

Investigating the Effects of Portland Cement and Lime on Improving Glycerol-Contaminated Clay

MOHAMMAD HAJIMOHAMMADI¹, AMIR HAMIDI^{1*}

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran
(Received: Sep. 9, 2020- Revised: Oct. 27, 2020- Accepted: Oct. 31, 2020)

ABSTRACT

Soil contamination through petrochemical activities and leakage of organic hydrocarbon is not just an environmental problem and also can be considered as an important geotechnical issue. Adding amendment material is one of the most suitable and economical solutions to improve the geotechnical parameters of contaminated soil. In this study, the effect of Portland cement content (3, 6 and 9%) and lime content (10, 20 and 30%) on kaolinite clay contaminated with glycerol content (3, 6 and 9%) was investigated through an experimental program. For this purpose, the samples were prepared as mixtures of clean or glycerol-contaminated clay with different Portland cement and lime contents for 7 days curing time. Then, unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted on the samples. The results showed a reduction of the strength of glycerol-contaminated kaolinite clay. The strength reduction increased with increase in degree of contamination. Based on the scanning electron microscopy (SEM) analysis, it was found that the presence of glycerol prevents the interaction between soil-cement particles. However, adding Portland cement and lime to uncontaminated and contaminated soil increased the strength. The rate of increase in UCS increased with Portland cement and lime content. Also, the results of soil improvement showed that the strength of soil-cement mixture containing 9% Portland cement is approximately equal to that of the soil mixed with 10% lime. In other contents, the degree of improvement was dependent to the applied cement content. The main reasons were polar behavior of glycerol and its dielectric constant. The results were also analyzed and proved using the images taken by SEM.

Keywords: Kaolinite Clay, Glycerol, Improvement, Unconfined Compressive Strength, Scanning Electron Microscopy.

بررسی تأثیر سیمان و آهک بر بهسازی خاک رس آلوده به گلیسرول

محمد حاجی محمدی^۱، امیر حمیدی^{۱*}

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۱۰)

چکیده

آلودگی خاک از طریق فعالیتهای پتروشیمی و نشت مواد هیدروکربنی، تنها یک مسئله زیست محیطی محسوب نمی‌شود بلکه یک مسئله ژئوتکنیکی نیز هست. یکی از راهکارهای مناسب و اقتصادی جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به این مواد، بهسازی به روش افزودن مواد مناسب می‌باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی، اثر سیمان پرتلند با مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی و آهک با مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی در بهسازی خاک رس کائولینیت آلوده به ماده آلی گلیسرول با مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی مطالعه شده است. بدین منظور نمونه‌های خاک تمیز، خاک آلوده، ترکیب خاک و سیمان، ترکیب خاک و آهک، خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و خاک آلوده بهسازی شده با آهک، در زمان عمل آوری ۷ روزه تهیه و آزمایش تعیین مقاومت تک محوری بر روی آنها انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت خاک رس کائولینیت آلوده به گلیسرول نسبت به رس تمیز کاهش می‌یابد و میزان این کاهش با افزایش درصد آلاینده بیشتر می‌شود. بر اساس تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز مشخص شد که وجود گلیسرول از اندرکنش بهتر بین خاک-سیمان و خاک-آهک جلوگیری می‌کند. افزودن سیمان و آهک به خاک تمیز و خاک آلوده موجب افزایش مقاومت تک محوری آنها شده و ازدیاد درصد سیمان تا سیون سبب افزایش مقاومت می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که بهسازی رس با ۹ درصد وزنی سیمان پرتلند تقریباً معادل ۱۰ درصد وزنی آهک است. در مقادیر دیگر، میزان بهسازی خاک متفاوت بوده و وابسته به درصد وزنی به کار گرفته شده از مواد تثبیت کننده خواهد داشت. نزدیک بودن ثابت دی‌الکتریک گلیسرول به آب و البته قطبیت آن، مشخصه‌های مهم این سیال آلی در بروز چنین رفتاری هستند. نتایج حاصل، با آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز مورد بررسی و تایید قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: رس کائولینیت، گلیسرول، بهسازی، مقاومت تک محوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

مقدمه

به‌طور کلی می‌توان تغییرات شیمیایی یا فیزیکی که تأثیر نامطلوب در آب، خاک یا هوا داشته باشد را به‌عنوان آلودگی تعریف کرد (Pichtel, 2007). آلودگی خاک به مواد آلی و نفتی فقط برای آبهای زیرزمینی مضر نمی‌باشد، بلکه برای ساختمان‌ها و سازه‌های بنا شده بر روی زمین نیز می‌تواند مشکل ساز باشد. بدین صورت که هر گونه تغییر در مشخصات مهندسی و رفتار لایه‌های خاک ممکن است منجر به کاهش در ظرفیت باربری و افزایش در میزان نشست سازه شود. منشأ آلودگی‌های آلی، مواد هیدروکربنی نفتی است. آلودگی خاک با مواد آلی ممکن است از طریق نشت و پراکنده شدن این مواد از پالایشگاه‌ها، مجتمع‌های پتروشیمی، انفجار و شکستن خطوط لوله انتقال یا نشت مواد نفتی از مخازن روزمینی و زیرزمینی صورت پذیرد.

در اثر فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی که بین آلاینده و خاک رخ می‌دهد، رفتار و خصوصیات خاک تغییر می‌کند. به

عنوان مثال، Singh et al. (2008) نشان دادند، زمانی که نفت در خاک و فضاهای خالی بین دانه‌ها نشت پیدا می‌کند، رفتار آن را تغییر می‌دهد. همچنین Khamehchiyan et al. (2007) بیان کردند که نشت نفت به درون زمین منجر به تغییر ویژگی‌های ژئوتکنیکی شده و این مسئله نیاز برای اصلاح خاک را نشان می‌دهد. تثبیت خاک به روش شیمیایی و با استفاده از مواد سیمانی همچون سیمان و آهک یکی از راه‌های مناسب و اقتصادی است که معمولاً برای بهسازی استفاده می‌شود. رفتار خاک‌های آلوده و روش‌های بهسازی و اصلاح آنها توسط محققین مختلفی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. از جمله Ratnaweera and Meegoda (2006) به بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های مختلف از جمله کائولینیت، ماسه سیلتی و خاک مخلوط آلوده به مقادیر مختلف از مواد شیمیایی از جمله گلیسرول، آستون و پروپانول با غلظت‌های متفاوت پرداختند و کاهش مقاومت برشی ایجاد شده در خاک را به تغییرات ثابت

از SEM برای توضیح رفتار انواع مختلف خاک استفاده می‌شود. محققانی مانند Tremblay *et al.* (2002)، Yazdandoust and Oluwatuyi *et al.* (2010)، Chavali *et al.* (2020) و Nazari Heris *et al.* (2020) برای مشاهده ریزساختار نمونه‌های خاک در شرایط مختلف (آلوده، مخلوط شده با سیمان، آهک و سایر مواد تثبیت‌کننده) و برای توصیف رفتارهای مشاهده شده از آنالیز SEM استفاده کردند.

مرور مراجع مذکور نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات در رابطه با بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی، به‌وسیله سیمان بوده و مطالعات در خصوص بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی با آهک و همچنین مقایسه کارایی آن با سیمان پرتلند بسیار محدود بوده است. در این پژوهش برای آلوده نمودن خاک و بررسی نحوه تأثیر آلاینده بر ساختار آن از ماده آلی گلیسرول از گروه هیدروکربن‌های زنجیره‌ای (AH¹) استفاده شده است. سیمان و آهک نیز به عنوان دو ماده مناسب، رایج و اقتصادی با درصد‌های مختلف جهت بهسازی به‌کار گرفته شده و نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه و مورد بحث قرار گرفته است. تصویربرداری میکروسکوپی نیز در راستای تفسیر بهتر رفتار مشاهده شده انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مواد به کار گرفته شده در این تحقیق شامل خاک رس کائولینیت، سیمان پرتلند معمولی، آهک هیدراته، آب و ماده آلی گلیسرول بوده که در تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه، ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مواد مذکور ارائه شده است.

