

**A. Hamidi\***

Faculty of Engineering,  
Kharazmi University.

**e-mail:** hamidi@khu.ac.ir

**S. Abdoos**

Faculty of Engineering,  
Kharazmi University.

**e-mail:** saeid.abdoos@gmail.com

## **Application of Lime and Portland Cement for Improvement of Clay Contaminated with Anthracene and Glycerol**

*Due to the limited soil resources and population increase, the use of contaminated or problematic soils is inevitable. There are different methods to improve the geotechnical properties of clay soils. One of the ways is to stabilize the soil with stabilizers such as Portland cement and lime. Investigation of the combined effect of organic pollutants under the influence of stabilizers (Portland cement (I) and lime) on Kaolinite clay using modified Proctor and CBR experiments constitutes the present research framework. The maximum unit weight decreased with increase in Anthracene content while its variations were strongly dependent to the Glycerol content. The maximum of dry unit weight and minimum of optimum water content occurred at a glycerol content of 6%. Based on tests results, it was found that the increase in strength of clean Kaolinite using 6% of Portland cement is equivalent to that of 30% lime. It was also found that the contaminants decrease the strength of kaolinite; however, both stabilizers increase it. The effect of Portland cement on the strength of the specimens contaminated with Anthracene was better than that of lime and the effect of Portland cement and lime on the improvement of samples contaminated with Glycerol was considerable.*

**Keywords:** Kaolinite, Anthracene, Glycerol, Stabilization, Lime and Portland cement.

---

\* Corresponding author

Received 30 March 2020, Revised 07 May 2020, Accepted 07 June 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.5374.1198

## کارایی آهک و سیمان پرتلند در تثبیت رس آلوده به آنتراسن و گلیسرول

یکی از روش‌های بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک آلوده، تثبیت آن به وسیله تثبیت‌کننده‌هایی چون سیمان پرتلند و آهک است. در این تحقیق، تأثیر آلاینده‌های آلی آنتراسن و گلیسرول بر رس کائولینیت بررسی و تأثیر تثبیت‌کننده‌های سیمان پرتلند و آهک بر خاک با انجام آزمایش CBR ارزیابی شده است. از گلیسرول ۴۰٪ و آنتراسن به‌عنوان آلاینده و سیمان پرتلند نوع یک و آهک زنده کم‌مایه نیز به‌عنوان تثبیت‌کننده استفاده شده است. در نمونه‌های آلوده به درصد‌های مختلف آنتراسن، همواره کاهش وزن مخصوص حداکثر و افزایش در رطوبت بهینه مشاهده شد؛ درحالی‌که در نمونه‌های آلوده به گلیسرول، این رفتار به‌شدت تابع درصد آلاینده افزوده‌شده به خاک بود. به‌طوری‌که با ازدیاد درصد گلیسرول به ۶، بیشینه وزن مخصوص حداکثر و کمترین رطوبت بهینه ایجاد گردید. براساس نتایج، نشان داده شد که آلاینده‌ها مقاومت کائولینیت را کاهش و تثبیت‌کننده‌ها مقاومت آن را افزایش می‌دهند. همچنین مشخص گردید که افزایش مقاومت ناشی از افزودن ۶٪ سیمان پرتلند نوع ۱ در کائولینیت تمیز حدوداً هم‌ارز ۳۰٪ آهک است. هر دو عامل تثبیت‌کننده سیمان پرتلند و آهک در ازدیاد مقاومت خاک مؤثر بودند؛ اما تأثیر سیمان پرتلند در بهبود خواص مقاومتی نمونه‌های آلوده به آنتراسن بهتر از آهک تعیین شد. اگرچه تأثیر هر دو عامل در بهسازی نمونه‌های آلوده به گلیسرول قابل ملاحظه بود.

**واژگان کلیدی:** کائولینیت، آنتراسن، گلیسرول، تثبیت، آهک و سیمان پرتلند.

امیر حمیدی\*

گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
پست الکترونیک:

hamidi@khu.ac.ir

سعید عبدوس

گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
پست الکترونیک:

saeid.abdoos@gmail.com

### ۱- مقدمه

و فلزات سنگین، زباله‌ها، مواد شیمیایی و نفتی از منابع اصلی آلودگی خاک‌ها هستند. آلودگی به مواد شیمیایی از منابع متعددی صورت می‌گیرد که نشت حین انتقال، تصادف تانکرها، تأسیسات دریایی و نشت طبیعی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند [۱].

در گذشته مطالعات متعددی برای بررسی آثار آلاینده‌های آلی بر خاک‌ها انجام گرفته است. با بررسی تغییرات حدود اتربرگ خاک ریزدانه آلوده به نفت خام مشخص شد که با افزایش میزان آلاینده، پلاستیسیته خاک، کاهش یافته و چسبندگی آن کمتر می‌شود. به‌علاوه نشان داده شد که تأثیر آلودگی بر خاک‌های ریزدانه بیش از مصالح درشت‌دانه است [۲]. در تحقیقات

آلودگی خاک توسط آلاینده‌های آلی خطرناک و سمی به‌عنوان یک معضل زیست‌محیطی در گستره وسیعی از جهان مطرح شده است. آلودگی خاک به ایجاد، پخش یا آمیختن یک یا چند ماده خارجی با آن اطلاق می‌گردد. در نتیجه، تغییراتی در کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ایجاد شده و برای انسان و سایر موجودات زنده زیان‌آور می‌شود. آلاینده‌های صنعتی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۰۲/۱۸، بازنگری ۱۳۹۹/۰۳/۱۸، پذیرش ۱۳۹۹/۰۳/۱۸  
DOI: 10.22091/cer.2020.5374.1198 شناسه دیجیتال

لزجت ماده آلی مصرفی نیز نقش مهمی در تراکم خاک دارد. افزایش لزجت سیال آلاینده نسبت به آب حفره‌ای موجب افزایش وزن واحد حجم و کاهش رطوبت بهینه می‌گردد [۹]. در پژوهشی دیگر، کائولینیت و بنتونیت آلوده به نفت سفید و گازوئیل در تراکم نسبی ۹۰٪ تحت آزمایش سه محوری تحکیم نیافته - زهکشی نشده قرار گرفتند. بر این اساس، مشخص شد که با افزایش آلودگی، ساختار خاک رسی به صورت متصل و فولوکوله تغییر می‌یابد. به علاوه، چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش پیدا می‌کند. همچنین چارچوبی یکسان برای بیان رفتار خاک‌های آلوده در محدوده درصد‌های آلاینده مورد بررسی، ارائه شد [۱۰].

