تحلیل استاتیکی و دینامیکی خاک رس تثبیت شده با ژئوپلیمر پوزولان طبیعی باقران

جابر شهیری[۱]، محسن کرامتی[*۱]، حسین مرادی مقدم[۲]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،

***(ایمیل نویسنده مسئول)** keramati@sharoodut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران،

ACCEPTED MANUSCRIPT

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون به روش‌های کم‌کربن برای بهسازی خاک و محدود بودن مطالعات درباره استفاده از پوزولان طبیعی باقران (BNP) برای تثبیت خاک‌ها، این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد مکانیکی، دینامیکی و ریزساختاری یک چسب ژئوپلیمری مبتنی بر BNP در خاک رس CL انجام شد. نوآوری اصلی مطالعه، بررسی هم‌زمان اثر مقدار BNP و دو نوع فعال کننده قلیایی (NaOHو Na_2SiO_3) بر مقاومت فشاری، پاسخ برش ساده دینامیکی و سازوکارهای ریزساختاری خاک رس تحت عمل‌آوری محیطی است. برنامه آزمایشی شامل آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، آزمایش برش ساده دینامیکی در مدت یک روز عمل آوری و تحت چهار دامنه بارگذاری و سه سربار و تحلیل‌های SEM و EDX بود. نتایج نشان داد که فعال‌سازی با NaOH بیشترین افزایش مقاومت فشاری را در خاک رس ایجاد کرد؛ مقاومت ۲۸ روزه مخلوط های BNP ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به‌ترتیب ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۵۰۰ kPa بود .نسبت به خاک طبیعی در همان سن، این مقادیر به‌ترتیب% ۲۲۰، % ۲۷۳و % ۳۶۷ افزایش نشان دادند .در آزمایش برش ساده، حضور ژئوپلیمر و افزایش سربار باعث افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی شد. همچنین، نتایج ریزساختاری نشان داد که انحلال آلومینوسیلیکات‌ها و تشکیل ژل پیوسته، از عوامل اصلی افزایش مقاومت هستند. یافته‌ها نشان می‌دهند که BNP فعال‌شده با قلیا ظرفیت مناسبی برای بهسازی خاک رس دارد؛ با این حال، برای تعمیم نتایج به پروژه‌های اجرایی، انجام آزمون‌های CBR، تحلیل ابعادی و ارزیابی رفتار در مقیاس بزرگ ضروری است.

کلمات کلیدی: پوزولان طبیعی باقران، فعال‌کننده قلیایی، برش ساده، مقاومت فشاری تک محوره، رفتار ریزساختاری

۱- مقدمه

تثبیت از طریق یک واکنش شیمیایی بین مواد معدنی موجود در خاک و مواد چسبنده، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد و تراکم‌پذیری خاک و انقباض تورمی را کاهش می‌دهد [2] ,[1]. آهک، یک تثبیت‌کننده رایج شناخته شده، همراه با سیمان پرتلند معمولی (OPC)، به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، اما شواهد فزاینده‌ای اکنون نشان می‌دهد که این تثبیت‌کننده‌ها به عنوان عوامل ناپایدار زیست‌محیطی کاملاً تثبیت شده‌اند [4] ,[3]. در پاسخ به این نگرانی‌ها، محققان به طور فزاینده‌ای بر توسعه جایگزین‌های پایدارو مقرون به صرفه برای تثبیت‌کننده‌های خاک تمرکز کرده‌اند [5]. محصولات جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی (FA)، سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده آسیاب شده (GGBS)، خاکستر سوخت روغن نخل (POFA)، خاکستر آتشفشانی و گچ قرمز، مواد جایگزین امیدوارکننده‌ای را برای تثبیت خاک ارائه می‌دهند [7] ,[6] [8]. در مقایسه با OPC، ژئوپلیمرها مزایای متعددی از جمله نفوذپذیری کاهش یافته [9]، استحکام بالای اولیه، سخت شدن سریع [11] ,[10]، مقاومت در برابر آتش[12]، رفتار خودتنظیم رطوبت و مقاومت قوی در برابر حملات شیمیایی و اسیدی [14] ,[13] را ارائه می‌دهند. ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند انتشار CO_2 مرتبط با تولید را تا ۶۰ تا ۸۰ درصد کاهش دهد و ژئوپلیمرها را به یکی از امیدوارکننده‌ترین چسب‌های پایدار موجود در حال حاضر تبدیل کند[15].

تحقیقات اخیر تأیید می‌کند که ژئوپلیمرها می‌توانند رفتار خاک رس را به طور قابل توجهی بهبود بخشند [16]. به عنوان مثال، ژئوپلیمرهای مبتنی بر متاکائولن، پایداری حجمی را افزایش می‌دهند، انقباض را کاهش می‌دهند و ریزساختارهای قوی‌تر و متراکم‌تری نسبت به خاک‌های اصلاح‌شده با OPC ایجاد می‌کنند. ژانگ و همکارانش [17] نشان دادند که خاک دریایی اصلاح‌شده با ژئوپلیمر، هنگامی که ۳ تا ۵ درصد ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن استفاده شد، ۲ تا ۳ برابر مقاومت خاک تثبیت‌شده با سیمان را به دست آورد. به طور مشابه، اوده و ال-رکابی [18] مقاومت فشاری را از ۱ تا ۸ مگاپاسکال هنگام تثبیت مخلوط‌های رس-ماسه با ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی کلاس C گزارش کردند، در مقایسه با کمتر از ۰,۳ مگاپاسکال برای نمونه‌های اصلاح‌نشده. یافته‌های آنها همچنین نشان داد که افزایش محتوای شن، نسبت فعال‌کننده قلیایی بهینه را از ۰,۸ (برای رس با ۵ درصد شن) به ۰,۶ (برای رس با ۱۰ تا ۳۰ درصد شن) کاهش می‌دهد. پیشرفت‌ها در فناوری نانو فرصت‌های بیشتری را برای افزایش عملکرد ژئوپلیمر ایجاد کرده است. نانومواد مانند نانوسیلیکا، نانورس، مشتقات گرافن، نانواکسید تیتانیوم، نانوکائولن، نانولوله‌های کربنی و نانوآلومینیوم در ماتریس‌های ژئوپلیمر گنجانده شده‌اند و پایداری حرارتی و شیمیایی، مقاومت در برابر رطوبت و عملکرد مکانیکی را بهبود می‌بخشند [20] ,[19]. به طور خاص، پودر شیشه بازیافتی (RGP) به دلیل محتوای بالای سیلیس و تقریباً ٪ ۱۳ اکسید سدیم (Na_2O) که نیاز به NaOH یا Na_2SiO_3 غلیظ را در محلول فعال‌کننده کاهش می‌دهد، مورد توجه قرار گرفته است [21]. از آنجایی که ژئوپلیمرهای مبتنی بر RGP را می‌توان در دمای محیط و بدون ورودی حرارتی بالا سنتز کرد، مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی ارائه می‌دهند [22].

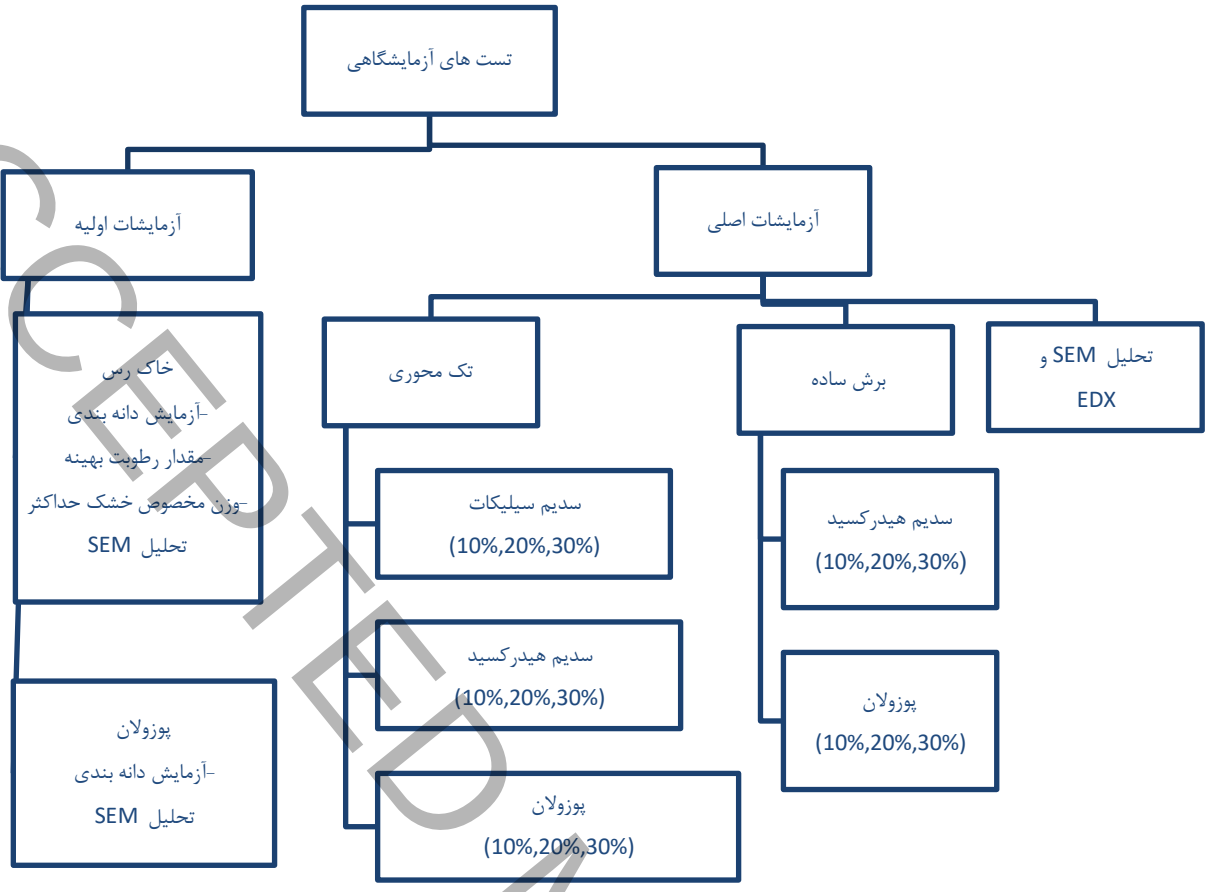
دوام همچنان یک چالش عمده در کاربردهای تثبیت خاک است. هورپیبولسوک و همکاران [23] و بین-شفیق و همکاران [24] دریافتند که خاک‌های تثبیت‌شده با FA فعال‌شده با قلیا، دوام بالایی را در چرخه‌های تر و خشک نشان می‌دهند، اگرچه قرار گرفتن در معرض یخزدگی و ذوب می‌تواند مقاومت را تا ٪۴۰ کاهش دهد. ادیکاری و همکاران [25] و سریلاکشمی و همکاران [26] نیز دوام استثنایی در خاک‌های اصلاح‌شده با ژئوپلیمر، از جمله حداقل تغییر شکل پس از دوازده چرخه تر و خشک را گزارش کردند. با این وجود، تحقیقات محدودی در مورد مقاومت در برابر اسید، نفوذ کلرید و دوام شیمیایی خاک‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر در دسترس است. با توجه به افزایش قرار گرفتن خاک‌ها در معرض آلاینده‌های

ACCEPTED MANUSCRIPT

صنعتی مانند اسید سولفوریک ($SO_2 \rightarrow H_2SO_4$)، که می‌تواند به چسب‌های سیمانی آسیب برساند و ایمنی فونداسیون را به خطر بیندازد، این موضوع نشان‌دهنده یک شکاف تحقیقاتی قابل توجه است. پژوهش‌های جدید نیز نشان داده‌اند که نوع پیش ماده، مقدار فعال‌کننده، زمان عمل‌آوری و کانی‌شناسی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت و ریزساختار خاک‌های تثبیت شده دارند[32-27] .

مطالعه حاضر به طور سیستماتیک امکان‌سنجی تولید چسب‌های ژئوپلیمری مؤثر با استفاده از پوزولان طبیعی باقران (BNP) را در شرایط عمل‌آوری محیطی ارزیابی می‌کند. این تحقیق بر موارد زیر تمرکز دارد: (الف) ارزیابی راندمان تثبیت ژئوپلیمرهای مبتنی بر BNP بر روی ماتریس‌های رس هنگام فعال شدن با محلول‌های قلیایی مانند Na_2SiO_3 یا NaOH؛ (ب) مقایسه NaOH و Na_2SiO_3 برای شناسایی فعال‌کننده مناسب‌تر برای به حداکثر رساندن مقاومت فشاری؛ (ج) بررسی سهم جداگانه و ترکیبی BNP در توسعه مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده به منظور تعیین فعال کننده مؤثرتر؛ و (د) تعیین حد بالای افزایش مقاومت با استفاده از دوزهای بالاتر از حد معمول چسب. نتایج این تحقیق با هدف روشن کردن پتانسیل ژئوپلیمریزاسیون BNP، ارائه راهنمایی در مورد طراحی بهینه مخلوط برای انواع مختلف خاک و کمک به تلاش‌های گسترده‌تر در ترویج جایگزین‌های پایدار و کم‌کربن برای بهسازی خاک انجام شده است. با فراهم کردن امکان ارزش‌گذاری پوزولان‌های طبیعی و محصولات جانبی صنعتی، یافته‌ها از توسعه مصالح ساختمانی سازگار با محیط زیست و با عملکرد بالا پشتیبانی می‌کنند. تجزیه و تحلیل‌های تکمیلی شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و EDX برای بررسی ریزساختار، ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی نمونه‌ها انجام می‌شود. نوآوری اصلی مطالعه، بررسی هم‌زمان اثر مقدارBNP کمتر بررسی شده و دو نوع فعال‌کننده قلیایی (NaOH) و (Na_2SiO_3) بر مقاومت فشاری، پاسخ برش ساده دینامیکی و سازوکارهای ریز ساختاری خاک رس تحت عمل‌آوری محیطی است.شکل ۱ نمودار جریانی را نشان می‌دهد که آزمایش‌های آزمایشگاهی را شرح می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱- نمودار جریان آزمایش‌ها

Figure1. Flowchart of the experiments.