الف) خاک

برای انجام این پژوهش از خاک رس کائولینیت تهیه شده از شرکت صنایع خاک چینی ایران، استفاده شده است. علت آن است که این نوع خاک در مناطق با آب و هوای گرم و خشک، به ویژه در مکان‌هایی که ذخایر نفت موجود بوده و عملیات اکتشاف و استخراج نفت خام انجام می‌شود، فراوان یافت می‌گردد (Kamel and Mabrouk, 2003). همچنین کانی کائولینیت از رایج‌ترین مواد معدنی خاک‌های موجود در جنوب ایران هست که برخی پالایشگاه‌های کشور بر روی آن بنا شده و امکان آلودگی به نفت خام در آنها بسیار زیاد است (Khamsehchiyan *et al.*, 2007). طبقه‌بندی این نوع خاک بر اساس سیستم یونیفاید (USCS)، رس با خمیری کم (CL) است. منحنی دانه‌بندی، مشخصات

دی‌الکتریک و لزجت سیال حفره ای نسبت دادند. در تحقیقی دیگر Estabragh *et al.* (2016a) به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی خاک رس آلوده به گلیسرول و اتانول با غلظت‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درصد پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت برشی و زاویه اصطکاک، تابع نوع سیال آلی و غلظت آن است. Estabragh *et al.* (2016b) به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی خاک رس آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول و ترکیب شده با ۳، ۶ و ۹ درصد سیمان پرتلند نوع یک پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، حدود اتربرگ خاک با افزایش گلیسرول و سیمان کاهش یافته و پارامترهای مقاومتی خاک بهسازی‌شده توسط سیمان پرتلند ازدیاد پیدا کرده است. در مطالعه‌ای دیگر بر رفتار رس آلوده به آلاینده آترازین، Keramatikerman *et al.* (2020) نیز کاهش در حدود اتربرگ خاک آلوده را با افزایش درصد این آلاینده از ۲ تا ۶ درصد نشان دادند. همچنین Estabragh *et al.* (2020) رفتار رس آلوده به ۴، ۷ و ۱۰ درصد محلول گلیسرول را در زمان‌های عمل‌آوری صفر، ۷، ۱۴، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روزه بررسی و افزایش در حدود اتربرگ را با ازدیاد درصد گلیسرول و زمان عمل‌آوری برای نمونه‌ها (به جز نمونه‌های صفر روزه) گزارش نمودند. محققانی همچون Akinwumi *et al.* (2016) و Chen *et al.* (2017) نیز به بررسی اثر مقادیر مختلف سیمان بر تثبیت خاک رس آلوده به مواد آلی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کاهش مقاومت نمونه‌های آلوده بود اما پس از تثبیت نمونه‌ها با سیمان، مقاومت آنها با ازدیاد درصد سیمان افزایش یافت. همچنین در مقدار سیمان ثابت، مقاومت نمونه‌ها با افزایش مقدار آلاینده کاهش پیدا کرد. (Shah *et al.* (2003) به مطالعه موردی بر 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 تثبیت‌کننده، 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. (Hamidi and Abdoos (2020) با انجام آزمایش CBR کارایی آهک و سیمان پرتلند با مقادیر مختلف را در تثبیت رس کائولینیت آلوده به آنتراسن و گلیسرول بررسی کردند. بر اساس نتایج نشان داده شد که آلاینده‌ها مقاومت خاک را کاهش و تثبیت‌کننده‌ها مقاومت آن را افزایش می‌دهند.

با کاربرد میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) می‌توان اطلاعات قابل توجهی در مورد ساختار خاک به‌دست آورد. اکنون

به کار رفته جهت تثبیت نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده شده به ماده آلی مورد نظر این تحقیق، صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک انتخاب شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان پرتلند مورد استفاده (Abyek Cement Co., 2020)

مقادیر	مشخصات
۲۹/۲	غلظت نرمال (%)
۱۰۸	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۸۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۲۳	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)
۳۴	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)

ج) آهک

آهک مورد استفاده در این تحقیق پودری شکل و از نوع هیدراته تهیه شده از کارخانه یکتا در آبرگرم قزوین می‌باشد که بخش عمده آن شامل هیدروکسید کلسیم یا $Ca(OH)_2$ است. پیش از اختلاط آهک هیدراته با خاک، ابتدا از الک نمره ۴۰ عبور داده شد. مشخصات شیمیایی این نوع از آهک در جدول (۴) ارائه شده است. مقدار آهک اضافه‌شده به نمونه‌های خاک برابر صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن خشک خاک انتخاب گردیده است. درصد‌های انتخابی در سایر مطالعات صورت گرفته بر تثبیت کائولینیت با آهک نیز به کار رفته‌اند (Soltaninejad *et al.*, 2018) و (Hamidi and Abdoos, 2020).

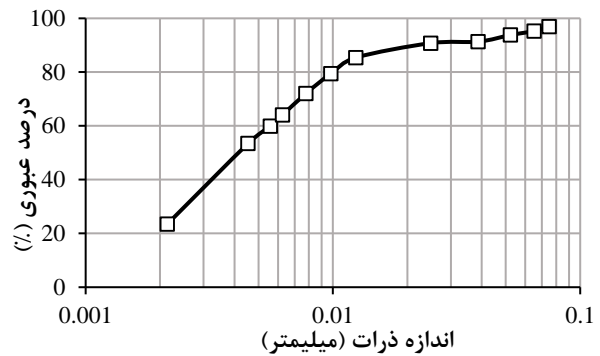
جدول ۴- مشخصات شیمیایی آهک مورد استفاده

مقدار (درصد)	ترکیب شیمیایی
۲/۵۵	SiO ₂
۰/۶۵۶	Al ₂ O ₃
۰/۴۳	Fe ₂ O ₃
۰/۰۴	TiO ₂
۶۱/۶۲	CaO
۰/۰۶	Na ₂ O
۳/۸۲	MgO
۰/۲۳	K ₂ O
۰/۰۳	P ₂ O ₅
۰/۸۱	SO ₃

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 $C_3H_5(OH)_3$ است که به دلیل دارا بودن پیوندهای هیدروژنی، با هر نسبتی در آب حل می‌شود. گلیسرول به صورت مایعی زلال،

فیزیکی و شیمیایی رس کائولینیت به کار گرفته شده نیز به ترتیب در شکل (۱) و جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رسی پایه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک رس مورد استفاده

مقادیر	مشخصات
CL	سیستم متحد طبقه بندی خاک
۳۲	حد روانی (درصد)
۲۲	حد خمیری (درصد)
۱۰	دامنه خمیری (درصد)
۲/۶۶	چگالی ویژه
۱۷/۰۷	دانسیته خشک بیشینه (KN/m^3)
۱۷	رطوبت بهینه (درصد)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک رس کائولینیت

میزان (درصد)	ترکیبات شیمیایی
۶۷/۱۲	SiO ₂
۱۷/۰۳	Al ₂ O ₃
۳/۳۶	Fe ₂ O ₃
۰/۷۹	TiO ₂
۰/۴۴	CaO
۰/۱۷	Na ₂ O
۰/۷۰	MgO
۳/۲۶	K ₂ O
۷/۱۳	L.O.I ^۱

ب) سیمان

جهت تثبیت و اصلاح خاک در پژوهش حاضر، از سیمان پرتلند نوع یک کارخانه آبیگ قزوین (با توجه به فراوانی و در دسترس بودن) استفاده شده است. سیمان پرتلند نوع یک توسط محققین دیگری مانند Vipulanandan (1995) و Estabragh *et al.* (2016b, 2018) نیز برای تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به ماده آلی مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۳) تعدادی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این عامل سیمانی که بر اساس استاندارد ASTM تعیین شده است را نشان می‌دهد. مقدار سیمان

صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی در زمان عمل آوری ۷ روزه، استفاده شد. این زمان عمل آوری در سایر تحقیقات انجام شده بر تثبیت خاک با این دو عامل نیز به کار گرفته شده است (Mohammadi and Moharamzade Saraye, 2015). برای ثابت نگه داشتن رطوبت، نمونه‌های تهیه شده در کیسه‌های پلاستیکی به صورت دربسته قرار گرفته و سپس برای عمل آوری در اتاق مرطوب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بیشتر از ۹۵ درصد نگهداری شدند (Consoli et al., 2007). حداکثر وزن مخصوص خاک و حداکثر مقاومت آن، در شرایط رطوبت بهینه (ω_{opt}) و وزن واحد حجم خشک حداکثر ($\gamma_d(max)$) ایجاد می‌گردد (Estabragh et al., 2011). با توجه به این که یکی از مهم‌ترین اهداف مطالعات مرتبط با بهسازی خاک‌ها بررسی پارامترهای مکانیکی و مقاومتی آنها است، در این پژوهش کلیه نمونه‌ها در شرایط وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه معادل آن ساخته شدند تا شرایط یکسانی برای مقایسه مقاومت نمونه‌های ساخته شده فراهم گردد. بدین منظور، ابتدا آزمایش تراکم بر مبنای استاندارد ASTM D698-12 بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده به درصد‌های مختلف گلیسرول انجام گردید تا مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر مربوط به هر یک تعیین شوند. سپس با افزودن آب و رساندن میزان رطوبت اولیه به رطوبت بهینه، کلیه نمونه‌ها برای انجام آزمایش تک‌محوری به روش تراکم استاتیکی ساخته شدند. علت استفاده از روش تراکم استاتیکی به جای تراکم دینامیکی در ساخت نمونه‌ها، عدم جدایش آلاینده از خاک، وارد کردن انرژی یکسان به هر لایه، یکنواختی تراکم لایه‌ها و نزدیک‌تر بودن شیوه تراکم به شرایط واقعی در محل بود. به این ترتیب، خاک درون قالب استوانه‌ای با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر در سه لایه ریخته شد و هر لایه توسط دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه متراکم گردید. پیش از ریختن لایه بعدی و برای ایجاد پیوستگی بهتر میان لایه‌ها، سطح رویه لایه قبلی 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 حداکثر مربوط به آن نمونه شود. در این تحقیق، از ترازویی با دقت ۰/۱ گرم برای اندازه‌گیری‌های وزنی استفاده شد. نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده به گلیسرول پس از ساخت و نمونه های خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک، پس از عمل آوری ۷ روزه، مورد آزمایش مقاومت تک محوری قرار گرفتند.

بی‌رنگ و بدون بو است که در داروسازی، صابون‌سازی، صنایع بهداشتی و آرایشی، مواد منفجره مثل نیتروگلیسرین، روغن کاری ابزارها و تأسیسات فلزی و نیز برای جلوگیری از یخ بستن جک‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات فیزیکی این ماده در جدول (۵) نشان داده شده است.

ه) آب

در این پژوهش از آب آشامیدنی شهری با pH برابر ۷/۷۶ و میزان کلر ۱/۷ میلی‌اکی‌والان در لیتر استفاده شده است. مشخصات فیزیکی آب نیز در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی مواد آلی و آب مورد استفاده

مشخصات	مواد	
	آب	گلیسرول ۴۰٪
گرانروی مطلق 25°C (cp)	۰/۸۹۴	۱۵۰۰
ثابت دی الکتریک	۷۸/۵	۴۰/۱۰
چگالی در دمای 25°C (g/cm^3)	۰/۹۹۷	۱/۲۵۸
هدایت الکتریکی (mmhos/cm)	$8/40 \times 10^{-3}$	$6/42 \times 10^{-5}$

تهیه نمونه‌ها

در این تحقیق انواع متفاوتی از نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که شامل رس کائولینیت، رس-سیمان پرتلند، رس-آهک، رس آلوده شده، رس آلوده اختلاط یافته با سیمان پرتلند و رس آلوده مخلوط شده با آهک 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. (2016b) نیز ۳، ۶ و ۹ درصد و در تحقیقات Suresh and D'Cruz (2019) 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. 1995). به این ترتیب ابتدا گلیسرول با غلظت ۴۰ درصد (۴۰ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب) آماده شد و به میزان ۳، ۶ و ۹ درصد به خاک رس کائولینیت افزوده شده است. برای انجام فعل و انفعالات شیمیایی و حصول یک مخلوط متعادل، خاک رس کائولینیت آلوده شده توسط گلیسرول به مدت یک هفته به دور از آفتاب، در کیسه پلاستیکی و به صورت دربسته نگهداری شد (Meegoda et al., 1994 و Estabragh et al., 2016b).

برای ساخت نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک از سیمان به میزان صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی و آهک به میزان

آزمایش‌ها و مطالعه میکروسکوپی

برای ارزیابی مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS^۱) طبق استاندارد ASTM D1633-07 انجام گرفت. بر اساس این استاندارد، نمونه‌ها از ۲ ساعت قبل از قرارگرفتن در دستگاه بارگذاری، خارج از شرایط عمل‌آوری (اتاق 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 (Kumar et al. 2007 و Estabragh et al. 2016b). از هر نمونه دو تکرار انجام شد و میانگین دو آزمایش به‌عنوان نتیجه نهایی منظور گردید تا اثرات تکرارپذیری آزمایش‌ها بر نتایج و کاهش خطای ناشی از آن نیز مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که در هنگام انجام آزمایش‌های تراکم و مقاومت تک محوری، اختلاف نتایج دو نمونه بیشتر از ۵ درصد میانگین آن دو بود، نمونه سوم نیز مورد آزمایش قرار گرفته و از دو نتیجه نزدیکتر میانگین‌گیری شد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۲) برای مشاهده ریزساختار نمونه‌ها در شرایط مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌ها با توجه به درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد خشک تهیه شدند. مدت عمل‌آوری ۷ روز برای نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده بهسازی‌شده با سیمان و خاک آلوده بهسازی‌شده با آهک در نظر گرفته شد. پس از عمل‌آوری، نمونه با چاقوی تیز به قطعات کوچک دیسک شکل با حجم یک سانتی‌مترمکعب تقسیم شد (Yazdandoust, and Yasrobi, 2010 و Tremblay et al., 2002) و سپس توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اسکن گردید.

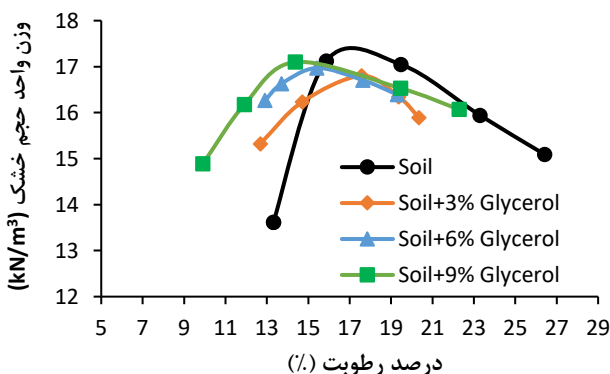
بررسی و تفسیر نتایج

آزمایش تراکم

براساس نتایج آزمایش تراکم بر روی خاک رس کائولینیت تمیز، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه خاک به ترتیب $17/07 \text{ kN/m}^3$ و ۱۷٪ به دست آمدند. مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه برای نمونه‌های آلوده‌شده با درصد‌های وزنی ۳، ۶، ۹ درصد گلیسرول نیز در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. طبق نتایج به دست آمده، افزودن مقدار کم گلیسرول (۳ درصد) به خاک طبیعی سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و ازدیاد رطوبت بهینه شده‌است، اما با افزایش مقدار گلیسرول بیشتر (۶ و ۹ درصد) میزان وزن واحد خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.