عملیات تثبیت خاک‌های آلوده به منظور عدم پخش بیشتر آلاینده در خاک، جلوگیری از رسیدن آن به سفره آب زیرزمینی، تبدیل آن به یک ماده غیرسمی و استفاده مجدد انجام می‌گیرد. معمولاً در این خصوص از سیمان، آهک و یا خاکستر بادی استفاده می‌شود. در مورد تأثیرات این مواد بر رفتار خاک آلوده، تحقیقات بسیاری انجام شده است. کارایی آهک در بهسازی خاک‌های ماسه سیلت یا رس‌دار آلوده به مواد نفتی در محدوده پالایشگاه تبریز بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزودن آهک زنده، خواص خمیری خاک کاهش یافته و پارامترهای مقاومتی افزایش می‌یابند [۱۱]. تأثیر سیمان پرتلند و غبار کوره سیمان بر بهسازی رس کائولینیت نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. نتایج نشان داده که سیمان و غبار کوره سیمان مقاومت خاک را افزایش می‌دهند. مقاومت تک‌محوری نمونه با ۱۵ درصد غبار کوره سیمان برابر با مقاومت نمونه با ۱۰ درصد سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری می‌باشد [۱۲].

برای بررسی اثر زمان عمل‌آوری با سیمان پرتلند بر مقاومت نمونه آلوده به گلیسرول، آزمایش‌های متعدد فشار تک‌محوری انجام گرفت. مقادیر سیمان پرتلند و گلیسرول، ۳، ۶ و ۹ درصد بوده است. براساس نتایج،

دیگر، با انجام تست‌های حدود اتربرگ و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR<sup>۱</sup>) تأثیر تثبیت‌کننده آهک بر کانی‌های کائولیت و مونت‌موریلونیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش درصد آهک در خاک حاوی کانی‌های کائولینیت، مقدار CBR افزایش می‌یابد [۳] و [۴].

در تحقیقی دیگر، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و تحکیم یک‌بعدی بر روی نمونه‌های رس کائولینیت و بنتونیت آلوده به نفت سفید و گازوئیل در تراکم‌های نسبی ۵۰ و ۷۰ درصد انجام شد. براساس نتایج، با افزایش درصد آلاینده شاخص خمیری خاک افزایش جزئی یافته و میزان رطوبت بهینه نسبت به خاک تمیز کاهش یافته است. همچنین مشاهده شد که میزان تورم و ضریب فشردگی خاک آلوده نیز نسبت به خاک تمیز افزایش یافته است [۵]. در ادامه این روند، مشخص گردید که ضریب تحکیم و نفوذپذیری خاک آلوده نسبت به خاک تمیز، کمتر است و با ازدیاد درصد آلودگی کاهش بیشتری می‌یابد [۶]. محققین دیگر، افزایش در حدود اتربرگ کائولینیت آلوده به ۱۰٪ نفت خام و کاهش در رطوبت بهینه آن را نشان دادند. با توجه به این تغییرات مشخص شد که در اثر آلودگی، حتی نام خاک از CL به OH تغییر می‌نماید [۷].

تأثیر گازوئیل بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی رس کائولینیت با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، تحکیم، تک‌محوری و برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، تا محدوده ۱۲٪ گازوئیل، حد روانی و شاخص خمیری افزایش می‌یابند. ضریب تورم نیز بیشتر شده و ضریب فشردگی کاهش پیدا می‌کند. همچنین چسبندگی خاک افزایش یافته و از زاویه اصطکاک داخلی کاسته می‌شود، به طوری که مقاومت برشی تغییر چندانی نخواهد کرد [۸].

<sup>۱</sup>- California Bearing Ratio

بررسی قرار گرفت و با انجام آزمایش‌های تراکم و CBR به ارزیابی امکان بهسازی این خاک‌ها پرداخته شد.

## ۲- مصالح

### ۲-۱- رس کائولینیت

در این تحقیق از رس کائولینیت که به اصطلاح خاک چینی یا کائولن نامیده می‌شود به‌عنوان مصالح پایه استفاده شده است. این خاک دارای رنگی سفید و پودری شکل با فرمول شیمیایی  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$  است که ۹۹ درصد ذرات آن از ۲۰ میکرون کوچکتر هستند. از کاربردهای این خاک می‌توان به صنایع مرتبط با کاشی و سرامیک و لعاب چینی اشاره کرد. خواص، ترکیبات شیمیایی و خصوصیات معدنی این خاک به‌همراه مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۲-۲- تثبیت‌کننده‌ها

سیمان پرتلند تیپ ۱ و آهک زنده کم‌مابه، تثبیت‌کننده‌های مورد نظر در این تحقیق هستند. مهم‌ترین علل استفاده از این دو تثبیت‌کننده، در دسترس و مقرون به صرفه بودن این دو ماده است. آهک برای پی‌سازی در ساختمان‌های کم‌ارتفاع و راهسازی مناسب است و به‌عنوان تثبیت‌کننده در صنعت ساختمان کاربردهای فراوانی دارد. سیمان پرتلند تیپ ۱ نیز دیرگیر نیست که با توجه به در نظرگیری دوره عمل‌آوری سه روزه، مناسب است. همچنین این نوع سیمان از دسته سیمان‌های دارای خواص شیمیایی خاص نمی‌باشد. لذا اثرات هر دو ماده بر روی خاک مشهود است.

