

ارزیابی تاثیر سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با هیدروکسید سدیم

بر بهسازی رس کائولینیت آلوده به گلیسرول

حسین بیگدلی^۱، امیر حمیدی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

۲- *استاد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

ایمیل نویسنده مسئول: hamidi@khu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵

چکیده

آلودگی خاک به دلیل فعالیتهای پتروشیمی و نشت مواد آلی هیدروکربنی، تنها یک موضوع زیست محیطی محسوب نمی شود بلکه یک مسئله ژئوتکنیکی نیز هست. یکی از راهکارهای مناسب و اقتصادی جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاکهای آلوده به این مواد، بهسازی به روش سیمان تاسیون مصنوعی می باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی، تاثیر سیمان ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره ذوب آهن در درصد های وزنی صفر، ۵ و ۱۰ به همراه فعال کننده قلیایی سدیم هیدروکسید با غلظت های ۴، ۶ و ۸ مولار بر بهسازی رس کائولینیت آلوده به ماده آلی گلیسرول در مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی مطالعه شده است. نمونه های خاک تمیز، خاک آلوده، خاک تمیز بهسازی شده با ژئوپلیمر و خاک آلوده بهسازی شده با سیمان ژئوپلیمر، در زمان عمل آوری ۷ روزه تهیه و آزمایش تعیین مقاومت تک محوری بر روی آنها انجام شده است. نتایج اولیه نشان داد که مقاومت رس کائولینیت آلوده به گلیسرول نسبت به رس تمیز کاهش می یابد و میزان این کاهش با افزایش درصد آلاینده بیشتر می شود. پس از بهسازی، با افزایش درصد سرباره برای هر غلظت محلول قلیایی، مقاومت تک محوری کائولینیت فاقد آلودگی افزایش می یابد. به نحوی که مقاومت کائولینیت فاقد آلودگی و بهسازی شده با سیمان ژئوپلیمر حاوی ۱۰ درصد سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۶ مولار نسبت به کائولینیت فاقد آلودگی بهسازی نشده، ۴۴۱ درصد افزایش را نشان می دهد. در نمونه های آلوده به گلیسرول، بیشترین افزایش مقاومت فشاری تک محوری پس از بهسازی، برای کائولینیت آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد آلاینده، با ژئوپلیمر حاوی ۱۰ درصد سرباره و فعال شده با سدیم هیدروکسید ۶ مولار است که به ترتیب حدود ۴۸۹ و ۴۴۶ و ۴۰۲ درصد می باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی، نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر را تایید می نماید. واژه های کلیدی: رس کائولینیت، گلیسرول، سیمان ژئوپلیمر، سرباره کوره ذوب آهن، سدیم هیدروکسید.

مقدمه

سازه ها شوند (Rahman, ۲۰۱۰; Du et al., ۲۰۲۱). در سه دهه گذشته، تحقیقات زیادی برای بررسی تغییرات نامطلوب در خواص فیزیکی، شیمیایی و ژئوتکنیکی خاک آلوده به هیدروکربن ها انجام شده است (Oluwatuyi et al., ۲۰۱۹; Ghadyani et al., ۲۰۲۰). برخی مطالعات کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک رس آلوده را گزارش کرده و برخی دیگر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک رس آلوده را گزارش نمودند. برخی کاهش چسبندگی در خاک رس آلوده به نفت را مشاهده کرده اند (Oluwatuyi et al., ۲۰۲۰)، در حالی که دیگران افزایش

در بسیاری از موارد، خاک آلوده به مواد شیمیایی دچار تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی خود خواهد شد. آلودگی خاک معمولاً از محل دفن زباله، آب سطحی آلوده به لایه های زیرین، نشت از خطوط لوله و مخازن ذخیره سازی زیرزمینی، زباله های صنعتی، کود و آفت کش ها ناشی می شود (Karkush and Abdulkareem, ۲۰۱۷). این تغییرات می توانند باعث افزایش نشست سازه های بنا شده بر روی این خاک ها، کاهش ظرفیت باربری پی ها، طولانی شدن زمان انجام عملیات های عمرانی، افزایش هزینه های ساخت و ساز و ازدیاد ریسک تخریب

(Estabragh et al., ۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی خاک رس آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول و ترکیب شده با ۳ و ۶ درصد سیمان پرتلند نوع یک پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، بهبود پارامترهای مقاومتی با بهسازی خاک توسط سیمان پرتلند مشاهده شد. Akinwumi et al., ۲۰۱۶ به بررسی اثر سیمان پرتلند معمولی نوع یک با مقادیر مختلف بر تثبیت خاک رس در رطوبت طبیعی و آلوده شده به ۱۰٪ نفت خام پرداختند. بر این اساس، مقاومت و نفوذپذیری خاک که با افزودن نفت خام کاهش یافته بود با بهسازی توسط سیمان، بهبود یافت. Chen et al., ۲۰۱۷ نیز اثر افزودن سیمان در زمان‌های عمل آوری مختلف بر رفتار رس آلوده با درصد‌های مختلف روغن دیزل را تحت آزمایش تک محوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده کاهش مقاومت نمونه‌های آلوده با افزایش زمان عمل آوری بود. همچنین در درصد سیمان ثابت، مقاومت نمونه‌ها با افزایش درصد روغن دیزل کاهش پیدا کرد. Shah et al., ۲۰۰۳ به مطالعه موردی روی تثبیت خاک آلوده به نفت کوره، با آهک، خاکستر بادی و سیمان پرداختند. آنها ۳۵ درصد کاهش در مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک آلوده مشاهده نمودند. اما با افزودن مواد تثبیت کننده، مقاومت تک محوری نمونه‌ها افزایش یافت. بهترین نتایج تثبیت، برای نمونه آلوده و تثبیت شده با مخلوط ۱۰ درصد آهک، ۵ درصد خاکستر بادی و ۵ درصد سیمان مشاهده شد. همچنین (Jahani et al., ۲۰۲۳) امکان بهسازی یک خاک رس از نوع CL آلوده به محلول گلیسرول با استفاده از سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با اکسیدمنیزیم (MgO) و همچنین سرباره فعال شده با مخلوط MgO و سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که فعال سازی GGBS با اضافه کردن MgO و یا مخلوط MgO و سیمان، در نهایت منجر به بهبود عملکرد در افزایش مقاومت فشاری و افزایش سختی نظیر ۵۰٪ مقاومت اوج (E_{۰۰}) نمونه های خاک آلوده می گردد. نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM^۲ نیز آشکار کرد که بهسازی خاک در نتیجه واکنشهای شیمیایی است که بین ذرات خاک و مواد افزودنی صورت می پذیرد.

چسبندگی خاک رس را نشان داده اند (Khosravi et al., ۲۰۱۹; Ghadyani et al., ۲۰۱۳). مقایسه نتایج در متون فنی نشان می دهد که تغییرات در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک های آلوده به هیدروکربن ها به ویژگی هایی مانند نوع خاک، دانه بندی، ویژگی های پلاستیک، نوع هیدروکربن و روش نمونه برداری بستگی دارد. رفتار خاکهای آلوده و روشهای بهسازی و اصلاح آنها توسط محققین مختلفی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. از جمله (Zanjarani and Hamidi, ۲۰۱۴) به بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت آلوده به دو نوع سیال نفتی پرداختند. بر این اساس مشخص گردید که با افزایش درصد آلودگی، تراکم پذیری خاک آلوده نسبت به خاک تمیز افزایش می یابد اما ضریب تحکیم و نفوذپذیری خاک با ازدیاد درصد آلاینده کاهش خواهند یافت. میزان کاهش نیز مرتبط با نوع آلاینده است. به علاوه روغن کاری ذرات خاک به دلیل حضور سیال نفتی به دلیل لزجت بالای آن نسبت به آب نیز موجب لغزش بهتر و افزایش تراکم پذیری خاک خواهد شد. در تحقیقی دیگر، (Srivastava et al., ۲۰۱۰) به بررسی تثبیت رس با پلاستیسیته پایین و آلوده به ۱۰ درصد روغن موتور، توسط مقادیر مختلف سیمان پرداختند. نتایج نشان داد که با اضافه شدن آلودگی به خاک، مقاومت تک محوری کاهش یافته و پارامترهای مقاومت برشی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می یابند. از سیمان تاسیون می توان برای احیای خاک آلوده استفاده کرد که شامل مخلوط کردن خاک آلوده با مواد سیمانی مانند سیمان پرتلند، سنگ آهک و یا دیگر مواد پایه سیمانی است. این امر به طور کلی خواص خاک مانند مقاومت تک محوری (UCS)، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را از طریق تشکیل پیوندهای هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) بهبود می بخشد. ملات سیمانی حاصل، ذرات خاک را پوشش داده و آنها را به هم پیوند می دهد (Shah et al., ۲۰۰۳). استراتژی دیگر برای بهبود خواص مکانیکی خاک، شیمیایی از پایدار کننده های فیزیکی یا شیمیایی است. پایدار سازی شیمیایی با افزودن سیمان، آهک، خاکستر بادی یا ترکیبی از آنها که منجر به ایجاد واکنش پوزولانی می گردد، ایجاد می گردد (Hajimohammadi and Hamidi, ۲۰۲۱).