۲- روش و مواد

برنامه آزمایشی این مطالعه برای ارزیابی اثربخشی ژئوپلیمر مشتق شده از پوزولان طبیعی باقران (BNP) در تثبیت خاک‌های رسی تحت شرایط عمل‌آوری محیطی طراحی شده است. انتخابBNP بر اساس غنای آن از SiO_2 و Al_2O_3 و قابلیت آن به عنوان پیش‌ماده آلومینوسیلیکاتی انجام گرفت .برای ارزیابی جامع عملکرد، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌عنوان شاخص اصلی مقاومت و قابلیت باربری فشاری، برش ساده دینامیکی برای تعیین سختی چرخه‌ای و نسبت میرایی تحت بارگذاری تکراری، و SEM/EDXبرای ارتباط دادن تغییرات مکانیکی با تشکیل ژل و تغییرات ریزساختاری انتخاب شدند. این روش شامل مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد خاک، آماده‌سازی مخلوط و تکنیک‌های تحلیلی است که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

۲-۱- خاک

ACCEPTED MANUSCRIPT

در این تحقیق از خاک رس کارخانه چینی تبریز استفاده شد. توزیع اندازه دانه برای خاک طبق استاندارد (ASTM D422 2007) تعیین شد، در حالی که تراکم طبق استاندارد ASTM D698 (2012) انجام شد. طبق گزارش USCS، خاک رس مورد مطالعه، یک خاک رس با پلاستیسیته کم است که به عنوان CL طبقه‌بندی می‌شود. در جدول ۱، شاخص و خواص فیزیکی نمونه‌های خاک ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات خاک رس

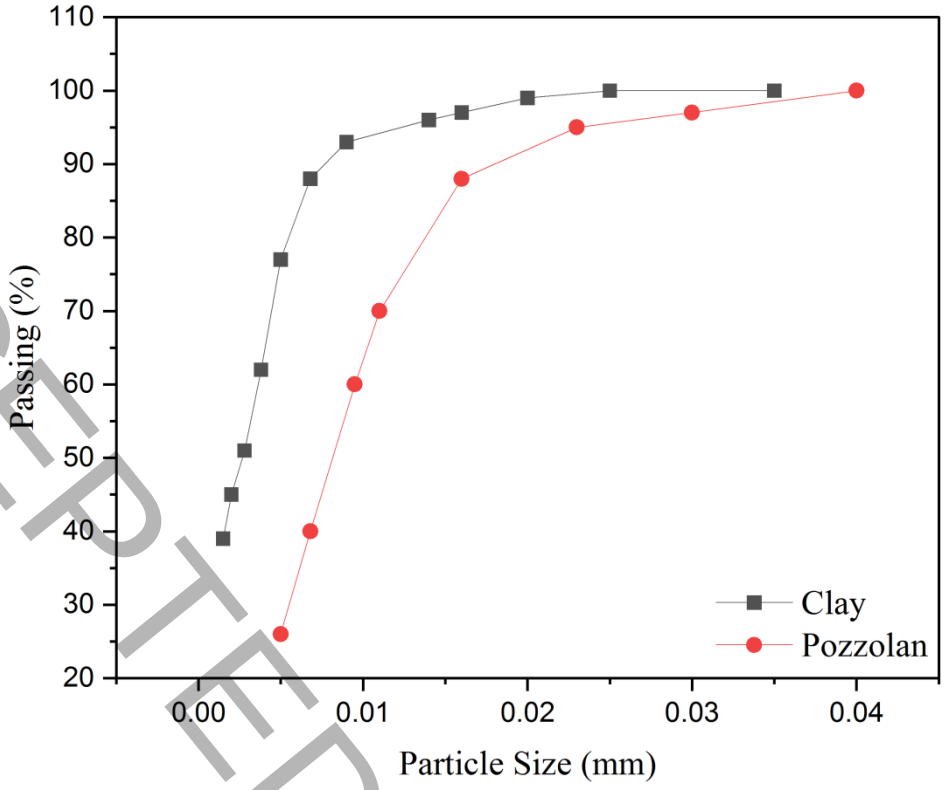
Table 1. Characteristics of the clay

پارامتر خاک	اندازه
حد روانی (LL٪)	۳۵
حد روانی (PL٪)	۲۶
شاخص خمیری (PI)	۹
حداکثر چگالی خشک (MDD، g/cm³)	۱/۵۴
میزان رطوبت بهینه (OMC٪)	۲۲/۴
طبقه‌بندی USCS	CL

خاک رس دارای حد روانی٪ ۳۵، حد خمیری٪ ۲۶ و شاخص خمیری ۹ است؛ بنابراین، این ماده دارای مقدار متوسطی از ریزدانه‌ها و پتانسیل تورم کم است. MDD آن برابر با $1/54\ g/cm^3$ و OMC آن برابر با ٪ ۲۲/۴ است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که خاک ریزدانه است و آب زیادی را جذب می‌کند.

منحنی‌های توزیع اندازه ذرات خاک رس و پوزولان در شکل ۲ ارائه شده است. از شکل ۲ می‌توان دریافت که خاک رس و پوزولان طبیعی تحت سلطه ذرات ریزتر از mm ۰/۰۱ هستند این ریزی دانه‌ها می‌تواند سطح ویژه و در دسترس بودن سطح واکنش را افزایش دهد؛ با این حال، صرفاً از روی اندازه ذرات نمی‌توان واکنش‌پذیری ژئوپلیمری را اثبات کرد و این موضوع باید با نتایج XRF/XRD و عملکرد مکانیکی تفسیر شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۲- توزیع اندازه ذرات خاک رس و پوزولان

Figure 2. Particle size distribution of clay and pozzolan.

به منظور بررسی بیشتر خواص شیمیایی و کانی‌شناسی مهم برای ژئوپلیمریزاسیون، آنالیزهای XRF، XRD و EDX انجام شد. ترکیب اکسید خاک رس (جدول ۲) نشان می‌دهد که سیلیس حدوداً (٪ ۶۳ وزنی) و آلومینا (٪ ۲۴ وزنی) اجزای غالب هستند، در حالی که داده‌های XRD (جدول ۳) کائولینیت را به عنوان فاز معدنی اصلی، همراه با کوارتز و کلسیت فرعی گزارش کرده‌اند. این ترکیب معمول خاک رس کائولینیتی واکنش‌پذیر است که به طور گسترده در کاربردهای ژئوپلیمر استفاده می‌شود.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک رس

Table 2. Chemical properties of the clay.

ترکیبات	LOI	K_2O	Na_2O	MgO	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد وزنی	9±1	0.4±0.1	0.3±0.1	0.4±0.1	1.2±0.3	0.04±0.01	0.55±0.1	24±1	63±1

جدول ۳- ویژگی‌های کانی‌شناسی رس

Table 3. Mineralogical properties of the clay.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ترکیبات	Other	Feldspar	Calcite	Quartz	Kaolinite
درصد وزنی	6±1	-	2.5±0.5	27±2	64±2

۲-۲-فعال‌کننده‌های ژئوپلیمر

چسب ژئوپلیمر مورد استفاده در این کار تحقیقاتی از منبع آلومینوسیلیکات (پوزولان طبیعی) با افزودن فعال‌کننده‌های قلیایی سنتز می‌شود. انتخاب استفاده از این منبع آلومینوسیلیکات بر اساس خلوص بالای جزء سیلیکونی، اندازه ذرات ریز و موفقیت گذشته با فعال‌کننده‌های مشابه است. پوزولان طبیعی مورد استفاده در این کار تحقیقاتی از معادن کارخانه سیمان باقران، استان خراسان جنوبی جمع‌آوری شده است. اندازه پوزولان طبیعی در شکل ۲ نمایش داده شده است که به وضوح نشان می‌دهد که اندازه غالب ذرات ریز است و اندازه کافی برای انحلال در فرآیند فعال‌سازی قلیایی دارد. ترکیبات شیمیایی اجزا توسط فلورسانس اشعه ایکس (XRF) شناسایی می‌شوند که در جدول ۴ نمایش داده شده است. خلوص بالای جزء سیلیکونی (٪۷۵,۶۷) با آلومینات‌های متوسط (٪۱۴,۷۳) اما با محتوای بسیار کم اکسید کلسیم (٪۰,۷۶) به وضوح مشهود است. کاهش محتوای اکسید کلسیم در مخلوط، تولید هیدرات‌های کلسیم-سیلیکات (C-S-H) را مختل می‌کند. فرآیند غالب بر اساس تولید ژل ژئوپلیمری از انحلال مولکول‌های آلومینوسیلیکات است که بعداً تمایل به تشکیل یک ژل ژئوپلیمری سه‌بعدی دارند.

جدول ۴- ترکیب شیمیایی و خواص پوزولان سیمان باقران

Table 4. Chemical composition and properties of Bagheran cement pozzolan.

ترکیبات	LOI	Cl	Na_2O	K_2O	S	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
درصد وزنی	1.93	0.10	1.645	3.072	0.02	1.09	0.76	0.98	14.73	75.67

سیلیکات سدیم مورد استفاده محلولی با خلوص ٪۹۸-۹۹ و مدول ۳/۱۷ بود و شامل ٪۳۱,۹ SiO_2، ٪۱۰,۰۷ Na_2O و ٪۵۸,۶۳ H_2O بود. محلول NaOH با غلظت 10 M از گلوله‌های NaOH با خلوص ٪۹۹ و آب بدون یون تهیه شد NaOH با ایجاد محیط قلیایی، انحلال گونه‌های آلومینوسیلیکاتی را تسهیل می‌کند؛ در حالی که Na_2SiO_3 علاوه بر قلیائیت، منبع سیلیس محلول نیز فراهم می‌کند.

جدول ۵- ترکیب شیمیایی و خواص فعال‌کننده‌های قلیایی

Table 5. Chemical composition and properties of alkaline activators.

فعال کننده	پارامترهای اصلی	خلوص (%)
سدیم سیلیکات(Na_2SiO_3)	SiO_2 = ۳۱/۹%, Na_2O = ۱۰/۰۷%, H_2O = ۵۸/۶۳%, مدول = ۳/۱۷	۹۸–۹۹ %

ACCEPTED MANUSCRIPT

سدیم هیدروکسید (NaOH)	10 M محلول تهیه شده در آب مقطر	۹۹ %

۲-۳-آماده‌سازی نمونه و طرح آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌ها به‌صورت کنترل‌شده انجام شد. ابتدا خاک خشک با BNP مخلوط شد تا توزیع یکنواخت پیش‌ماده حاصل شود .سپس محلول فعال‌کننده شامل Na_2SiO_3 یا NaOH به مخلوط افزوده و اختلاط تا رسیدن به یکنواختی ادامه یافت . برای هر ترکیب حداقل سه نمونه تکراری ساخته شد .مخلوط تازه در قالب استوانه‌ای در سه لایه قرار گرفت و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم شد .نمونه‌ها در دمای $22 \pm 1\ ^\circ C$ و برای سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند .طرح آزمایش شامل سه مقدار BNP برابر ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ و دو نوع فعال‌کننده بود .این دامنه امکان بررسی اثر مقدار پیش‌ماده، نوع فعال‌کننده و زمان عمل‌آوری را فراهم می‌کند. در شکل ۳ نشان داده شده است، نگهداری شدند.