در واقع ثابت دی‌الکتریک آلاینده، نقش به‌سزایی در ایجاد

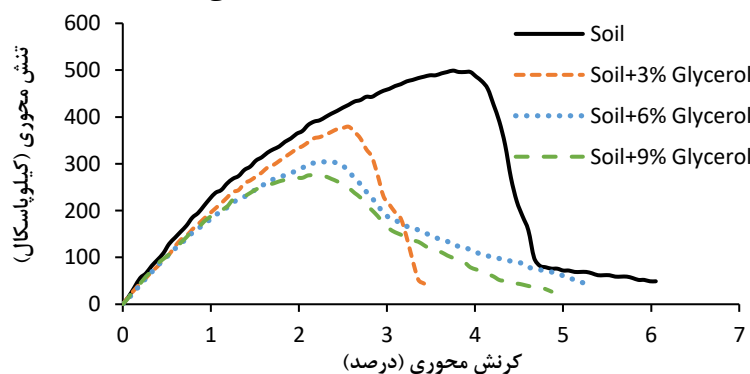
ساختار جدید برای خاک آلوده دارد. تاکنون پژوهش‌های فراوانی در رابطه با نقش ضریب دی‌الکتریک در ضخامت لایه مضاعف اطراف کانی رسی انجام شده که طبق نتایج آن‌ها، ضخامت لایه مضاعف با مجذور ثابت دی‌الکتریک ارتباطی مستقیم دارد (Oldham, 2008). می‌توان کاهش ضخامت لایه آب مضاعف را معادل با فشردگی ساختار خاک در اثر کاهش نیروهای دافعه دانست. با کاهش نیروهای دافعه، خاک ساختار لخته‌ای و نامنظم‌تری را پیدا خواهد کرد (Brosky and Pamukcu, 2015). طبق جدول (۵)، با توجه به ثابت دی‌الکتریک کمتر ماده آلی گلیسرول از ثابت دی‌الکتریک آب، ضخامت لایه مضاعف تشکیل شده در اطراف ذرات رس شده کاهش یافته و ساختار خاک لخته‌ای‌تر می‌شود. به این ترتیب، نقش ماده آلی گلیسرول در نتایج آزمون تراکم را می‌توان به کاهش ضخامت لایه مضاعف و در نتیجه، ایجاد ساختار لخته‌ای‌تر در خاک مرتبط دانست. در ساختار فولوکوله، ذرات به هم می‌چسبند اما فضای بین آنها خالی است. سیال حفره‌ای با وزن مخصوص کمتر نسبت به مخلوط خاک و مواد افزودنی در این فضاهای خالی وارد می‌شود (Estabragh et al. 2016b). بنابراین تحت انرژی تراکم یکسان وارد بر مخلوط خاک و مواد افزودنی، امکان جابه‌جایی و تغییر ذرات با میزان فولوکوله بیشتر نسبت به خاک طبیعی وجود ندارد و بنابر این وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. اما چون گلیسرول یک ماده آلی قطبی بوده و جذب آن به وسیله ذرات باردار رس نسبت به مواد غیرقطبی بیشتر است، افزایش درصد آن در خاک رس موجب قرارگیری بخشی از این ماده در بین ذرات شده و با کاهش چسبندگی بین صفحات و غلبه بر ساختار لخته‌ای و در نتیجه سهولت جابه‌جایی آنها، سبب افزایش وزن واحد حجم بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می‌شود.



شکل ۲- منحنی تراکم کائولینیت طبیعی و آلوده با درصد‌های مختلف گلیسرول

پس مقادیر ۶ و ۹ درصد گلیسرول باعث کاهش چسبندگی

و خاک آلوده به گلیسرول با مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد در شکل (۳) نشان داده شده است. طبق نتایج مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری رس طبیعی ۴۹۹ kPa و کرنش محوری نظیر آن ۳/۷۵ درصد است. همین طور در شکل دیده می‌شود که با افزودن گلیسرول به خاک، مقاومت تک محوری خاک آلوده و کرنش نظیر نقطه گسیختگی آن کاهش یافته است. این روند با افزایش میزان درصد گلیسرول همچنان ادامه خواهد داشت به طوری که با افزودن ۹ درصد گلیسرول به خاک، مقاومت فشاری تک محوری به ۲۷۵ kPa و کرنش متناظر آن ۲/۱ درصد می‌شود. به عبارت دیگر افزودن ۹ درصد گلیسرول به خاک موجب کاهش ۴۵ درصدی مقاومت نهایی و کاهش حدود ۴۴ درصدی کرنش نسبت به خاک در حالت طبیعی شده است. بر این اساس ابتدا نتیجه‌گیری می‌شود که چسبندگی خاک آلوده با ازدیاد درصد گلیسرول کاهش یافته است. همچنین سختی خاک آلوده نیز با افزایش درصد آلاینده مورد نظر کمتر شده که نشانگر رفتار نرم تر مصالح آلوده به گلیسرول در مقایسه با مصالح تمیز می‌باشد. البته کرنش نظیر نقطه شکست، که حاصل تقسیم مقاومت بر سختی است، کمتر می‌شود.



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش تک محوری خاک طبیعی و خاک آلوده با درصد‌های مختلف گلیسرول

کاتیون‌هایی مانند Mg^{++} ، Ca^{++} ، K^+ ، Na^{++} می‌توانند مواد آلی مانند فنول، 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 ساختمان خاک می‌گردد. لیکن ماده آلی موجود در فضای بین ذرات در تغییرات مکانیکی مانند سهولت جابجایی ذرات موثرتر است (Yong and Mulligan, 2003). می‌توان عامل موثر در کاهش مقاومت خاک آلوده به گلیسرول نسبت به خاک طبیعی را به این مسئله مربوط دانست. از آنجایی که قدرت جذب مواد آلی به وسیله ذرات خاک رس کائولینیت محدود می‌باشد، افزایش درصد ماده آلاینده موجب افزایش بیشتر مقدار آنها در فضای بین ذرات می‌گردد که کاهش بیشتر مقاومت را در

بین صفحات خاک، لغزش و کاهش فضای بین آنها و در نتیجه افزایش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم می‌گردد. اما مقدار ۳ درصد گلیسرول دارای توان کافی جهت ایجاد واکنش قطبی و غلبه بر ساختار فولوکوله، حذف نیروی جاذبه و چسبندگی بین صفحات و جابجایی آنها، به مانند مقادیر ۶ و ۹ درصد گلیسرول نیست و بنابراین مقدار وزن واحد حجم خشک ماکزیمم کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. پس هر چه درصد ماده آلی گلیسرول بیشتر باشد این تغییرات بیشتر است، زیرا ماده آلی بیشتری در بین ذرات قرار گرفته و جابجایی آنها را امکان‌پذیر می‌نماید. در نتیجه می‌توان گفت غلظت ماده آلی مصرفی نقش مهمی در تراکم خاک دارد و این افزایش غلظت نسبت به آب است که موجب افزایش وزن واحد حجم و کاهش رطوبت بهینه شده است. نتایج بدست آمده در این خصوص با نتایج برخی محققان برای خاک‌های مختلف مطابقت دارد (Shen and Mitchell 1996; Zanjarani Farahani and Hamidi 2014; Estabragh et al. 2016b و Nazari Heris et al. (2020)).

