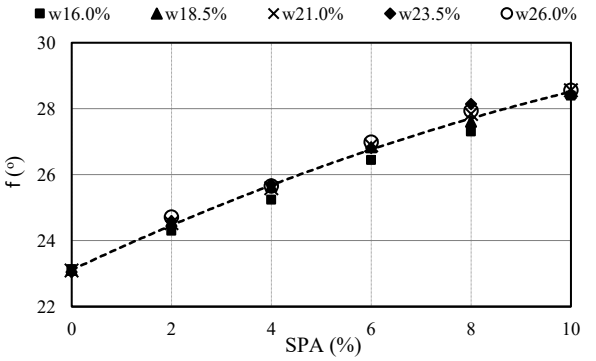
شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در ازاء رطوبت‌های مختلف.

تاناکا[2] (۲۰۱۲)، مطابقت دارد.[۲۴] همچنین همان‌طور که خواجه و همکاران (۲۰۲۳) توضیح داده‌اند، در رطوبت کمتر از حد رطوبت بهینه، مکش ماتریک خاک باعث افزایش تنش‌های تماس بین ذرات می‌شود، که باعث افزایش استحکام نیز می‌شود.[۲۵] همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش SPA، مقاومت فشاری محصورنشده افزایش یافته است، که حاکی از تولید محصولات سیمانی و ایجاد پیوندهای سیمانی است.

آزمون برش مستقیم از رایج‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی از جمله: چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ذرات خاک (f) است. در شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی براساس تغییرات رطوبت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن‌ها، تغییرات



شکل۹. تغییرات چسبندگی در ازاء SPA های مختلف.



شکل ۱۰. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در ازاء SPA های مختلف.

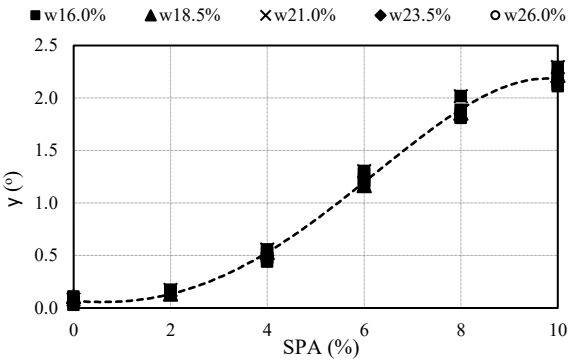
چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی با درصد رطوبت محسوس نیست، که مزید بر علت آن مقاومت یکسان پیوندهای تشکیل‌شده در درصد رطوبت‌های متفاوت به واسطه‌ی اشباع‌سازی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون بوده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، نیز تغییرات مقادیر C و f نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف SPA مشاهده می‌شوند.

با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که افزایش مقدار SPA مسبب به‌وجودآمدن روندی افزایشی در مقدار C نمونه‌های تثبیت‌شده بوده است. با ارزیابی شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تغییرات پارامتر f در نمونه‌های تثبیت‌شده، روندی مشابه تغییرات پارامتر C از خود نشان داده‌اند، اما شدت تغییرات اخیر به‌مراتب کمتر از پارامتر C بوده است رفتار مشابه روند افزایشی در پارامترهای C و f با افزودن مواد پوزولانی خاکستر سبوس برنج و ضایعات کربیدکلسیم به خاک رس در پژوهش بابو[3] و همکارانش (۲۰۲۳)،[۲۶] نیز مشاهده شده است. افزایش مقادیر پارامترهای C و f با افزودن و افزایش در مقدار SPA پس از عمل‌آوری به‌دلیل تولید ژل‌های C-S-H در فرایند هیدراتاسیون و افزایش مقدار آن به نسبت افزایش مقدار افزودنی مذکور است.