شکل ۳- نمونه های آماده شده

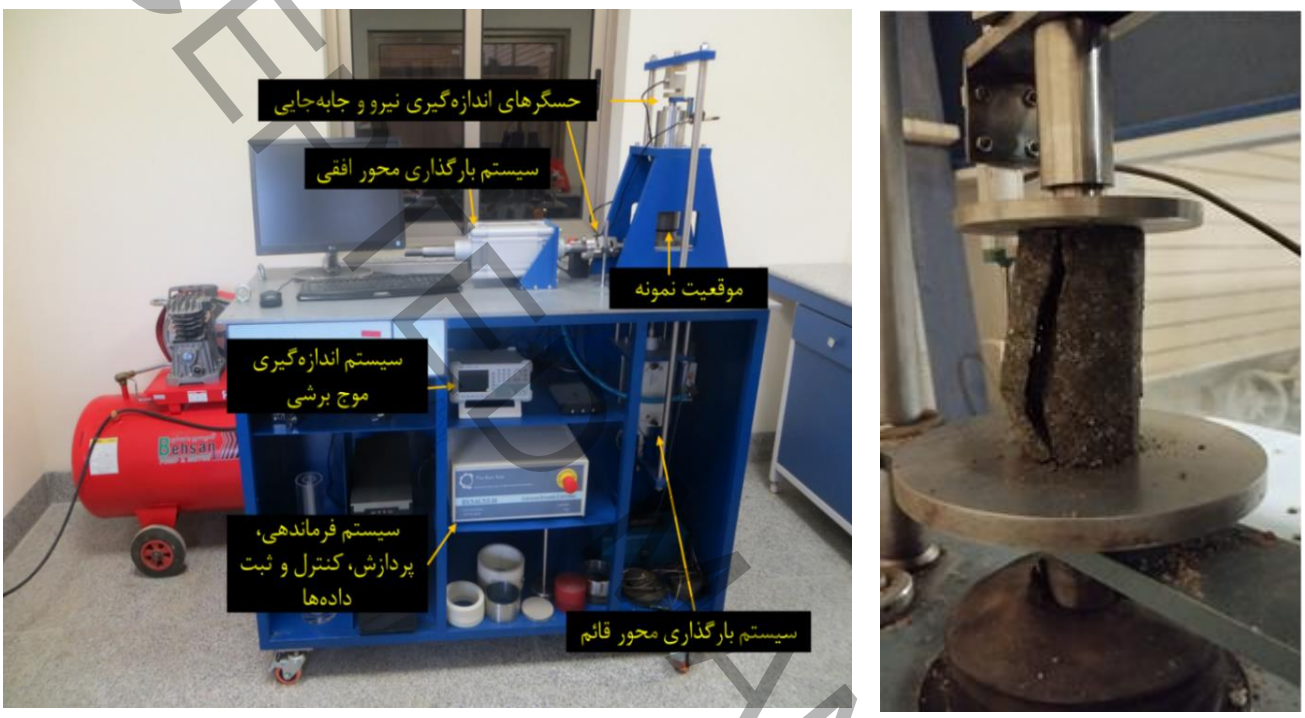
Figure 3. Prepared samples.

۲-۴- آزمایش‌های مقاومت فشاری، برش ساده و ریزساختاری

مشخصات مکانیکی و ریزساختاری نمونه‌های تثبیت‌شده با ترکیب آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و تجزیه و تحلیل‌های کانی‌شناسی-شیمیایی انجام شد. آزمایش UCS طبق استاندارد ASTM D2166 و با استفاده از نرخ بارگذاری محوری ۱/۲۷ KN/s تا زمان شکست نمونه انجام شد. این آزمایش، معیار کمی کلیدی بهبود مکانیکی ناشی از ژئوپلیمریزاسیون را ارائه داد. شکل ۴ (الف)یک نمونه از آزمایش UCS را نشان می‌دهد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

برای ارزیابی رفتار دینامیکی از دستگاه برش ساده دینامیکی با نمونه‌ای به ارتفاع cm ۴ و قطرcm ۱۰ استفاده شد . انتخاب برش ساده به این دلیل بود که این آزمون امکان اعمال کرنش برشی چرخه‌ای و استخراج مدول برشی و نسبت میرایی را فراهم می‌کند؛ این پارامترها برای ارزیابی سختی و اتلاف انرژی خاک در بارگذاری‌های تکراری، از جمله بارهای ناشی از ترافیک و ارتعاشات، کاربرد دارند .دستگاه دارای محرک‌های افقی و قائم پنوماتیکی، سلول‌های بارگذاری، حسگرهای جابه‌جایی (LVDT)، سامانه اندازه‌گیری سرعت موج برشی و ثبت‌کننده داده بود. فرکانس بارگذاری و دامنه کرنش برشی در محدوده گزارش‌شده دستگاه اعمال شد[33] . شکل ۴ (ب) شماتیک عملکرد دستگاه برش ساده دینامیکی و موقعیت نمونه در داخل دستگاه را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۴- (الف) دستگاه تک محوری- (ب) دستگاه برش حلقه‌ای ساده دینامیکی

Figure 4. (a) Unconfined compressive strength (UCS) machine– (b) Dynamic simple shear machine.

آنالیزهای ریزساختاری تکمیلی، مانند فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پس از آزمایش مکانیکی، بر روی نمونه‌های انتخاب‌شده از هر سن عمل‌آوری انجام شد. به نوبه خود، آنالیز XRF داده‌های کمی در مورد ترکیب عنصری چسب‌ها ارائه داد و امکان تأیید واکنش‌پذیری پوزولانی را از طریق تغییرات در سیلیس، آلومینا و محتوای قلیایی فراهم کرد. تصویربرداری SEM برای ارائه تکامل مورفولوژیکی ماتریس‌های تثبیت‌شده، تشکیل ژل چسب، اصلاح منافذ و درهم‌تنیدگی ذرات انجام شد.

هر یک از روش‌های تحلیلی، بینشی در مورد سهم آن در افزایش مقاومت ارائه داد. اهداف، رویه‌های آزمایش و پارامترهای کلیدی خروجی در پایان برنامه آزمایش مکانیکی و ریزساختاری برای چهار تکنیک اصلی تحلیلی، یعنی مقاومت تک محوری، برش ساده ، XRF و SEM در جدول ۶ خلاصه شده‌اند.

جدول ۶- برنامه آزمایش مکانیکی، دینامیکی و ریزساختاری

ACCEPTED MANUSCRIPT

Table 6. Mechanical, dynamic, and microstructural testing program.

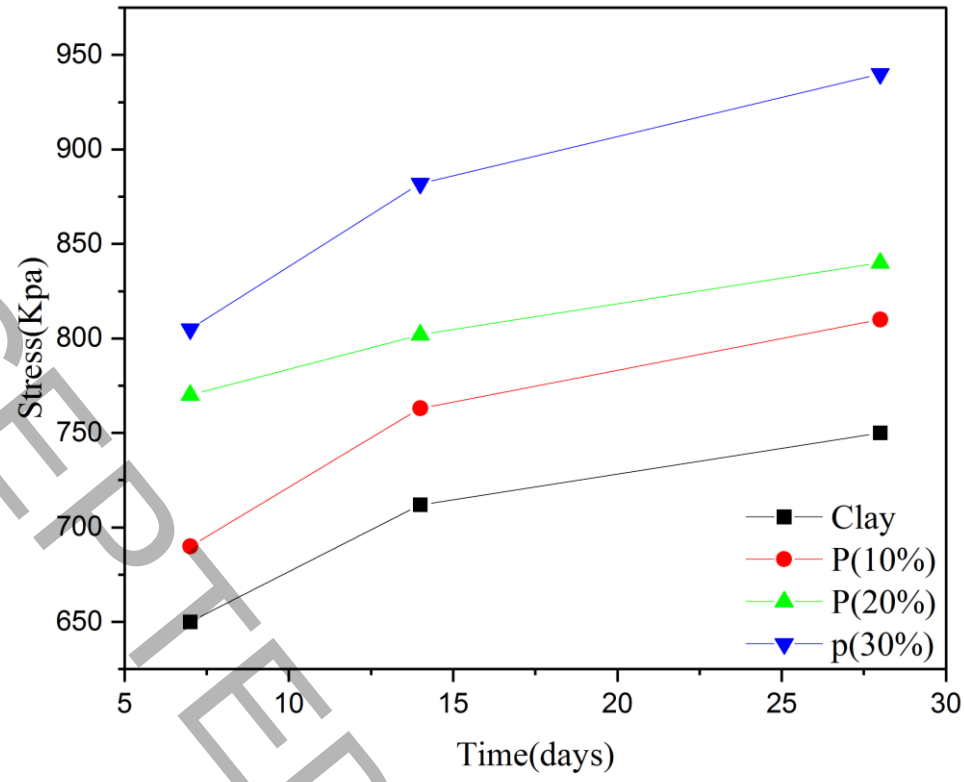
نوع آزمایش	استاندارد	هدف	روش	پارامترهای خروجی کلیدی
UCS	ASTM D2166 (2016)	ارزیابی بهبود مکانیکی ناشی از تثبیت ژئوپلیمریزاسیون	شکل ۴(الف)؛ نرخ بارگذاری = ۱/۲۷ kN/s	حداکثر مقاومت فشاری
Simple Shear	(ASTM D6528)	ارزیابی بهبود دینامیکی ناشی از تثبیت ژئوپلیمریزاسیون	شکل ۴ (ب)	مدول برشی (G) و میرایی (D)
XRF	روش مبتنی بر ابزار	تعیین ترکیب عنصری/اکسیدی؛ ارزیابی پیشرفت واکنش پوزولانی	XRF analyzer	SiO_2, Al_2O_3, Na_2O, K_2O, CaO changes after curing
SEM	روش مبتنی بر ابزار	بررسی ریزساختار، اصلاح منافذ، توسعه ژل، پیوند ذرات	SEM imaging (high-resolution)	Morphology; matrix densification; gel–particle interactions

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری خاک رس طبیعی و خاک رس حاوی BNP بدون فعال‌کننده

شکل 5 مقاومت فشاری خاک رس طبیعی و خاک رس حاوی ۱۰%، ۲۰% و۳۰% BNP را در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد . مقاومت خاک طبیعی از ۶۵۰kPa در ۷ روز به ۷۱۲ kPa در ۱۴ روز و ۷۵۰kPa در ۲۸ روز افزایش یافت؛ یعنی نسبت به ۷ روز، به ترتیب % ۹/۵و % ۱۵/۴ افزایش داشت .در ۷ روز، مقاومت مخلوط‌های ۱۰%، ۲۰% و۳۰% BNP به‌ترتیب ۶۹۰، ۷۷۰ و ۸۰۵ kPa بود که نسبت به خاک طبیعی در همان سن، به‌ترتیب % ۶/۲، % ۱۸/۵و % ۲۳/۸ بیشتر است. در ۲۸ روز، مقاومت این مخلوط‌ها به ۸۱۰، ۸۴۰ و ۹۴۰ کیلوپاسکال رسید که نسبت به خاک طبیعی ۲۸ روزه، به‌ترتیب% ۸، % ۱۲و % ۲۵/۳ افزایش نشان می‌دهد . بنابراین، BNP بدون فعال‌کننده نیز موجب افزایش محدود مقاومت شد، اما میزان بهبود آن به‌مراتب کمتر از نمونه های ساخته شده با فعال‌کننده بود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



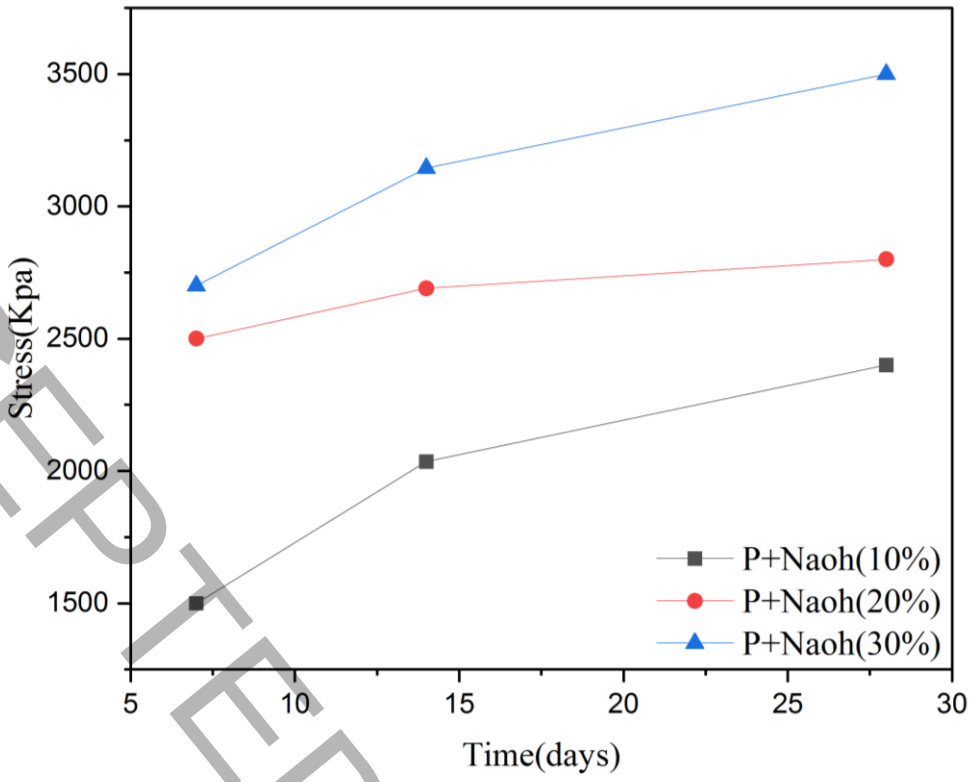
شکل ۵-توسعه UCS نمونه‌های طبیعی و دارای پوزولان بدون فعال کننده برای خاک رس در سنین عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸

Figure 5. Development of UCS for natural and pozzolan-containing samples (without an activator) using clay, at curing ages of 7, 14, and 28 days.