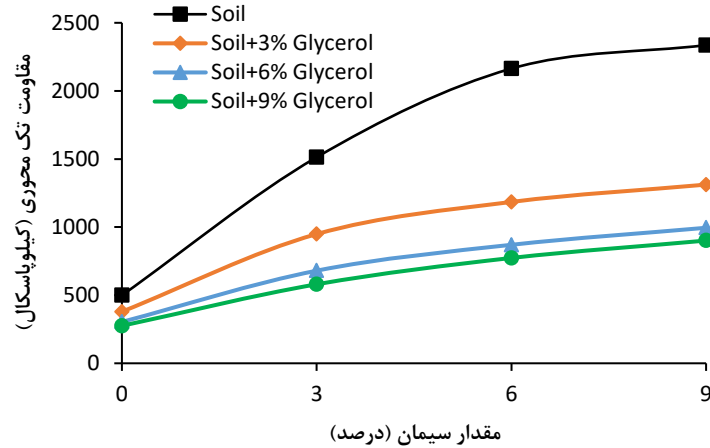
آزمایش فشار تک محوری

منحنی‌های تنش محوری-کرنش محوری نمونه‌های خاک طبیعی

افزودن ماده آلی به خاک‌های چسبنده منجر به واکنش ذرات خاک با ماده آلی می‌شود که به عنوان واکنش‌های فیزیکوشیمیایی مرسوم است. این واکنش‌ها منجر به تغییراتی در ضخامت لایه آب مضاعف و فولوکوله شدن ساختمان خاک می‌شوند. محققینی همچون Estabragh et al. (2016b) و Ratnaweera and Meegoda (2006) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و نتیجه‌گیری نمودند که حضور ماده آلی بین ذرات نقش بسیار مهمی در تغییرات مقاومت دارد. کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی بوده و خاصیت جذب آب به وسیله آنها به میزان بار الکتریکی و سطح ویژه آنها مرتبط است. در این خصوص محققینی مانند Jaynes and Vance (1999) و Sheng et al. (1996) گزارش نمودند که خاک‌های رسی از طریق

صفحات و سهولت جابجایی آنها می‌شود، سبب کاهش مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی و افزایش درصد گلیسرول موجب کاهش بیشتر آن خواهد شد.

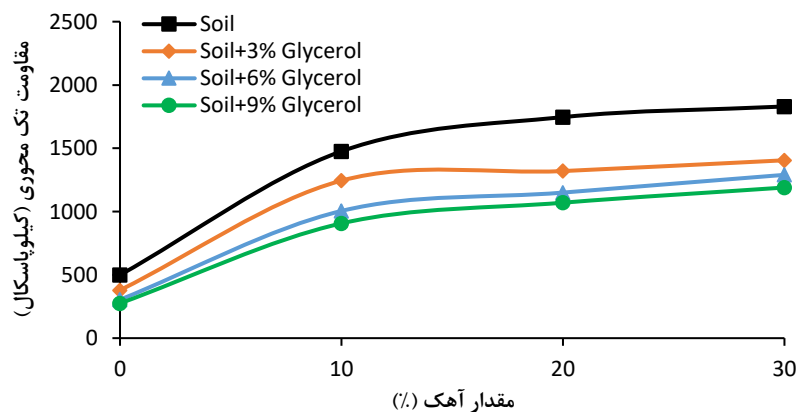
پی دارد (Estabragh *et al.*, 2016b). همان‌گونه که در نتایج مربوط به آزمایش تراکم گفته شد چون افزودن گلیسرول به خاک موجب جذب بخشی از ماده آلی در سطح ذرات، کاهش ضخامت لایه مضاعف، افزایش حالت لخته‌ای و کم شدن چسبندگی بین



شکل ۴- تغییرات مقاومت تک محوری با مقادیر مختلف سیمان برای خاک طبیعی و خاک آلوده با درصد‌های مختلف گلیسرول

شده‌است. براساس این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-آهک و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک، افزایش یافته است. همچنین با افزایش درصد آلودگی، مقاومت فشاری نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-آهک، کاهش بیشتری داشته اما نرخ این کاهش از میزان آلودگی ۶٪ به ۹٪ کمتر شده است که با نتایج Estabragh *et al.* (2016b) همخوانی دارد (شکل‌های ۴ و ۵).

مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده به درصد‌های مختلف گلیسرول (۳، ۶ و ۹ درصد) اختلاط یافته با درصد‌های مختلف سیمان (صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد) در شکل (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سیمان، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، افزایش یافته است. در شکل (۵) نیز مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک-آهک و خاک آلوده به مقادیر مختلف گلیسرول (۳، ۶ و ۹ درصد) اختلاط یافته با مقادیر مختلف آهک (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) نشان داده

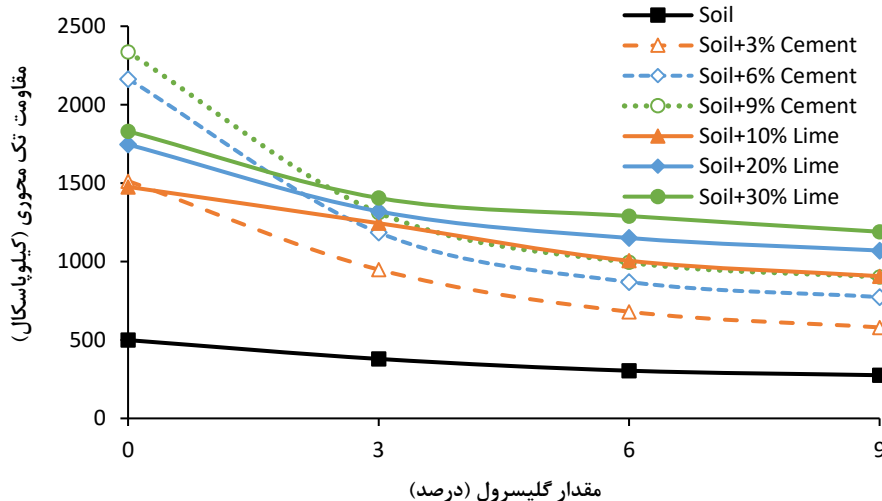


شکل ۵- تغییرات مقاومت تک محوری با مقادیر مختلف آهک برای خاک طبیعی و خاک آلوده با درصد‌های مختلف گلیسرول

می‌شود، با اضافه شدن گلیسرول به خاک مقاومت فشاری خاک آلوده کاهش یافته است. این روند با افزایش میزان گلیسرول همچنان ادامه دارد. همچنین مطابق نمودار مشاهده می‌شود با افزایش درصد سیمان و آهک مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک و خاک آلوده به گلیسرول اختلاط

شکل (۶) مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های خاک، خاک-سیمان، خاک-آهک و خاک آلوده به درصد‌های مختلف گلیسرول (۳، ۶ و ۹ درصد) و اختلاط یافته با مقادیر مختلف سیمان (۳، ۶ و ۹ درصد) یا آهک (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) در زمان عمل‌آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار دیده

هیچ گونه واکنشی با سیمان انجام نمی‌دهد (Botta et al. 2004) و سهولت تغییر شکل را فراهم می‌نماید. لذا افزایش مقدار ماده آلی کاهش مقاومت خاک-سیمان را در پی خواهد داشت. این موضوع به خوبی در شکل (۶) قابل مشاهده است و با افزایش درصد گلیسرول، مقاومت خاک آلوده بهسازی شده کاهش یافته است. Tremblay et al. (2002) وجود اسیدهای آلی در ترکیب خاک و سیمان را سبب مختل نمودن مکانیزم سیمانی شدن به دلیل مهار هیدراسیون و در نتیجه عدم افزایش مقاومت ذکر نمودند. به علاوه اشاره شده که افزودن گلیسرول به خاک و تسهیل جابجایی ذرات خاک آلوده، سبب کاهش مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و آهک نسبت به خاک طبیعی و تمیز ترکیب شده با سیمان و آهک می‌شود.