### ۲-۳- آلاینده‌ها

دو ماده آلاینده در این تحقیق به‌کار گرفته شده است. آنتراسن با فرمول مولکولی  $C_{14}H_{10}$  یک ماده آلی با پیوندهای حلقوی است. همچنین گلیسرول با فرمول مولکولی  $C_3H_8O_3$  یک ماده آلی پرکاربرد با پیوندهای

مشاهده شد که با افزایش درصد سیمان و ازدیاد زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک افزایش می‌یابد [۱۳].

در تحقیقی دیگر بر روی کائولینیت آلوده به آنتراسن که توسط سیمان پرتلند تثبیت شده بود، آزمایش‌های فشار تک‌محوری انجام گرفت. با توجه به عدم انحلال آنتراسن در آب، با نسبت وزنی ۱ به ۱۰۰ در استون حل شده و به خاک اضافه گردید. مشاهده شد که با افزایش درصد سیمان و ازدیاد زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک افزایش می‌یابد. ولی نمونه در بیشترین میزان مقاومت فشاری، کرنش کمتری را تحمل می‌کند که نشانگر افزایش سختی خاک تثبیت شده است [۱۴].

اثر مخلوط سیمان و آهک به نسبت ۱ به ۲، بر خصوصیات ژئوتکنیکی رس کائولینیت آلوده به ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۵]. اثربخشی این مخلوط به‌عنوان یک تثبیت‌کننده جدید برای رس آلوده به نفت خام نشان داده شد. همچنین طبق نتایج به‌دست آمده از مطالعات میکروسکوپ الکترونی مشاهده گردید که با افزودن مخلوط سیمان و آهک به رس آلوده به نفت خام، از میزان ساختار فولوکوله و لخته‌ای به‌وجود آمده به علت آلودگی، کاسته می‌شود.

مرور متون فنی نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات فراوانی در خصوص رفتار مکانیکی خاک‌های آلوده انجام گرفته است. با توجه به امکان آلودگی خاک توسط منابع مختلف، این مطالعات نیز در طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی و خاک‌ها صورت پذیرفته است. اما امکان استفاده از این مواد آلوده به‌عنوان مصالح قرضه در پروژه‌های عمرانی و ساخت‌وساز جاده‌ها و خاکریزها کمتر مورد توجه قرار داشته است. به این ترتیب، در تحقیق حاضر، امکان تثبیت رس کائولینیت آلوده با آنتراسن، به‌عنوان نماینده‌ای از مجموعه آلاینده‌های حلقوی، و گلیسرول، به‌عنوان نماینده‌ای از آلاینده‌های زنجیره‌ای، توسط دو تثبیت‌کننده رایج سیمان پرتلند و آهک مورد

زنجیره‌ای است. با حل ۴۰ گرم گلیسرول در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب، از گلیسرول ۴۰٪ استفاده شده است. شکل ۱، نمایی از این دو آلاینده را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- خواص شیمیایی، معدنی و فیزیکی کائولینیت

خصوصیات فیزیکی	ترکیبات معدنی		ترکیبات شیمیایی		
	مقدار	ماده	درصد	ماده	
ویژگی				L.O.I	۹±۱
				SiO <sub>2</sub>	۶۳±۱
G <sub>s</sub>	۲/۴۵	Quartz	۲۷±۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۴±۱
				Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۵۵±۰/۱
LL (%)	۴۶	Calcite	۲/۱±۰/۵	TiO <sub>2</sub>	۰/۰۴±۰/۰۱
				CaO	۱/۲±۰/۲
PL (%)	۳۳	Kaolinite	۶۲±۲	MgO	۰/۵۵±۰/۰۶
				Na <sub>2</sub> O	۰/۴±۰/۱
PI (%)	۱۳	Others	۶±۱	K <sub>2</sub> O	۰/۳±۰/۱



(ب)



(الف)

شکل ۱- آلاینده‌های آلی استفاده شده در پژوهش، (الف) گلیسرول و (ب) آنتراسن

مقادیر ۰/۰۶٪، ۰/۰۹٪ و ۰/۱۲٪ آلودگی، به ترتیب ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ میلی‌گرم آنتراسن به‌ازای هر کیلوگرم خاک است.

### ۳- روش انجام آزمایش‌ها

به منظور دست‌یابی به رطوبت بهینه و دانسیته بیشینه، آزمایش پروکتور اصلاح‌شده بر روی کائولینیت تمیز و آلوده به آلاینده آلی، طبق روش ASTM D1557 انجام گرفت و مقادیر مورد نظر تعیین شدند [۱۶]. برای ساخت نمونه‌ها، خاک رس کائولینیت با ۵٪ رطوبت بهینه و درصد وزنی مورد نظر از گلیسرول ۴۰٪ (۳، ۴/۵، ۶، ۷/۵ و ۹) یا آنتراسن (۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲) آلوده شد.

همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، برخلاف آلاینده زنجیره‌ای گلیسرول که به‌صورت مایع است؛ آلاینده حلقوی معطر آنتراسن، پولکی شکل و جامد می‌باشد. این ماده دارای قابلیت حل‌الیت بسیار کمی در آب است (۰/۰۷۵ میلی‌گرم در لیتر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد). به این ترتیب، ابتدا از استون با قابلیت حل نسبتاً خوب در آب (۱۰ گرم در لیتر در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد) استفاده شده است. سپس محلول آنتراسن حل‌شده در استون به خاک اضافه و مخلوط شد. با توجه به فرار بودن استون، هنگامی که خاک در معرض هوای آزاد قرار گرفت، به سرعت از خاک خارج و خاک آلوده به آنتراسن جهت ادامه کار تهیه گردید. لازم به توضیح است که منظور از

بوده است. پس از آن، نمونه‌های ترکیب شده با تثبیت کننده در محفظه عمل‌آوری قرار داده شدند و به مدت ۳ روز مورد عمل‌آوری قرار گرفتند.