۳-۲- مقاومت فشاری مخلوط‌های فعال‌شده با NaOH

شکل ۶ نشان می‌دهد که چگونه فعال‌سازی NaOH باعث افزایش مقاومت خاک رس می‌شود، که به طور قابل توجهی بهتر از نمونه‌های کنترل و همچنین فعال‌سازی پوزولان است. مقاومت فشاری از ۶۵۰ کیلوپاسکال برای خاک رس طبیعی به ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۷۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برای ۱۰%، ۲۰% و۳۰%P+NaOH در ۷ روز بهبود یافته است. این امر باعث افزایش قابل توجه٪ ۱۳۰/۸ ،٪ ۲۸۴/۶و٪ ۳۱۵/۴ مقاومت می‌شود که نشان‌دهنده پتانسیل انحلال قابل توجه NaOH حتی در خاک‌های ریزدانه متشکل از آلومینوسیلیکات‌ها است. در ۱۴ روز، حدود ۲۰۵۰، ۲۷۰۰ و ۳۱۵۰ kPa و در ۲۸ روز ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۵۰۰ kPa هستند .نسبت به خاک طبیعی در ۲۸ روز(۷۵۰ kPa)، افزایش مقاومت برای مخلوط‌های% ۱۰، % ۲۰و ۳۰% به‌ترتیب% ۲۲۰، % ۲۷۳/۳و % ۳۶۶/۷ است. بهبود مستمر با افزایش تدریجی در تمام دوزهای فعال کننده نشان می‌دهد که چگونه اجزای آلومینوسیلیکات، همراه با محیط بسیار بازی تولید شده از NaOH، به طور هم‌افزایی در پیوند اتم‌ها با یکدیگر تعامل می‌کنند تا با افزایش سن، ساختاری فشرده‌تر تشکیل دهند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



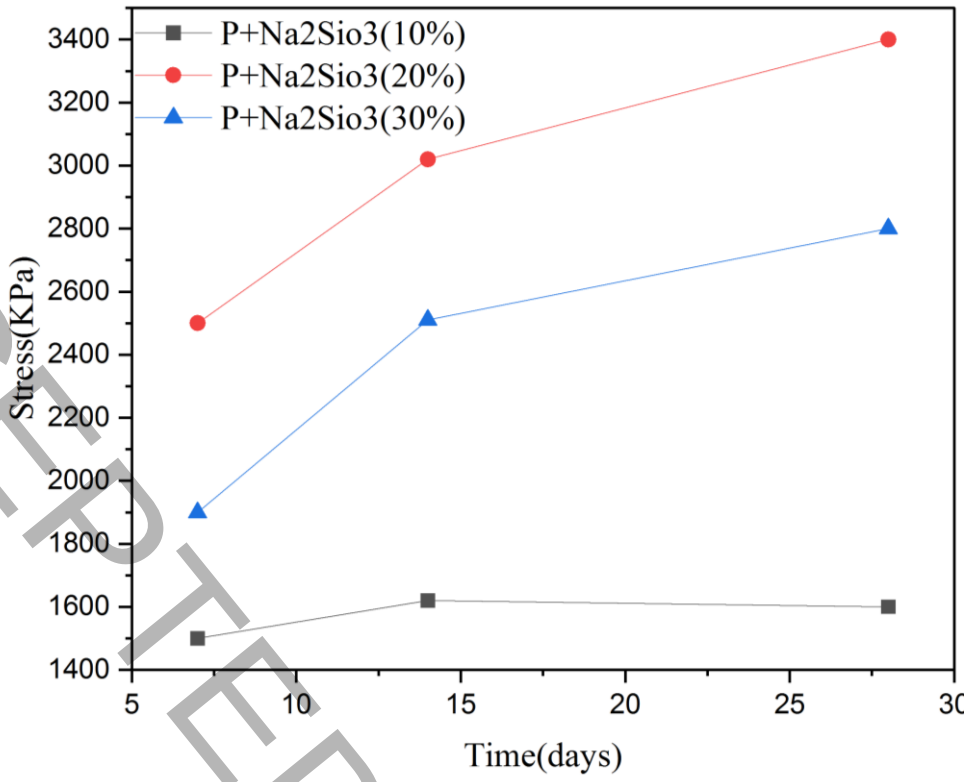
شکل ۶- توسعه UCS مخلوط‌های فعال‌شده با NaOH در ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

Figure 6. UCS development of NaOH-activated mixtures at 7, 14, and 28 days.

۳-۳- مقاومت فشاری مخلوط‌های فعال‌شده با سیلیکات سدیم

شکل ۷ افزایش مقاومت نمونه‌های فعال‌شده با Na_2SiO_3 را نشان می‌دهد . در ۷ روز، مقاومت مخلوط‌های % ۱۰، % ۲۰ و% ۳۰ به‌ترتیب ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و kPa ۱۹۰۰ بود؛ بنابراین نسبت به خاک طبیعی ۷ روزه، به‌ترتیب% ۱۳۰/۸، % ۲۸۴/۶و % ۱۹۲/۳ افزایش داشتند .در ۱۴ روز، مقاومت‌ها به‌ترتیب ۱۵۲۰، ۳۰۲۰ و kPa ۲۵۱۰ رسیدند که نسبت به خاک طبیعی ۱۴ روزه(kPa ۷۱۲)، معادل% ۱۱۳/۵، % ۳۲۴/۲ و % ۲۵۲/۵ افزایش است .در ۲۸ روز نیز مقادیر ۱۶۰۰، ۳۳۰۰ و kPa ۲۸۰۰ به‌دست آمد که نسبت به kPa ۷۵۰ ، به‌ترتیب% ۱۱۳/۳، % ۳۴۰و % ۲۷۳/۳ افزایش نشان می‌دهد . در این مجموعه، مخلوط % ۲۰ BNP+Na_2SiO_3بیشترین مقاومت ۲۸ روزه را داشت، که نشان می‌دهد برای تعادل بین فعالیت پیش‌ساز و در دسترس بودن سیلیکون، آستانه مشخصی لازم است. برای ۳۰٪، مقاومت‌ها ظاهراً کمتر هستند؛ یعنی انحلال پیش‌ساز اضافی محدود است، از این رو توسعه ژل در خاک رس یکپارچه محدود است.قدرت بالای تشکیل ژل سیلیکات سدیم، واکنش‌های انحلال و پلیمریزاسیون شدید را تسهیل می‌کند و منجر به افزایش استحکام حتی در سنین بسیار پایین می‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۷- توسعه UCS مخلوط‌های فعال‌شده با Na_2SiO_4 در ۷، ۱۴ و ۲۸ روز برای خاک رس.

Figure 7. UCS development of Na_2SiO_4-activated mixtures for clay at 7, 14, and 28 days.

۳-۴- طرح اختلاط بهینه برای خاک رس

بهینه‌سازی نسبت‌های اختلاط برای هر نوع خاک، نیاز به ارزیابی اثرات متقابل مواد اولیه، فعال‌کننده بر توسعه مقاومت بلندمدت دارد. مخلوط ۳۰% BNP+NaOH با UCS برابر ۳۵۰۰ kPa بالاترین مقاومت را در محدوده آزمایش‌شده نشان می دهد و مخلوط۲۰% BNP+Na_2SiO_3 با ۳۳۰۰ kPa در رتبه بعدی قرار می‌گیرد که به طور قابل توجهی کمتر از مقاومت حاصل از مخلوط‌های فعال‌شده با NaOH+Si است، که نشان می‌دهد محتوای بالای سیلیکون در افزایش مقاومت ژئوپلیمرهای رسی، نسبت به قدرت انحلال بالای فعال‌کننده قلیایی، مزیت بسیار کمتری دارد.

۳-۵- نتایج آزمایش برش چرخه‌ای ساده

همانطور که توسط مطالعات آزمایشگاهی گزارش شده است، سختی دینامیکی تحت تأثیر کرنش چرخه‌ای، تخلخل، تنش اصلی مؤثر، ضریب تحکیم و تعداد سیکل‌های بارگذاری قرار می‌گیرد [34] در این مطالعه، مدول برشی و نسبت میرایی به عنوان دو شاخص اصلی پاسخ دینامیکی بررسی شدند

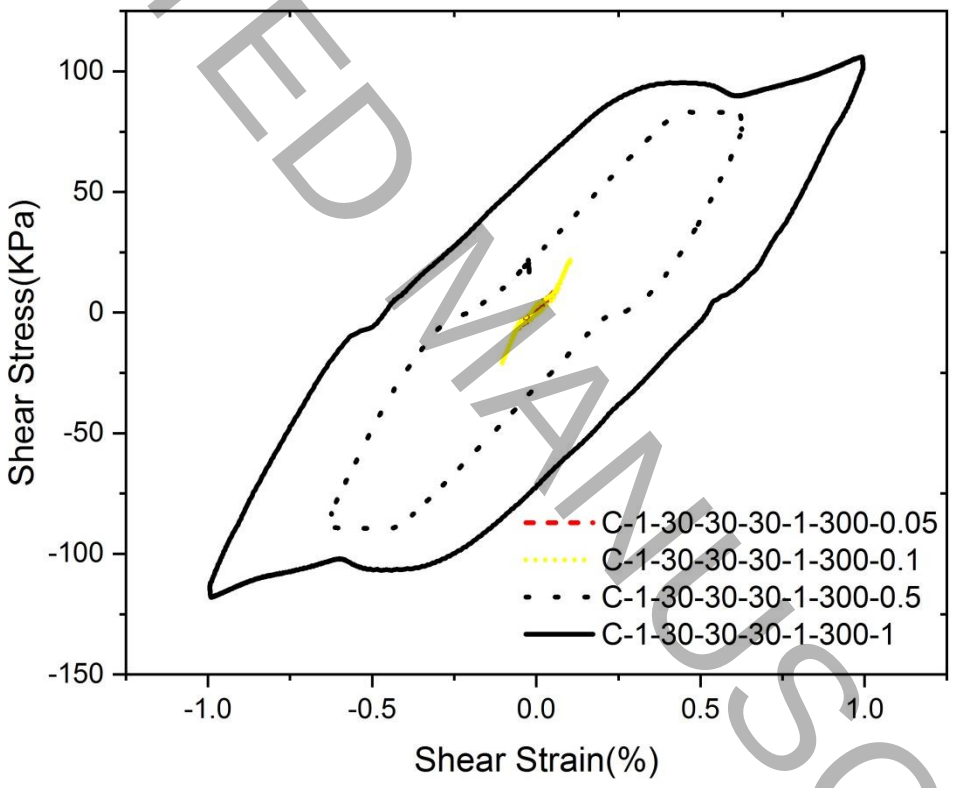
۳-۵-۱-اثرات دامنه کرنش برشی بر مدول برشی و میرایی

مدول برشی و میرایی پارامترهایی هستند که به شدت به دامنه کرنش برشی بستگی دارند. تأثیر دامنه کرنش برشی بر پارامترهای دینامیکی برای دامنه‌های مختلف از جمله ۰،۰۰۵، ۰،۰۱، ۰،۰۵ و ۱ درصد بررسی شده است. در این رابطه، حلقه‌های

ACCEPTED MANUSCRIPT

هیسترزیس مختلف برای نمونه خاک رسی با ۳۰ درصد ژئوپلیمر و تحت بار ناشی از سربار ۳۰۰ کیلو پاسکال نشان داده شده و در شکل (۸) مقایسه شده است.

به طور کلی، همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، سختی برشی به شیب حلقه‌های هیسترزیس رسم شده مربوط می‌شود، در حالی که میرایی به مساحت حلقه‌های رسم شده بستگی دارد. بنابراین، با افزایش کرنش شکست، نمودارها بیشتر به افق نزدیک می‌شوند و مساحت سطح داخلی آنها گسترش می‌یابد. در نتیجه، مدول برشی کاهش می‌یابد، در حالی که نسبت میرایی افزایش می‌یابد. در کد هر آزمایش، پارامتر اول حرف C است که نشان‌دهنده خاک رس است. پارامتر دوم نوع فعال‌کننده است که در آن صفر و یک به ترتیب به معنی خاک لخت و فعال‌کننده هیدروکسید سدیم است. پارامتر سوم درصد اختلاط فعال‌کننده را نشان می‌دهد، در حالی که پارامتر چهارم درصد اختلاط پوزولان را نشان می‌دهد. علاوه بر این، پارامتر پنجم به درصد اختلاط میکروسیلیس اشاره دارد و پارامتر ششم دوره عمل‌آوری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، پارامتر هفتم میزان سربار اعمال شده به نمونه را نشان می‌دهد و پارامتر هشتم محدوده حرکت افقی نمونه را نشان می‌دهد. هر نمونه در چهار محدوده آزمایش شد

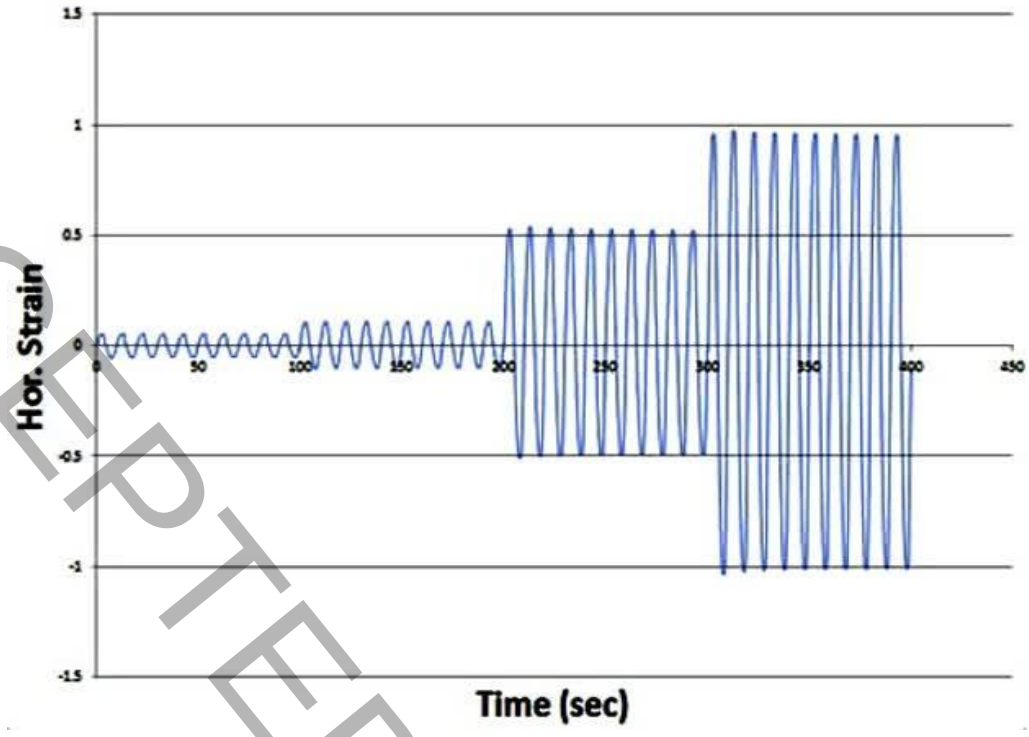


شکل ۸- حلقه‌های تنش-کرنش (هیسترزیس) حاصل از یک سری آزمایش بر روی نمونه‌های بهبود یافته با ۳۰٪ ژئوپلیمر و تنش سربار ۳۰۰ کیلوپاسکال

Figure 8. Stress-strain loops (hysteresis) obtained from a series of tests on samples improved with 30% geopolymer under an overburden stress of 300 kPa.