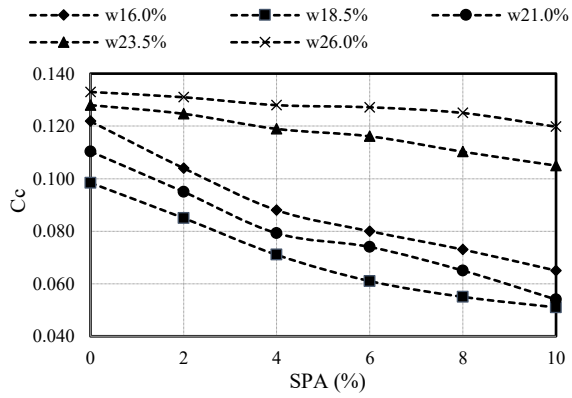
همچنین در شکل ۱۱، تغییرات زاویه‌ی اتساع، که حاصل تفاضل زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و حالت بحرانی است، مشاهده می‌شود. به‌عبارت دیگر، زاویه‌ی اصطکاک بحرانی، از تنش برشی مربوط به گام‌های آخر بارگذاری در آزمون برش مستقیم (جایی که تقریباً ضمن اعمال کرنش ثابت، تنش برشی مقداری تقریباً ثابت دارد) تعیین شده است. مطابق شکل ۱۱ مشخص است که با افزایش درصد SPA، مقدار زاویه‌ی اتساع افزایش یافته است، که نشانگر رفتار ترد و شکننده‌ی نمونه‌هاست. به بیانی دیگر، با افزایش میزان SPA، هم زاویه‌ی

[2] Seng & Tanaka

[3] Babu



شکل ۱۱. تغییرات زاویه‌ی اتساع در برابر مقادیر مختلف SPA.

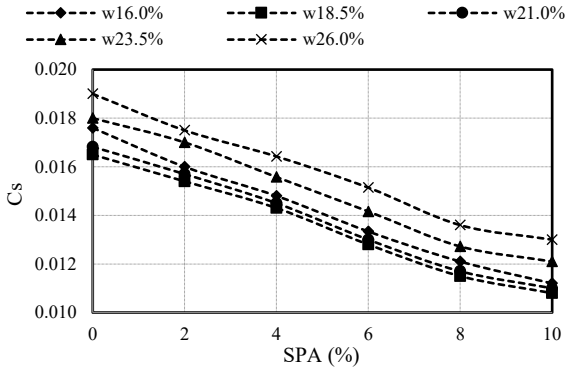


شکل ۱۲. تغییرات شاخص فشردگی با درصد SPA.

اصطکاک بیشینه و هم زاویه‌ی اصطکاک حالت بحرانی افزایش یافته‌اند، ولی سرعت افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی بیشینه نسبت به حالت بحرانی بیشتر بوده است. همچنین باید اضافه کرد که درصد رطوبت، پارامتر بسیار تعیین‌کننده‌ای در رفتار اتساعی خاک تثبیت‌شده با SPA نیست.

از آزمون تحکیم، جهت ارزیابی پارامترهای سختی و سرعت نشست سازه‌ها استفاده می‌شود. این نتایج تابعی از مقدار بارگذاری و چگونگی گام‌های آن و تداوم زمانی بارگذاری‌ها ی مذکور است. در شکل ۱۲، تغییرات شاخص فشردگی (Cc) برحسب تغییرات SPA و مقدار درصد رطوبت‌های گوناگون مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن ۲٪ SPA به خاک لس سبب کاهش محسوس در مقدار Cc نمونه‌ی تحت آزمون پس از عمل‌آوری شده است. افزایش مقدار SPA تا مقدار ۱۰٪ سبب کاهش بیشتر مقدار Cc در نمونه‌ها شده است. خواجه و همکارانش (۲۰۲۵)،[۲۵] نیز کاهش شاخص فشردگی در خاک رس نرم تثبیت‌شده با سیمان را گزارش کرده‌اند. در پژوهش ایشان، افزایش مقدار سیمان نیز سبب کاهش بیشتر شاخص فشردگی شده است.

در شکل ۱۳، تغییرات شاخص تورم (Cs) نمونه‌های تثبیت‌شده با SPA و درصد رطوبت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، پارامتر Cs در نمونه‌های



شکل ۱۳. تغییرات شاخص بازفشردگی با درصد SPA.

تثبیت‌شده با SPA کاهش یافته است. کاهش اخیر با افزایش مقدار SPA شدت بیشتری از خود نشان داده است.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، به بررسی تأثیر استفاده از ماده‌ی بازیافتی خاکستر لجن به‌دست‌آمده از خلیج گرگان به‌عنوان جایگزین بخشی از خاک پایه در بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک لس گرگان پرداخته شده است. استفاده از ماده‌ی آهکی خاکستر لجن سبب کاهش مصرف سیمان در طرح‌های بهسازی خاک‌های لسی می‌شود، که هم از لحاظ زیست‌محیطی و هم از جنبه‌ی اقتصادی حائز اهمیت است. جهت بررسی آثار جایگزینی خاکستر لجن در رفتار ژئوتکنیکی خاک لس فروریزشی از آزمون‌های مقاومت فشاری محصورنشده، برش مستقیم، و تحکیم استفاده شده است. در ادامه، نتایج حاصل از آزمون‌های اخیر ارائه شده‌اند:

- با افزایش درصد رطوبت، مقاومت فشاری محصورنشده‌ی نمونه کاهش یافته است.

