



## مطالعه آزمایشگاهی تثبیت خاک طبیعی با ژئوپلیمر مبتنی بر پودر شیشه و کاربید کلسیم

سیدعرفان حسینی<sup>۱</sup>، علیرضا طبرسا<sup>۲\*</sup>، امین بهمن‌پور<sup>۱</sup>

۱-دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

### کلمات کلیدی:

آزمایش سه محوری سیکلی

آزمایش تک محوری محصور نشده

مدول برشی

میرایی

ژئوپلیمر

ماسه لای دار

خصوصیات دینامیکی خاک

**خلاصه:** مسائل زیست محیطی، اقتصادی، فنی و محدودیت منابع انرژی و مواد اولیه در فرآیند تولید سیمان، ضرورت استفاده جایگزین سیمان را ایجاد می‌کند. بدین منظور سه سری خاک، به نام‌های ماسه با نسبت‌های مختلف لای یا خاک طبیعی (SX)، خاک تثبیت شده با سیمان (CSS)، و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه و کاربید کلسیم (GSS) از نظر مکانیکی و دینامیکی مطالعه شده است. استحکام، مدول برشی و میرایی نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری (UCS) و سه محوری سیکلی تحت فشارهای همه جانبه و کرنش‌های برشی مختلف و نسبت‌های لای ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ مورد مطالعه قرار گرفت. طرح اختلاط مختلفی از مواد ژئوپلیمری برای آزمایش UCS تهیه و نسبت بهینه طرح اختلاط که در آن ژئوپلیمر حاصل شامل بالاترین مقاومت فشاری خاک باشد، به عنوان ژئوپلیمر بهینه مشخص گردید. نتایج بیانگر مؤثر بودن ژئوپلیمر حاصل برای تثبیت خاک است. نسبت‌های ترکیبی ژئوپلیمر بهینه از نظر حداکثر مقاومت، متشکل از ۱۵٪ پودر شیشه، ۷٪ کاربید کلسیم و ۲۵٪ لای، به دست آمد که غلظت‌های بیشتر/کمتر از مقدار بهینه، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. مقاومت فشاری خاک-ژئوپلیمر بهینه حدود ۱۶٪ بیشتر از خاک تثبیت شده با سیمان ۴٪ بود. افزایش تنش محصور کننده، مدول برشی را در کرنش‌های کوچک بهبود می‌بخشد، در حالی که تأثیر ناچیزی بر نسبت میرایی دارد. مقاومت فشاری، سختی و مدول برشی خاک ژئوپلیمری برعکس میرایی، بیشتر از خاک سیمانی بود. مقاومت برشی و میرایی خاک‌ها با نسبت‌های مختلف ریزدانه تا حد معینی از ریزدانه آستانه (۵۰٪ لای)، افزایش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

موضوع بهسازی خاک، عموماً در موضوعات مربوط به مهندسی خاک و خاصه برای خاک‌های ضعیف مطرح می‌گردد. معمولاً خاک محل احداث پروژه‌ها حاوی خصوصیات مکانیکی مطلوب نمی‌باشند و باید با افزودنی‌های شیمیایی نظیر سیمان که از متداول‌ترین روش‌ها می‌باشد، خاک را بهسازی و به آن تحکیم بخشید [۲ و ۱]. محدودیت‌های مالی تولید سیمان نظیر مصرف زیاد انرژی و آثار مخرب زیست محیطی این محصول، در سالیان اخیر سبب بروز چالش‌های فراوان برای این نوع بهسازی گردیده است [۴ و ۳]. تحقیقات نشان داده است در فرآیند تولید هر تن سیمان، حدود یک تن گاز دی اکسید کربن CO<sub>2</sub> تولید می‌گردد که به تنهایی حدود ۵٪ الی ۸٪ آلودگی‌های جهان را به خود اختصاص دهد. همچنین گاز CO<sub>2</sub> بیشترین تأثیر را در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد که باعث تغییرات شدید آب و هوایی و افزایش دمای کره زمین می‌گردد [۵]. علاوه بر این، خاک-

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.tabarsa@gu.ac.ir

سیمان رفتار شکننده‌ای از خود نشان داده است. توجه به مزایای زیست محیطی و اقتصادی جایگزینی سیمان با مواد بازیافتی مانند پودر شیشه به عنوان جایگزین کامل یا بخشی از آن می‌تواند در کاهش مصرف سیمان مؤثر باشد. بنابراین پژوهش در رابطه با استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر ژئوپلیمرها در بهسازی خاک‌های مسئله‌دار توجه محققین حوزه عمران را در سال‌های اخیر فراهم آورده است [۱۰-۶]. کاربید کلسیم همچنین به عنوان تثبیت کننده پایدار برای خاک استفاده شده است. اما ترکیب کاربید کلسیم و پودر شیشه برای تثبیت خاک تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است و در این تحقیق خواص استاتیکی و دینامیکی خاک تثبیت شده ژئوپلیمری بر پایه پودر شیشه و کاربید کلسیم با خاک تثبیت شده با سیمان بررسی و مقایسه خواهد شد. تعیین خواص دینامیکی خاک‌ها مسئله‌ای مهم در حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به شمار می‌رود [۱۱]. مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی مهم‌ترین ویژگی دینامیکی خاک در تعیین پایداری و ناپایداری مهندسی ژئوتکنیک خاک هستند [۱۲-۲۰]. زرگر در سال ۲۰۲۱



دینامیکی خاک را نیز بهبود بخشد یا خیر از موارد مهمی است که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌های آزمایش

مواد مورد استفاده تحقیق شامل خاک ماسه‌ای لای دار و همچنین پودر شیشه، فعال کننده قلیایی کاربید کلسیم و سیمان پرتلند نوع ۲ می‌باشد.

### ۲-۱- خاک

خاک مورد مطالعه برای فرآیند تثبیت از شهرستان بندرگز، استان گلستان، در شمال ایران، با محتوای لای جمع آوری شده است. شکل هندسی این مواد نیمه گرد و نیمه زاویه‌ای است. این نوع خاک ماسه‌ای لای دار با توجه به سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک به عنوان درجه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی می‌شود. همچنین درصد ترکیبات شیمیایی مواد مورد استفاده برای ساخت سه سری خاک طبیعی و خاک‌های تثبیت شده در جدول ۱ خلاصه شده است. برای تهیه ماسه و لای تمیز، خاک را کاملاً خشک می‌کنند، سپس با الک شماره ۲۰۰ درشت و ریز دانه‌ها را جدا می‌کنند تا آنچه از الک رد شده، به عنوان لای جدا می‌شود، که برای ساخت نمونه‌هایی از خاک‌های SX، CSS و GSS با نسبت‌های مختلف لای استفاده شود و آنچه در بالای الک باقی می‌ماند به عنوان ماسه تمیز نامیده می‌شود. توجه داشته باشید که وجود رس در خاک مقدار کمتری است و قابل چشم پوشی است.

### ۲-۲- ژئوپلیمر مبتنی بر پودر شیشه

پودر شیشه‌ای که برای تثبیت خاک استفاده می‌شود حاصل پودر کردن ضایعات شیشه ساختمانی بوده که پودر تهیه شده پس از عبور از الک شماره ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به جدول ۱، نکته کلیدی این نوع پودر شیشه، میزان بالای کلسیم (CaO) موجود در آن است.

### ۲-۳- ژئوپلیمر مبتنی بر فعال کننده قلیایی (کاربید کلسیم)

فعال کننده قلیایی مورد استفاده در این تحقیق کاربید کلسیم با ترکیب اصلی هیدروکسید کلسیم حاصل از ضایعات و بقایای شیشه در صنعت خودروسازی بود که پس از عبور از الک شماره ۲۰۰ پودر شده و مورد استفاده قرار گرفت. ترکیبات شیمیایی باقی‌مانده کلسیم استفاده شده کاربید مشابه پودر شیشه است که با طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) به دست می‌آید و در جدول ۱ آورده شده است.

پارامترهای مقاومتی ماسه کربناته بندرعباس و ماسه کوارتزی فیروزکوه تحت آزمایش‌های سه محوری معمولی و برش ساده استاتیکی بررسی کرده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ماسه کربناته در شرایط یکسان، مقاومت برشی بیشتری نسبت به ماسه کوارتزی دارد [۲۱]. طبرسا در سال ۲۰۱۰ به مطالعه و بررسی تاثیر الیاف‌های مصنوعی در اصلاح خواص مقاومت دینامیکی یک خاک ماسه‌ای ریز پرداخت که بدین منظور یک سری آزمایش‌های سه محوری سیکلی کنترل تنش بر روی نمونه‌های ماسه ریز مسلح شده به کمک الیاف با توزیع تصادفی انجام گردید. نتایج به روشنی نشان می‌دهد که در اثر مسلح شدن نسبت میرایی نمونه‌های مسلح تحت تنش‌های همه جانبه مختلف افزایش می‌یابد [۲۲].

در این مقاله، برای تعیین درصد اختلاط بهینه مواد متشکله ژئوپلیمر برای بهسازی خاک‌های ماسه‌ای لای دار، نسبت‌های مختلف پودر شیشه و کاربید کلسیم به کار گرفته شده و به منظور یافتن طرح اختلاط بهینه یا ژئوپلیمر بهینه که حائز بالاترین مقاومت فشاری تک محوری می‌باشد اثر تثبیت کنندگی هر اختلاط روی نمونه خاک، بررسی شده است. سپس تثبیت خاک به واسطه‌ی مقدار ژئوپلیمر بهینه با مقادیر تثبیت خاک به واسطه‌ی درصدهای مختلف سیمان توسط آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری مقایسه شده است و سپس وضعیت ریزساختار نمونه‌های خاک ژئوپلیمری منتخب با تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است [۲۳]. مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی مهم‌ترین ویژگی دینامیکی خاک در تعیین پایداری و ناپایداری مهندسی ژئوتکنیک خاک هستند. در این مقاله با توجه به مواد نوظهور مانند ژئوپلیمر مبتنی بر پودر شیشه ضایعاتی که سازگار با محیط زیست است و امیدوار کننده است که به عنوان یک چسب جایگزین به جای سیمان پرتلند معمولی (OPC) به طور جزئی یا حتی کامل برای تثبیت خاک استفاده شود. بنابراین، پارامترهای مؤثری مانند نوع افزودنی‌های خاک، نسبت لای، کرنش‌های برشی و فشارهای محصور کننده بر روی خواص دینامیکی خاک طبیعی، خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و خاک تثبیت شده با سیمان مورد بررسی قرار گرفت.