^۲Scanning Electron Microscopy^۲Unconfined Compressive Strength

با توجه به موارد ذکر شده، تحقیق بر سیمان ژئوپلیمر ساخته شده بر پایه زائادات سرباره کوره ذوب آن که تولید قابل توجهی در ایران دارد، حائز اهمیت است. از طرف دیگر، با توجه به وجود منابع آلودگی خاکها، تثبیت خاک‌های آلوده که ممکن است در برخی پروژه‌ها به‌عنوان مواد قرضه مورد استفاده قرار گیرند نیز اهمیت به‌سزایی دارد. در این تحقیق سعی بر آن است که خصوصیات مقاومتی کاتولینیت تمیز و الوده به آلانده گلیسرول، با استفاده از سیمان ژئوپلیمری تولیدشده بر مبنای سرباره کوره ذوب آهن و فعال شده توسط هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گیرد و مقادیر بهینه و میزان افزایش مقاومت پس از بهسازی مورد ارزیابی و تفسیر قرار گیرد.

روش انجام تحقیق

مواد بکار گرفته شده در این تحقیق، شامل رس کاتولینیت، سرباره کوره ذوب آهن در مقادیر صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک خشک، آب و هیدروکسید سدیم در غلظت‌های ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸ مولار به‌عنوان فعال‌ساز قلیایی با pH بالا و ماده آلی و آلانده گلیسرول بوده که در تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد مذکور ارائه شده است.

الف) خاک

خاک پایه مورد استفاده در تحقیق حاضر، رس کاتولینیت است. علت آن است که این نوع خاک در مناطق با آب و هوای گرم و خشک، به‌ویژه در مکان‌هایی که ذخایر نفت موجود بوده و عملیات اکتشاف و استخراج آن انجام می‌گیرد، فراوان یافت می‌شود (Juo and Franzluebbbers, ۲۰۰۴). برای انجام این تحقیق از خاک رس کاتولینیت تهیه شده از شرکت صنایع خاک چینی ایران استفاده شده است. همچنین کانی کاتولینیت از رایج‌ترین مواد معدنی خاک‌های موجود در جنوب ایران هست که عمده پالایشگاه‌های کشور بر روی آن بنا شده و امکان آلودگی به نفت خام در آنها زیاد است (Khomehchiyan et al., ۲۰۰۷). طبقه‌بندی این نوع خاک بر اساس سیستم یونیفاید (USCS)، رس با خمیری کم (CL) است. منحنی دانه‌بندی، مشخصات فیزیکی، کانی‌شناسی و

در سطح جهانی پتانسیل بالایی برای حرکت به سمت استفاده از مواد سیمانی سبز (با کمترین تاثیر بر محیط زیست) وجود دارد. بر این اساس در سالهای اخیر توجه محققین معطوف به تولید سیمان‌های ژئوپلیمری که سازگاری مناسبی با طبیعت دارند، بوده است. این سیمان در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی مزایایی مانند هزینه کم‌تر تولید، سهولت دسترسی، انتشار دی‌اکسید کربن بسیار کم‌تر و خواص مکانیکی بهینه دارد. استفاده و تولید سیمان ژئوپلیمر، مشکلات ناشی از افزایش مقادیر باطله‌ها و سنگ‌های زائد تولید شده توسط صنایع و معادن را مرتفع نموده و مسائل زیست‌محیطی و بهداشتی آنها را کاهش می‌دهد زیرا تولید و استفاده از سیمان پرتلند، معایب زیست‌محیطی از جمله افزایش سطح تولید گاز دی‌اکسید کربن به وسیله تولید سیمان را کاهش می‌دهد. به گزارش سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، تولید کلینکر در جهان در سال ۲۰۱۴ به ۳,۵۷ Bt رسید. تولید هر یک تن کلینکر سیمان پرتلند منجر به انتشار حدود ۹۰۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن می‌گردد. این سطح از تولید به این معنی است که صنعت سیمان مسئول تولید ۶ تا ۷ درصد از دی‌اکسید کربن تولیدی بشر است (Khatib, ۲۰۱۶). در نتیجه، صنعت به دنبال راه‌هایی برای کاهش تولید گاز کربن دی‌اکسید کربن و کاهش درصد کلینکر در سیمان است. برای این منظور، نیاز به افزایش استفاده از مواد سیمانی جدید برای جایگزینی با کلینکر است. با این حال باید توجه شود که بسیاری از این موارد پایه سیمانی، محصولات فرعی صنعتی هستند و در دسترس بودن آنها وابسته به تولید محصولات اولیه است. یعنی باید میزان تولید آهن برای استفاده از سرباره کوره (GGBFS) در کشور و دنیا مورد توجه قرار بگیرد. تولید سالانه حدود ۱/۷ میلیارد تن فولاد (شامل ۱/۲ میلیارد تن آهن خام) معادل حدود ۵۰۰ میلیون تن سرباره کوره بلند است. این مقدار معادل با سطح جایگزینی احتمالی کمتر از ۳۳٪ سیمان پرتلند مورد نیاز جهانی است (Khatib, ۲۰۱۶). ذکر این نکته نیز ضروری است که در خاورمیانه درصد استفاده از ضایعات صنعتی در تولید سیمان، درصد پایینی است، طبق اطلاعات موجود در خاورمیانه، آفریقا، روسیه و هند کمتر از ۲۰٪ این سرباره‌ها مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد، اما کشورهای پیش‌رو همچون چین و آمریکا از ضایعات سرباره‌ای در تولید سیمان و دیگر محصولات حداکثر بهره‌برداری انجام می‌شود (Khatib, ۲۰۱۶).

^۱Unified Soil Classification System

^۲Ground-Granulated Blast-Furnace Slag

ب) سرباره کوره ذوب آهن

در این تحقیق از سرباره کوره ذوب آهن تامین شده از کارخانه ذوب آهن اصفهان واقع در استان اصفهان، استفاده شده است. به منظور واکنش پذیری بالا با خاک و محلول قلیایی، این سرباره به صورت پودر رد شده از الک ۲۰۰ (ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون) درآورده شده است. در جدول شماره ۳ خواص شیمیایی سرباره کوره ذوب آهن مورد استفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است.

جدول ۳. خواص شیمیایی سرباره کوره ذوب آهن مورد استفاده

ترکیب شیمیایی	درصد (%)
CaO	37.9
SiO ₂	35.9
MgO	8.9
Al ₂ O ₃	8.4
BaO	2.1
TiO ₂	1.9
MnO ₂	1.5
SO ₃	0.7
K ₂ O	0.7
Fe ₂ O ₃	0.7
SrO	0.3
LOI	0.9

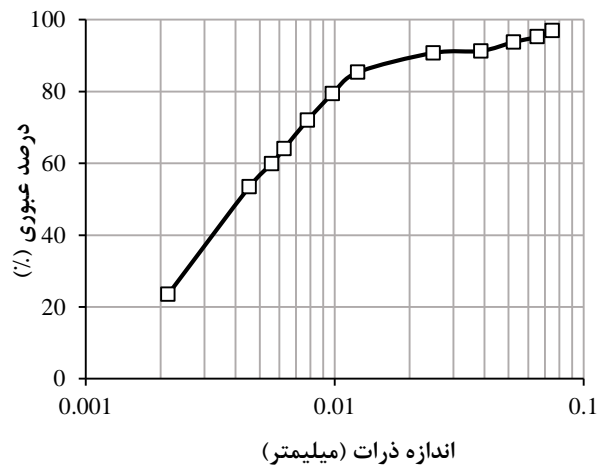
ج) محلول قلیایی

محلول فعال ساز قلیایی مورد استفاده در این تحقیق، سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۴، ۶ و ۸ مول است. غلظت مناسب برای NaOH بین ۴/۵ تا ۱۸ مول گزارش شده است (Andini et al. ۲۰۰۸). از آنجایی که سازگاری با محیط زیست و ارزان بودن یکی از مسائل مهم در این پژوهش است، غلظت محلول در نمونه‌ها حداکثر تا ۸ مول در نظر گرفته شد.