شکل۹ تغییرات کرنش افقی بر حسب زمان را نشان می دهد. نکته اصلی این است که دامنه کرنش در طول آزمایش بصورت مرحله ای افزایش یافته است. هر دامنه حدود ۱۰۰ ثانیه طول کشیده است و کرنش مثبت و منفی بیانگر تغییر جهت شکل افقی در بارگذاری رفت و برگشتی است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

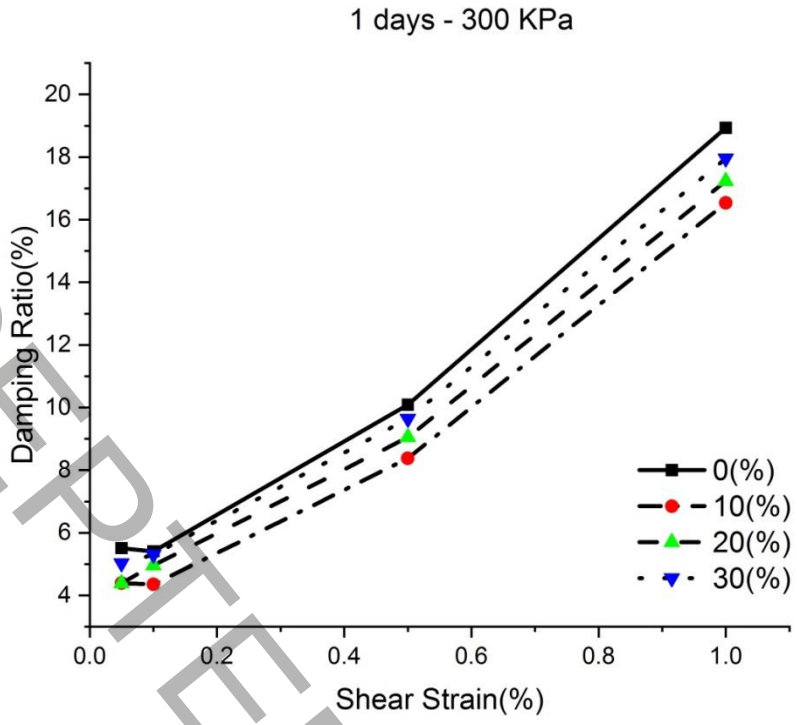


شکل ۹- تغییرات کرنش افقی بر حسب زمان

Figure 9. Variations in horizontal strain over time.

نسبت میرایی بیانگر بخشی از انرژی است که در هر چرخه بارگذاری تلف می‌شود. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که حضور ژئوپلیمر نسبت میرایی را در مقایسه با خاک طبیعی کاهش داده است، در حالی که مدول برشی افزایش یافته است. هرچه حرکت ذرات خاک و لغزش آنها روی یکدیگر بیشتر باشد، اصطکاک بیشتر می‌شود که به نوبه خود باعث افزایش میرایی نمونه‌ها می‌شود. طبق این نمودار، بهبود خاک به طور کلی به دلیل انسداد بین ذرات خاک رس، نسبت میرایی را کاهش می‌دهد. پیوند ایجاد شده بین خاک و ژئوپلیمر که در زوایای مختلف در نمونه پراکنده شده‌اند، مانع از حرکت ذرات و ایجاد اصطکاک و اتلاف انرژی می‌شود. بنابراین، مقدار میرایی در نمونه‌های بهبود یافته در کرنش‌های مختلف برخلاف نمونه‌های خاک رس معمولی کاهش می‌یابد. طبق هر دو نمودار، وجود ژئوپلیمر در نمونه باعث افزایش مدول برشی و کاهش درصد میرایی شده است که در ۱۰٪ بیشتر و در ۲۰٪ و ۳۰٪ کمتر قابل توجه است. این حادثه ناشی از افزایش بیش از حد مقدار مواد فعال کننده در مخلوط بود که مانع از واکنش بیشتر یا نیاز به زمان بیشتر برای دستیابی به مقاومت بیشتر می‌شد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

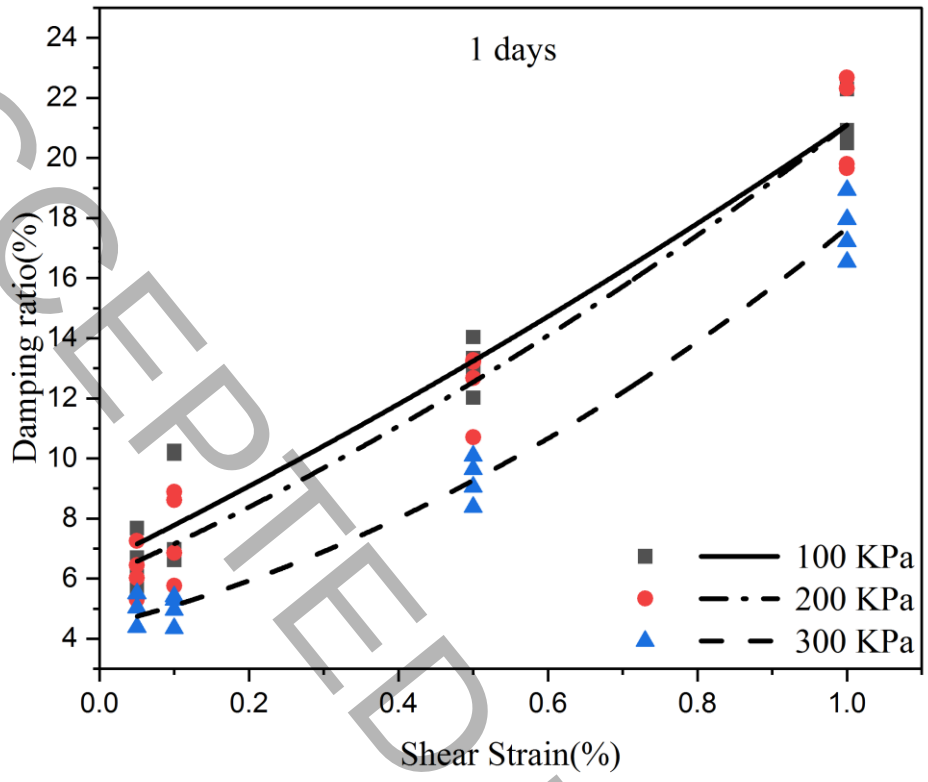


شکل ۱۰- تأثیر بهبود بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی در دوره عمل‌آوری یک روزه و تحت بار سربار ۳۰۰ KPa

Figure 10. Effect of improvement on the variation of the damping ratio versus shear strain (after a one-day curing period and under a 300 kPa surcharge).

تأثیر سربار بر نسبت میرایی نیز قابل بررسی است. مطابق شکل ۱۱، افزایش سربار تأثیر قابل توجهی بر کاهش نسبت میرایی در هر دو نمونه بهبود یافته و بهبود نیافته داشته است که با حضور ژئوپلیمر به عنوان تثبیت کننده، این کاهش بیشتر خواهد بود. این پدیده به این دلیل رخ داده است که پیوند و درگیری ذرات خاک با ژئوپلیمر افزایش می‌یابد، چیزی که نشان دهنده افزایش اثر تثبیت در میرایی امواج با افزایش عمق است. علاوه بر این، تأثیر همزمان افزایش دوره عمل آوری و بهبود باعث کاهش بیشتر درصد میرایی شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

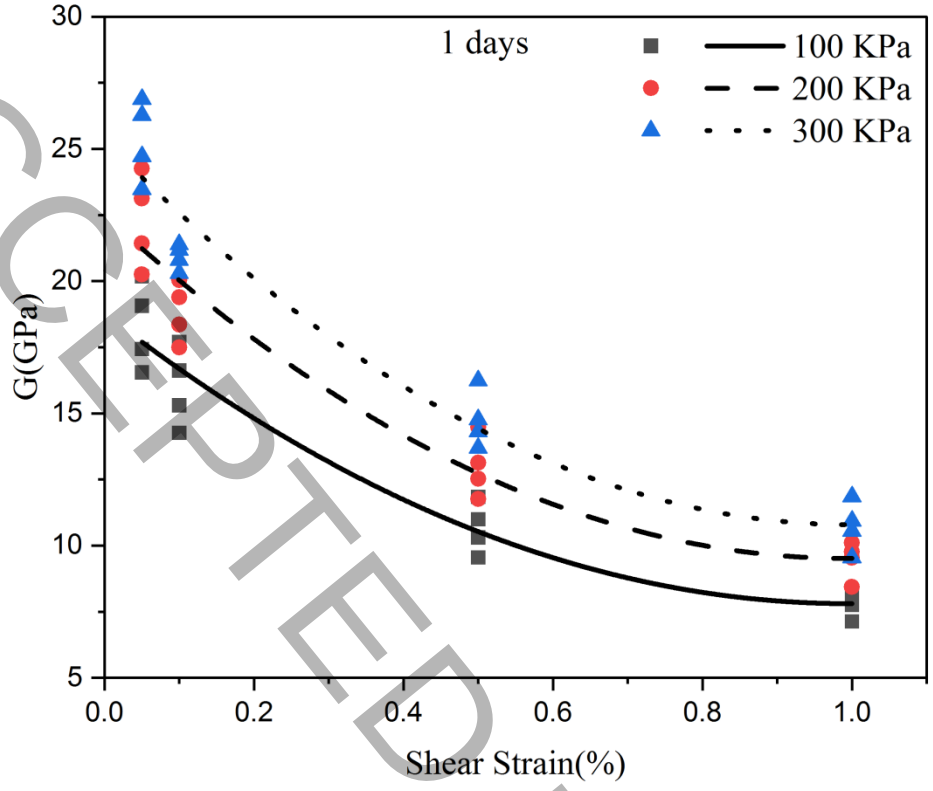


شکل ۱۱ - تأثیر سربار بر تغییرات نسبت میرایی به کرنش برشی (تأثیر بهبود در دوره عمل‌آوری یک روزه و تحت سربارهای مختلف)

Figure 11. Effect of surcharge on the variation of the damping ratio versus shear strain (effect of improvement after a one-day curing period under various surcharge loads).

نتایج آزمایش همچنین نشان داد که مقدار میرایی در نمونه‌هایی با سربار بالاتر افزایش یافته است. تأثیر سربار بر مدول برشی نیز قابل بررسی است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش دوره عمل‌آوری و افزایش سربار تأثیر قابل توجهی بر افزایش مدول برشی در نمونه‌های عمل‌آوری شده و نشده داشته است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

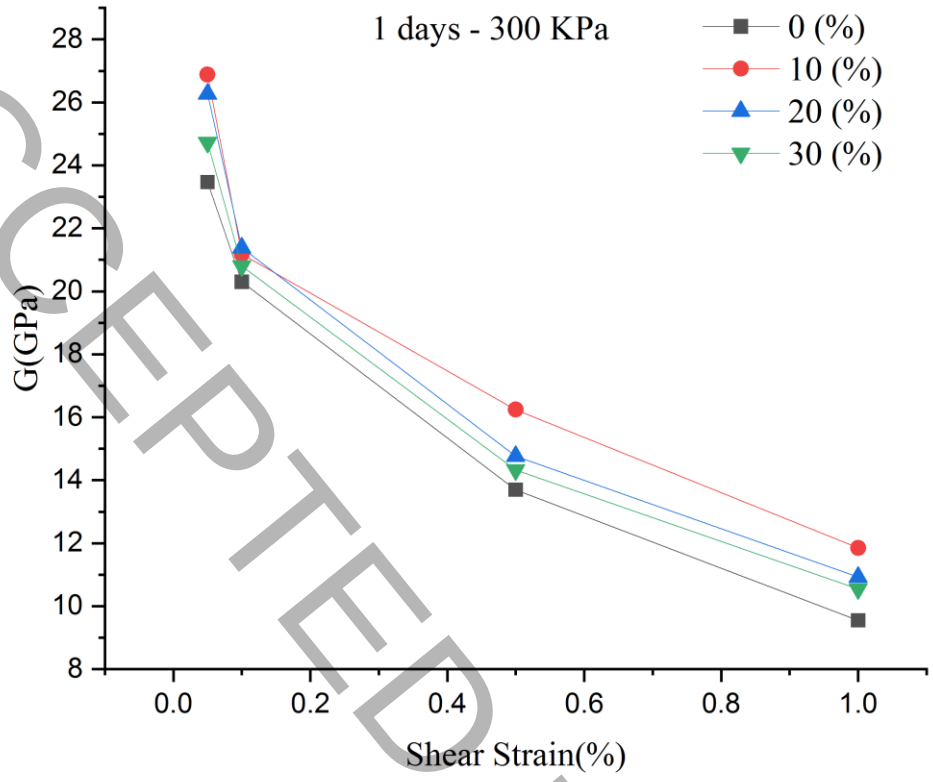


شکل ۱۲- تأثیر سربارها بر مقدار مدول برشی(نمونه‌های بهبود نیافته و بهبود یافته با ۳۰٪ سربار در طول یک دوره عمل‌آوری یک روزه)

Figure 12. Effect of surcharge loads on the shear modulus (unimproved samples vs. samples improved with 30% surcharge, after a one-day curing period).

همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، طولانی شدن دوره عمل آوری و افزایش سربار، تأثیر قابل توجهی بر افزایش مدول برشی در نمونه‌های بهبود یافته و بهبود نیافته داشته است. همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، با حضور ژئوپلیمر به عنوان تثبیت کننده، مدول برشی نیز افزایش یافته است. علاوه بر این، در ۱۰٪ افزودنی‌ها، این افزایش بیش از ۲۰٪ و ۳۰٪ مشاهده شد.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۳- تأثیر درصد ژئوپلیمر بر مقدار مدول برشی(نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف ژئوپلیمر در طول دوره عمل‌آوری یک روزه)

Figure 13. Effect of geopolymer percentage on the shear modulus (samples prepared with varying geopolymer percentages, after a one-day curing period).

۳-۶- تفسیر یکپارچه روندهای افزایش مقاومت

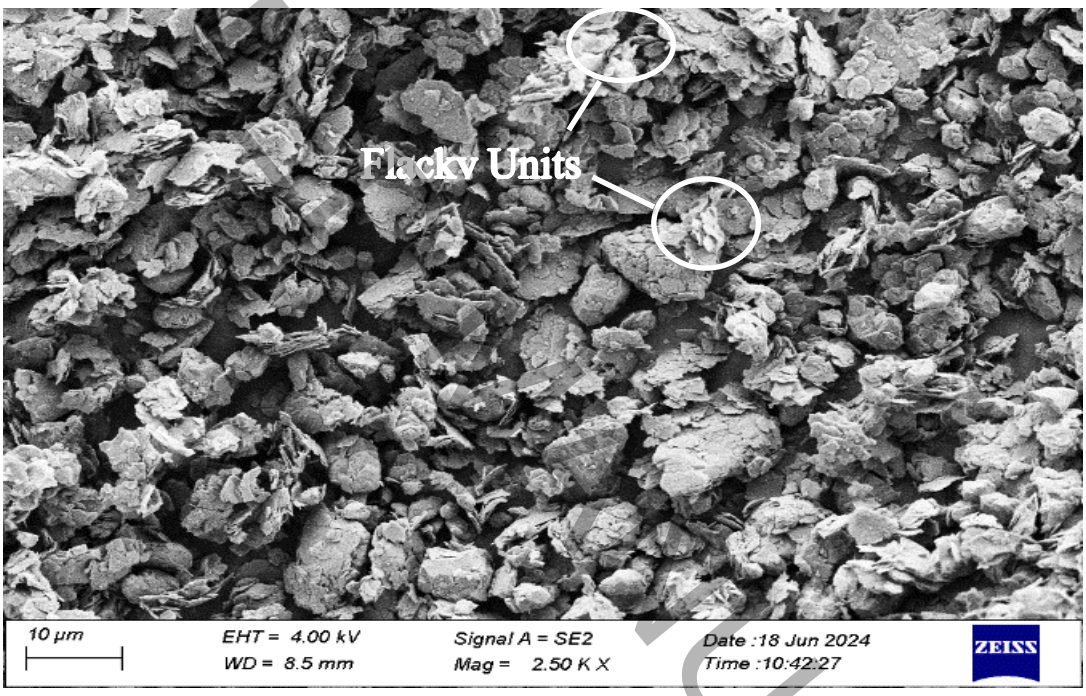
در مجموع، خاک طبیعی مقاومت ۷ تا ۲۸ روزه ۶۵۰ تا ۷۵۰ kPa داشت. افزودن BNP بدون فعال‌کننده بهبود کمی ایجاد کرد؛ برای مثال، در ۲۸ روز، ۳۰ % BNP مقاومت را نسبت به خاک طبیعی از ۷۵۰ به ۹۴۰ kPa رساند (۲۵/۳ % افزایش) . فعال‌سازی با NaOH اثر بسیار بیشتری داشت و در ۲۸ روز، مقاومت مخلوط‌های۱۰ % ، ۲۰ % و ۳۰ % به‌ترتیب ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۵۰۰ kPa بود؛ یعنی۲۲۰ % ، ۲۷۳/۳ % و ۳۶۶/۷% بیشتر از خاک طبیعی .فعال‌سازی با Na_2SiO_3 نیز مؤثر بود و بیشترین مقدار آن در ۲۰ % BNP و ۲۸ روز برابر ۳۳۰۰ kPaبود (۳۴۰% افزایش نسبت به خاک طبیعی). این روند نشان می دهد که نوع فعال‌کننده و مقدار پیش‌ماده هر دو در توسعه مقاومت نقش دارند و مقدار بیشتر BNP الزاماً به معنی بیشینه شدن مقاومت در هر نمونه فعال‌کننده نیست.

۳-۷- تفسیر یکپارچه میکرومکانیکی از افزایش مقاومت

پیش‌بینی می‌شود که تفسیر یکپارچه تحلیل‌های SEM و EDX درک مکانیکی از تکامل ریزساختاری را ارائه دهد که رفتار مقاومتی ماکروسکوپی خاک‌های رسی تثبیت‌شده با ژئوپلیمر را تعیین می‌کند. شکل ۱۴ نتایج SEM را در مورد گذار از

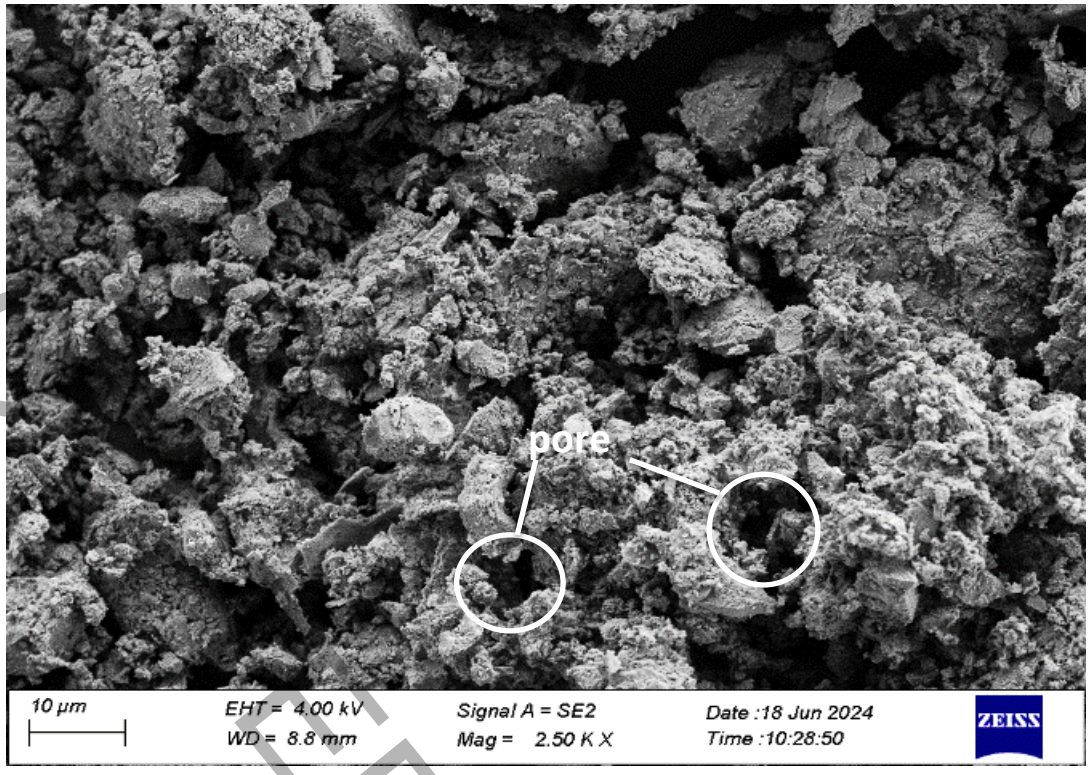
ACCEPTED MANUSCRIPT

ساختار سست و غیرمقید مواد اولیه به ماتریس‌های بسیار متراکم‌تر تشکیل‌شده در محلول‌های فعال‌شده قلیایی نشان می‌دهد. شکل ۱۴(الف) نشان می‌دهد که رس خالی دارای ساختار ورقه‌ای شکل پوسته‌پوسته و ضعیفی است، در حالی که شکل ۱۴(ب) نشان می‌دهد که پوزولان بافت‌های دانه‌ای ظریف‌تری دارند که قادر به واکنش با فعال‌کننده‌های قلیایی هستند. پس از فعال‌سازی، تغییرات مورفولوژیکی قابل توجهی حاصل می‌شود. در خاک رس فعال‌شده با NaOH با میکروسیلیس و پوزولان (شکل ۱۴(ت))، ورق‌ها توسط یک ژل ژئوپلیمر پیوسته به هم متصل می‌شوند و حفره‌ها را پر می‌کنند و اندازه منافذ را کاهش می‌دهند. این تراکم ریزساختاری مستقیماً با مقادیر بالای UCS حاصل در مخلوط‌های رسی مبتنی بر NaOH مطابقت دارد. برعکس، فعال‌سازی سیلیکات سدیم در خاک رس (شکل ۱۴(ت)) به دلیل راندمان انحلال پایین‌تر محلول غنی از سیلیکات، ساختار چسبنده‌تری ایجاد می‌کند که با UCS پایین‌تر به‌دست‌آمده مطابقت دارد. فعال‌سازی NaOH منجر به تشکیل جزئی ژل در اطراف دانه‌ها در خاک شنی می‌شود، اما پیوند ناپیوسته باقی می‌ماند. شکل ۱۴ تأیید می‌کند که پیوستگی ژل، اصلاح منافذ و پیوند بین ذرات از علل اصلی توسعه مقاومت هستند.

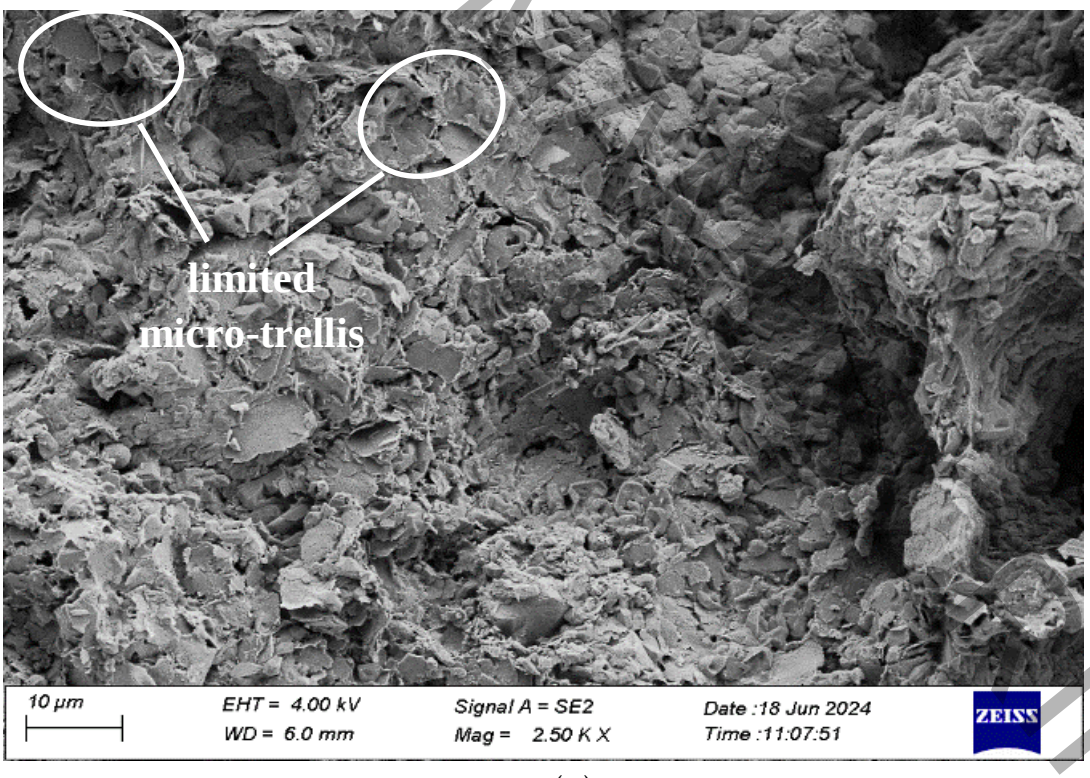


(الف)