به عبارتی مقاله حاضر ارزیابی خصوصیات دینامیکی خاک‌های ماسه‌ای لای دار بهسازی شده با ژئوپلیمر متشکل از ماده پایه پودر شیشه بازیافتی و کاربید کلسیم می‌باشد که به صورت آزمایشگاهی انجام شده و نتایج آن با سیمان پرتلند معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی این موضوع که آیا ژئوپلیمر در کنار بهبود خصوصیات مکانیکی خاک می‌تواند خصوصیات

جدول ۱. درصد ترکیبات شیمیایی مواد مورد استفاده برای ساخت سه سری خاک طبیعی و تثبیت شده.

Table 1. The percentage of chemical compounds of materials used to make three series of natural and stabilized soil.

مصالح	خاک	پودر شیشه	کاربید کلسیم	سیمان
ترکیبات شیمیایی				
SiO <sub>2</sub> (%)	۹۵-۹۸	۶۶/۵	۳/۱۹	۲۰/۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰/۵ - ۱	۱/۵	۱/۲۴	۵/۲
CaO (%)	۰/۵ - ۱	۱۱/۵	۶۳/۳۵	۶۳/۳
Na <sub>2</sub> O (%)	۰/۲-۰/۵	۱۲/۵	۰/۲۸	۰/۳
MgO (%)	-----	۴	۰/۱۶	۱/۸
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰/۵ - ۱	۰/۴۴	۰/۲۴	۳/۶۵
K <sub>2</sub> O (%)	۰/۵ - ۰/۷	۰/۳۹	۰/۰۱	۰/۵۵
SO <sub>3</sub> (%)	-----	۰/۳	۰/۶۴	۲/۵
TiO <sub>2</sub> (%)	-----	۰/۵۳	۰/۰۶	-----
LOI (%)	-----	۰/۲۶	۳۰/۶۹	-----

جای همزن برقی استفاده شد [۲۶]. سپس نمونه‌های خاک به مدت ۳۰ دقیقه در کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفتند تا رطوبت به طور همگن توزیع شود [۲۷]. از این مخلوط‌ها برای ساختن نمونه‌هایی برای آزمایش‌های UCS استفاده شد. پس از اختلاط کامل مواد، نمونه‌های خاک به صورت استاتیکی در هشت لایه به ضخامت در قالب استوانه‌ای فولادی ضد زنگ به قطر ۳۸ mm و ارتفاع ۷۶ mm فشرده شدند. فرآیند کوبیدن به کمک ضربات چکش و پتک تا رسیدن به ۹۵٪ حداکثر وزن واحد خشک خاک طبیعی (ماسه با ۱۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ وزنی لای) بر اساس آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده ادامه یافت که بر اساس آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده و بیشتر در آزمون UCS استفاده می‌شود. سپس تمامی نمونه‌های خاک در کیسه‌های پلاستیکی در بسته با هوای داخل آن‌ها قرار داده شدند و در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌های خاک در داخل آب (در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۹۰٪) غوطه‌ور شدند. قابل توجه است که آزمایش UCS معمولاً برای مواد منسجم خاک مانند خاک رس یا مواد خاکی که با مواد افزودنی به انسجام دست یافته‌اند استفاده می‌شود. در مورد آزمایش UCS برای دانه‌ها و خاک‌های غیرچسبنده مورد استفاده در این تحقیق مانند ماسه تمیز، چگالی، رطوبت و نیروی کشش سطحی ایجاد شده بین ذرات ساختار خاک را برای آزمون UCS حفظ می‌کند.

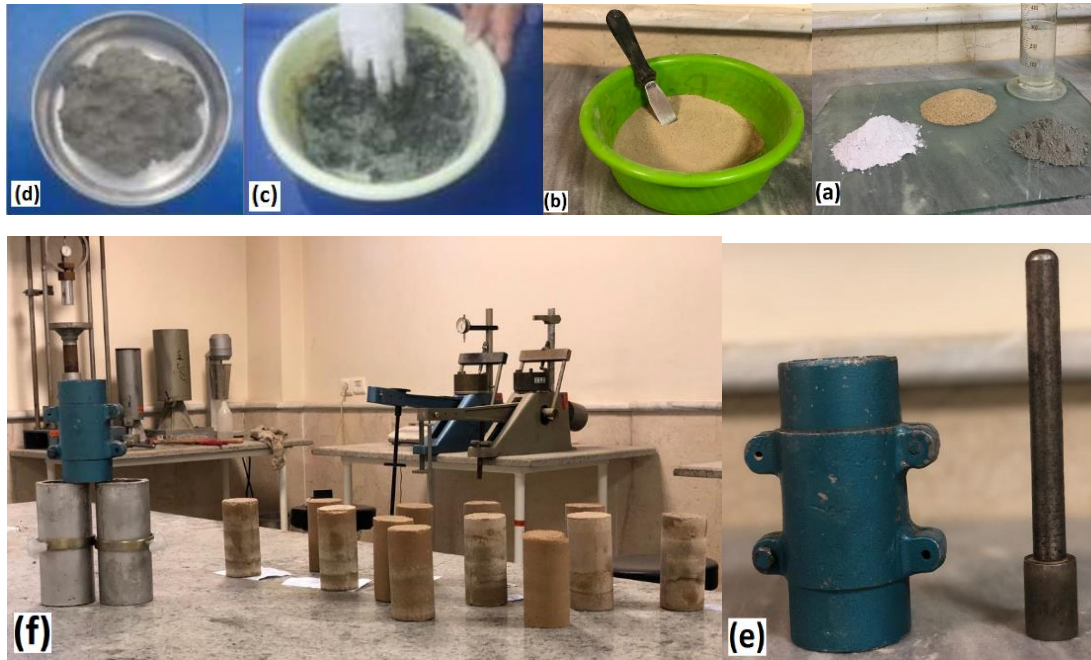
### ۲-۴- سیمان

سیمان انتخابی سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان پیوند گلستان می‌باشد که ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۱ ذکر شده است.

### ۳- آماده‌سازی نمونه

آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده (ASTM D698-78-2012) [۲۴] برای تهیه نمونه خاک انجام شد. برای داشتن نمونه‌هایی با تراکم یکنواخت در طول ارتفاع، از روش تراکم مرطوب با چگالی کاهش یافته مطابق با آنچه که توسط Lade و همکارانش در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد شده بود استفاده گردید [۲۵]. نمونه‌ها ابتدا در دمای ۶۰ سانتی‌گراد به مدت ۲ روز خشک شدند تا رطوبت از بین برود. در تحقیق حاضر از محتویات مختلف لای ۰٪، ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ وزنی ماسه خشک استفاده شد. در فرآیند آماده‌سازی نمونه، مقدار معینی ماسه خشک با درصد‌های مختلف لای مخلوط شد. در مرحله آخر مقدار رطوبت مورد نیاز (ω<sub>opt</sub>) به مخلوط اضافه شد. مجتمع ماسه-لای-آب (Sx)، ماسه-لای-سیمان-آب (CSS)، ماسه-لای-ژئوپلیمر-آب (GSS)، به خوبی به صورت دستی مخلوط شد تا مخلوط‌های همگن به دست آید.

به دلیل استفاده از ریزدانه‌ها و جلوگیری از یکنواختی نمونه‌ها و همچنین توزیع یکنواخت رطوبت بین ذرات خاک، از اختلاط دستی به



شکل ۱. (a) ترکیب ژئوپلیمر (b) مخلوط خشک (c) اختلاط خاک مرطوب (d) مخلوط (e) تجهیزات مورد استفاده (f) نمونه‌های آماده شده.

Fig. 1. (a) Geopolymer composition (b) Dry mix (c) Wet soil mix (d) Mix (e) Equipment used (f) Prepared samples.

محتویات مختلف لای) و پودر شیشه در اندازه مناسب و سپس مخلوط کردن خاک طبیعی با پودر شیشه در درصدهای مختلف و مخلوط کردن آن برای تهیه مخلوطی همگن شکل ۱- (a) و ۱- (b). دوم تهیه مواد پایه قلیایی و ترکیب مواد قلیایی با آب در درصدهای مختلف و مشخص و سپس مخلوط کردن آب و مواد قلیایی به منظور تهیه محلول قلیایی همگن شکل ۱- (c). سوم، مخلوط همگن خاک پودر شیشه به همراه محلول قلیایی را ترکیب کنید و سپس برای واکنش ژئوپلیمریزاسیون آماده شوید شکل ۱- (d). تمام نمونه‌ها به سه قسمت مساوی تقسیم می‌شوند و هر یک از این قسمت‌ها در داخل قالب آزمایش فشرده می‌شوند شکل ۱- (e). نمونه‌های GSS شکل ۱- (f). جدول ۲ طرح اختلاط پیشنهادی ساخت ژئوپلیمر بر پایه پودر شیشه و کاربرد کلسیم را نشان می‌دهد.

#### ۴- روش آزمایش

در این بخش، بررسی مقایسه‌ای روی سه سری خاک SX، CSS و GSS از نظر خواص مکانیکی تحت آزمون UCS مورد بررسی قرار گرفته است. یک سری آزمایش تراکم بر روی خاک طبیعی (۱۲ آزمایش) انجام شد. آزمایش‌های UCS در شرایط ثابت و بر اساس استاندارد ASTM D2166-2013 [۲۸] برای ارزیابی تأثیر درصدهای مختلف سیمان

۳-۱- خاک طبیعی (SX) (ماسه با ۰، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی لای) در دسته اول ماسه تمیز بدون هیچ گونه افزودنی، در دسته دوم ماسه با ۱۰٪ لای، در دسته سوم ماسه با ۲۵٪ لای و در دسته چهارم ماسه با ۵۰٪ لای که به ترتیب S0، S10، S25 و S50 نام گذاری شده‌اند. به عبارت دیگر، S0 = خاک حاوی ۱۰۰٪ ماسه و ۰٪ لای. S10 = خاک حاوی ۹۰٪ ماسه و ۱۰٪ لای، S25 = خاک حاوی ۷۵٪ ماسه و ۲۵٪ لای، S50 = خاک حاوی ۵۰٪ ماسه و ۵۰٪ لای.