برای جلوگیری از تغییر رطوبت در زمان عمل‌آوری، نمونه‌های ساخته شده درون کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در داخل اتاق مرطوب قرار گرفتند. این محفظه به صورت کاملاً بسته با رویه پلاستیکی جهت مشاهده نمونه‌ها است. دمای داخل آن تقریباً ثابت و برابر ۲۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی برای عمل‌آوری نمونه‌ها  $95 \pm 2$  درصد بوده است. همچنین برای ثابت ماندن درصد رطوبت عمل‌آوری، با قراردادن گونی خیس روی نمونه‌های قرار گرفته در کیسه پلاستیکی، شرایط مذکور برای دوره ۳ روزه عمل‌آوری فراهم شد. این روش عمل‌آوری در تحقیقات مشابه نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰].

در تحقیقات قبلی که برای بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند انجام شده است، به طور معمول، زمان‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز لحاظ گردیده است [۱۹]. در خصوص آهک نیز دوره‌های زمانی ۱، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است [۱۱]. براساس نتایج گزارش شده، عموماً در مورد آهک زنده بعد از ۱ روز و در خصوص سیمان تیپ یک بعد از ۳ روز، روند نرمال افزایش مقاومت با زمان عمل‌آوری قابل مشاهده است. به این ترتیب در تحقیق حاضر نیز از دوره عمل‌آوری سه روزه برای هر دو نوع تثبیت‌کننده استفاده شده است.

برای بررسی تأثیر آلاینده‌ها بر رفتار مکانیکی خاک، در تحقیق حاضر از دستگاه CBR و بارگذاری استاتیکی استفاده شده است، سرعت بارگذاری در این دستگاه ۱/۲۷ میلی‌متر بر ثانیه است [۲۱]. شکل ۲، نمایی از خاک تمیز و آلوده شده را نشان داده است. جدول ۲، متغیرهای به کار گرفته شده در پژوهش حاضر را ارائه می‌نماید. شکل ۳ نیز تصویری از انجام آزمایش CBR را نشان می‌دهد.

علت انتخاب حداقل ۳٪ گلیسرول، آن است که براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط ایالت نیوجرسی کشور ایالات متحده آمریکا، میزان آلودگی بیشتر از ۳٪ به‌عنوان زائادات خطرناک تلقی می‌شود [۱۷]. آنتراسن نیز توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA<sup>۲</sup>) به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی آلودگی زیست‌محیطی معرفی شده و از مفاد لیست نگرانی‌های خیلی بزرگ (VHCL<sup>۳</sup>) آژانس شیمی اروپا (ECHA<sup>۴</sup>) است [۱۸]. با توجه به بررسی پژوهش‌ها و گزارش‌های مبنی بر مقدار موجود آنتراسن در مناطق آلوده به این ماده آلی، بیشینه مقدار گزارش شده، ۰/۱۲ درصد انتخاب گردیده است [۱۸] و [۱۹].

برای ایجاد مخلوط همگن، ابتدا آلاینده مورد نظر به داخل خاک موجود در کیسه زیپ‌دار ریخته شد. پس از اختلاط کامل با خاک درون کیسه درب آن بسته شده و مجدداً به مدت ۱۰ دقیقه از روی کیسه چنان مخلوط شد تا ملاحظه شود که تمام ذرات خاک به طور همگن به آلاینده آغشته شده باشند. بعد از آن نیز به مدت ۷ روز در کیسه نگهداری شد تا واکنش‌های مورد نظر انجام شوند. این روش اختلاط در مطالعات دیگر بر خاک‌های آلوده نیز به کار گرفته شده است [۱۰]. پس از آن، خاک آلوده از کیسه خارج و با ۹۵٪ باقیمانده از رطوبت بهینه و درصد مورد نظر از سیمان پرتلند تیپ ۱ (۳، ۶ و ۹) یا آهک (۱۰، ۲۰ و ۳۰) ترکیب گردید.

خاک‌های آلوده عمل‌آوری شده یا تثبیت شده برای انجام آزمایش در سه لایه در قالب دستگاه CBR ریخته شده و به روش استاتیکی، تا حصول وزن مخصوص حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده، متراکم شدند. مهمترین علت در انتخاب روش استاتیکی برای تراکم لایه‌ها، عدم جدایش آلاینده از ذرات خاک

2- Environmental Protection Agency

3- Very High Concern List

4- European Chemicals Agency



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از نمونه‌های خاک، (الف) رس کائولینیت تمیز و (ب) رس کائولینیت آلوده شده

جدول ۲- متغیرهای به کار رفته در مطالعه آزمایشگاهی

نوع آزمایش		CBR
آلاینده (درصد وزنی)	گلیسرول	۳
		۴/۵
		۶
	آنتراسن	۷/۵
		۹
		۰/۰۶
تثبیت کننده (درصد وزنی)	آهک	۰/۰۹
		۰/۱۲
		۱۰
	سیمان پرتلند	۲۰
		۳۰
		۳
زمان عمل آوری (روز)		۶
زمان تثبیت (روز)		۷
دفعات تکرار		۳
		۲

کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. علت این موضوع در تفاوت ثابت دی‌الکتریک آب و گلیسرول است. ثابت دی‌الکتریک آب ۸۰ و این مقدار برای گلیسرول ۴۰٪ حدود ۶۷ است. کاهش ثابت دی‌الکتریک موجب کاهش در ضخامت لایه آب مضاعف ذرات رس شده و ساختار آن را لخته‌ای‌تر می‌نماید [۱۰، ۱۳ و ۱۹]. لذا میزان تخلخل در ساختار لخته‌ای و فولوکوله افزایش پیدا می‌نماید؛ که سبب کاهش

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

##### ۴-۱- بررسی نتایج آزمایش‌های تراکم

افزودن گلیسرول به خاک تمیز موجب بروز تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌گردد. شکل ۴، نتایج آزمایش‌های تراکم اصلاح شده بر رس تمیز و آلوده به گلیسرول را نشان می‌دهد. بر این اساس، افزودن گلیسرول به میزان کم (۳ درصد) به خاک طبیعی موجب

آنها بر یکدیگر و کاهش فضای خالی بین آنها است که باعث افزایش وزن واحد حجم خشک حداکثر و کاهش در رطوبت بهینه می‌شود. اما مجدداً در درصدهای بالا (۷/۵ و ۹)، وزن مخصوص، کاهش و درصد رطوبت بهینه، افزایش یافته است. دلیل این موضوع آن است که در مقادیر بالای آلاینده، نقش فیزیکی آن نیز تعیین‌کننده می‌گردد. به عبارت دیگر، در درصدهای زیاد، آلاینده نقش پرکننده فضاهای خالی را ایفا نموده و با توجه به کمتر بودن دانسیته آن نسبت به خاک، طبیعتاً وزن واحد حجم مجموعه، کاهش خواهد یافت.