د) گلیسرول

ماده آلی به کار گرفته شده جهت آلوده‌سازی خاک در این تحقیق، گلیسرول با غلظت ۴۰ درصد (۴۰ گرم گلیسرول در ۱۰۰ گرم آب) می‌باشد. گلیسرول در واقع یک الکل سه عاملی با فرمول C₃H₈(OH)₃ است که به دلیل دارا بودن پیوندهای هیدروژنی، با هر نسبتی در آب حل می‌شود. گلیسرول به صورت مایعی زلال، بی‌رنگ و بدون بو است که در داروسازی، صابون‌سازی، صنایع بهداشتی و آرایشی، مواد منفجره مثل نیتروگلیسرین، روغن کاری ابزارها و تأسیسات فلزی و

شیمیایی خاک رس کائولینیت مورد مطالعه به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک رسی

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک رس مورد استفاده

ویژگی	واحد	مقادیر	استاندارد
سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)	-	CL	ASTM D2487
حد روانی (LL)	%	۴۰	ASTM D4318-17
حد خمیری (PL)	%	۲۴	
دامنه خمیری (PI)	%	۱۶	
دانسیته خشک حداکثر $\gamma_d(max)$	kN/m^3	۱۷/۰۷	ASTM D698-12
رطوبت بهینه (ω_{opt})	%	۱۷/۰۰	ASTM D698-12

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و کانی شناسی خاک رس کائولینیت

ترکیب کانی شناسی	مقدار (%)	ترکیب شیمیایی	درصد (%)
کائولینیت	۶۴	LOI	9±1
		SiO ₂	63±1
کوارتز	۲۷	Al ₂ O ₃	24±1
		Fe ₂ O ₃	0.55±0.1
		TiO ₂	0.04±0.01
کلسیت	۳	CaO	1.2±0.3
		MgO	0.4±0.1
		Na ₂ O	0.3±0.1
کانی‌های دیگر	۶	K ₂ O	0.4±0.1

نیز برای جلوگیری از یخ بستن جک‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات فیزیکی این ماده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی مواد آلی

مشخصات	گلیسرول	آب	گلیسرول ۴۰٪
گرانروی مطلق (cp) ۲۵°C	۱۵۰۰	۰/۸۹۴	۴/۳۱
ثابت دی الکتریک	۴۰/۱۰	۷۸/۵	۶۷/۱۰
چگالی در دمای °C ۲۵ (g/cm ³)	۱/۲۵۸	۰/۹۹۷	۱/۰۹۷
هدایت الکتریکی (mmhos/cm)	۶/۴۲× ^۵ -۱۰	۸/۴۰× ^۳ -۱۰	۸/۴۰× ^۳ -۱۰

تهیه نمونه

در این تحقیق انواع متفاوتی از نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که شامل رس کائولینیت، رس-سیمان ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره، رس آلوده شده و رس آلوده اختلاط یافته با سیمان ژئوپلیمر هستند. برای تهیه نمونه‌های آلوده شده، از گلیسرول با غلظت ۴۰ درصد در مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی خاک خشک استفاده شده است. مقدار گلیسرول با غلظت ۴۰ درصد به کار گرفته شده در مطالعات محققان دیگر مانند (Estabragh et al., ۲۰۱۶) نیز ۳، ۶ و ۹ درصد و در تحقیقات (Suresh and D'Cruz, ۲۰۱۹) به میزان ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد بوده است. دلیل اصلی انتخاب حداقل ۳ درصد آلودگی این بوده که بر اساس طبقه‌بندی انجام شده در ایالت نیوجرسی آمریکا، خاک با آلودگی بیشتر از ۳ درصد به عنوان زباله خطرناک شناخته می‌شود (Pincus et al., ۱۹۹۵). به این ترتیب ابتدا گلیسرول ۴۰ درصد تهیه و در درصدهای مورد نظر به توده خاک افزوده شده است. برای ایجاد ترکیب متعادل و انجام واکنش‌های شیمیایی، خاک آلوده شده به گلیسرول برای یک هفته در کیسه پلاستیکی دربسته و دور از آفتاب نگهداری شد (Meegoda et al., ۱۹۹۴ و Estabragh et al., ۲۰۱۶).

جهت تهیه نمونه‌های خاک-ژئوپلیمر و خاک آلوده-ژئوپلیمر، مقادیر سرباره صفر، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک خشک با سه غلظت محلول قلیایی ۴، ۶ و ۸ مولار و درصد محلول آلكالی برابر با درصد رطوبت

بهینه ۱۷٪ مخلوط شد. به منظور تهیه سیمان ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره ذوب آهن، در ابتدا سرباره در درصدهای مشخص با محلول هیدروکسید سدیم در درصد رطوبت بهینه مخلوط گردید. پس از اختلاط سرباره و محلول، حدود ۱۰ دقیقه به آن فرصت داده شد تا واکنش ژئوپلیمریزاسیون رخ دهد. سپس برای اختلاط یکنواخت خاک و ژئوپلیمر، در مدت زمان حدود ۱۰ دقیقه اختلاط خاک و سیمان ژئوپلیمر انجام گردید. به منظور جلوگیری از تغییر رطوبت، کلیه نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی قرار گرفته و بعد از آن جهت عمل‌آوری در اتاق مرطوب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بیشتر از ۹۵ درصد نگهداری شدند (Consoli et al., ۲۰۰۷). حداکثر وزن مخصوص و به تبع آن مقاومت خاک، در شرایط رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن واحد حجم خشک حداکثر ($\gamma_d(max)$) ایجاد می‌گردد (Estabragh et al., ۲۰۱۱).

نظر به اینکه یکی از مهمترین اهداف در مطالعات مربوط به بهسازی خاک‌ها، ارزیابی شرایط مکانیکی و مقاومتی آنها است و همچنین به منظور ایجاد شرایط واحد برای مقایسه مقاومت نمونه‌های ساخته شده در تحقیق حاضر، کلیه نمونه‌ها در شرایط وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه معادل آن با روش تراکم استاتیکی ساخته شدند. دلایل استفاده از روش تراکم استاتیکی به جای تراکم دینامیکی، عدم جدایش آلاینده از خاک، وارد کردن انرژی یکسان به هر لایه و در نتیجه یکنواختی تراکم لایه‌ها و نزدیکتر بودن شیوه تراکم به شرایط واقعی در محل بود. به این ترتیب، خاک در سه لایه درون قالبی با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر ریخته شده و هر لایه به وسیله دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه متراکم گردید. پیش از ریختن لایه بعدی، رویه لایه قبلی برای ایجاد پیوند بهتر میان لایه‌ها اندکی خراشیده شد. در هنگام ساخت، نیروی وارد جهت تراکم هر لایه با سعی و خطا به گونه‌ای تعیین شد که وزن واحد حجم خشک نمونه ساخته شده پس از خارج کردن از قالب، برابر وزن واحد حجم خشک بیشینه مربوط به آن نمونه شود. اندازه‌گیری‌های وزن با ترازویی به دقت ۰/۱ گرم انجام شد. نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده پس از ساخت و نمونه‌های خاک-سیمان ژئوپلیمر و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان ژئوپلیمر پس از عمل‌آوری ۷ روزه، مورد آزمایش مقاومت تک محوری قرار گرفتند.

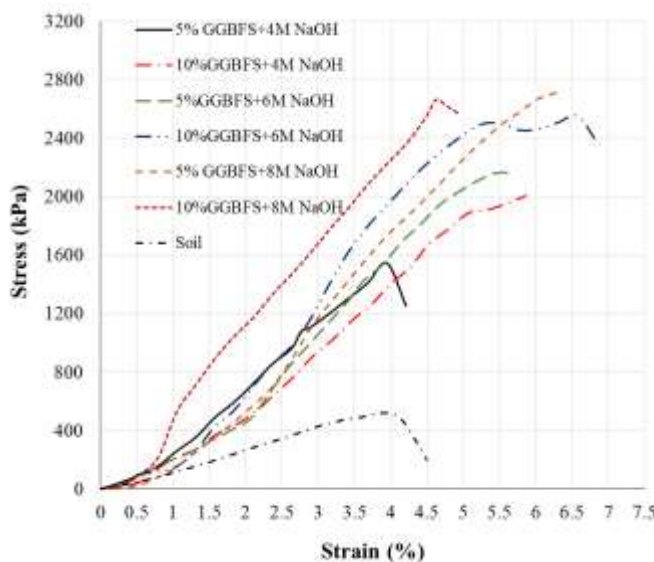
روشن آزمایش

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش فشار تک محوری (UC) طبق استاندارد ASTM D ۱۶۳۳-۰۷ انجام گرفت. براساس استاندارد مذکور، نمونه‌ها از ۲ ساعت قبل از قرارگیری در دستگاه بارگذاری، بیرون شرایط نگهداری (محیط مرطوب) قرار داده شدند و بعد از آن با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه تا رسیدن به شرایط گسیختگی کامل تحت بارگذاری قرار گرفتند (Estabragh et al., ۲۰۱۶). همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای مشاهده ریزساختار نمونه‌ها در شرایط مختلف بر روی نمونه‌ها استفاده شد.

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، با چاقوی تیز به قطعات کوچک دیسکی شکل با حجم یک سانتی‌مترمکعب تقسیم شد (Yazdandoust, and Yasrobi, ۲۰۱۰) و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اسکن و مورد بررسی دقیق قرار گرفتند.