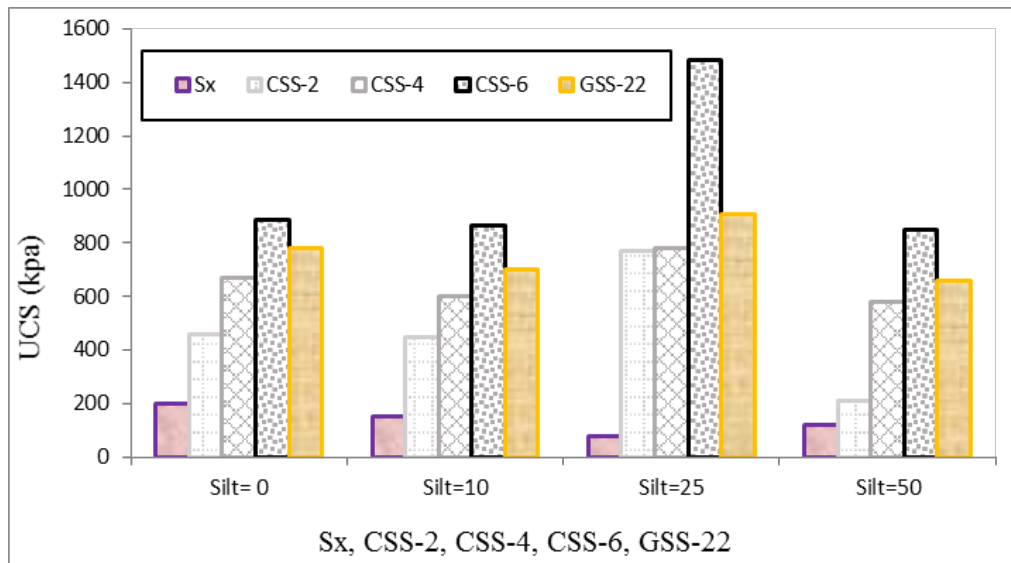
#### ۳-۲- خاک‌های زیربنایی تثبیت شده با سیمان (CSS).

برای خاک‌های زیربنایی تثبیت شده با سیمان (CSS)، افزودنی سیمان در محتویات مختلف ۲٪، ۴٪ و ۶٪ به ۴ دسته خاک (SX) اضافه شده است. هر یک از مخلوط‌های به دست آمده به سه قسمت مساوی تقسیم شده و هر قسمت به صورت استاندارد در داخل قالب آزمایش فشرده می‌شود تا بر اساس چگالی ۵۰٪ به وزن مخصوص مورد نظر برسد.

#### ۳-۳- خاک‌های زیربنایی تثبیت شده با ژئوپلیمر (GSS).

برای ساخت خاک‌های GSS، فرآیند تهیه بایندرهای ژئوپلیمری تثبیت شده به طور خلاصه در سه مرحله ارائه شده است. ابتدا خاک طبیعی (ماسه با





شکل ۲. نتایج آزمایش UCS برای انواع مختلف خاک‌های طبیعی و تثبیت شده.

Fig. 2. UCS test results for different types of natural and stabilized soils.

و کاربرد کلسیم به ترتیب G و K نامگذاری شده‌اند. حداکثر مقدار مقاومت، یعنی طرح اختلاط بهینه، در نمونه‌های GSS، مطابق با ردیف ۱۲ جدول‌های ۳ تا ۶ به دست آمده است. بنابراین، طرح مخلوط بهینه شامل  $G + 7\%K + 15\%G$  است و در نتیجه ژئوپلیمر بهینه پیشنهادی از ترکیب  $22\%$  پودر شیشه و کاربرد کلسیم (مربوط به جدول ۵- حاوی  $25\%$  لای) ساخته می‌شود. نتایج آزمایش UCS برای نمونه‌های  $G15K7S0$ ،  $G15K7S10$ ،  $G15K7S25$  و  $G15K7S50$  به ترتیب  $780$ ،  $699$  kPa،  $909$  kPa و  $660$  kPa به دست آمد. بنابراین،  $G15K7S25$  متشکل از  $25\%$  لای است که دارای حداکثر مقاومت  $909$  kPa در بین تمام محتویات لای است. آزمون UCS خاک‌های GSS از نظر پایداری استاتیکی نشان می‌دهد که حد آستانه ریزدانه برای خاک‌های بستر در  $25\%$  نسبت لای یافت می‌شود.

شکل ۲ نشان می‌دهد که خاک GSS بهینه برای  $22-25$  GSS است که بالاترین UCS را شامل می‌شود. لطفاً توجه داشته باشید که  $22-25$  GSS خاک بستر تثبیت شده با ژئوپلیمر  $22\%$  ژئوپلیمر و  $25\%$  لای است. در نتیجه رفتار مکانیکی خاک‌های بستر تثبیت شده تابعی از نوع مواد افزودنی و مقدار ریزدانه‌ها می‌باشد، به طوری که وقتی مقدار لای در خاک کم باشد، مقاومت برشی آن توسط قسمت درشت تحمل می‌شود. با

خاک CSS به شدت کاهش می‌یابد (نقطه  $C2S25$  تا  $C2S50$ ). بنابراین با افزودن سیمان همراه با افزایش لای به خاک، تا مقدار مشخصی لای (حد آستانه)، مقاومت خاک‌های CSS افزایش می‌یابد (نقاط  $C2S25$ ).  $C4S25-C6S25$  بنابراین، برای خاک‌های زیربنایی تثبیت شده، محتوای لای نقش متفاوتی در روند افزایش یا کاهش چسبندگی خاک‌های زیربنایی دارد. بنابراین، آزمون UCS خاک‌های CSS از نظر پایداری استاتیکی نشان می‌دهد که حد آستانه ریزدانه برای خاک‌های بستر در  $25\%$  نسبت لای یافت می‌شود. علاوه بر این، نمونه  $C6S25$  دارای حداکثر مقدار مقاومت در بین تمام نمونه‌های خاک است. بنابراین، حداکثر مقدار خاک CSS برای  $25-6$  CSS خواهد بود که بالاترین UCS را شامل می‌شود. لطفاً توجه داشته باشید که  $25-6$  CSS خاک بستر تثبیت شده با سیمان با محتوای  $6\%$  سیمان و  $25\%$  لای است.

### ۵-۳- خاک‌های GSS

خاک‌های GSS به منظور یافتن طرح اختلاط بهینه خاک GSS، طرح‌های مختلف اختلاط پیشنهادی مطابق جدول ۲، تحت آزمون UCS بررسی شده است. جدول‌های ۳ تا ۶ آزمایش UCS را برای خاک‌های GSS با محتوای لای مختلف نشان می‌دهند. در جدول‌ها، پودر شیشه

جدول ۴. آزمایش‌های UCS برای GSS-S۰

Table 4. UCS tests for GSS-S0

ردیف	نمونه	UCS (kPa)
۱	S10	۱۷۰
۲	G9S10	۱۰۰
۳	G9K4S10	۶۴۹
۴	G9K7S10	۶۶۹
۵	G9K10S10	۵۱۹
۶	G9K13S10	۴۷۴
۷	K7S10	۳۹۵
۸	G3K7S10	۵۲۴
۹	G6K7S10	۶۶۹
۱۰	G9K7S10	۵۹۹
۱۱	G12K7S10	۶۴۹
۱۲	G15K7-S10	۶۹۹
۱۳	G18K7S10	۶۸۶
۱۴	G21K7S10	۶۷۴

جدول ۳. آزمایش‌های UCS برای GSS-S۱۰

Table 3. UCS tests for GSS-S10

ردیف	نمونه	UCS (kPa)
۱	S0	۲۵۰
۲	G9S0	۱۱۱
۳	G9K4S0	۷۲۵
۴	G9K7S0	۷۴۷
۵	G9K10S0	۵۷۹
۶	G9K13S0	۵۳۰
۷	K7S0	۴۴۲
۸	G3K7S0	۵۸۵
۹	G6K7S0	۶۴۱
۱۰	G9K7S0	۷۴۷
۱۱	G12K7S0	۷۲۵
۱۲	G15K7-S0	۷۸۰
۱۳	G18K7S0	۷۶۶
۱۴	G21K7S0	۷۵۳

با حداکثر ظرفیت  $0.005 \pm 10 \text{ kN}$  با نرخ کرنش ثابت  $0.5 \text{ mm/min}$  بارگذاری شد. همانطور که در شکل ۳- (c) نشان داده شده است. بنابراین به صورت دیجیتالی میزان کرنش‌ها توسط گیج اندازه‌گیری ثبت می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که بار اعمال شده به حداکثر مقدار برسد و سپس گیج اندازه‌گیری تقریباً ثابت می‌ماند یا شروع به کاهش می‌کند. کار انجام شده و منحنی تنش-کرنش با داده‌های ثبت به دست می‌آید. شکل ۳- (a) و (b) وضعیت بحرانی رشد ترک در خاک CSS را در مقایسه با خاک GSS نشان می‌دهد که هر دو به ترتیب در معرض بار مساوی حدود  $780 \text{ کیلوپاسکال}$  هستند. با مقایسه ترک‌ها در هر دو نمونه، مشخص می‌شود که در خاک GSS، هیچ ترک قابل مشاهده‌ای مشاهده نشد، در حالی که رشد ترک‌ها در CSS مشهود است.

افزودن مقداری لای بیشتر، لای در تحمل برشی خاک نیز مشارکت خواهد داشت. مقدار لای که در آن رفتار خاک تغییر می‌کند، در این میان وجود ماده لای باعث افزایش مقاومت برشی خاک می‌شود، حالت گذار مقدار لای نامیده می‌شود. شکل ۲ نشان می‌دهد که خاک‌های بستر تثبیت شده با محتوای لای  $25\%$ ، دارای بالاترین UCS در مقایسه با سایر خاک‌های بستر تثبیت شده با درصد لای متفاوت هستند. و استحکام-GSS-۲۲  $25\%$  بیشتر از خاک‌های CSS-۲-۲۵ و CSS-۴-25 است. مقاومت فشاری GSS-۲۲-۲۵ حدود  $16\%$  بیشتر از نمونه خاک CSS-۴-۲۴ بود. بنابراین، جایگزینی جزئی سیمان با خاک GSS می‌تواند به طور پایدار به منظور تثبیت خاک بستر بدون شکستگی اعمال شود.