نتایج به دست آمده در این تحقیق در تطابق با مطالعات میکروسکوپ الکترونی انجام شده توسط سایر محققین بر رس کائولینیت آلوده به گلیسرول است. طبق این تحقیقات، نسبت تخلخل خاک آلوده به ۶٪ گلیسرول کاهش می‌یابد. این موضوع به ویسکوزیته گلیسرول که سبب کاهش اصطکاک بین ذرات و امکان حرکت آنها بر روی یکدیگر یا درون حفرات است مرتبط شد [۱۳].

شکل ۵، نتایج آزمایش تراکم را به روی خاک رس کائولینیت آلوده به آنتراسن نمایش می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که در هر سه درصد مورد بررسی، با افزایش مقدار آنتراسن، کاهش در وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه اتفاق افتاده است. علت این موضوع را می‌توان در ثابت دی‌الکتریک آلاینده آنتراسن یافت. ثابت دی‌الکتریک آنتراسن برابر ۲/۳۵ است که بسیار کمتر از مقدار نظیر برای آب است. به این ترتیب افزودن این ماده به خاک به شدت موجب کاستن ضخامت لایه آب مضاعف شده و ساختار آن را فولوکوله می‌نماید. بر این اساس، تخلخل خاک افزایش خواهد یافت و این امر سبب ازدیاد درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر آن می‌گردد. این روند تا بیشترین مقدار درصد آنتراسن اضافه شده یعنی ۰/۱۲ ادامه پیدا می‌کند.

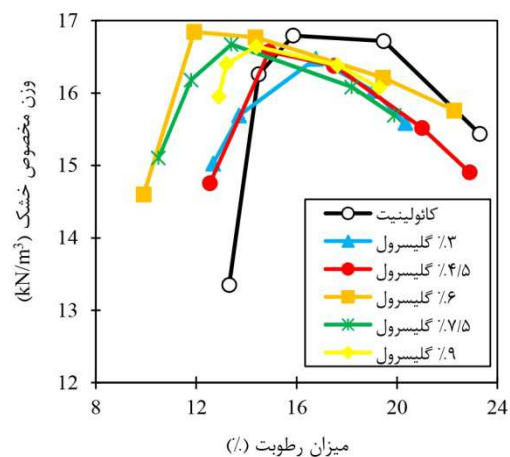
بررسی میکروسکوپی تغییرات تخلخل در رس کائولینیت آلوده به آنتراسن در تحقیقاتی انجام و گزارش

وزن مخصوص حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه خواهد شد.



شکل ۳- تصویری از نحوه انجام آزمایش CBR

این روند با ازدیاد درصد گلیسرول به ۴/۵ کماکان مشاهده می‌شود. اما همانطور که شکل ۴ نشان داده است با افزایش میزان گلیسرول از ۴/۵ تا ۶ درصد، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش و رطوبت بهینه کاهش یافته است.



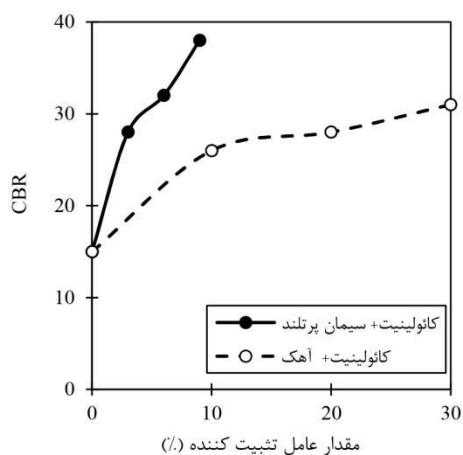
شکل ۴ نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده بر رس کائولینیت تمیز و آلوده به گلیسرول

نکته مهم آن است که تفاوت ثابت دی‌الکتریک گلیسرول با آب، زیاد نیست و بنابراین عامل ثانویه‌ای موجب غلبه بر این موضوع شده است. عامل ثانویه مذکور، پوشانده شدن سطح ذرات رسی با گلیسرول در درصدهای بالاتر و در نتیجه کاهش اصطکاک بین ذرات خاک، لغزش



میزان سیمان بیشتر باشد، خاک در مقادیر نفوذ یکسان، تنش بیشتری را تحمل می‌کند.

براساس نتایج آزمایش CBR به‌طور تقریبی مشاهده می‌شود که افزودن ۳۰٪ آهک به کائولینیت تقریباً با اثرات بهسازی توسط ۶٪ سیمان پرتلند برابر است. این موضوع، عملکرد مناسب‌تر سیمان پرتلند در بهسازی نمونه‌های خاک تمیز را نشان می‌دهد.