یافته‌های آزمایش

شکل ۲ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی نشده و بهسازی شده خاک فاقد آلودگی با درصدهای مختلف سرباره کوره ذوب آهن (GGBFS) در غلظت‌های مختلف محلول قلیایی هیدروکسید سدیم را نشان می‌دهد. با استفاده از نقاط اوج این منحنی‌ها، تغییرات مقاومت تک‌محوری با درصد سرباره، برای غلظت‌های مختلف محلول قلیایی، در شکل ۳ ارائه شده و با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط (Hamidi & Hajimohammadi, 2023) بر کائولینیت آلوده به گلیسرول و بهسازی شده با آهک و سیمان پرتلند مقایسه شده است. طبق نتایج، مقاومت تک محوری کائولینیت فاقد آلودگی با افزایش درصد سرباره کوره ذوب آهن در غلظت‌های مختلف محلول هیدروکسید سدیم افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش مقاومت تک‌محوری نسبت به کائولینیت بهسازی نشده، مربوط به سیمان ژئوپلیمر متشکل از ۱۰ درصد سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۶ مولار است. در این حالت مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۷۱۰ کیلوپاسکال بدست آمده است که نسبت به نمونه بهسازی نشده ۴۴۱ درصد افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. منحنی‌های تنش محوری-کرنش محوری خاک بدون آلودگی بهسازی شده با ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره ذوب آهن

با سیمان پرتلند و آهک با مشخصات یکسان با این پژوهش، نشان می‌دهد که سیمان ژئوپلیمر در طرح اختلاط بهینه آن که حاوی

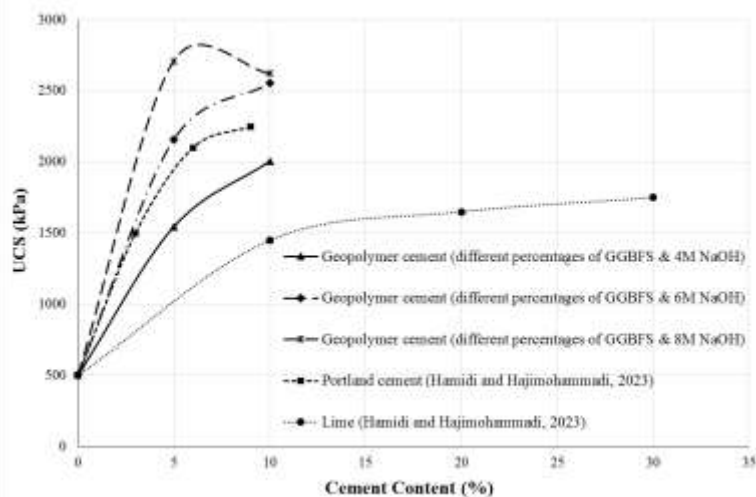
از طرفی، مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات Hamidi & Hajimohammadi (2023) بر کائولینیت بهسازی شده

^۱Scanning Electron Microscopy

^۲Unconfined Compression

حاوی ۵ درصد سرباره و غلظت محلول ۸ مولار ۵۵ درصد بالاتر از خاک بهسازی شده با ۳۰ درصد آهک و ۲۰ درصد بالاتر از خاک بهسازی شده با ۹ درصد سیمان پرتلند است.

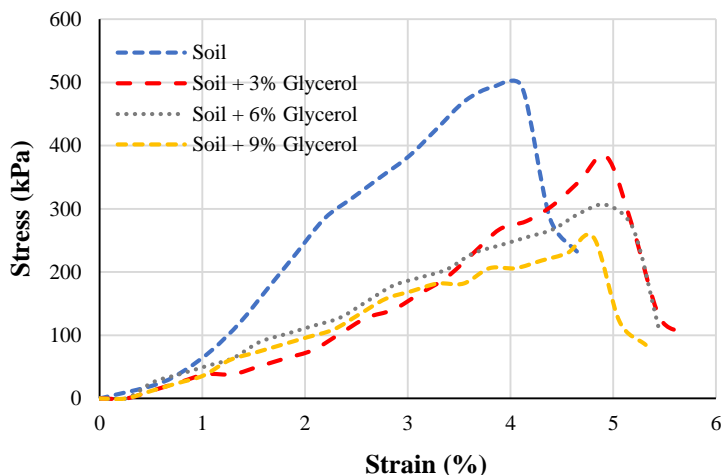
محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار است عملکرد مناسبتری نسبت به آهک و سیمان پرتلند دارد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقاومت تک محوری خاک بهسازی شده با ژئوپلیمر



شکل ۳. مقاومت تک محوری کاتولینیت بهسازی شده با سیمان ژئوپلیمر بر پایه سرباره و مقایسه با نتایج (Hamidi & Hajimohammadi, 2023) در خصوص کاتولینیت بهسازی شده با سیمان پرتلند و آهک

درصد گلیسرول همچنان ادامه خواهد داشت به طوری که با افزودن ۹ درصد گلیسرول به خاک، مقاومت فشاری تک محوری به kPa ۲۵۴ می رسد. به عبارت دیگر، افزودن ۹ درصد گلیسرول به خاک موجب کاهش ۴۸ درصدی مقاومت نهایی نسبت به خاک در حالت طبیعی شده است.

منحنی های تنش-کرنش نمونه های خاک طبیعی و خاک آلوده به گلیسرول در مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد ورنی در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج مشاهده می شود که مقاومت فشاری رس طبیعی ۴۹۳ kPa است. با افزودن گلیسرول به خاک، مقاومت تک محوری خاک آلوده کاهش یافته است. این روند با افزایش میزان



شکل ۴. منحنی تنش-کرنش تک محوری خاک طبیعی و خاک آلوده با درصد های مختلف گلیسرول است. این واکنش ها منجر به تغییراتی در ضخامت لایه مضاعف و فلوکوله شدن ساختار خاک می شود. (Estabragh et al., ۲۰۱۶)

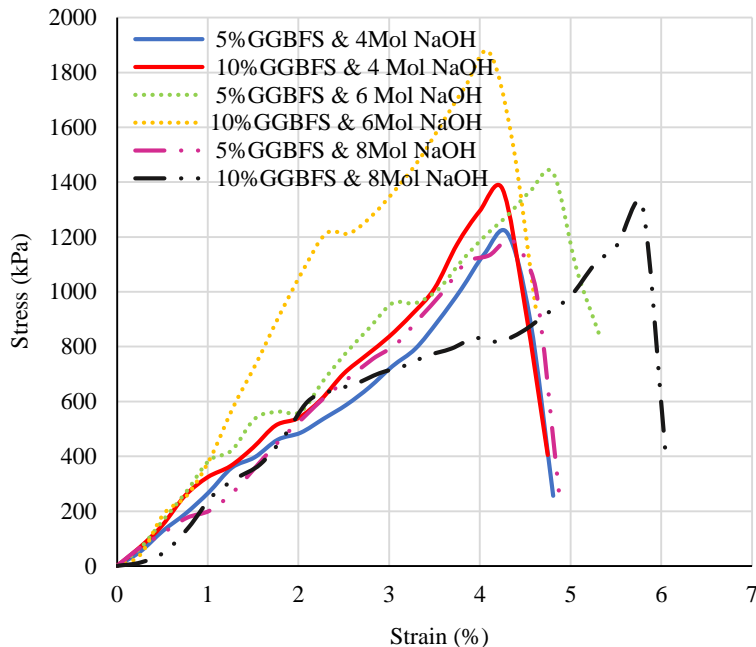
افزودن ماده آلی به خاک های چسبیده منجر به واکنش ذرات خاک با ماده آلی می شود که به عنوان واکنش های فیزیکوشیمیایی مرسوم

به گلیسرول نسبت به خاک طبیعی به این موضوع مربوط است. از آنجایی که قدرت جذب مواد آلی توسط ذرات رس محدود است، افزایش درصد ماده آلاینده موجب افزایش بیشتر مقدار آنها در فضای بین ذرات می‌شود که کاهش بیشتر مقاومت را در پی دارد. نمودارهای تنش-کرنش تک‌محوری مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ درصد گلیسرول در شکل ۵، نمونه‌های حاوی ۶ درصد گلیسرول در شکل ۶ و نمونه‌های حاوی ۹ درصد گلیسرول در شکل ۷، بهسازی شده با ژئوپلیمر در زمان عمل‌آوری ۷ روزه ارائه شده است. موفق‌ترین طرح اختلاط برای خاک آلوده به ۳٪ گلیسرول با ۱۰٪ سرباره و محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار بوده است. این مقادیر برای ۶٪ و ۹٪ گلیسرول نیز دقیقاً یکسان بوده است.

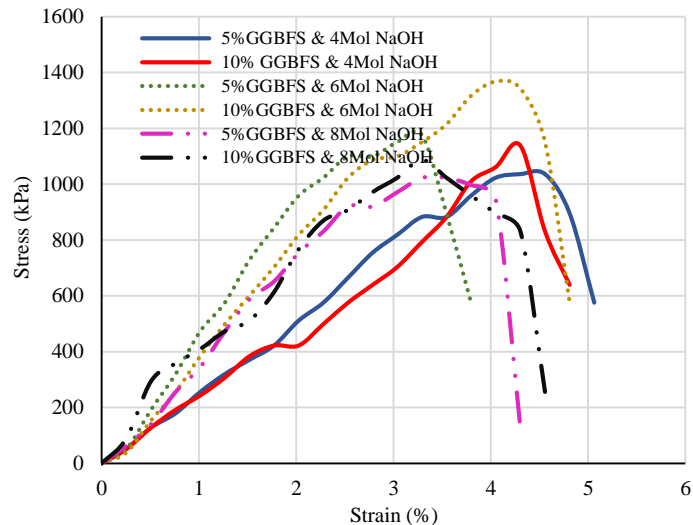
نشان دادند که حضور ماده آلی بین ذرات نقش بسیار مهمی در تغییرات مقاومت خاک دارد. کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی بوده و خاصیت جذب آب به‌وسیله آنها به‌میزان بار الکتریکی و سطح ویژه آنها مرتبط است.