به منظور به دست آوردن مقدار تنش کرنش نمونه‌ها، پس از قرار دادن نمونه‌های خاک در دستگاه آزمایش UCS، یک سیستم بارگیری خودکار

جدول ۶. آزمایش‌های UCS برای GSS-S25

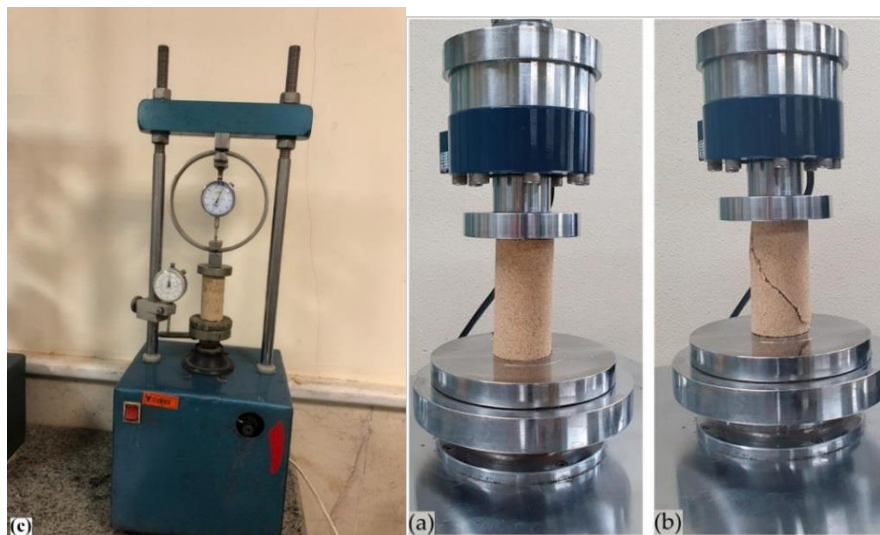
Table 6. UCS tests for GSS-S25

ردیف	نمونه	UCS (kPa)
۱	S50	۶۰
۲	G9S50	۵۰
۳	G9K4S50	۶۳۱
۴	G9K7S50	۶۵۰
۵	G9K10S50	۵۰۱
۶	G9K13S50	۴۶۰
۷	K7S50	۳۵۲
۸	G3K7S50	۵۰۷
۹	G6K7S50	۶۵۰
۱۰	G9K7S50	۵۷۷
۱۱	G12K7S50	۵۶۹
۱۲	G15K7-S50	۶۶۰
۱۳	G18K7S50	۶۴۴
۱۴	G21K7S50	۶۳۶

جدول ۵. آزمایش‌های UCS برای GSS-S50

Table 5. UCS tests for GSS-S50

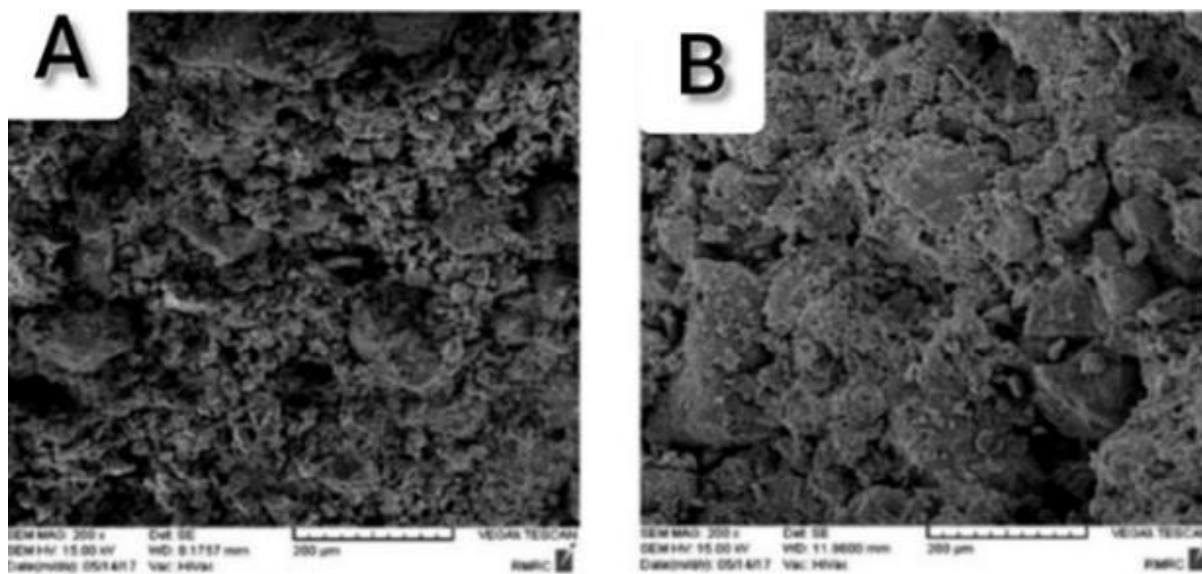
ردیف	نمونه	UCS (kPa)
۱	S25	۱۱۰
۲	G9S25	۱۳۰
۳	G9K4S25	۸۴۴
۴	G9K7S25	۸۷۰
۵	G9K10S25	۶۷۵
۶	G9K13S25	۶۱۷
۷	K7S25	۵۱۴
۸	G3K7S25	۶۸۱
۹	G6K7S25	۸۷۰
۱۰	G9K7S25	۷۷۹
۱۱	G12K7S25	۸۴۴
۱۲	G15K7-S25	۹۰۹
۱۳	G18K7S25	۸۹۲
۱۴	G21K7S25	۸۷۶



شکل ۳. وضعیت ترک خوردگی خاک‌های تثبیت شده (a) CSS-4-25 (b) GSS-22-25 (c) دستگاه آزمایش UCS

Fig. 3. State of cracking of stabilized soils (a) UCS test device (b) CSS-4-25 (c) GSS-22-25





شکل ۴. تصویربرداری الکترونیکی با بزرگنمایی  $200\times$  (A) GSS-22-10 (B) خاک GSS-22-25

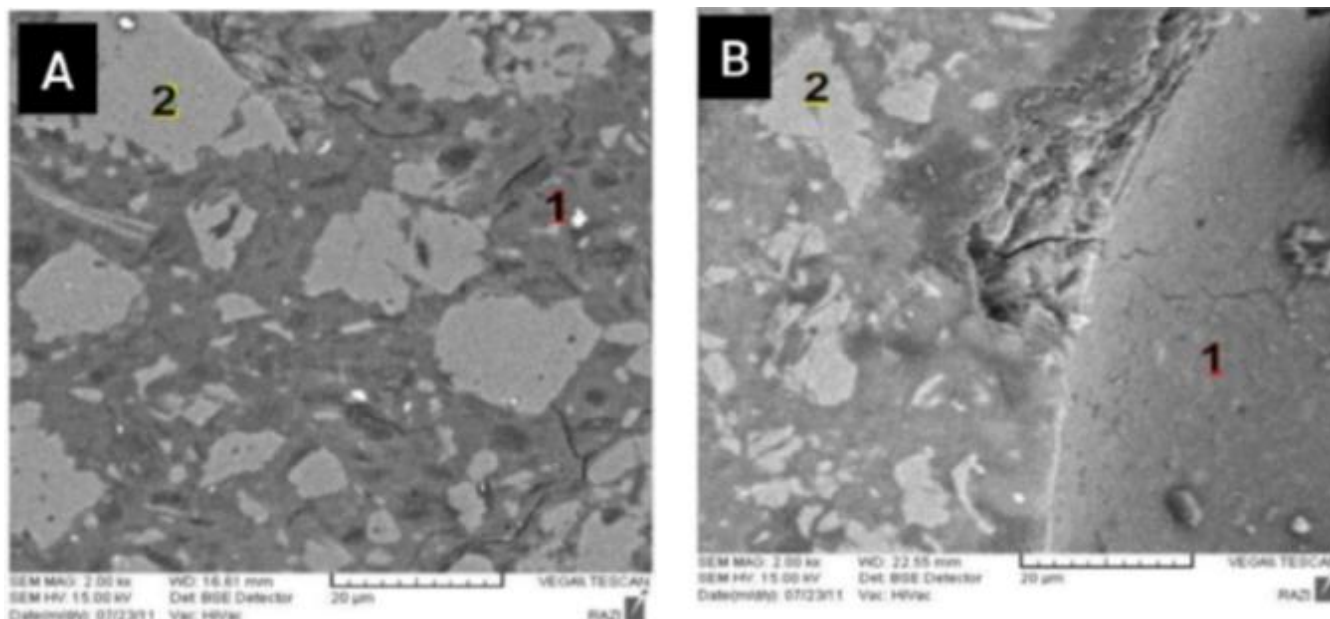
Fig. 4. Electronic imaging with 200X magnification (A) GSS-22-10 (B) GSS-22-25

است [۳۳-۳۵].

توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس CT برای تجزیه و تحلیل تکامل ریزساختار، به ویژه توزیع تخلخل در خاک‌های GSS به تصویب رسید. در اینجا تجزیه و تحلیل SEM برای شناسایی محصولات واکنش و ریزساختار خاک‌های GSS با محتوای لای مختلف انجام می‌شود. شکل ۴ تصویربرداری الکترونیکی از دو سری خاک GSS-۲۲-۱۰ و GSS-۲۲-۲۵ به ترتیب با ۱۰٪ و ۲۵٪ لای را با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر نشان می‌دهد. در این دو شکل که به ترتیب مربوط به نمونه‌های GSS-۲۲-۱۰ و GSS-۲۲-۲۵ می‌باشد، محتوای لای از ۱۰٪ به ۲۵٪ تغییر یافته است، در حالی که سایر پارامترهای آزمایش ثابت نگه داشته شده‌اند. شکل ۴- (A) نشان می‌دهد که نمونه GSS-۲۲-۱۰ بسیار متخلخل، ناهمگن و دارای ساختار سطحی نافشرده بود، در حالی که تصویر نمونه برای محتویات لای ۲۵٪ شکل ۴- (B) ساختار متراکم و فشرده را نشان می‌دهد. منافذ کمتری دارند بر اساس نتایج آزمون UCS. خاک‌های GSS-۲۲-۱۰ و GSS-۲۲-۲۵ به ترتیب دارای مقاومت ۶۹۹ kPa و ۹۰۹ kPa هستند. دلیل آن این است که با افزایش تعداد منافذ در سطح خاک، غلظت تنش در قسمت همگن خاک افزایش یافته و در نتیجه مقاومت کاهش می‌یابد. این رفتار مشابه رفتاری است که ساهو و سینگ در سال ۲۰۲۲ گزارش کرده‌اند [۳۶].