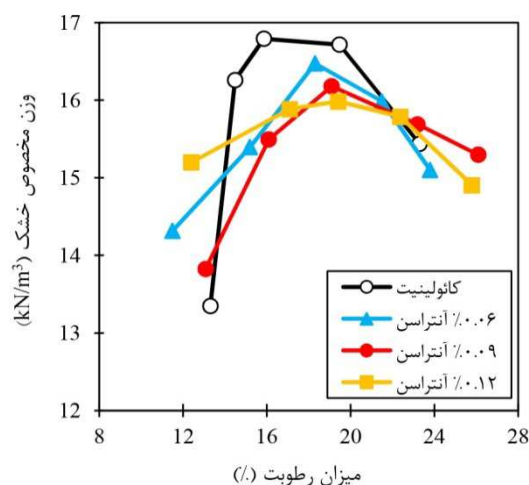


شکل ۶- تأثیر درصد تثبیت‌کننده بر نشانه باربری کالیفرنیا خاک رس کائولینیت

#### ۴-۲-۲- تأثیر آلودگی بر CBR رس کائولینیت

شکل ۷، تغییرات CBR رس کائولینیت آلوده به درصد‌های مختلف از دو آلاینده موردنظر در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به ویسکوزیته و لزجت بالای گلیسرول که موجب روان‌کاری ذرات می‌شود (۴/۳۱ cP در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد)، افزایش درصد آن در خاک تا ۳ و حتی ۶ درصد، سبب نفوذ ساده‌تر پیستون در نمونه شده و عدد CBR را نسبت به خاک تمیز کاهش می‌دهد. افزودن ماده آلی به خاک‌های چسبنده منجر به واکنش ذرات خاک با ماده آلی می‌شود که به‌عنوان واکنش‌های فیزیکی- شیمیایی موسوم هستند. اثر این واکنش‌ها منجر به تغییراتی در ضخامت لایه مضاعف و فولوکوله شدن ساختمان خاک می‌گردد. ماده آلی بین ذرات نقش بسیار مهمی در تغییرات مقاومت دارد. کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی بوده و خاصیت جذب آب به‌وسیله آن‌ها به

شده است [۱۹]. طبق نظر ایشان، اضافه شدن آنتراسن به کائولینیت موجب افزایش ساختار لخته در آن می‌گردد. علت این امر، تفاوت زیاد بین ثابت دی‌الکتریک آنتراسن و آب گفته شده است. در نتیجه، افزایش درجه لخته‌سازی، نسبت تخلخل در خاک افزایش پیدا خواهد کرد که با نتایج تحقیق حاضر در تطابق است.



شکل ۵- نتایج آزمایش تراکم اصلاح شده بر رس کائولینیت تمیز و آلوده به آنتراسن

#### ۴-۲-۴- بررسی نتایج آزمایش‌های CBR

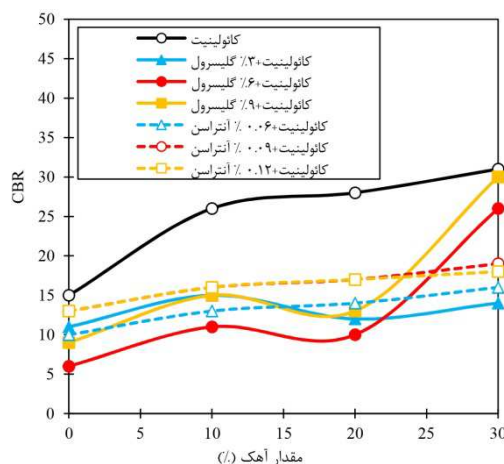
با انجام آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا، عدد CBR برای کائولینیت تمیز، آلوده و تثبیت شده تعیین شد. این سنجش در زمان عمل‌آوری مشابه و شرایط محیطی کاملاً یکسان صورت پذیرفته است.

#### ۴-۲-۴-۱- تأثیر تثبیت‌کننده‌ها بر CBR خاک طبیعی

شکل ۶ تغییرات CBR رس کائولینیت تمیز بهسازی شده با سیمان پرتلند و آهک را نشان می‌دهد. بر این اساس، هرچه میزان آهک در خاک تمیز افزایش پیدا کرده است، نیروی فشاری بیشتری برای وارد کردن پیستون به داخل نمونه خاک در مقادیر نفوذ یکسان لازم است.

قبل از نفوذ ۱۵ میلی‌متری، هیچ‌یک از نمونه‌های بهسازی‌شده با آهک، دچار ترک عمیق در محدوده نفوذ پیستون و کاهش مقاومت نشدند. در نمونه‌های بهسازی‌شده با سیمان پرتلند نیز مشاهده شد که هرچه

گلیسرول چنین نیست. به طوری که نرخ افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با ۲۰ تا ۳۰ درصد آهک، به مراتب بیش از مقادیر مابین ۱۰ تا ۲۰ درصد است. این موضوع به ویژه در مورد خاک آلوده به ۶ یا ۹٪ گلیسرول وضوح بیشتری دارد. در خاکی که ۳٪ آلودگی دارد، نرخ ازدیاد عدد CBR با تثبیت به کمک آهک کمتر از روند مشاهده شده برای ۶ یا ۹٪ آلودگی است. همچنین با مشاهده شکل ۷ می توان دریافت که خاک آلوده به ۳٪ گلیسرول حساسیت چندانی به عمل آوری با درصد آهک بیشتر نشان نداده و عدد CBR برای ۱۰ درصد آهک اضافه شده حداکثر است. اما در درصدهای آلودگی بیشتر، برای حصول به بیشینه CBR، نیاز به استفاده از ۳۰ درصد آهک خواهد بود.



شکل ۷- تأثیر آهک بر CBR خاک رس کائولینیت آلوده به گلیسرول و آنتراسن

شکل ۸، تأثیر سیمان پرتلند بر CBR خاک رس کائولینیت آلوده شده با آلاینده های مدنظر تحقیق حاضر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش مقدار سیمان پرتلند عدد CBR خاک افزایش پیدا می کند. روند تغییرات تقریباً مشابه عملکرد آهک است. در اینجا شیب افزایش مقاومت، از ۳ تا ۶ درصد سیمان پرتلند، بیش از شیب مابین ۶ تا ۹ درصد است. این موضوع به خصوص در مورد خاک آلوده به ۶ یا ۹٪ گلیسرول نمود بیشتری دارد. روند افزایش عدد CBR

میزان بارالکتریکی و سطح ویژه آن ها مرتبط است [۲۲]. خاک های رسی از طریق کاتیون هایی مانند  $Na^+$ ،  $K^+$  و  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  مواد آلی را جذب می کنند. بخشی از مواد آلی به علت عدم وجود کانی های لازم و نیز سطح ویژه مناسب، جذب ذرات رس شده و در فضای بین ذرات باقی می ماند.