شکل ۶- تغییرات مقاومت تک محوری با درصدهای مختلف گلیسرول برای خاک بهسازی شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک

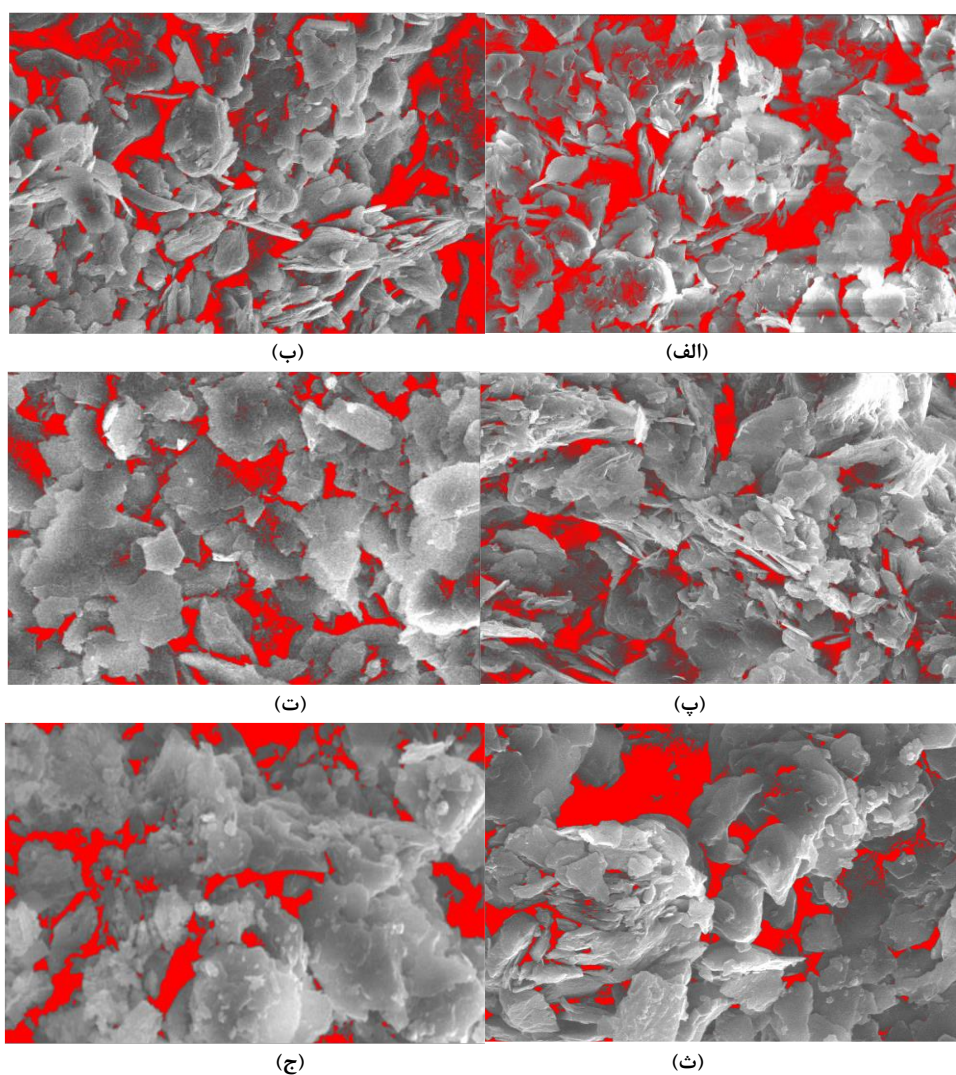
جداسازی و انحلال مواد یونی را داراست. تعدادی از محققین مانند (Schmertmann et al. 2001) و (Jedari and Hamidi 2013), (Olgun and Yildiz 2012) و (Ghadyani et al. 2019) تغییرات مشخصات ژئوتکنیکی رس کائولینیت در معرض چندین سیال شیمیایی با ثابت دی‌الکتریک مختلف را چنین بیان کردند که کاهش هرچه بیشتر ثابت دی‌الکتریک باعث افزایش فولوکوله‌شدگی ذرات و تمایل رفتار خاک رسی به رفتار مشابه خاک سیلتی می‌شود. به علاوه، کاهش و افزایش میزان رطوبت موثر در واکنش‌ها در خاک آلوده می‌تواند به دلیل واکنش قطبی و غیر قطبی آلاینده و خاک باشد. مواد آلی غیرقطبی باعث جذب رطوبت بیشتر خاک و کاهش میزان رطوبت در آن می‌شوند، در صورتی که در مواد قطبی این موضوع بر عکس می‌باشد (Devatha et al. 2019). با توجه به تفاوت دو ماده تثبیت کننده سیمان پرتلند و آهک در میزان رطوبت لازم برای

یافته با سیمان و آهک، افزایش یافته است. با افزایش مقدار سیمان و آهک، مقادیر مقاومت نهایی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش افزایش یافته‌اند و مقاومت نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-آهک بسیار بیشتر از خاک طبیعی است. در خصوص این میزان افزایش مقاومت در خاک آلوده باید توجه داشت که چون تعدادی از ذرات سیمان و آهک به وسیله ماده آلی پوشانده می‌شود، مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و آهک نسبت به مقاومت ترکیب خاک طبیعی با سیمان و آهک کمتر خواهد بود. همان طور که اشاره شد در خاک‌های حاوی مواد آلی ممکن است مقدار محدودی از ماده جذب ذرات شود و در تشکیل ماده سخت که از ژل ایجاد شده به وسیله سیمان و ذرات خاک به وجود می‌آید، مشارکت داشته باشد. باقیمانده ماده آلی در فضاهای خالی باقی می‌ماند و

همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود در نمونه‌های آلوده به گلیسرول تأثیر بهسازی با ۹ درصد سیمان تقریباً معادل ۱۰ درصد آهک است. همچنین تأثیر بهسازی با آهک به میزان ۲۰ درصد و ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با ۶ و ۹ درصد سیمان بیشتر شده است. این بدان معنی است که سیمان پرتلند و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به گلیسرول را داشته است اما تأثیر آهک در بهسازی نمونه‌های آلوده به گلیسرول بیشتر از سیمان است. علت این امر را می‌توان در نقش ثابت دی‌الکتریک ماده آلی گلیسرول با غلظت ۴۰ درصد در ضخامت لایه مضاعف و قطبی بودن ماده آلی دانست. از آنجایی که ماده گلیسرول با غلظت ۴۰٪، ثابت دی‌الکتریک کمتر اما نزدیک به آب دارد، سبب کاهش اندک ضخامت لایه مضاعف در اطراف ذرات رس شده و ساختار خاک را کمی فولوکوله و لخته‌ای می‌کند اما به دلیل قطبی بودن و قابلیت حل در آب، توانایی بیشتری در

مطالعه می‌باشد) برابر است. به این ترتیب برای بهسازی رس کائولینیت و در صورتی که معیار اصلی افزایش مقاومت فشاری باشد، می‌توان از این نسبت به منظور جایگزین کردن میزان هر یک از عوامل سیمانی‌کننده در عملیات تثبیت بهره برد. طبق مطالعات قبلی، این درصد هم‌ارزی برای حصول عدد CBR برابر در تثبیت خاک آلوده به ۹ درصد گلیسرول (با عمل‌آوری سه روزه)، به صورت ۴ درصد سیمان و ۱۰ درصد آهک بوده است (Hamidi and Abdoos 2020).

شروع هیدراتاسیون که توسط محققین مختلف نیز بیان گردیده است (Ampera and Aydogmus, 2005 و Hastuty, 2019)، بسته به میزان وزنی به کار رفته از هر کدام در بهسازی نمونه‌های آلوده به گلیسرول، شاهد سطح عملکرد متفاوتی خواهیم بود. بر اساس نتایج مطالعات، مقاومت تک‌محوری ناشی از تثبیت خاک آلوده با ۹ درصد سیمان (که بالاترین درصد از این ماده تثبیت‌کننده در تحقیق حاضر است) و ۱۰ درصد آهک (که کمترین درصد به کار گرفته شده از این ماده تثبیت‌کننده در این



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ذرات خاک و فضاهای خالی مابین آنها (الف) خاک طبیعی؛ (ب) خاک + ۹٪ گلیسرول؛ (پ) خاک + ۹٪ سیمان؛ (ت) خاک + ۱۰٪ آهک؛ (ث) خاک + ۹٪ گلیسرول + ۹٪ سیمان؛ (ج) خاک + ۹٪ گلیسرول + ۱۰٪ آهک.