#### ۶- تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

در این مقاله، بحث در مورد خواص شیمیایی نمونه‌های خاک نه تنها بر اساس آزمایش‌های مکانیکی است، بلکه در این تحقیق، واکنش شیمیایی ترکیبات خاک با استفاده از فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز اثبات شده است [۳۰ و ۲۹]. آزمایش‌های SEM نسبت‌های  $Na/Al$  و  $Si/Al$  نقش مهمی در بهبود ژئوپلیمریزاسیون و رفتار فیزیکی-شیمیایی ژئوپلیمر بازی کردند. زمان پخت و دمای محیط دو عاملی هستند که بر واکنش‌های پوزولانی و بهبود مقاومت نمونه‌های تثبیت شده پوزولانی تأثیر می‌گذارند [۳۱]. همچنین بر اساس آزمایش‌های SEM و پراش اشعه ایکس دریافتند که مکانیسم تثبیت به دلیل پیوند فیزیکی به جای برهم‌کنش شیمیایی است و پلی‌آکریل امید عامل اصلی برای افزایش خواص فیزیکی و مهندسی خاک است [۳۲]. با توجه به مشخصات مواد و آنالیز پراش اشعه ایکس نسبت  $Si/Al$  محاسبه شده است که بیشتر آن متعلق به خاک GSS با ۷٪ کاربید کلسیم به عنوان فعال کننده قلیایی و ۱۵٪ پودر شیشه و برابر با ۴/۲ است که با نتایج مشابه محققین مختلف مطابقت دارد و حداکثر مقاومت فشاری با حداکثر مقدار نسبت  $Si/Al$  نسبت مستقیم دارد و به نظر می‌رسد این نسبت برای تشکیل ژل ژئوپلیمری و ژئوپلیمریزاسیون در محدوده معقولی باشد. همچنین، با توجه به تاریخچه، غلظت فعال کننده قلیایی عامل قابل توجهی برای فرآیند ژئوپلیمریزاسیون



شکل ۵. تصویربرداری الکترونیکی با بزرگنمایی X 1000 (A) S25 (B) GSS-22-25

Fig. 5. Electronic imaging with magnification 1000 X (A) S25 (B) GSS-22-25

بزرگ شدن فاز شماره ۱ و کوچکتر شدن فاز شماره ۲ و ذرات کوارتز می‌شود. بنابراین مقاومت خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر افزایش می‌یابد. مقایسه این دو شکل لزوم استفاده از فعال کننده قلیایی را به منظور تکمیل ژئوپلیمریزاسیون و دستیابی به خواص مکانیکی مناسب برای بهبود تثبیت خاک بستر را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل ۵ برای خاک GSS-۲۲-۲۵، طیف SEM نشان می‌دهد که استفاده از کاربید کلسیم به عنوان یک فعال کننده قلیایی مناسب و پودر شیشه به عنوان مواد ژئوپلیمری پایه می‌تواند برای تثبیت خاک‌های زیرین استفاده شود و می‌تواند جایگزین مناسبی برای خاک سیمان باشد.

#### ۷- نتایج و بحث دینامیکی

##### ۷-۱- نتایج آزمایش سه محوری سیکی خاک اشباع شده

در این بخش، پارامترهای دینامیکی شامل مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی برای سه نوع خاک طبیعی، خاک-ژئوپلیمر و خاک-سیمان با نسبت‌های مختلف لای ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ در شرایط زهکشی نشده بررسی شده است. شکل ۶ دستگاه آزمایش سه محوری سیکی را به همراه یک نمونه خاک قرار داده شده در سلول، قبل از اعمال بارگذاری نشان می‌دهد. ساخت نمونه‌ها به روش تراکم مرطوب انجام شد، نمونه‌ها با قطر

شکل ۵-(A, B) تصویربرداری الکترونیکی را به ترتیب با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر دو سری خاک S25 و GSS-۲۲-۲۵ نشان می‌دهد. به طور کلی، تثبیت کننده‌های ژئوپلیمر مواد کامپوزیتی هستند که از یک فاز پایه ژل ناشی از واکنش ژئوپلیمریزاسیون به همراه فازهای کریستالی واکنش نداده تشکیل شده است که این فازهای کریستالی ممکن است از ناخالصی‌های موجود در مواد خام یا در نتیجه فرآیند تبلور مجدد فاز پایه ایجاد شوند. با در نظر گرفتن شکل ۵-(A, B)، در هر دو تصویر SEM، دو فاز مجزا و متفاوت که با شماره ۱ و ۲ مشخص شده‌اند به وضوح قابل مشاهده است. فاز شماره ۱ واکنش‌های فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و فاز شماره ۲ ذرات کوارتز و واکنش نداده را نشان می‌دهد، با این تفاوت که در نمونه خاک S25 بدون مواد افزودنی شکل ۵-(A)، فاز شماره ۲ از ذرات بزرگتر تشکیل شده است، فضای بیشتر و وجود آن‌ها از نظر حجم و وزن بیشتر احساس می‌شود. بنابراین، نشان می‌دهد که برای خاک S25، به نظر می‌رسد ژل ژئوپلیمر وجود ندارد و تأخیر در واکنش ژئوپلیمریزاسیون را تأیید می‌کند. اما در شکل ۵-(B)، به معنی خاک GSS-۲۲-۲۵، فاز شماره ۱ که واکنش‌های فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را نشان می‌دهد، بیشترین فضا را اشغال می‌کند و به نظر می‌رسد با گذشت زمان مقدار دیگری از ذرات فاز کوارتز ( $\text{SiO}_2$ ) حل می‌شود و وارد فاز شماره ۱ (فرآیند ژئوپلیمریزاسیون) می‌شود که منجر به

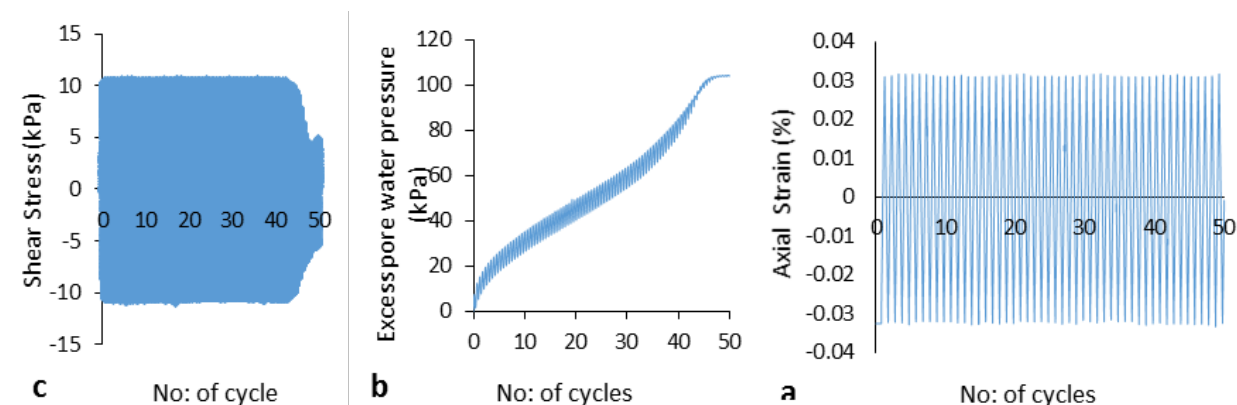


شکل ۶. دستگاه آزمایش سه محوری سیکلی

Fig. 6. Cyclic three-axis testing device

سیکلی برای نوع نمونه (در شرایط زهکشی نشده با تراکم نسبی ۰/۵۰) شامل خاک طبیعی (P)، خاک سیمان (C) و خاک-ژئوپلیمر (G) در ۵۰ سیکل بارگذاری با فرکانس ۰/۱ Hz و بر اساس کنترل کرنش (کرنش‌های مختلف ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۳) اعمال شده است که شکل ۷-(a)، (b) و (c) به ترتیب کرنش محوری، فشار آب منفذی اضافی و نمودارهای تنش برشی را بر اساس سیکل‌های بارگذاری نشان می‌دهد. از آنجایی که نتایج پژوهشگران مختلف حاکی از آن است که به چرخه دهم آزمون نتایج مناسبی داده خواهد شد (به دلیل دستیابی به پایداری در منحنی تنش-کرنش)، در پژوهش حاضر نیز چرخه دهم به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شد. برای انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل نتایج هر آزمایش نیز منحنی‌های پسماند تنش محوری-کرنش محوری برای هر نمونه تهیه و مدول الاستیسیته و نسبت میرایی را برای هر چرخه بارگذاری به دست آوردیم.

۷۱ mm و ارتفاع ۱۶۰ mm با دانسیته حدود ۰/۵۰٪ پس از ساخت به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت، به مدت ۲۸ روز در کیسه‌های آب بند در وان آب قرار داده شدند. برای دستیابی به درجه اشباع بیش از ۰/۹۵٪ برای خاک طبیعی (P)، خاک-ژئوپلیمر (G) و خاک-سیمان (C)، چندین مرحله اشباع‌سازی با استفاده از فشار برگشتی بر روی نمونه‌ها انجام شد که برای این منظور فشار اعمال شده برای اشباع خاک‌های طبیعی حدود ۱۵۰ kPa تا ۲۰۰ kPa و برای نمونه‌های تثبیت شده حدود ۲۰۰ kPa تا ۲۵۰ kPa در نظر گرفته شد. در پایان، سه نوع خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C) و خاک-ژئوپلیمر (G) به طور جامع و یکنواخت تحت فشارهای سه محوری ۵۰ kPa، ۵۰ kPa و ۱۵۰ kPa قرار گرفتند، در ادامه بارگذاری تا ۵۰ سیکل با فرکانس ۰/۱ Hz، با دامنه کرنش‌های مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۳) به نمونه‌ها اعمال شد. به منظور به دست آوردن مقادیر مدول برشی دینامیکی و نسبت میرایی، مطابق آنچه گفته شد تعدادی آزمایش سه محوری



شکل ۷. نمودارهای (a) کرنش محوری (۰/۰۳) (b) فشار آب منفذی وارده ۱۰۰ kPa (c) تنش برشی

Fig. 7. Diagrams of (a) axial strain (0.03) (b) incoming pore water pressure of 100 kPa (c) shear stress

نوع افزودنی دارای استحکام برشی و سختی بالاتری است، به ویژه در کرنش‌های کوچک. خاک تثبیت شده با ۲۲٪ ژئوپلیمر و ۴٪ سیمان، مدول برش دینامیکی نمونه‌ها را با نسبت‌های مختلف لای به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. مطابق شکل ۱۰-۱ (c) مدول برشی دینامیکی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر در نسبت لای ۵۰٪ و فشار محصور کننده ۱۵۰ kPa حدود ۳۰۶۰۰۰ kPa به دست آمد، در حالی که این مقدار برای خاک تثبیت شده با سیمان حدود ۲۶۷۰۰۰ kPa و برای خاک طبیعی ۱۱۶۰۰۰ kPa بود که به ترتیب حدود ۱۴٪ و ۱۶۴٪ افزایش را نسبت به خاک تثبیت شده با سیمان و خاک طبیعی نشان می‌دهد. دلیل این افزایش استحکام اساساً به دلیل ایجاد چسبندگی حاصل از فرآیند هیدراتاسیون سیمان برای خاک - سیمان و ژئوپلیمرزاسیون برای خاک - ژئوپلیمر است.