جذب مواد آلی، موجب تغییراتی در ساختمان خاک می گردد؛ لیکن ماده آلی موجود در فضای بین ذرات در تغییرات مکانیکی مانند سهولت جابه جایی ذرات مؤثر می باشد که می توان آن را به عنوان عاملی مؤثر در کاهش مقاومت خاک آلوده به گلیسرول دانست. از طرف دیگر، با توجه به محصور بودن خاک در قالب و عدم امکان زهکشی سیال و همچنین به علت مدول حجمی بالای مایع به نسبت خاک، در مقادیر بالاتر گلیسرول (۹ درصد وزنی)، عدد CBR مجدداً افزایش می یابد. به این ترتیب، در خاک آلوده به گلیسرول، تا ۶ درصد وزنی آلاینده، کاهش و سپس افزایش در عدد CBR خاک مشاهده می گردد.

با توجه به شکل ۷، کاهش در عدد CBR زمانی که رس کائولینیت به آنتراسن نیز آلوده شده است دیده می شود. با افزایش درصد آنتراسن در خاک تا ۰/۰۶ درصد، کاهش و سپس در درصدهای ۰/۰۹ و ۰/۱۲، افزایش در نسبت باربری کالیفرنیا اتفاق افتاده است؛ هرچند که هنوز از CBR خاک تمیز کمتر است. علت کاهش اولیه، روان کاری سطح ذرات توسط آنتراسن است که حرکت آنها در فضای خالی مابین را تسهیل می نماید. اما در درصدهای بالاتر، به دلیل محصور بودن نمونه در قالب و شرایط زهکشی شده به همراه مدول حجمی بالاتر سیال نسبت به خاک، مقاومت در برابر نفوذ پیستون افزایش یافته و عدد CBR افزایش می یابد.

بر اساس شکل ۷، در خصوص خاک آلوده با آنتراسن، شیب ازدیاد مقاومت با افزایش درصد آهک تقریباً ثابت است. اما این روند در مورد خاک آلوده به

مقدار آلاینده افزایش یافته است. روند طی شده در خصوص آلاینده آنتراسن نیز تقریباً مشابه آهک است.

در شکل ۹، نمایی از سطح نمونه‌های آلوده به آنتراسن و گلیسرول پس از انجام آزمایش CBR ارائه شده است. همانطور که شکل نشان می‌دهد، نفوذ پیستون به درون قالب حاوی رس آلوده به گلیسرول با وقوع ترک‌هایی با زاویه حدوداً ۱۲۰ درجه در سطح نمونه‌ها همراه است. اما در نمونه‌های آلوده به آنتراسن، چنین ترک‌هایی به‌ویژه در مقادیر آلودگی بیشتر مشاهده نشد.

به‌طور کلی در آزمایش‌های انجام‌شده، نمونه‌های آلوده به آنتراسن زودتر به حد گسیختگی رسیدند. به‌عبارت دیگر، با ازدیاد میزان آنتراسن موجود در رس کائولینیت، خاک آلوده‌شده در میزان نفوذ کمتری به حد باربری نهایی خود رسید. گسیختگی در خاک آلوده به گلیسرول به شکل ترک‌های سطحی تا عمیق مشاهده گردید (شکل ۹-الف). ولی در خاک آلوده به آنتراسن، دامنه تغییر شکل نمونه بر اثر نفوذ پیستون، از ترک‌های عمیق تا شکلی مشابه برش سوراخ‌شدگی برحسب درصد آلاینده دیده شد (شکل ۹-ب).



(ب)

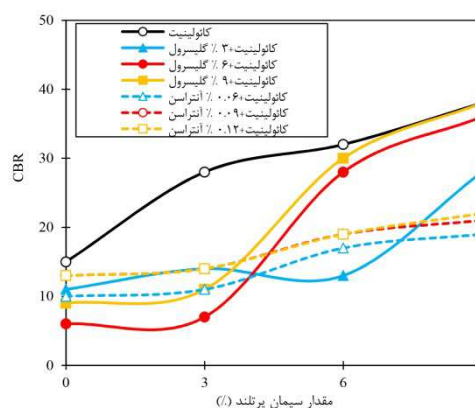


(الف)

شکل ۹- نمایی از سطح نمونه رس آلوده بعد از انجام آزمایش CBR (الف) گلیسرول و (ب) آنتراسن

وزنی به رس کائولینیت، رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم کاهش یافت. با ازدیاد گلیسرول تا ۰.۶٪، با توجه به روان کاری بیشتر سطح ذرات و

خاک آلوده به گلیسرول در خاکی که ۳ درصد آلودگی دارد، بطئی‌تر از روند ۰.۶٪ و ۰.۹٪ آلودگی است و دیرتر به نقطه اوج می‌رسد. براساس شکل ۸، خاک آلوده به ۰.۳٪ گلیسرول به حداقل ۰.۹٪ سیمان برای افزایش CBR در محدوده بازه زمانی ۳ روز عمل‌آوری نیاز دارد. به‌عبارت دیگر، ۰.۳٪ سیمان، مقدار مناسبی برای تثبیت خاک آلوده به گلیسرول نیست و اثر تثبیت در درصدهای ۶ تا ۹ رضایت‌بخش‌تر است.



شکل ۸- تأثیر تثبیت با سیمان پرتلند بر نسبت باربری کالیفرنیا در رس کائولینیت آلوده به گلیسرول و آنتراسن

افزودن سیمان پرتلند و افزایش چسبندگی ناشی از آن، سعی در جبران پیوندهای شکسته‌شده در خاک توسط آلاینده حلقوی آنتراسن دارد. هرچه میزان سیمان پرتلند بیشتر می‌شود، تأثیر تثبیت‌کننده نسبت به تأثیر

## ۵- نتیجه گیری

۱- به‌دلیل کمتر بودن ثابت دی‌الکتریک گلیسرول ۰.۴۰٪ نسبت به آب، با افزودن گلیسرول تا ۰.۴/۵٪

گلیسرول، حداکثر CBR متناظر با استفاده از ۳۰٪ آهک است. برای خاک آلوده به آنتراسن در همه غلظت‌ها، این روند همواره با ازدیاد درصد آهک به صورت افزایشی مشاهده شد.