میکروگراف خاک طبیعی و خاک آلوده به گلیسرول ۹٪ را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (الف-۷) نشان داده شده است، ساختار خاک طبیعی به صورت ورقه ورقه و کمی فولوکوله است و نسبت سطح قرمز رنگ به سطح کل، که نمایانگر تخلخل نمونه است، در حدود ۲۱/۸ درصد می‌باشد. با افزودن گلیسرول در شکل

شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تعدادی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این تصاویر تخلخل و حفرات بین ذرات به صورت دوبعدی توسط نرم افزار Image J^۱ (که نرم‌افزاری قدرتمند برای آنالیز و کمی‌سازی تصاویر میکروسکوپی است) با رنگ قرمز نشان داده شده است. شکل (الف-۷ و ب) به ترتیب

مختلف سیمان پرتلند و آهک بر رفتار کاتولینیت آلوده به مقادیر مختلف ماده آلی گلیسرول و امکان بهسازی آن به این ترتیب، مورد بررسی قرار گرفته است. در ذیل اهم نتایج حاصل از این مطالعه ارائه شده است:

۱- اضافه کردن گلیسرول به خاک رس کاتولینیت، سبب تغییر در مشخصات تراکم آن می‌شود. مقادیر ۶ و ۹ درصد گلیسرول باعث کاهش در میزان چسبندگی ما بین صفحات، لغزش و کاهش فضای خالی بین آنها و در نتیجه ازدیاد وزن مخصوص خشک بیشینه می‌گردد. در مقدار گلیسرول ۳ درصد، امکان ایجاد واکنش‌های قطبی در خاک و غلبه بر ساختار فولوکوله، حذف نیروی جاذبه و چسبندگی بین صفحات و جابه‌جایی آنها به مانند ۶ یا ۹ درصد گلیسرول نیست. در نتیجه با افزودن ۳ درصد گلیسرول، مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. پس هر چه مقدار ماده آلی گلیسرول موجود در خاک بیشتر باشد، افزایش در وزن مخصوص خشک بیشینه و کاهش در رطوبت بهینه زیادتر خواهد بود.

۲- افزایش مقدار گلیسرول موجب کاهش در شیب منحنی تنش- کرنش یا سختی خاک می‌گردد. بنابراین خاک آلوده به گلیسرول، رفتار نرم‌تری نسبت به خاک تمیز دارد. اما با توجه به افت محسوس مقاومت اوج، کرنش نظیر نقطه شکست با ازدیاد درصد گلیسرول کمتر شده است.

۳- با اضافه نمودن سیمان پرتلند و آهک به خاک، مقاومت نهایی نمونه‌ها بیشتر شده است. با افزایش مقدار سیمان یا آهک مصرفی، مقدار مقاومت افزایش می‌یابد. طبق نتایج، ازدیاد مقدار سیمان یا آهک سبب افزایش مقاومت خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف گلیسرول نیز می‌شود.

۴- تأثیر بهسازی با ۹ درصد سیمان تقریباً معادل ۱۰ درصد آهک در نمونه‌های آلوده به گلیسرول است. همچنین تأثیر بهسازی با آهک به میزان ۲۰ درصد و ۳۰ درصد نسبت به نمونه های بهسازی شده با ۹ درصد سیمان بیشتر شده است. لذا در تثبیت رس کاتولینیت، با در نظرگیری افزایش مقاومت فشاری خاک به عنوان ملاک اصلی، امکان جایگزینی هر یک از عوامل در عملیات وجود خواهد داشت.

۵- با بررسی و آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص گردید که افزودن ۹ درصد گلیسرول سبب لغزش صفحات بر یکدیگر و کاهش تخلخل نسبت به خاک تمیز می‌شود. افزودن سیمان یا آهک به خاک آلوده نیز موجب پرشدگی حفرات و کاهش تخلخل خواهد شد، هر چند میزان تخلخل بیشتر از مقدار نظیر در خاک تمیز تثبیت شده خواهد بود.

(۷-ب) و تفاوت اندک ثابت دی‌الکتریک آن با آب، ساختار اندکی فولوکوله‌تر شده است. در واقع گلیسرول با نفوذ بین لایه‌ها و ذرات باعث چسباندن آنها به یکدیگر و تشکیل ذرات درشت‌تری در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود که در شکل (۷-ب) نیز مشهود است (Estabragh et al., 2016b). اما ویسکوزیته بالاتر گلیسرول، باعث کاهش چسبندگی در بین ذرات خاک شده و به آنها اجازه داده تا راحت‌تر حرکت کنند. بر اساس نمودارهای تنش محوری- کرنش محوری شکل (۳)، با افزایش مقدار گلیسرول از صفر تا ۹ درصد، چسبندگی خاک از ۲۴۸ کیلوپاسکال به ۱۳۸ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد. به این ترتیب نسبت تخلخل خاک آلوده نسبت به خاک تمیز کاهش یافته و با آنالیز صورت گرفته در نرم افزار، در حدود ۱۵/۲ درصد به دست آمده است. شکل (۷-پ و ت) به ترتیب میکروگراف مخلوطی از خاک تمیز با ۹٪ سیمان و ۱۰٪ آهک را برای مدت عمل آوری ۷ روزه نشان می‌دهد. این میکروگراف ساختار فولوکوله خاک- سیمان و آهک، با کاهش نسبت منافذ را نشان می‌دهد. به طوری که محصول سیمان‌تاسیون یک ساختار متراکم، به هم پیوسته و مستحکم را ایجاد کرده است. نتیجه سیمان‌تاسیون خاک در این شرایط عمدتاً هیدرات‌های سیلیکات کلسیم (C-S-H) است (Choquette et al. 1987 و Bensted and Barnes 2002). با محاسبه انجام شده، میزان تخلخل برای نمونه خاک- سیمان حدود ۷/۱۸ درصد و برای نمونه خاک- آهک حدود ۸/۲۲ درصد به دست آمد. همچنین از مقایسه شکل‌های (۷-پ) و (۷-ت) مشاهده می‌شود که سیمان پرتلند ساختار سوزنی‌تر و تیز گوشه‌تری را ایجاد کرده است. برخلاف آن، ساختار تشکیل شده از اندرکنش خاک با آهک، به مراتب پولکی‌تر و گرد گوشه‌تر می‌باشد. شکل‌های (۷-ث) و (۷-ج) به ترتیب خاک آلوده به ۹٪ گلیسرول و بهسازی شده با ۹٪ سیمان و ۱۰٪ آهک را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است خاک آلوده بهسازی شده به شکل توده پیوسته و متراکم‌تر با کاهش خلل و فرج نسبت به نمونه آلوده فاقد سیمان‌تاسیون ظاهر شده و سیمان پرتلند و آهک، بخش بزرگی از ذرات خاک را به هم پیوند داده است. میزان تخلخل به دست آمده در نرم افزار نظیر شکل‌های (۷-ث و ج) به ترتیب حدود ۱۰/۰۲ و ۱۱/۱ درصد به دست آمده است که حاکی از کاهش فضای خالی بین ذرات خاک آلوده، بر اثر تثبیت با سیمان و آهک می‌باشد. هر چند میزان این تخلخل‌ها بیشتر از مقادیر نظیر در خاک تمیز تثبیت شده با سیمان یا آهک است.