#### ۷-۲-۲- اثر نسبت لای

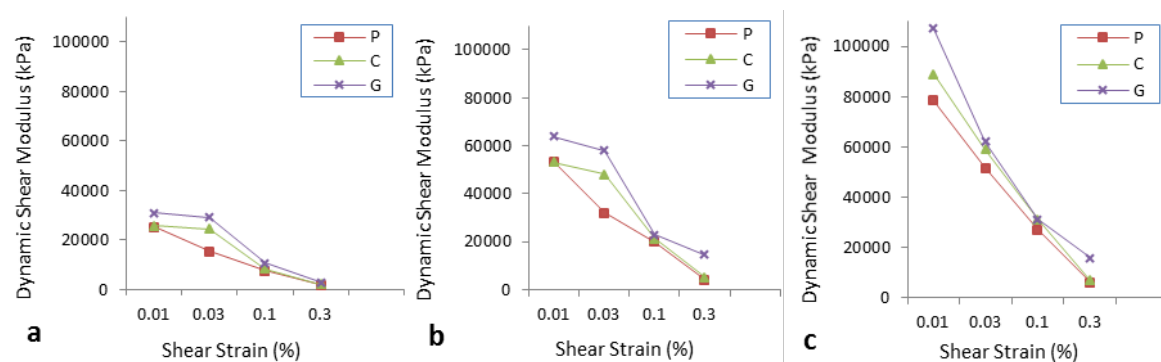
همانطور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشهود است، زمانی که ژئوپلیمر و سیمان برای خاک خالص جایگزین شد، مقادیر مدول برشی افزایش یافت. مطابق نمودارهای c و b و a مندرج در شکل ۱۰، افزایش مقادیر مدول برشی، در نسبت لای ۲۵٪ و ۵۰٪ به خصوص در کرنش برشی کوچکتر (۰/۰۱)، محسوس‌تر است و نمودارهای c و b و a شکل ۸ نشان دهنده آن است که در نسبت لای ۱۰٪ به دلیل افزودن مقدار لای کمتر از حد آستانه ریزدانه خاک، اساساً مواد لای باعث کاهش اصطکاک و فشار تماس بین دانه‌ها (با ایجاد لایه انتقالی بین دانه‌ها و خاک‌های درشت) می‌شود، نمونه‌های تثبیت

#### ۷-۲- مدول برشی دینامیکی

همانطور که در بالا اشاره شد به منظور بررسی اثر تثبیت خاک بر مقادیر مدول برشی دینامیکی خاک، سه نوع خاک شامل خاک طبیعی (P)، خاک - سیمان (C) و خاک - ژئوپلیمر (G) بررسی شده است. شکل‌های ۸-۱۰، مدول برشی دینامیکی - منحنی‌های کرنش برشی سه نوع خاک شامل خاک طبیعی (P)، خاک - سیمان (C) و خاک - ژئوپلیمر (G) را برای نسبت‌های مختلف لای ۱۰٪، ۲۵٪ و ۵۰٪ تحت بارگذاری سه محوری سیکلی مختلف (۰/۰۱، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۳) نشان می‌دهد. نتایج بیان کننده آن است که مدول برشی دینامیکی تابعی از نوع افزودنی، کرنش برشی، مقدار ریزدانه‌ها و فشار همه جانبه است. بنابراین در این بخش عوامل موثر بر رفتارهای دینامیکی خاک طبیعی و تحکیم شده، شامل مواد افزودنی خاک، نسبت‌های لای، کرنش‌های برشی، فشار محصور بررسی می‌شود. نتایج در منحنی‌های مدول برشی دینامیکی - کرنش برشی در واحد kPa (کیلوپاسکال) ارائه خواهد شد.

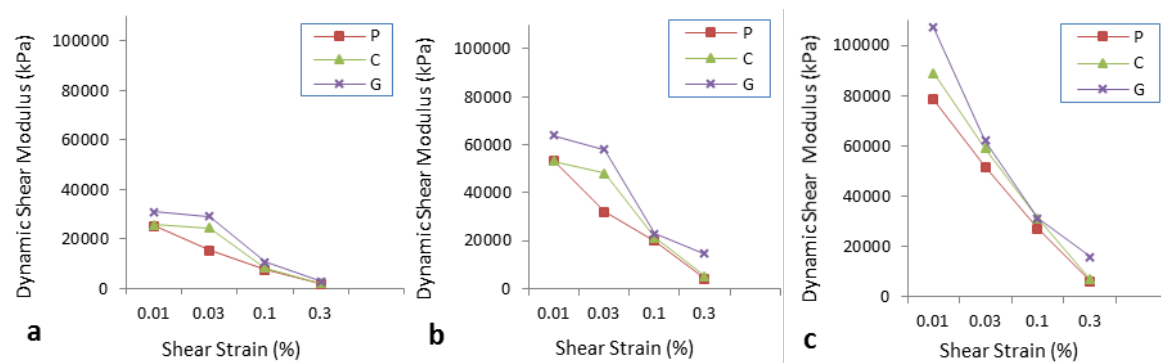
#### ۷-۲-۱- تأثیر مواد افزودنی خاک

نتایج شکل ۸-۱۰ نشان می‌دهد که مقادیر مدول برشی دینامیکی خاک - ژئوپلیمر بیشتر از خاک طبیعی و خاک - سیمان در تمامی محدوده‌های کرنش‌های برشی است. مقادیر مدول برشی با جایگزینی سیمان توسط ژئوپلیمر افزایش یافت. بنابراین، جایگزینی سیمان با ژئوپلیمر می‌تواند از دیدگاه زیست محیطی مورد توجه قرار گیرد. مدول برشی دینامیکی با



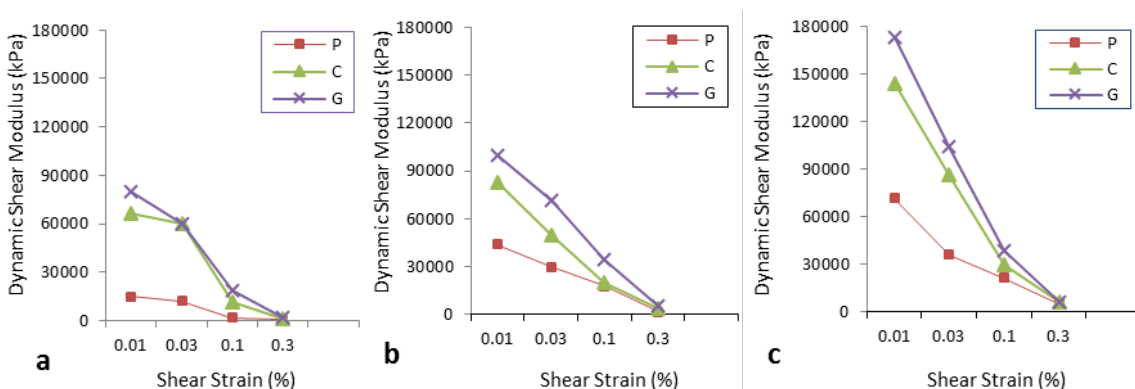
شکل ۸. مدول برشی دینامیکی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۱۰٪ لای  
(a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 8. Dynamic shear modulus-shear strain for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 10% clay (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa



شکل ۹. مدول برشی دینامیکی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۲۵٪ لای (a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 9. Dynamic shear modulus-shear strain for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 25% clay (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa



شکل ۱۰. مدول برشی دینامیکی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۵۰٪ لای (a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 10. Dynamic shear modulus-shear strain for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 50% clay (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa

دینامیکی کاهش می‌یابد و مطابق نمودارهای C و b, a مندرج در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، افزایش کرنش برشی باعث اضافه شدن نسبت میرایی خواهد شد.

#### ۷-۳- نسبت میرایی

به منظور بررسی اثر تثبیت بر میرایی خاک، سه نوع خاک شامل خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C) و خاک-ژئوپلیمر (G) بررسی شده است. نمودارهای C و b, a مندرج در شکل‌های ۱۳-۱۱، منحنی‌های نسبت میرایی-کرنش برشی سه نوع خاک شامل خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C) و خاک-ژئوپلیمر (G) را برای نسبت‌های مختلف لای ۰/۱۰، ۰/۲۵ و ۰/۵۰ تحت بارگذاری سه محوری سیکلی مختلف (۵۰ kPa، ۱۰۰ kPa، ۱۵۰ kPa)، با کرنش‌های برشی مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۱ و ۰/۳) را نشان می‌دهد. به طور کلی آنچه از نتایج به دست می‌آید آن است که نسبت میرایی نمونه‌ها تابعی از فشار همه جانبه، نسبت لای و انواع مواد افزودنی می‌باشد که در ادامه اثر هر یک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

#### ۷-۳-۱- تأثیر مواد افزودنی خاک

نمودارهای C و b, a مندرج در شکل ۱۲ در کنار سایر نمودارها نشان می‌دهد که خاک - سیمان با نسبت‌های مختلف لای، علی‌رغم داشتن مدول برشی دینامیکی کمتر از ژئوپلیمر، دارای نسبت میرایی بالاتری نسبت به خاک - ژئوپلیمر است و در نتیجه خاک - ژئوپلیمر نسبت میرایی کمتری نسبت به خاک طبیعی دارد. در گزارش‌های محققان مختلف، عموماً با افزودن سیمان، سفتی نمونه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه نسبت میرایی کاهش می‌یابد، البته میزان عیار سیمان در آزمایش‌ها بیش از ۶٪ بوده است. همچنین بر اساس گزارش محققان، در عیارهای کم سیمان (۴٪ و کمتر) ژل سیمان با ایجاد پیوند مومی بین دانه‌های خاک، نسبت میرایی را افزایش می‌دهد، افزایش نسبت میرایی خاک - سیمان را می‌توان ناشی از آن دانست. اما این پدیده، در خاک - ژئوپلیمر با افزودن ژئوپلیمر و به دلیل پیوندهای ژئوپلیمریزاسیون شیمیایی، چسبندگی بین ذرات خاک افزایش یافته و ساختار خاک سفت‌تر می‌شود و در نتیجه نسبت میرایی خاک - ژئوپلیمر نسبت به سیمان کاهش می‌یابد. (نمودارهای C و b, a مندرج در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳)