Jaynes & Wang ۱۹۹۹ گزارش کردند که خاک‌های رسی از طریق کاتیون‌هایی مانند Na^{++} ، K^{++} ، Ca^{++} ، Mg^{++} می‌توانند مواد آلی مانند فنل، بنزن، تولوئن و غیره را جذب نمایند. بخشی از مواد آلی به علت عدم وجود کانی‌های لازم و نیز سطح ویژه مناسب، جذب ذرات رس نشده و در فضای بین ذرات باقی می‌مانند.

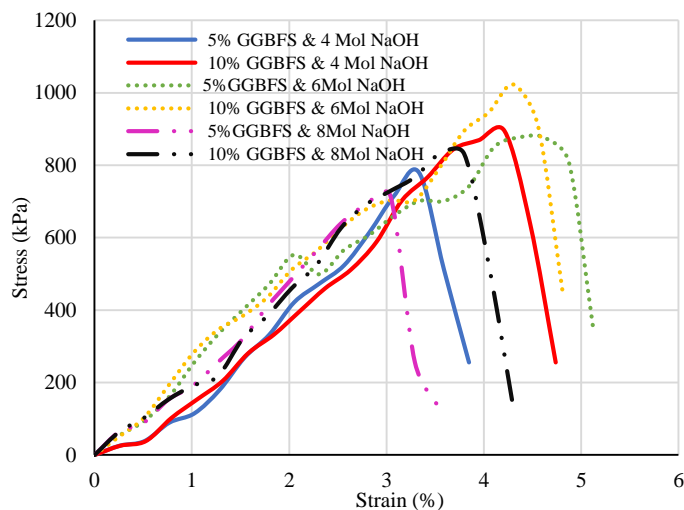
جذب مواد آلی موجب تغییراتی در ساختار خاک می‌گردد لیکن ماده آلی موجود در فضای بین ذرات در سهولت جابجایی ذرات موثر است (Yong & Mulligan, ۲۰۰۳). کاهش مقاومت خاک آلوده



شکل ۵. نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های بهسازی شده کاتولینیت حاوی ۳٪ گلیسرول



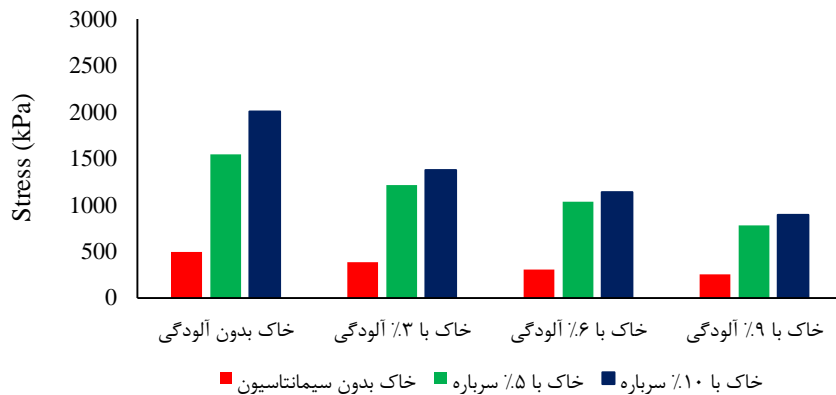
شکل ۶. نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه های بهسازی شده کائولینیت حاوی ۶٪ گلیسرول



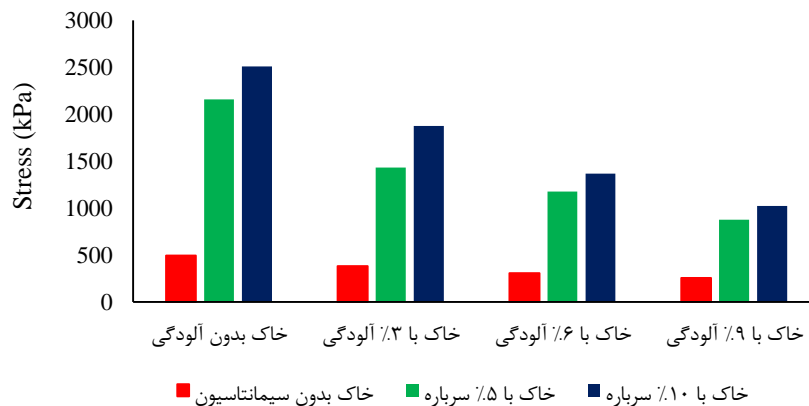
شکل ۷. نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه های بهسازی شده کائولینیت حاوی ۹٪ گلیسرول

درصد افزایش مقاومت در خاک آلوده بهسازی شده با ژئوپلیمر، در مواردی بیش از بهسازی خاک طبیعی غیر آلوده است. مقاومت کائولینیت طبیعی و بهسازی شده با ۱۰ درصد سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۶ مول نسبت به خاک طبیعی، ۴۴۱ درصد افزایش را نشان می‌دهد. حال آنکه در نمونه‌های آلوده به گلیسرول، بیشینه افزایش مقاومت تک‌محوری پس از بهسازی، برای کائولینیت آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد آلاینده، با ژئوپلیمر حاوی ۱۰ درصد سرباره و فعال شده با سدیم هیدروکسید ۶ مولار، به ترتیب ۴۸۹ و ۴۴۶ و ۴۰۲ درصد است.

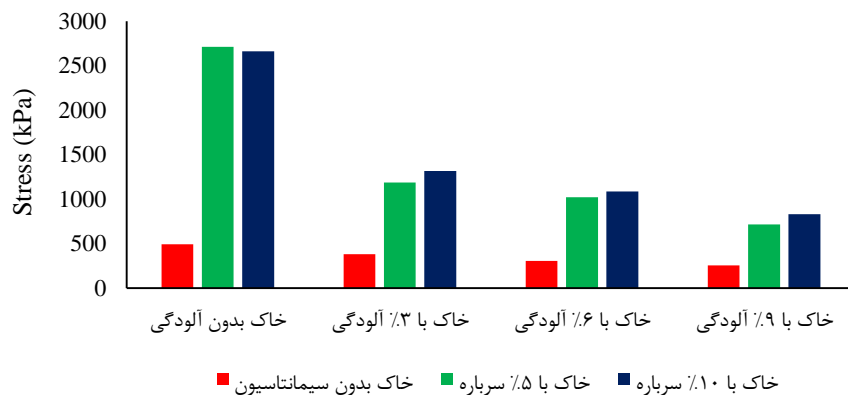
به منظور مقایسه بهتر، تغییرات مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک و خاک آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول، بدون بهسازی و یا با بهسازی توسط ژئوپلیمر حاوی ۵ یا ۱۰ درصد سرباره فعال شده با محلول قلیایی هیدروکسید سدیم در غلظت‌های ۴، ۶ و ۸ مول، به ترتیب در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سرباره، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده شده در تمامی درصدهای گلیسرول افزایش یافته است. شکل‌ها به خوبی نمای نزولی کاهش مقاومت خاک با افزایش درصد آلاینده آلی را نشان می‌دهند هرچند



شکل ۸. مقاومت فشاری تک محوری با غلظت ۴ مول هیدروکسید سدیم



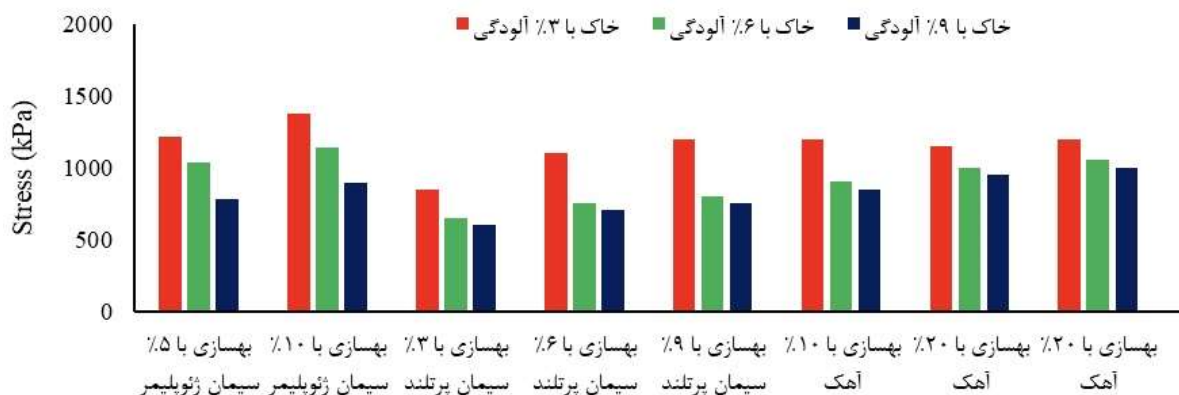
شکل ۹. مقاومت فشاری تک محوری با غلظت ۶ مول هیدروکسید سدیم