- افزایش افزودنی تا ۱۰٪ سبب بروز روند افزایشی محسوس در مقدار C پس از ۵۶ روز عمل‌آوری شده است.

- زاویه‌ی اصطکاک داخلی در این نمونه‌ها نیز روندی مشابه تغییرات پارامتر چسبندگی در زمان‌های عمل‌آوری ۵۶ روزه از خود نشان داده است، اما شدت تغییرات آن کمتر از چسبندگی بوده است.

- افزایش ماده‌ی افزودنی در خاک لس سبب کاهش محسوس در مقادیر Cc و Cs نمونه‌ها پس از ۵۶ روز عمل‌آوری شده است.

- در مقایسه با نمونه‌ی پایه، به‌طورکلی حضور خاکستر لجن خلیج گرگان در ترکیب، سبب کاهش مشهود شاخص فشردگی شده است.

- در انتها، انجام سایر آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی مقاومتی، از جمله سه‌محوری و برش ساده برای بررسی دقیق‌تر اثر افزودن SPA به خاک لسی پیشنهاد می‌شود.

References- منابع

1. Kalantari, B., 2013. Foundations on collapsible soils: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering, 166(2)*, pp. 57-63. https://doi.org/10.1680/feng.12.00016

2. Haeri, S. M., Akbari Garakani, A., Roohparvar, H. R., Desai, C. S., Seyed Ghafouri, S. M. H., and Salemi Kouchesfahani, K., 2019. *Testing and constitutive modeling of lime-stabilized collapsible loess. I:*

experimental investigations. International journal of geomechanics, 19(4), pp. 04019006.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001364

3. Angelova, R.N., 2007. Loess-cement long-term strength-a facilitating factor for loess improvement applications. *Geologica Balcanica, 36(3-4)*, pp.21-24.

https://doi.org/10.52321/GeolBalc.36.3-4.21

4. Zhang, C.L., Jiang, G.L., Su, L.J. and Zhou, G.D., 2017. Effect of cement on the stabilization of loess. *Journal of Mountain Science, 14(11)*, pp.2325-2336.

https://doi.org/10.1007/s11629-017-4365-4

5. Vakili, A.H., Selamat, M.R. and Moayedi, H., 2013. Effects of using pozzolan and portland cement in the treatment of dispersive clay. *The Scientific World Journal*.

https://doi.org/10.1155/2013/547615

6. Kajaste, R., Hurme, M., 2016. Cement industry greenhouse gas emissions management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production, Volume 112, Part 5*, pp 4041-4052.

https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055

7. Ke, J., McNeil, M., Price, L., Khanna, N.Z. and Zhou, N., 2013. Estimation of CO_2 emissions from China's cement production: methodologies and uncertainties. *Energy Policy 57*: pp.172–181.

https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.028

8. Amato, I., 2013. Green cement: Concrete solutions. *Nature. 494 (7437)*: pp.300–301.

https://doi.org/10.1038/494300a

9. Alijani Shirvani, R. and Noorzad, R., 2019. Effectiveness of sludge ash of wood and paper mill as nontraditional additive for clayey soil treatment. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(10), 04019230.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002877

10. Kumar, A. and Gupta, D., 2016. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes, 44(3),* pp.466-474.

https://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.

https://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.

https://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.

https://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.

https://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.

https://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.

https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103534

17. ASTM D422., 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils.

https://doi.org/10.1520/D0422-63R07

18. ASTM D4318-10., 2005. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.

https://doi.org/10.1520/D4318-10

19. ASTM D2487-17., 2017. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

https://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^3 (600 kN-m/m^3)).

https://doi.org/10.1520/D0698-12

21. ASTM D2166-06., 2006, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

https://doi.org/10.1520/D2166-06

22. ASTM D3080-04., 2004. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

https://doi.org/10.1520/D3080-04

23. ASTM D2435., 2004. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. https://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.

http://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.

https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103501

26. Babu, J.S., Thimothy, R.S.W., Shantharam, Y., Arun, M. and Sivakumar, T., 2023. Enhancing the compaction properties of frictional-cohesive soil by adding the industrial ash products. *In AIP Conference Proceedings (Vol. 2782, No. 1)*. AIP Publishing.

https://doi.org/10.1063/5.0155191