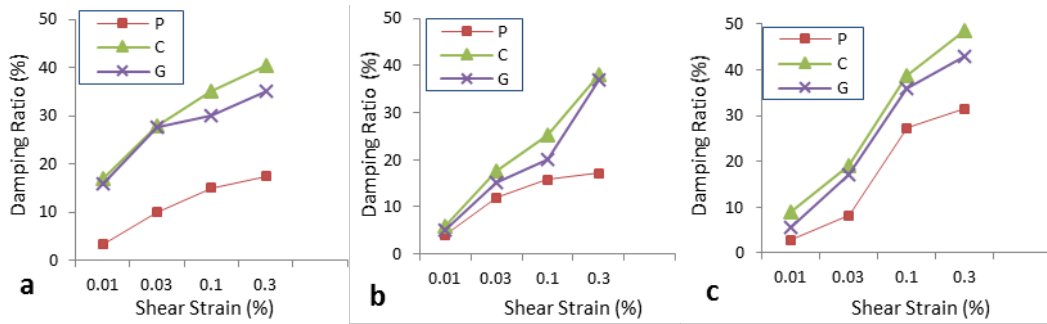
شده نقش مهمی در میزان افزایش مدول برشی دینامیکی ندارند، به ویژه در نمونه تثبیت شده با سیمان. ولی نمودارهای C و b, a شکل ۹ برای نسبت لای ۰/۲۵، با توجه به اینکه مقادیر لای همچنان کمتر از حد آستانه ریزه خاک است، به دلیل وجود مواد تثبیت کننده، مشکل تا حدی حل شده است، به طوری که مدول برشی دینامیکی خاک‌های تثبیت شده. در نسبت لای ۰/۲۵ بیشتر از مدول برش دینامیکی با لای ۰/۱۰ است. در مورد لای ۰/۵۰، به دلیل ایجاد ماتریس لای از نمونه‌ها، فشار تماس بین دانه‌ای افزایش می‌یابد و خاک‌های تثبیت شده در این نسبت لای، نقش بسیار مؤثرتری در افزایش مقادیر مدول برشی دینامیکی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، مدول برشی دینامیکی بزرگ‌تر مربوط به لای ۰/۵۰ است و مدول برش دینامیکی با مقدار فشار همه جانبه و نسبت لای نسبت مستقیم دارد، به طوری که بالاترین مدول برشی دینامیکی در آستانه ۰/۵۰ ریزدانه‌ها به دست آمد. دلیل خواص پایداری دینامیکی خاک طبیعی در ۰/۵۰ لای، این است که با افزایش لای از ۰/۱۰ به ۰/۵۰ در شکل ۸-۱۰، ضمن اینکه که مقادیر مدول برشی دینامیکی خاک طبیعی تا ۰/۵۰ لای افزایش می‌یابد. با توجه به تأثیر نسبت لای بر مقاومت برشی، با افزایش کرنش‌های برشی، روند کاهش مدول برشی دینامیکی خاک طبیعی، در نسبت ۰/۲۵ و ۰/۵۰ لای، با شیب نزولی ملایم همراه است، در حالی که در نسبت لای ۰/۱۰، کاهش مقاومت با شیب نزولی تند رخ می‌دهد. بنابراین با در نظر گرفتن آزمایشات استاتیکی پیشین و منحنی‌های نسبت مقاومت برشی به لای برای نمودارهای C و b, a شکل ۱۰، نشان می‌دهد که پایداری خواص استاتیکی و دینامیکی خاک به ترتیب برای ۰/۲۵ و ۰/۵۰ لای اتفاق می‌افتد.

#### ۷-۲-۳- اثر فشار همه جانبه

نتایج به دست آمده از نمودارهای C و b, a شکل ۹ نشان دهنده آن است که با افزایش فشار محصور کننده، مقادیر مدول برشی برای نمونه‌های خاک خالص، خاک-سیمان و خاک-ژئوپلیمر افزایش یافت که این افزایش برای خاک - ژئوپلیمر و خاک - سیمان در محدوده فشارهای محصور بالاتر معنی‌دار بود، به ویژه این افزایش برای خاک - ژئوپلیمر بیشتر بوده است. (نمودارهای C شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰)

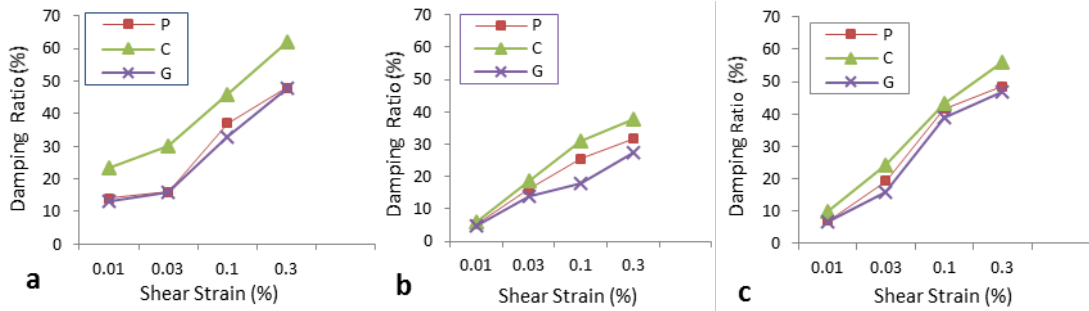
#### ۷-۲-۴- اثر کرنش‌های برشی

نتایج برآمده از نمودارهای C و b, a مندرج در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که برای همه نمونه‌ها با افزایش کرنش برشی، مدول برشی



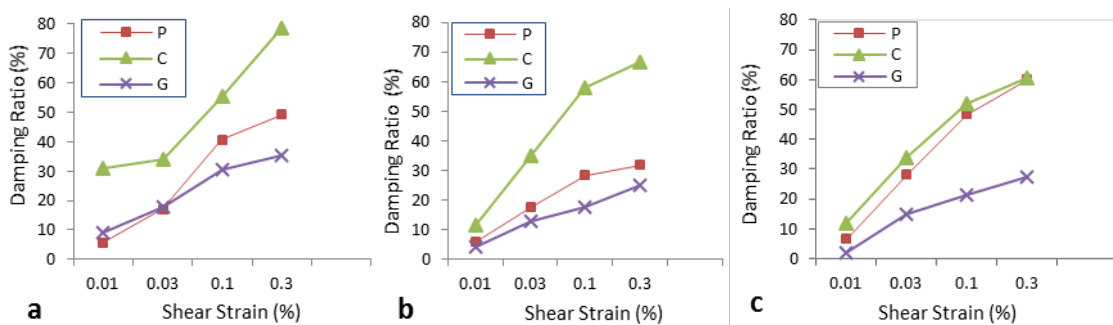
شکل ۱۱. نسبت میرایی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۱۰٪ لای (a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 11. Shear strain-damping ratio for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 10% silt (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa



شکل ۱۲. نسبت میرایی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۲۵٪ لای (a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 12. Shear strain-damping ratio for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 25% silt (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa



شکل ۱۳. نسبت میرایی - کرنش برشی برای خاک طبیعی (P)، خاک-سیمان (C)، خاک-ژئوپلیمر (G) با ۵۰٪ لای (a) فشار همه جانبه ۵۰ kPa (b) فشار همه جانبه ۱۰۰ kPa (c) فشار همه جانبه ۱۵۰ kPa

Fig. 13. Shear strain-damping ratio for natural soil (P), soil-cement (C), soil-geopolymer (G) with 50% silt (a) All-round pressure 50kPa (b) All-round pressure 100kPa (c) All-round pressure 150kPa

### ۷-۳-۲- اثر نسبت لای

با توجه به تأثیر نسبت‌های لای بر نسبت میرایی خاک، خاک طبیعی در نسبت‌های لای بالاتر، سریع‌تر به نسبت میرایی بالاتر و پایدار می‌رسد که این موضوع در نمودارهای C و B و A شکل ۱۱ به وضوح یافت می‌شود. نسبت میرایی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر در نسبت لای ۵۰٪ و فشار محصور کننده ۱۵۰ kPa نسبت به خاک طبیعی از مقدار ۶۰٪ به ۲۷٪ کاهش یافته است که حدود ۴۵٪ کاهش نشان می‌دهد. (نمودار C شکل ۱۳)

### ۷-۳-۳- اثر فشار همه جانبه

همانطور که از نمودارهای C و B و A شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشخص است فشار محصور کننده تأثیر زیادی بر مقدار مدول برشی دینامیکی داشت در حالی که مطابق نمودارهای C و B و A شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ این فشار تأثیر ناچیزی بر نسبت میرایی دارد. برای همه نمونه‌ها، با نگاهی کلی به نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ می‌توان دید که نسبت میرایی در فشارهای همه جانبه ۵۰ kPa تا ۱۰۰ kPa روند کاهشی داشته در حالی که نسبت میرایی برای فشارهای ۱۰۰ kPa تا ۱۵۰ kPa رو به افزایش است.

### ۸- نتیجه‌گیری

با توجه به مسائل پایداری زیست محیطی و مزایای اقتصادی جایگزینی سیمان با مواد بازیافتی مانند پودر شیشه، یک بررسی مقایسه‌ای آزمایشگاهی بر روی سه سری خاک طبیعی، خاک‌های زیربنایی تثبیت شده با سیمان (CSS) و خاک‌های زیربنایی تثبیت شده با ژئوپلیمر (GSS) مبتنی بر شیشه، پودر و کاربید کلسیم از نظر خواص استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. نتیجه این مطالعه می‌تواند ژئوپلیمر را به عنوان کاربردهای بهبود زمین و زیرسازی فراهم کند. از این مطالعه می‌توان نتایج زیر را به دست آورد:

■ خواص مکانیکی خاک تابعی از مواد افزودنی و ریزدانه‌ها است. ژئوپلیمر مبتنی بر پودر شیشه و کاربید کلسیم می‌تواند به عنوان یک پارامتر موثر برای تحکیم خاک بستر استفاده شود. ترکیب ۱۵٪ پودر شیشه به عنوان ماده پایه با ۷٪ کاربید کلسیم به عنوان یک فعال کننده قلیایی با ۲۵٪ لای دارای بالاترین مقاومت فشاری محصور نشده برای خاک‌های طبیعی است و غلظت‌های بالاتر یا کمتر از مقدار بهینه مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد. مقاومت فشاری ژئوپلیمر ۲۲٪ حدود ۱۶٪ بیشتر از سیمان ۴٪ بود. با جایگزین کردن سیمان به جای ژئوپلیمر، مقدار CaO کاهش یافته

و مقدار  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل SEM نشان می‌دهد که ژئوپلیمر مبتنی بر پودر شیشه و کاربید کلسیم، ماده مناسبی برای تثبیت خاک زیرین و مسدود کردن فضاهای منافذ است و در نتیجه باعث افزایش استحکام و یکپارچگی و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود.