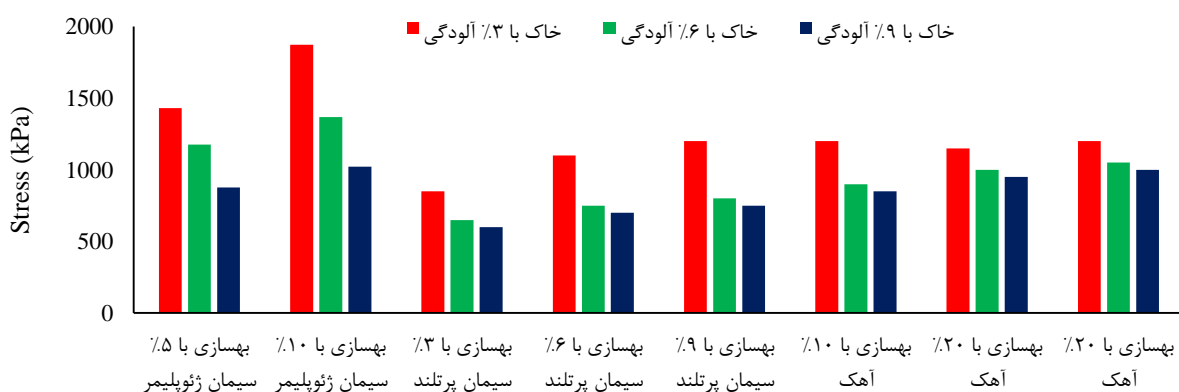
شکل ۱۰. مقاومت فشاری تک محوری با غلظت ۸ مول هیدروکسید سدیم

مناسبتی در بهسازی خاک نسبت به آهک و سیمان پرتلند دارد. این مقایسه در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب برای غلظت‌های ۴، ۶ و ۸ مولار نشان داده شده است.

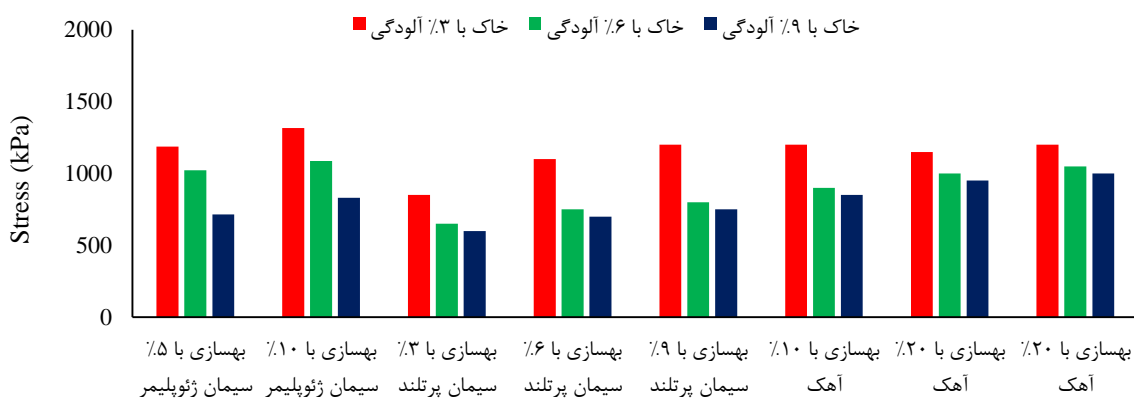
مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات (Hamidi & Hajimohammadi, ۲۰۲۳) بر کائولینیت آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول، بهسازی شده با سیمان پرتلند و آهک با مشخصات یکسان با این پژوهش، نشان می‌دهد که سیمان ژئوپلیمر عملکرد



شکل ۱۱. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر حاوی ۴ مول هیدروکسید سدیم، آهک و سیمان پرتلند



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر حاوی ۶ مول هیدروکسید سدیم، آهک و سیمان پرتلند



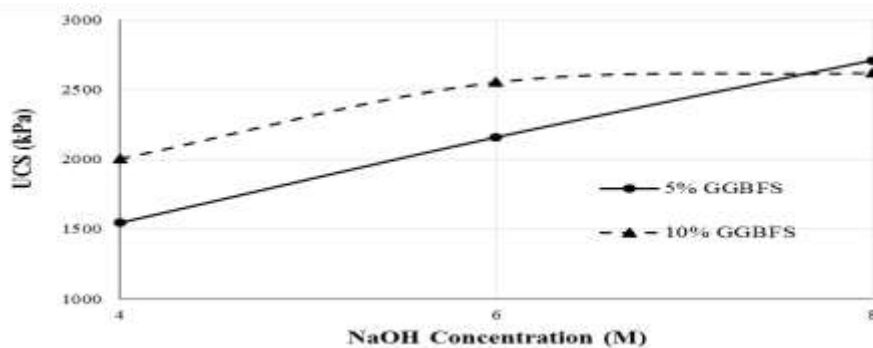
شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر حاوی ۸ مول هیدروکسید سدیم، آهک و سیمان پرتلند

محوری رس کائولینیت افزایش می‌یابد. با این حال نتایج بدست آمده در سیمان ژئوپلیمر متشکل از ۱۰ درصد سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار نسبت به سیمان ژئوپلیمر متشکل از ۵ درصد

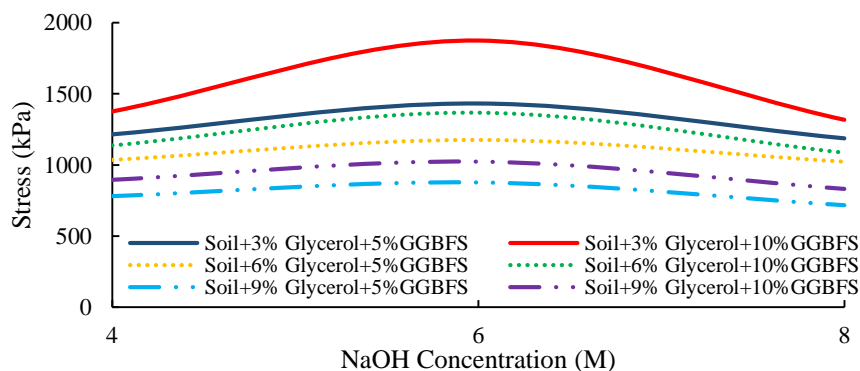
در شکل ۱۴ تغییرات مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک فاقد آلودگی حاوی سرباره، با افزایش غلظت محلول قلیایی نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش غلظت NaOH مقاومت تک

درصد سرباره کوره ذوب آهن، فعال شده با ۸ مول هیدروکسید سدیم در شکل ۱۶ (الف) و نمونه‌های خاک فاقد آلودگی بهسازی شده با ۱۰ درصد سرباره کوره ذوب آهن، فعال شده با ۸ مول هیدروکسید سدیم در شکل ۱۶ (ب) مشخص می‌شود که علت کاهش مقاومت تک محوری این نمونه‌ها کاهش سطح سیمان‌تاسیون و افزایش منافذ در نمونه‌های بهسازی شده با ۱۰ درصد سرباره و ۸ مول هیدروکسید سدیم نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با ۵ درصد سرباره و ۸ مول هیدروکسید سدیم می‌باشد. همچنین شکل‌های ۱۷ (الف) و ۱۷ (ب) تصاویر به‌دست آمده از نمونه‌های رس کائولینیت آلوده به ۶ درصد گلیسرول، به ترتیب بهسازی شده با ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با ۶ مول هیدروکسید سدیم و ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با ۸ مول هیدروکسید سدیم است. بر این اساس افزایش سطح منافذ در نمونه بهسازی شده با ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با ۸ مول هیدروکسید سدیم قابل مشاهده و تشخیص است.