ACCEPTED MANUSCRIPT

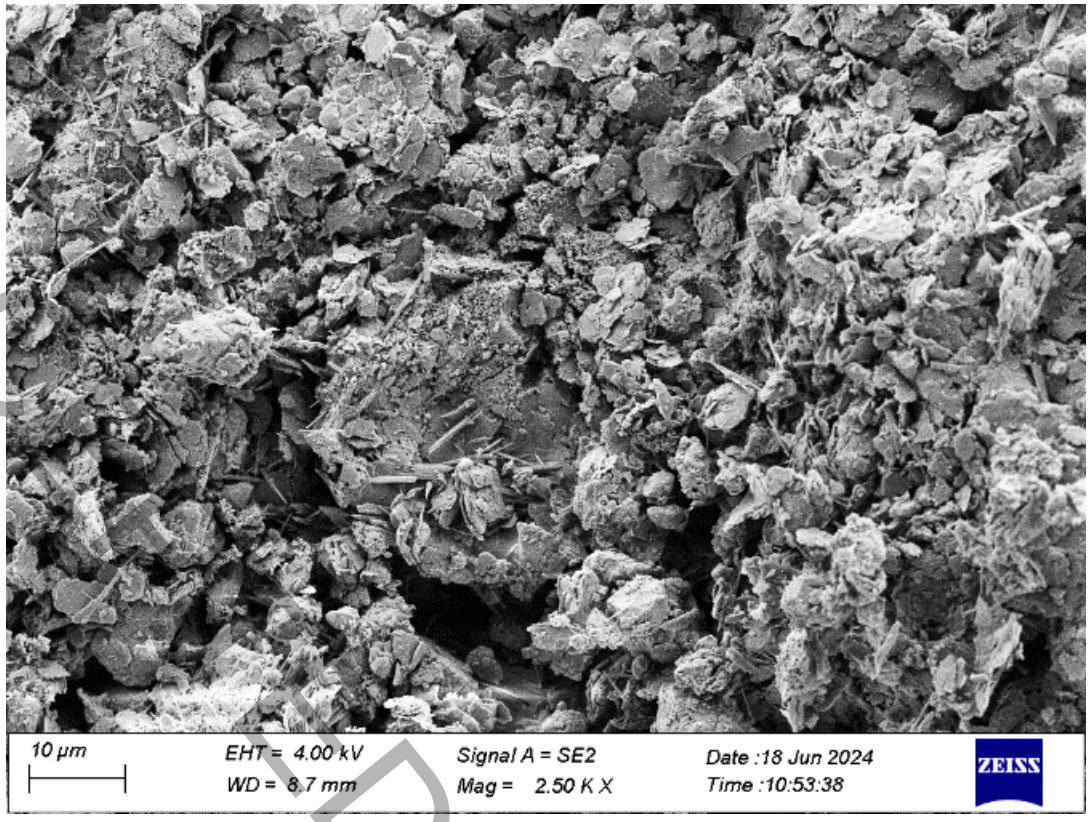


(ب)



(ت)

ACCEPTED MANUSCRIPT



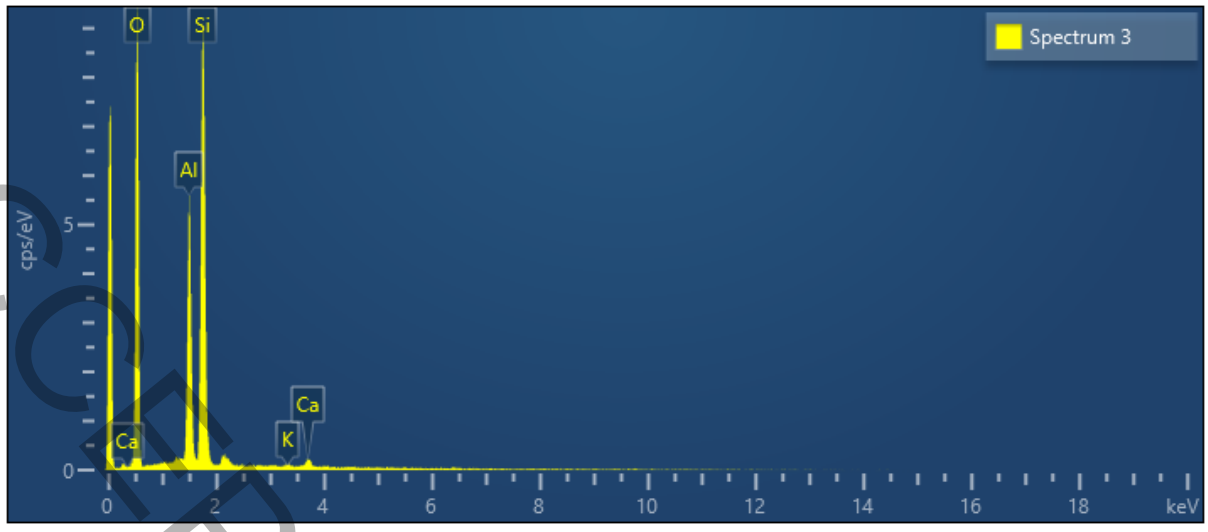
(ج)

شکل ۱۴- نمودار SEM. الف. خاک رس، ب. پوزولان، ج. ترکیب خاک رس با میکرو سیلیس، پوزولان و فعال کننده هیدروکسید سدیم، د. ترکیب خاک رس با میکرو سیلیس، پوزولان و فعال کننده سیلیکات سدیم

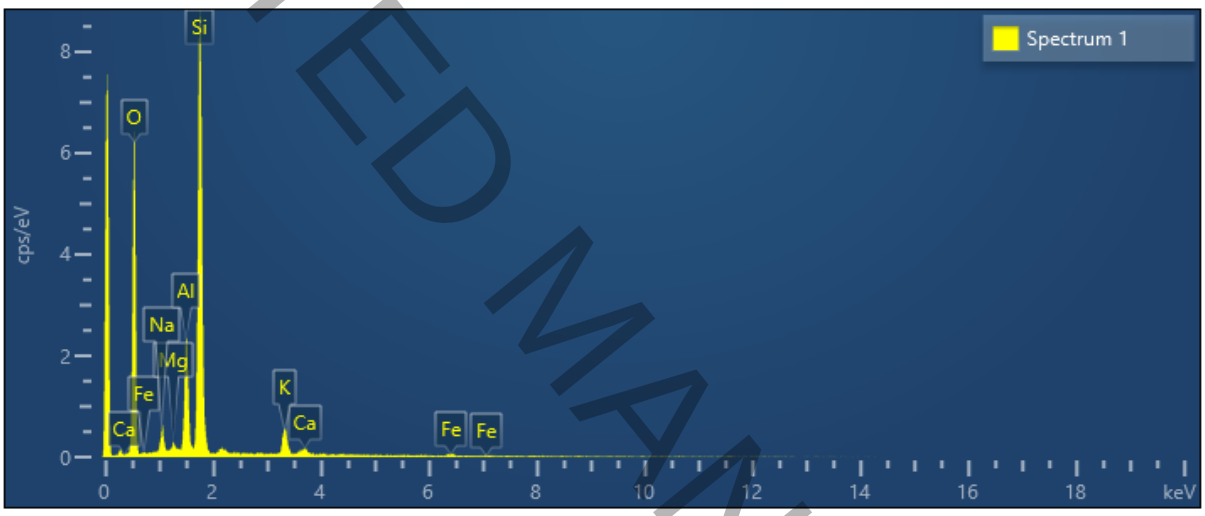
Figure 14. SEM micrographs: (a) Clay; (b) Pozzolan; (c) Mixture of clay, microsilica, pozzolan, and sodium hydroxide activator; (d) Mixture of clay, microsilica, pozzolan, and sodium silicate activator.

آنالیز EDX شکل ۱۵، مشاهدات SEM را در شناسایی ترکیب عنصری مسئول تشکیل ژل و افزایش مقاومت در مخلوط‌های تثبیت‌شده تکمیل می‌کند. خاک رس (شکل ۱۵- الف) نشانه‌های عنصری طبیعی را نشان می‌دهند؛ خاک رس حاوی Si، Al و مقدار کمی Fe است، پوزولان (شکل ۱۵- ب) با سیلیس و آلومینای آمورف بالا مشخص می‌شوند که آنها را به عنوان پیش‌سازهای واکنش‌پذیر مناسب در ژئوپلیمریزاسیون تأیید می‌کند. انحلال Si و Al در مورد فعال‌سازی NaOH (شکل ۱۵- ت) در مقایسه با دو مورد دیگر بیشتر است، که نشان دهنده انحلال قوی‌تر پلاکت‌های آلومینوسیلیکات در NaOH است و منجر به تشکیل بیشتر ژل‌های N-A-S-H می‌شود. این افزایش در دسترس بودن Si-Al مستقیماً با ریزساختار متراکم مشاهده شده در شکل (شکل ۱۵- ت) و مقادیر بالای UCS ثبت شده برای مخلوط‌های خاک رس مبتنی بر NaOH مطابقت دارد. به طور کلی، فعال‌سازی سیلیکات سدیم، انحلال کمی پایین‌تری را نشان می‌دهد، همانطور که با شدت‌های عنصری نسبتاً کاهش‌یافته (شکل ۱۵- ج) نشان داده شده است، که با مقادیر UCS متوسط‌تر در خاک رس فعال‌شده با Na_2SiO_3 مطابقت دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

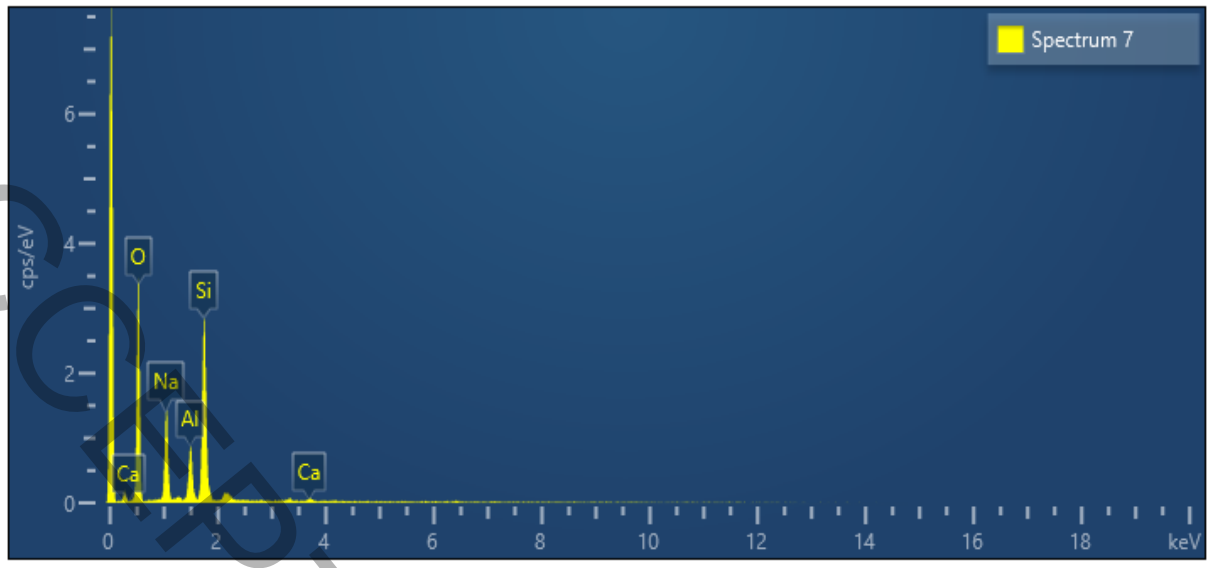


(الف)

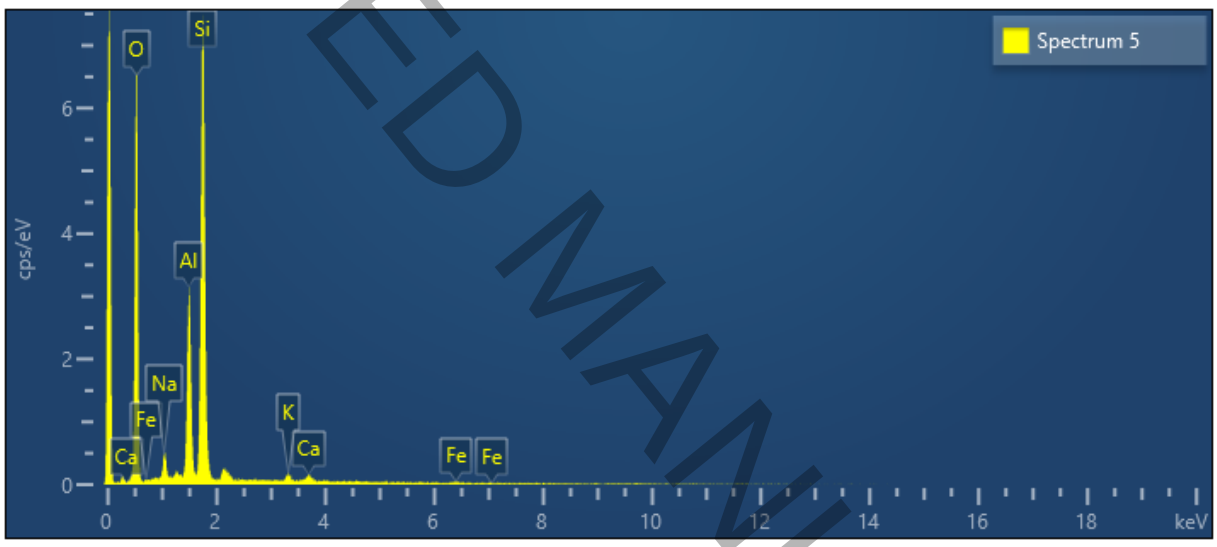


(ب)

ACCEPTED MANUSCRIPT



(ت)



(ج)

شکل ۱۵- نتایج EDS: (الف) خاک رس، (ب) پوزولان، (ت) ترکیب خاک رس با پوزولان و فعال کننده هیدروکسید سدیم، (ج) ترکیب خاک رس با پوزولان و فعال کننده سیلیکات سدیم

Figure 15. EDS results: (a) Clay, (b) Pozzolan, (c) Mixture of clay and pozzolan with sodium hydroxide activator, (d) Mixture of clay and pozzolan with sodium silicate activator.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تثبیت خاک رس با پوزولان طبیعی(BNP) ، به‌ویژه در حضور فعال‌کننده‌های قلیایی، موجب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی و رفتار دینامیکی خاک می‌شود. میزان این بهبود به درصد افزودنی، نوع فعال‌کننده قلیایی و مدت عمل‌آوری وابسته بود. مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- افزودن BNP بدون فعال‌کننده قلیایی موجب افزایش محدود مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) شد. در سن ۷ روز، مقاومت خاک طبیعی از ۶۵۰ به ۶۹۰، ۷۷۰ وkPa ۸۰۵ ، به‌ترتیب با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدBNP ، افزایش یافت که معادل بهبود٪ ۶/۲ ،٪ ۱۸/۵ و ٪ ۲۳/۸ بود. در عمل آوری ۲۸ روزه، مقاومت نمونه‌ها به‌ترتیب به ۸۱۰، ۸۴۰ و ۹۴۰ kPa رسید که در مقایسه با خاک طبیعی با مقاومتkPa ۷۵۰ ، بیانگر افزایش ۸، ۱۲ و٪ ۲۵/۳ است. بنابراین، پوزولان طبیعی به‌تنهایی موجب افزایش مقاومت شد، اما اثر آن در مقایسه با فعال‌سازی قلیایی محدودتر بود.