۶- در رس آلوده به ۳، ۶ و ۹٪ گلیسرول، مقدار CBR حداکثر با اضافه شدن ۹٪ سیمان پرتلند (که حداکثر مقدار وزنی این تثبیت کننده در تحقیق حاضر است) به دست آمد. در خصوص آلودگی با آنتراسن، مجدداً روند منظم افزایش مقاومت با ازدیاد درصد سیمان پرتلند، در تمامی غلظت‌ها دیده شد.

۷- وضعیت نمونه آلوده به گلیسرول بعد از آزمایش‌های CBR، همراه با ترک‌های سطحی و یا عمیق بر روی نمونه (با زاویه ۱۲۰ درجه) است. در نمونه‌های آلوده به آنتراسن، این وضعیت از ترک‌های عمیق تا حالتی مشابه برش سوراخ‌شدگی متغیر بود.

۸- هر دو عامل تثبیت‌کننده سیمان و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن و گلیسرول را دارا هستند. اما تأثیر سیمان در بهسازی نمونه‌های آلوده بیشتر از آهک است.

امکان حرکت و لغزش آنها بر یکدیگر، رطوبت بهینه کاهش و وزن واحد حجم حداکثر، افزایش پیدا کرد. در مقادیر بالاتر از ۶٪ وزنی، با توجه عملکرد آلاینده به‌عنوان ماده پرکننده، مجدداً وزن مخصوص، کاهش و رطوبت بهینه، افزایش یافت. به این ترتیب، بیشه وزن مخصوص خشک حداکثر و کمترین رطوبت بهینه، در میزان ۶٪ وزنی گلیسرول ایجاد گردید.

۲- با افزودن ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ درصد آنتراسن به رس کائولینیت، به‌طور مرتب درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم حداکثر خاک آلوده کاهش پیدا کرد.

۳- در بازه عمل‌آوری ۳ روزه مدنظر این تحقیق، افزودن ۶ درصد سیمان پرتلند نوع یک، افزایش CBR هم‌ارز با ۳۰ درصد آهک بر روی خاک رس کائولینیت تمیز ایجاد کرد.

۴- افزودن گلیسرول تا ۶٪ وزنی به رس کائولینیت تمیز، CBR را کاهش داد. از ۶ تا ۹٪ گلیسرول، روند کاهش به افزایش تبدیل شد. ازدیاد درصد آنتراسن تا ۰/۰۶٪ وزنی نیز CBR را کاهش داد؛ ولی با افزایش بیشتر به ۰/۰۹٪ یا ۰/۱۲٪، روند افزایشی مشاهده نشد.

۵- در رس آلوده به ۳٪ گلیسرول و تثبیت شده با آهک، حداکثر CBR در مقدار آهک ۱۰٪ وزنی تعیین شد. اما در رس آلوده به ۶٪ یا ۹٪

## مراجع

- [1] Khamchian, M., Charkhabi, A. H., & Tajik, M. (2007). "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, 89(3-4), 220-229.
- [2] Ijimdiya, T. S. (2012). "Effect of oil contamination on particle size distribution and plasticity characteristics of lateritic soil", *Advanced Materials Research*, 367, 19-25.
- [3] Bell, F. G. (1996). "Lime stabilization of clay minerals and soils", *Engineering Geology*, 42(4), 223-237.
- [4] Osinubi, K. J. (1998). "Influence of compactive efforts and compaction delays on lime-treated soil" *Journal of Transportation Engineering*, 124(2), 149-155.
- [5] Hamidi, A., & Jedari, C. (2013). "Investigating the consolidation behavior of contaminated clay", *Sharif Civil Engineering Journal*, 29-2(2), 29-35.
- [6] Zanjarani Farahani, M., & Hamidi, A. (2014). "Consolidation behavior and geotechnical parameters of oil contaminated kaolinite clay", *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 4(8), 1-15.

- [7] Akinwumi, I. I., Daniel, D. & Obianigwe, N. (2014), "Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay", *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 3(4): 816-24.
- [8] Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite", *Engineering Geology*, 166, 11-16.
- [9] Estabragh, A.R., Rafatjo, H., & Javadi, A. A. (2014). "Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques", *Geosynthetics International*, 21(3), 233-243.
- [10] 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.
- [11] Mohammadi, S. D., & 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.
- [12] Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., & Moghaddasnejad, F. (2018). "Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and cement kiln dust", *Amir Kabir Journal of Civil Engineering*, 10.22060/CEEJ.2018.15100.5829.
- [13] 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), 04015157.
- [14] Estabragh, A. R., Kholoosi, M., Ghaziani, F., & Javadi, A. A. (2018). "Mechanical and leaching behavior of a stabilized and solidified anthracene-contaminated soil", *Journal of Environmental Engineering* 144(2), 04017098.
- [15] Oluwatuyi, O., Ojuri, O., & Khoshghalb, A. (2020). "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 160-167.
- [16] ASTM, D. (2012). 1557. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. *West Conshohocken, USA*.
- [17] Pincus, H. J., Meegoda, N. J., & Ratnaweera, P. (1995). "Treatment of oil contaminated soils for identification and classification", *Geotechnical Testing Journal*, 18(1), 41-49.
- [18] Delgado, L., & Romero, E. M. (2013). "Removal of anthracene from recently contaminated and aged soils", *Water Air and Soil Pollution*, 224, 1420-1427.
- [19] Kholoosi, M. M., Estabragh, A. R., & Abdollahi, J. (2017). "Investigation of the effect of cement on the stabilization of contaminated soil with anthracene", *Sharif Civil Engineering Journal*, 33-2(4.1), 39-48.
- [20] Soltaninejad, S., Hamidi, S., & Marandi, S. M. (2019). "Effect of type and percentage of clay minerals on the pozzolanic stabilization of clayey soils (macrostructure and microstructure study)", *Sharif Civil Engineering Journal*, 35-2(4.1), 3-12.
- [21] ASTM, D. (2014). 1883 Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- [22] Ratnaweera, P., & Meegoda, J. (2006). "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 133-140.