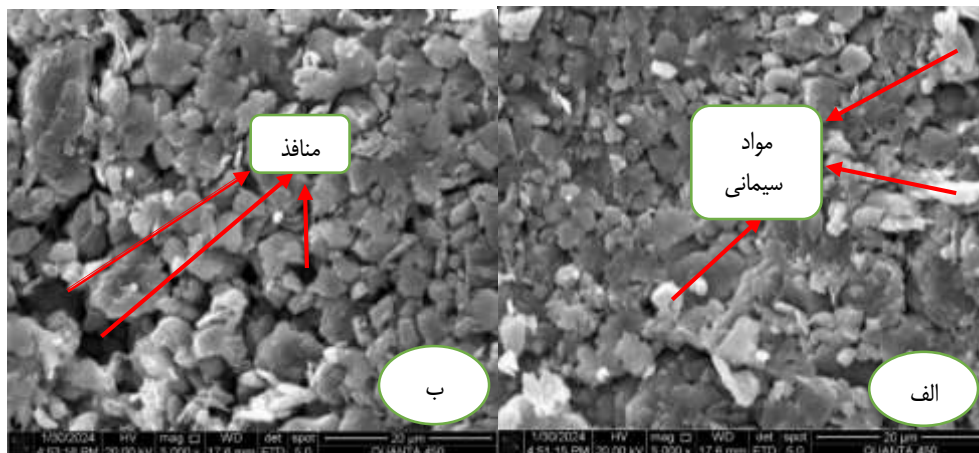
سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار، کاهش در UCS را نشان می‌دهد. در واقع مشاهده می‌شود که در حالتی که غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۸ مول است، افزایش میزان سرباره منجر به کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری شده است. غلظت کم NaOH توانایی محلول قلیایی برای حل کردن کانی آلومینوسیلیکات را کاهش می‌دهد. لذا فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به طور ناقص انجام می‌شود. از طرفی غلظت‌های بالاتر از مقدار بهینه آن نیز در درصد سرباره بالاتر منجر به تخریب ساختار خاک شده و موجب انحلال کمتر آلومینیوم و سیلیس می‌شود. بنابراین تشکیل ژل سیمانی را به تعویق می‌اندازد که مانع از تکمیل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود (He, ۲۰۱۲). در شکل ۱۵ تغییرات مقاومت تک محوری در نمونه‌های خاک با درصد آلودگی ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول با افزایش غلظت محلول قلیایی نشان داده شده است. مطابق شکل مقاومت تک محوری نمونه‌ها تا غلظت هیدروکسید سدیم ۶ مولار افزایش می‌یابد ولی این مقدار در غلظت ۸ مولار کاهش پیدا می‌کند. طبق تصاویر میکروسکوپی به‌دست آمده از مقایسه نمونه‌های خاک فاقد آلودگی بهسازی شده با ۵



شکل ۱۴. تغییرات UCS در خاک بدون آلودگی در برابر غلظت محلول سدیم هیدروکسید

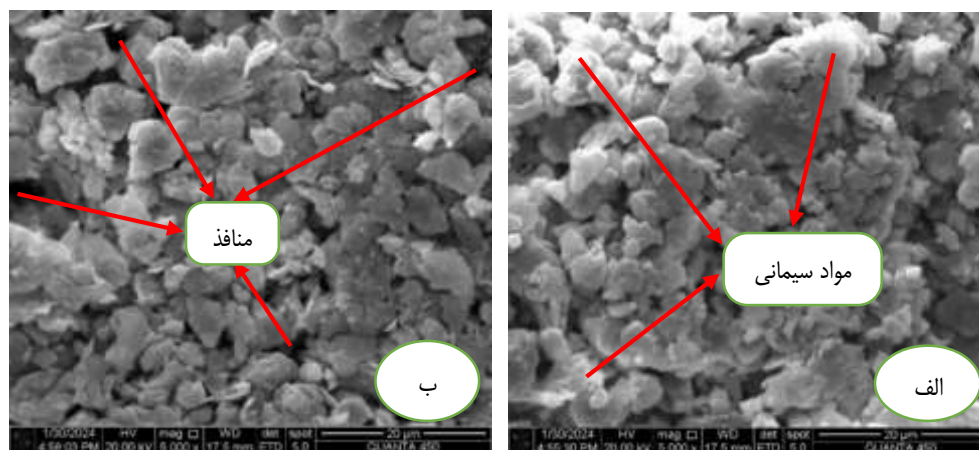


شکل ۱۵. تغییرات UCS در خاک با درصد‌های مختلف آلودگی در برابر غلظت محلول سدیم هیدروکسید



شکل ۱۶. تصاویر SEM (الف) خاک فاقد آلودگی بهسازی شده با ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن، فعال شده با ۸ مول سدیم هیدروکسید،

(ب) خاک فاقد آلودگی بهسازی شده با ۱۰ درصد سرباره کوره ذوب آهن، فعال شده با ۸ مول سدیم هیدروکسید



شکل ۱۷. تصاویر SEM (الف) نمونه رس کائولینیت آلوده به ۶ درصد گلیسرول بهسازی شده با ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با ۶ مول سدیم هیدروکسید،

(ب) نمونه رس کائولینیت آلوده به ۶ درصد گلیسرول بهسازی شده با ۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن فعال شده با ۸ مول سدیم هیدروکسید

بحث و نتیجه گیری

با انجام مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر تثبیت با اضافه نمودن درصدی مختلف سیمان ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره ذوب آهن و غلظت‌های مختلف سدیم هیدروکسید بر رفتار کائولینیت آلوده به مقادیر مختلف ماده آلی گلیسرول و امکان بهسازی آن، مورد بررسی قرار گرفت. در ذیل اهم نتایج حاصل از این مطالعه ارائه شده است:

۱. اضافه شدن گلیسرول به رس کائولینیت سبب تغییر در مشخصات مقاومتی آن می‌شود. مقادیر ۳ و ۶ و ۹ درصد گلیسرول باعث کاهش در میزان مقاومت

فشاری نمونه‌ها شده است. از آنجایی که قدرت جذب مواد آلی بوسیله ذرات رس محدود است، افزایش درصد ماده آلاینده موجب ازدیاد بیشتر مقدار آنها در فضای بین ذرات می‌گردد که کاهش بیشتر مقاومت را در پی دارد.

۲. اضافه کردن سیمان ژئوپلیمر به خاک رس، سبب افزایش مقاومت نهایی نمونه‌ها شده است. با افزایش درصد سیمان ژئوپلیمر، مقدار ازدیاد مقاومت افزایش می‌یابد. طبق نتایج، ازدیاد درصد سیمان ژئوپلیمر

تحقیقات Hamidi & Hajimohammadi, ۲۰۲۳ نشانگر عملکرد بهتر و مناسبتر ژئوپلیمر نسبت به آهک و سیمان پرتلند در بهسازی رس کائولینیت است.

۵. بیشترین افزایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به کائولینیت غیر آلوده بهسازی نشده مربوط به ژئوپلیمر حاوی ۱۰ درصد سرباره و محلول سدیم هیدروکسید ۶ مولار بوده و حدود ۴۴۱ درصد می باشد.

۶. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری تک محوری نسبت به کائولینیت با ۳ و ۶ و ۹ درصد آلاینده و بهسازی نشده، مربوط به ژئوپلیمر حاوی ۱۰ درصد سرباره و محلول هیدروکسید سدیم ۶ مولار بود که به ترتیب حدود ۴۸۹، ۴۴۶ و ۴۰۲ درصد می باشد.

سبب افزایش مقاومت خاک آلوده شده با درصد های مختلف گلیسرول نیز می شود.

۳. با افزایش غلظت NaOH مقاومت فشاری تک محوری خاک رس کائولینیت بدون آلاینده افزایش می یابد. با این حال در حالتی که غلظت محلول هیدروکسید سدیم ۸ مول است، افزایش میزان سرباره منجر به کاهش مقاومت فشاری تک محوری شده است. در نمونه های خاک آلوده، افزایش غلظت NaOH تا غلظت ۶ مول موجب افزایش مقاومت فشاری تک محوری می شود و در غلظت ۸ مول مقاومت کاهش پیدا می نماید.

۴. مقایسه نتایج به دست آمده برای کائولینیت آلوده و غیر آلوده بهسازی شده با سیمان ژئوپلیمر و نتایج

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت آپتوس ایران بابت حمایت از این مطالعه در قالب طرح پژوهشی به شماره ۱۴۰۱/۰۱/۶۷۰ اعلام می نمایند.

References

- Karkush, M. O., & Abdulkareem, M. S. (2019). Deep remediation and improvement of soil contaminated with residues oil using lime piles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 7197-7206.
- Du, J., Zheng, G., Liu, B., Jiang, N. J., Hu, J. (2021). Triaxial behavior of cement-stabilized organic matter-disseminated sand. *Acta Geotechnica*, 16(1), 211-220.
- Rahman, Z. A., Hamzah, U., Taha, M. R., Ithnain, N. S., & Ahmad, N. (2010). Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil. *American journal of applied sciences*, 7(7), 954.
- Ghadyani, M., Hamidi, A., & Hatambeigi, M. (2019). Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(1), 112-135.
- Oluwatuyi, O. E., Ojuri, O. O., & Khoshghalb, A. (2020). Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), 160-167.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11-16.
- Zanjarani, M. and Hamidi, A. (2014). Consolidation behavior and geotechnical parameters of oil contaminated kaolinite clay. *Iranian Journal of Petroleum Geology*. 4(8), 1-15. (In Farsi)