۲- فعال‌سازی با NaOH بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را در درصد افزودنی ۳۰ درصد ایجاد کرد. مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزودنی در سن ۷ روز به‌ترتیب ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۷۰۰ kPa بود که نسبت به خاک طبیعی در همین سن، افزایش ۱۳۰/۸، ۲۸۴/۶ و٪ ۳۱۵/۴ را نشان می‌دهد. این مقادیر در دوره عمل آوری ۲۸ روزه به‌ترتیب به ۲۴۰۰، ۲۸۰۰ و ۳۵۰۰ kPa رسیدند؛ یعنی مقاومت نمونه حاوی٪ ۳۰ افزودنی در مقایسه با خاک طبیعی ۲۸ روزه، حدود٪ ۳۶۶/۷ بیشتر بود. افزایش مقاومت با طولانی‌تر شدن دوره عمل‌آوری، با پیشرفت واکنش‌های فعال‌سازی قلیایی و توسعه ساختار پیونددهنده سازگار است.

۳- نتایج نشان داد که پاسخ مقاومت فشاری به درصد افزودنی در این سیستم یکنواخت نبود. در دوره عمل آوری ۷ روزه، مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و٪ ۳۰ افزودنی به‌ترتیب ۱۵۰۰، ۲۵۰۰ و ۱۹۰۰ kPa بود. در دوره عمل آوری ۲۸ روزه، این مقادیر به‌ترتیب به ۱۶۰۰، ۳۳۰۰ و ۲۸۰۰ kPa رسیدند که در مقایسه با خاک طبیعی، افزایش ۱۱۳/۳، ۳۴۰ و٪ ۲۷۳/۳ را نشان می‌دهد. بنابراین، در این سیستم، ترکیب حاوی٪ ۲۰ افزودنی بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را ایجاد کرد. کاهش مقاومت نسبی در ترکیب٪ ۳۰ در مقایسه با ترکیب٪ ۲۰ نشان می‌دهد که افزایش مقدار افزودنی الزاماً به افزایش مقاومت منجر نمی‌شود و تعیین درصد مناسب به ترکیب مواد و شرایط واکنش وابسته است.

۴-نتایج آزمایش‌های دینامیکی نشان داد که افزودن ژئوپلیمر، در محدوده شرایط آزمایش، موجب افزایش مدول برشی و کاهش نسبت میرایی نسبت به خاک طبیعی شد. همچنین، افزایش سربار و طولانی‌تر شدن دوره عمل‌آوری عموماً با افزایش مدول برشی همراه بود. اثر درصد افزودنی بر این پارامترها یکسان نبود و بر اساس نتایج گزارش‌شده، تغییرات در نمونه حاوی٪ ۱۰ افزودنی بیشتر از نمونه‌های حاوی ۲۰ و ٪۳۰ بود.

۵-مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تغییر ساختار خاک از بافت نسبتاً سست و متخلخل به ساختاری متراکم‌تر و دارای پیوند بیشتر میان ذرات را در نمونه‌های فعال‌شده نشان داد. همچنین، نتایج طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) حضور عناصرSi ، Al و Na را در محصولات واکنش تأیید کرد. ترکیب ۳۰ درصدی فعال‌شده با NaOH بیشترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه، معادل KPa ۳۵۰۰ ، و ترکیب٪ ۲۰ فعال‌شده با سیلیکات سدیم مقاومت KPa ۳۳۰۰ را نشان داد.

برای تعمیم این نتایج به پروژه‌های اجرایی، بررسی دوام بلندمدت، قابلیت اجرا در مقیاس بزرگ‌تر و شاخص‌های اختصاصی کاربرد موردنظر، از جمله CBR برای راه‌سازی، ضروری است. تعمیم نتایج آزمایشگاهی این پژوهش به پروژه‌های بزرگ‌مقیاس نیازمند بررسی بیشتر است. ازآنجاکه تحلیل ابعادی انجام نشده، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، روابط بی‌بُعد تدوین و نتایج از طریق آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس و مطالعات میدانی اعتبارسنجی شوند.

ACCEPTED MANUSCRIPT

مراجع

[1] O. S. B. Al-Amoudi, A. A. Al-Homidy, M. Maslehuddin, T. A. Saleh, Method and Mechanisms of Soil Stabilization Using Electric Arc Furnace Dust, Scientific Reports 7(1) (2017) 46676. https://doi.org/10.1038/srep46676

[2] Sabbaqzade, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, P. Hamidian, Evaluation of the mechanical behaviour of cement-stabilised collapsible soils treated with natural fibres, Geomechanics and Geoengineering 17(6) (2022) 1735–1750. https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1922766

[3] R. Bao et al., Effect of Microbial-Induced Calcite Precipitation on Surface Erosion and Scour of Granular Soils, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2657(1) (2017) 10–18. https://doi.org/10.3141/2657-02

[4] V. Ivanov, J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 7(2) (2008) 139–153. https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3

[5] M. A. Ghasemi Alamshiri, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, Investigation of the Effects of Weathering and Decay on Soil Stabilized with Rice Straw Fibers, Amirkabir Journal of Civil Engineering 57(8) (2025) 1319–1342. https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23771.8214

[6] M. R. Karami, M. Keramati, R. Maadi, H. Moradi Moghaddam, Effect of layered polyethylene terephthalate (Geopet) for reinforcing stabilized sand with fly ash, World Journal of Engineering 22(3) (2025) 638–651. https://doi.org/10.1108/WJE-12-2023-0501

[7] S. Pourakbar, A. Asadi, B. B. K. Huat, M. H. Fasihnikoutalab, Stabilization of clayey soil using ultrafine palm oil fuel ash (POFA) and cement, Transportation Geotechnics 3 (2015) 24–35. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.01.002

[8] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, A. Udomchai, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, Applied Clay Science 127–128 (2016) 134–142. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.005

[9] N. T. Abdel-Ghani, H. A. Elsayed, S. AbdelMoied, Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance, HBRC Journal 14(2) (2018) 159–164. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2016.06.001

[10] B. Nematollahi, J. Sanjayan, J. Qiu, E.-H. Yang, Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite, Construction and Building Materials 131 (2017) 552–563. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.117

[11] V. Toufigh, R. Baghban Shokatabad, I. Sheikhhosseini Lori, A. M. Namjoo, M. M. Toufigh, Mechanical Behavior's Enhancement of Sandy Soil by a Natural Pozzolan-Based Geopolymer and Nanomaterial, Indian Geotechnical Journal 53(2) (2023) 394–408. https://doi.org/10.1007/s40098-022-00678-0

ACCEPTED MANUSCRIPT

[12] B. Umniati, P. Risdanareni, F. T. Z. Zein, Workability enhancement of geopolymer concrete through the use of retarder, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing (2017). https://doi.org/10.1063/1.5003516

[13] S. You, S. W. Ho, T. Li, T. Maneerung, C.-H. Wang, Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents, Journal of Hazardous Materials 361 (2019) 237–244. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.089

[14] S. Samantasinghar, S. P. Singh, Effect of synthesis parameters on compressive strength of fly ash-slag blended geopolymer, Construction and Building Materials 170 (2018) 225–234. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.026

[15] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, A. Arulrajah, Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge, Construction and Building Materials 82 (2015) 20–30. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040

[16] J. Shahiri, M. Keramati, H. Moradi Moghaddam, Alkali-Activated Natural Pozzolan for Clay and Sand Stabilization: UCS Performance, Microstructural Evolution, and Optimum Mix Design, Journal of Mining and Environment (2026).

[17] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, Construction and Building Materials 47 (2013) 1468–1478. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017

[18] N. A. Odeh, A. H. J. Al-Rkaby, Strength, Durability, and Microstructures characterization of sustainable geopolymer improved clayey soil, Case Studies in Construction Materials 16 (2022) e00988. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00988

[19] M. Jafari Kermanipour, M. H. Bagheripour, E. Yaghoubi, Improving Durability and Mechanical Properties of Silty Sand Stabilized with Geopolymer and Nanosilica Composites, Journal of Composites Science 9(8) (2025) 397. https://doi.org/10.3390/jcs9080397

[20] M. R. Hayder, H. Ziari, A. M. Shaban, Strength and microstructural characteristics of sand soils stabilized with paper sludge Ash-Based geopolymer, Scientific Reports 15(1) (2025) 8752. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92813-z

[21] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A. T. Pinto, Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation, Acta Geotechnica 8(4) (2013) 395–405. https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9

[22] M. Yaghoubi, A. Arulrajah, M. M. Disfani, S. Horpibulsuk, S. Darmawan, J. Wang, Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay, Applied Clay Science 167 (2019) 33–42. https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.005

[23] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, A. Arulrajah, Durability against Wetting–Drying Cycles of Water Treatment Sludge–Fly Ash Geopolymer and Water

ACCEPTED MANUSCRIPT

Treatment Sludge–Cement and Silty Clay–Cement Systems, Journal of Materials in Civil Engineering 28(1) (2016). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351

[24] S. Bin-Shafique, K. Rahman, I. Azfar, The Effect of Freezing-Thawing Cycles on Performance of Fly Ash Stabilized Expansive Soil Subbases, Geo-Frontiers 2011, American Society of Civil Engineers, Reston, VA (2011) 697–706. https://doi.org/10.1061/41165(397)72

[25] B. Adhikari, M. J. Khattak, S. Adhikari, Mechanical and durability characteristics of flyash-based soil-geopolymer mixtures for pavement base and subbase layers, International Journal of Pavement Engineering 22(9) (2021) 1193–1212. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1668562

[26] S. Sreelakshmi, B. K. Huchegowda, S. Chithaloori, G. K. Kumar, Strength and Durability Behaviour of Geopolymer-Stabilized Soil (2020) 585–591. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6086-6_48

[27] S. Gupta, S. Kumar, Mechanical and microstructural analysis of soft kaolin clay stabilized by GGBS and dolomite-based geopolymer, Construction and Building Materials 421 (2024) 135702. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135702

[28] M. H. Abed, F. H. Abed, I. S. Abbas, S. A. Zareei, H. Canakci, N. H. Kurdi, Mechanical and durability performance of eco-friendly geopolymer-stabilized soil, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement 178(1) (2024) 14–30. https://doi.org/10.1680/jgrim.23.00037

[29] J. Rui, Z. Chu, Triaxial mechanical properties and microstructure of Tianjin clay stabilized with fly ash-based geopolymer, Soils and Foundations 65(6) (2025) 101687. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101687

[30] R. Raj, B. Yadav, J. S. Yadav et al., Advancement in soil stabilisation process by utilising fly ash-red mud geopolymer: a comprehensive review, Discover Materials 5 (2025) 216. https://doi.org/10.1007/s43939-025-00392-7

[31] Jaber Shahiri, Mojtaba Ghasemi, Utilization of Soil Stabilization with Cement and Copper Slag as Subgrade Materials in Road Embankment Construction, International Journal of Transportation Engineering 5(1) (2017) 45–58. https://doi.org/10.22119/IJTE.2017.45834

[32] P. Alidoust, M. Keramati, N. Shariatmadari, Laboratory studies on effect of fiber content on dynamic characteristics of municipal solid waste, Waste Management 76 (2018) 126–137. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.038

[33] H. M. Moghaddam, M. Keramati, A. Fahimifar, T. Ebadi, S. Siddiqua, A. R. Ghanizadeh, A. T. Amlashi, S. Dessouky, Shear modulus prediction of landfill components using novel machine learners hybridized with forensic-based investigation optimization, Construction and Building Materials (2024) 13443. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134443

[34] H. M. Moghaddam, A. Fahimifar, T. Ebadi, M. Keramati, S. Siddiqua, Assessment of leachate-contaminated clays using experimental and artificial methods, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 17 (2025) 524–538. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.02.050

ACCEPTED MANUSCRIPT