نتیجه‌گیری

با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی، تأثیر اضافه نمودن مقادیر

۶- بررسی نتایج نشان می‌دهد که هر دو ماده سیمان پرتلند و آهک قابلیت مناسبی برای بهسازی خاک آلوده به گلیسرول داشته‌اند اما به دلیل رفتار قطبی گلیسرول، افزایش رطوبت موثر در واکنش و نیاز متفاوت هر یک از این دو ماده به رطوبت جهت شروع هیدراتاسیون، تأثیر بهسازی وابسته به درصد وزنی به کار گرفته شده از آنها است. بر اساس نتایج آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در درصد وزنی مشابه، کارایی سیمان پرتلند در بهسازی خاک رس آلوده به گلیسرول بیشتر است. بنابراین برای انتخاب عامل تثبیت کننده مناسب می‌توان با توجه به امکانات موجود و

محدودیت‌های اقتصادی تصمیم‌گیری نمود.

۷- تثبیت خاک با سیمان و آهک به عنوان روشی کاربردی برای بهسازی خاک مناطق آلوده به گلیسرول و آلاینده‌های هم خانواده آن برای ساخت و ساز قابل توصیه است. همچنین در صورت عدم دسترسی به قرصه مناسب، امکان بهسازی خاک آلوده با تثبیت آن توسط عوامل سیمانی یاد شده در تحقیق حاضر و استفاده از آن وجود خواهد داشت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abyek Cement Co. (2020). Online Brochure, Qazvin, Iran.
- 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.
- Ampera, B. and Aydogmus, T. (2005). Recent experiences with cement and lime – stabilization of local typical poor cohesive soil. In book: *Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg*, Edition: Heft 2005-2, Publisher: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Editors: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich. 121–144.
- ASTM D698 (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, *American Society of Testing and Materials*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bensted, J., and Barnes, P. (2002). Structure and performance of cements, Spon Press, New York.
- Botta, D., Dotelli, G., Biancardi, R., Pelosato, R. and Natali Sora, I. (2004). Cement–clay pastes for stabilization / solidification of 2-chloroaniline. *Waste Management*, 24(2), 207–216.
- Brosky, R.T. and Pamukcu, S. (2015). Role of DDL processes during electrolytic reduction of Cu (II) in a low oxygen environment. *Journal of Hazardous Materials*. 262, 878–882.
- Chavali, R.V.P., Vindula, S.K., Vydehi, K.V., Reddy, H.P. and Moghal, A.A.B. (2020). Effect of acid and alkali contamination on swelling behavior of kaolin clay. *Geo-Congress, Minneapolis, Minnesota*, 25–28.
- Chen, H., Jiang, Y., Zhang, W. and He, X. (2017). Experimental study of the stabilization effect of cement on diesel contaminated soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 50, 199–205.
- Choquette, M., Bérubé, M. A. and Locat, J. (1987). Mineralogical and micro textural changes associated with lime stabilization of marine clays from eastern Canada. *Applied Clay Science*. 2(3), 215–232.
- Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L. and Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 133(2), 197–205.
- Devatha, C.P., Vishnu Vishal, A. and Chandra Rao, J.P. (2019). Investigation of physical and chemical characteristics on soil due to crude oil contamination and its remediation. *Applied Water Science*. 9:89, <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0970-4>.
- 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.
- Estabragh, A.R. Beytolahpour, I. Moradi, M. & Javadi, A.A. (2016a). Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(5), 503-519.
- Estabragh, A.R. Khatibi, M. and Javadi, A.A. (2016b). Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001443](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001443).
- Estabragh, A.R., Kholoosi, Ghaziani, M. F. and Javadi, A. A. (2018). Mechanical and leaching behavior of a stabilized and solidified anthracene-contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering*. 144(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001311](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001311).
- Estabragh, A.R., Ghayamara, F., Soltanian, A.R. and Babalar, M. (2020). Effect of ageing on the properties of a clay soil contaminated with glycerol. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*. <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1827165>.
- Ghadyani, M., Hamidi, A. and Hatambeigi, M. (2019). Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 23(1), 112-135
- Hamidi, A. and Abdoos, S. (2020). Application of Lime and Portland Cement for Improvement of Clay Contaminated with Anthracene and Glycerol. *Journal of Civil and Environmental Researches*, 5(2), 111-122.
- Hastuty, I. (2019). Comparison of the use of cement,

- gypsum, and limestone on the improvement of clay through unconfined compression test. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 5(2) 131-138.
- Jaynes, W. F. and Vance, G. F. (1999). Sorption of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) compounds by hectorite clays exchanged with aromatic organic cations. *Clays and Clay Minerals*, 47(3), 358-365.
- Jedari, C., and Hamidi, A. (2013). Investigating the consolidation behavior of contaminated clay. *Sharif Civil Engineering Journal*. 29, 29–35 (In Farsi)
- Kamel, M.H. and Mabrouk, W.M. (2003). Estimation of shale volume using a combination of the three porosity logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 40(3), 145–157.
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A., Nikraz, H. and Yilmaz, Y. (2020). Mechanical behaviour of atrazine-contaminated clay. *Applied Sciences*. 10(7), <https://doi.org/10.3390/app10072457>.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89, 220–229.
- Kumar, A., Walia, B.S. and Bajaaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compacted and strength properties of expansive soil. *J. Mat. In. Civil Eng.* 19(3), 242–248.
- 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*. 904–911.
- Mohammadi, S. D. and Moharamzade Saraye, K. (2015). The study of workability of lime on improvement of oil materials contaminated soils around the Tabriz oil refinery. *Modares Civil Engineering Journal*. 15, 223–233.
- Nazari Heris, M., Aghajani, A., Hajjalilue-Bonab, M. and Vafaei Molamahmood, H. (2020). Effects of lead and gasoline contamination on geotechnical properties of clayey soils. *Soil and Sediment Contamination*. 29(3), 340-354.
- Oldham, K.B. (2008). A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a (metal)/ (ionic liquid) interface. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 613(2), 131–138.
- Olgun, M. and Yildiz, M. (2012). The Effects of pore fluids with different dielectric constants on the geotechnical behaviour of kaolinite. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 37(7).
- Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. (2020). Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 12, 160–167.
- Pichtel, J.(2007) .*Fundamentals of Site Remediation : For Metal and Hydrocarbon-contaminated Soils* . Government Institutes.
- 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.
- Ratnaweera, P. and Meegoda, J. N. (2006). Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 133–140.
- Schmertmann, J., Teachavorasinskun A.S. and D. Zhao, A. (2001). Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 127(5).
- Shah, S.J., Shroff, A.V., Patel, J.V., Tiwari, K.C. and Ramakrishnan, D. (2003). Stabilization of fuel oil contaminated soil- A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21, 415–427.
- Shen, C.K. and Mitchell, J.K. (1996). Behavior of soil-cement in repeated compression and flexure. *Highway Research Records*, 128, 68-100.
- Sheng, G., Xu, S. and Boyd, S.A. (1996). Mechanism (s) controlling sorption of neutral organic contaminants by surfactant-derived and natural organic matter. *Environmental science & technology*, 30(5), 1553–1557.
- Singh, S. K., Srivastava, R. K. and John, S. (2008). Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & sediment contamination*, 17(3), 290–300.
- Soltaninejad, S., Hamidi, S. and Marandi, S.M. (2018). The influence of different curing conditions on durability of lime-stabilized clay soils (micro- and macro- structure study). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*. 4(3), 83–98.
- Suresh, A.R. and D’Cruz, T.C. (2019) Strength Characteristics of Soil Glycerol Mixture: Cement as Additive. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2(2), 483–484.
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. and Leroueil S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal*. 39, 535–46.
- Vipulanandan, C. (1995). Effect of clays and cement on the solidification/stabilization of phenol-contaminated soils. *Waste Management*. 15, 399–406.
- Yazdandoust, F. and Yasrobi, S.S. (2010). Effect of cyclic wetting and drying on swelling behaviour of polymer-stabilized expansive clays. *Applied Clay Science*. 50(4), 461–468.
- Yong, R.N. and Mulligan, C.N. (2003). *Natural attenuation of contaminants in soils*, CRC Press.
- Zanjarani Farahani, 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).