- Srivastava, L.P., Paramkusam, B.R. and Arun Prasad. (2010). Stabilisation of engine oil contaminated soil using cement kiln dust, proc. *Indian Geotechnical Conference*, GEOTrendz, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay. India.
- Estabragh, A.R. Khatibi, M. & Javadi, A.A. (2016). Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4).
- Hajimohammadi, M., & Amir, H. (2021). Investigating the Effects of Portland Cement and Lime on Improving Glycerol-Contaminated Clay. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3045-3057.
- Shah, S.J., Shroff, A.V., Patel, J.V., Tiwari, K.C. & Ramakrishnan, D. (2003). Stabilization of fuel oil contaminated soil- A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, ۲۱, ۴۱۵-۴۲۷.
- Jahani, A., Estabragh, A.R., Jahani, M., Vakili, Gh. (2023). Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 10.22059/IJSWR.2023.365905.669583.
- Akinwumi, I., Booth, A. and Diwa, D. (2016). Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 169(4), 336-345.
- Chen, H., Jiang, Y., Zhang, W., & He, X. (2017). Experimental study of the stabilization effect of cement on diesel contaminated soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. ۵۰, ۱۹۹-۲۰۵.
- Khatib, J. (Ed.). (2016). *Sustainability of construction materials*. Woodhead Publishing.
- Juo, A. S. R and Franzluebbbers, K. (۲۰۰۴). Tropical soils—properties and management for sustainable agriculture. *Geoderma* ۱۲۳, ۳۷۳-۳۷۵.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. & Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, ۸۹, ۲۲۰-۲۲۹.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F., & Santoro, L. (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste management*, 28(2), 416-423.
- Suresh, A.R. and D’Cruz, T.C. (۲۰۱۹) Strength Characteristics of Soil Glycerol Mixture: Cement as Additive. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2(2), 483-484.
- Pincus, H.J., Meegoda, N.J., and Ratnaweera, P. (1995). Treatment of oil contaminated soils for identification and classification. *Geotech. Test. J.*, 18(1), 41-49.
- Meegoda, J. N. Ezeldin, A. S. Vaccari, D. A. and Muller, R.T. (1994). Petroleum contaminated soils in highway construction. *Third materials engineering conference. infrastructure: New materials and methods of repair*. ۹۰۴-۹۱۱.
- Estabragh, A.R. Beytolahpour, I. & Javadi, A.A. (2011). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(7), 969-976.
- Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ۱۳۳ (۲), ۱۹۷-۲۰۵.
- Hamidi, A., & Hajimohammadi, M. (2023). Improving the mechanical behaviour of clay contaminated with glycerol and anthracene using lime and Portland cement. *Geomechanics and Geoengineering*, 18(1), 1-15.
- Yong, R.N. and Mulligan, C.N. (2003). *Natural attenuation of contaminants in soils*, CRC Press.

Effect of ground-granulated blast-furnace slag activated with sodium hydroxide on the improvement of glycerol contaminated kaolinite clay

Hossein Bigdeli^a, Amir Hamidi^{b,*}

^aGraduate Student, Department of Civil Engineering, Kharazmi university, Karaj, Iran

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Kharazmi university, Karaj, Iran

*hamidi@khu.ac.ir

ABSTRACT

In this experimental study, the influence of geopolymer cement based on g-granulated blast-furnace slag (GGBFS) at percentages of 0, 5, and 10, along with the alkaline activator sodium hydroxide at concentrations of 4, 6, and 8 molars, on the improvement of the kaolinite clay contaminated with glycerol organic substance at 3, 6, and 9 percentages has been investigated. The soil samples, including clean soil, contaminated soil, geopolymer-soil, and geopolymer-contaminated soil, were prepared and subjected to unconfined compressive strength (UCS) tests after 7 days of curing. The initial results indicated that UCS of glycerol-contaminated kaolinite clay decreases compared to the clean kaolinite. The reduction increases with an increase in the contaminant content. After improvement, the UCS of uncontaminated kaolinite increases with an increase in the slag percentage for every alkaline solute concentration. In such a way that the geopolymer cement stabilized kaolinite containing 10% slag and 6 molar sodium hydroxide solution showed 441% increase in UCS compared to the uncontaminated kaolinite. In the glycerol-contaminated samples, the highest increase in past improvement UCS occurred using a geopolymer containing 10% slag activated with 6 molar sodium hydroxide. For kaolinite contaminated with 3%, 6%, and 9% glycerol, it approximately increased UCS about 489%, 446%, and 402% compared to the clean soil, respectively. The results of scanning electron microscopy confirmed the obtained results of present study.

Introduction

Soil pollution usually arises from landfill sites, surface water contaminated with underlying layers, leakage from pipelines and underground storage tanks, industrial waste, fertilizers, and pesticides (Karkush and Abdulkareem, 2017). These changes can lead to an increase in settlement of structures built on these soils, decrease in the bearing capacity of foundations, prolongation of construction operations, increased construction costs, and an increase in the risk of the structural failure (Du et al., ۲۰۲۱; Rahman, ۲۰۱۰). Various researchers have studied the behavior of contaminated soils and proposed methods for their remediation and improvement. For instance, Zanjari and Hamidi (2014) investigations have been conducted on the geotechnical behavior of kaolinite clay soil contaminated with two types of petroleum contaminants. Based on these studies, it was determined that as the contamination percentage increases, the compressibility of the contaminated soil increases compared to the clean soil, but the soil's consolidation coefficient and permeability decrease with the increase in the percentage of contaminants. Estabragh et al. (2016) conducted laboratory experiments to investigate the mechanical properties of clay soil contaminated with 3%, 6%, and 9% glycerol and blended with 3% and 6% Portland cement type I. Based on the obtained results, improvement of the mechanical parameters was observed through soil remediation with Portland cement. Additionally, Jahani et al. (2023) explored the possibility of remediating CL type clay soil contaminated with glycerol solution using activated blast furnace slag (GGBFS) with magnesium oxide (MgO) and a mixture of MgO and cement. The results indicated that GGBFS activation by adding MgO or a mixture of MgO and cement ultimately led to improved performance, enhancing the compressive strength and increasing the peak strength and stiffness at mid-strength (E_{50}) of contaminated soil samples by 50%. Scanning Electron Microscopy (SEM) images also revealed that chemical reactions between soil particles and additives has occurred.

On a global scale, there is high potential for transitioning towards the use of greener cementitious materials. Therefore, in recent years the researchers have focused on producing geopolymer cements, which exhibit suitable compatibility with the environment. Geopolymer cement offers advantages such as lower production costs, ease of accessibility, significantly reduced carbon dioxide emissions, and optimized mechanical properties. The use and production of geopolymer cement address issues arising from increased waste and byproducts generated by industries and mines, thereby reducing their environmental and health concerns.

In this research, the main objective is to investigate the mechanical behavior and strength characteristics of the clean and glycerol-contaminated kaolinite by using an environmental friendly geopolymer cement produced based on blast furnace slag activated by sodium hydroxide. The optimum contents and the rate of increase in compressive strength will be evaluated and interpreted after soil improvement.

Methodology

The materials used in this study include kaolinite clay, blast furnace slag at 0, 5, and 10 weight percent of dry soil, water, and sodium hydroxide at concentrations of 4, 6, and 8 molars as an alkaline activator with high pH, as well as an organic matter glycerol contaminant, which were used in preparing the samples. To prepare soil-geopolymer and contaminated soil-geopolymer samples, various amounts of slag (0, 5, and 10 percent by weight of dry soil) were mixed with three concentrations of alkaline solution (4, 6, and 8 molars) to achieve an optimum moisture content of 17 percent. To produce geopolymer cement based on blast furnace slag, the slag was initially mixed with sodium hydroxide solution at specific concentrations and optimum moisture content. The soil was poured in three layers into a mold with a diameter of 38 millimeters and a height of 76 millimeters. Then, each layer was compacted using a loading device at a speed of 1.5 millimeters per minute. Uniaxial compressive strength tests were conducted on the samples according to ASTM D1633-07 standard. According to this standard, the samples were kept out of the storage conditions (moist environment) two hours before being placed in the loading device. Then, they were subjected to complete consolidation conditions under loading at a rate of 1 millimeter per minute (Estabragh et al., 2016). Additionally, scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the microstructure of the samples under different conditions.

Conclusion

The highest increase in uniaxial compressive strength compared to untreated kaolinite is related to the geopolymer cement consisting of 10% slag and 6 molar sodium hydroxide solution. In this case, a uniaxial compressive strength of 2710 kPa was obtained, indicating 441% increase compared to the untreated sample. According to the results, the uniaxial compressive strength of kaolin soil is 493 kPa. Glycerol addition to the natural kaolinite decreases the uniaxial compressive strength of the contaminated soil. This trend continues with an increase in the glycerol content, so that with the addition of 9% of glycerol to the soil, the uniaxial compressive strength decreases to 254 kPa. In other words, adding 9% glycerol to the soil results in 48% reduction of the final strength compared to the natural soil. Adding geopolymer cement to the clay soil increases the final compressive strength of the samples. According to the results, an increase in the geopolymer cement percentage also increases the final strength of the soil contaminated with various glycerol contents. Furthermore, the highest increase in uniaxial compressive strength compared to kaolinite with 3, 6, and 9% contaminant is related to the geopolymer containing 10% slag and 6 molar sodium hydroxide solution, which are approximately ۴۸۹, ۴۴۶, and ۴۰۲%, respectively. Comparing the results with Hamidi and Hajimohammadi (۲۰۲۳) shows more and better performance of geopolymer compared to the lime and Portland cement in soil stabilization.

Keywords

Kaolinite clay; Glycerol; Geopolymer cement; GGBFS; Sodium hydroxide