■ مدول برشی خاک تابعی از نوع افزودنی، کرنش برشی، میزان ریزدانه‌ها و فشار همه جانبه است، به طوری که مدول برشی با هر نوع افزودنی به ویژه در کرنش‌های کوچک دارای استحکام برشی و سختی بالاتری است. نتایج نشان داد مدول برشی و سختی خاک ژئوپلیمری بیشتر از خاک-سیمانی و خاک طبیعی است. برای همه نمونه‌ها اعم از خاک طبیعی، خاک ژئوپلیمری و خاک سیمانی، مدول برشی با مقدار فشار همه جانبه و نسبت لای نسبت مستقیم دارد. بالاترین مدول برشی در آستانه ۵۰٪ ریزدانه خاک به دست آمد به طوری که مدول برشی نمونه خاک - ژئوپلیمر در سطح کرنش ۰/۱٪ مطابق نمودار C شکل ۱۰ نسبت به نمونه خاک - سیمان ۱۰٪ و نسبت به نمونه خاک بدون افزودنی ۶۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. بنابراین پایداری خصوصیات استاتیکی و دینامیکی خاک به ترتیب در ۲۵٪ و ۵۰٪ آستانه ریزدانه خاک مشاهده شد.

■ برای همه نمونه‌ها با افزایش کرنش برشی مدول برشی کاهش و میرایی افزایش می‌یابد. میرایی نمونه‌ها تابعی از فشار محدود و انواع افزودنی‌ها بود. خاک سیمانی دارای بالاترین نسبت میرایی است و خاک ژئوپلیمری میرایی کمتری نسبت به خاک طبیعی دارد به طوری که آنچه از نمودار A شکل ۱۳ مشخص است مقدار میرایی خاک بهسازی شده با ژئوپلیمر برای سطح کرنش ۰/۱٪، حدود ۲۰٪ از خاک بهسازی شده با سیمان کمتر و تقریباً با خاک معمولی برابر است که این مقدار در سطح کرنش برشی ۰/۳٪ به ۴۵٪ می‌رسد. فشار همه جانبه تأثیر زیادی بر مقدار مدول برشی داشت در حالی که تأثیر ناچیزی بر میرایی دارد. برای همه نمونه‌ها، میرایی برای فشارهای محدود ۵۰ kPa تا ۱۰۰ kPa کاهش یافت، در حالی که میرایی برای فشارهای ۱۰۰ kPa تا ۱۵۰ kPa افزایش یافت.

■ در کنار نتایج فنی فوق، ژئوپلیمرها بر پایه مواد آلومینوسیلیکاتی هستند که هم به صورت طبیعی در پوسته زمین به فراوانی یافت می‌شوند و هم از طریق ضایعات صنایع دیگر تولید می‌شوند، نکته مذکور از یک سو و از سوی دیگر مصرف کم انرژی در فرآیند تولید ژئوپلیمرها به دلیل عمل‌آوری آن‌ها در دمای بسیار پایین، از جمله عواملی هستند که باعث شده ژئوپلیمر نسبت به سیمان از هزینه تولید پایین‌تری برخوردار باشد.



- [10] A. Esparham, A.B. Moradikhou, Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(3) (2021) 1117-1136. )in persian(.
- [11] A. Aghaei Araei, S. Ahmadi, H. Mehrnahad, N. Attarchian, Comparison of Dynamic Behavior of Reconstituted and Core Barrel Sandy Soil Sample by Resonant Column Test in Flexural Mode, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 8-12. )in persian(.
- [12] Y. Jiang, J. Luo, H. Azarkhosh, E. Wu, The switching control method for the nonlinear response of seismic surface based on the local T-S model *Earth Sciences Research Journal*, 24 (2020) 327-333.
- [13] A. Xu, H. Azarkhosh, E. Wu, Monitoring Method of Longitudinal Land Subsidence and Deformation in Seismic Geological Disasters, *Earth Sciences Research Journal*, 24 (2020) 259-266.
- [14] N. Mahbubi Motlagh, A. Noorzad, Discrete Element Method Simulation of Dynamic Behavior of Granular Materials, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10) (2021) 13-13. )in persian(.
- [15] H. Nikpoor, A. Bazrafshan Moghaddam, Effect of uncertainty in soil parameters on dynamic response of the ground using random field theory, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (2022) -. )in persian(.
- [16] M. Keramati, H. Torabi, P. Alidoust, N. Shariatmadari, Evaluating the Effect of Fiber Content on the Shear wave Velocity and Small-strain Shear Modulus of Municipal Solid Waste Using Bender Element (BE), *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(5) (2018) 929-936.
- [17] M. Saadati, M. Derakhshandi, A. Bahmanpour, N. Ganjian, Experimental investigation of cyclic behavior of zeolite cemented sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12) (2022) 17-17. )in persian(.
- [18] h. bahadori, a. khalili, Investigating the Effect of Loading Frequency on the Dynamic Properties of Sand Tire Powder Mixture Using Shaking Table Tests, [1] A. Karimi, M. Amelsakhi, R. Yousefi, A.A. Amooei, Experimental Study on the Effect of Adding Polypropylene Fibers on Soil Stabilized by Cement and Zeolite Replacement, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(4) (2022) 16-16. )in persian(.
- [2] M.S. soltani, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 18-18. )in persian(.
- [3] R. Rehan, M. Nehdi, Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry, *Environmental Science & Policy*, 8(2) (2005) 105-114.
- [4] G.A. Lorenzo, D.T. Bergado, Fundamental parameters of cement-admixed clay—New approach, *Journal of geotechnical geoenvironmental engineering*, 130(10) (2004) 1042-1050.
- [5] K.L. Scrivener, R.J. Kirkpatrick, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 38(2) (2008) 128-136.
- [6] H. Xu, 'Geopolymerisation of aluminosilicate minerals', PhD thesis, Department of Chemical Engineering, in, University of Melbourne Australia, 2001.
- [7] M. Jafari Nadoushan, A.A. Ramezaniapor, Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Pastes and Determination of Optimum Values of Effective Factors, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(6) (2019) 1043-1052. )in persian(.
- [8] R. Baghban SHokatabad, V. Toufigh, M.M. Toufigh, Stabilization of sandy soil with geopolymers based on nanomaterials and Taftan pozzolan, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(9) (2020) 2357-2378. )in persian(.
- [9] M.A. Mohammadzadeh, M.M. Toufigh, Fabrication of geopolymer with recycled glass powder base and its application in modifying strength parameters for clay stabilization, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(5) (2022) 12-12. )in persian(.

- [28] A.I.-A. D2166/D2166M-13, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, in, ASTM International, 2013.
- [29] R.A. Mozumder, A.I. Laskar, Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using Artificial Neural Network, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 291-300.
- [30] M. Sabbagh Gol, V. Toufigh, Feasibility Study of Sandy Soil Stabilization with Glass Powder and Natural Pozzolan Based Geopolymer *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1) (2019) 169-182. )in persian(.
- [31] S. Jamshidvand, A. Ardakani, A. Kordnaeij, Effect of cement and zeolite on silty sand samples under freeze–thaw cycles, *Road Materials and Pavement Design*, 23(8) (2022) 1836-1859.
- [32] R.N. Georgees, R. Hassan, Performance-related properties of low-volume roads when stabilised with a sustainable anionic polyacrylamide: particle and specimen-levels study, *Road Materials and Pavement Design*, 23(3) (2022) 565-582.
- [33] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M. Sumajouw, B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *Materials Journal*, 101(6) (2004) 467-472.
- [34] J. He, Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications, PhD thesis, The Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2012.
- [35] A.B. Pascual, M.T. Tognonvi, A. Tagnit-Hamou, Waste glass powder-based alkali-activated mortar, *International Journal of Research in Engineering Technology*, 03(9) (2014) 15-19.
- [36] S. Sahoo, S. Prasad Singh, Strength and durability properties of expansive soil treated with geopolymer and conventional stabilizers, *Construction and Building Materials*, 328 (2022) 127078.
- Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(6) (2020) 1361-1378.
- [19] A. shakeri, R. Ziaie\_Moayed, M.A. Nozari, Passive Remediation with Colloidal Silica Effect on Shear Strength Properties of oil-contaminated Bushehr Carbonate Sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(1) (2021) 367-382.
- [20] A. Kordnaeij, R. Ziaie Moayed, M. Soleimani, Small Strain Shear Modulus of Sands Grouted with Zeolite-cement Suspension, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5) (2020) 1277-1298. )in persian(.
- [21] k. zargar, A. Ardakani, Comparison of carbonate and quartz sand shear strength parameters with triaxial and simple shear tests, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10) (2021) 14-14. )in persian(.
- [22] A.R. Tabarsa, H. Ghiassian, H. Shahnazari, A. Shafiee, R. Jamshidi C, Damping Characteristics of Silty Sand Reinforced With Carpet Waste Strips, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 42(1) (2010) 65-73. )in persian(.
- [23] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete –A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3) (2014) 1767-1775.
- [24] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 KN-m/m<sup>3</sup>)) 1, ASTM international, 2007.
- [25] P.V. Lade, D.D. Overton, Cementation effects in frictional materials, *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(10) (1989) 1373-1387.
- [26] A. Aldaood, M. Bouasker, M. Al-Mukhtar, Effect of water during freeze–thaw cycles on the performance and durability of lime-treated gypseous soil, *Cold Regions Science and Technology*, 123 (2016) 155-163.
- [27] D.N. Little, Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime, 1995.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. E. Hosseini, A. R. Tabarsa, A. Bahmanpour, *Experimental study of stabilization of natural soil with geopolymer based on glass powder and calcium carbide*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 4827-4846.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21630.7781



