

بررسی رفتار و پارامترهای تحکیمی خاک رس کائولینیت آلوده به مشتقات نفتی

معصومه زنجرانی فراهانی^۱، امیر حمیدی^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه خوارزمی

^۲دانشیار مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه خوارزمی

*hamidi@khu.ac.ir

دریافت بهمن ۱۳۹۳، پذیرش مرداد ۱۳۹۴

چکیده

آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به مواد ارگانیک و سمی، یک مشکل شایع و زیست محیطی است. در این میان، مواد نفتی یکی از مهمترین آلوده‌کننده‌های محیط زیست به حساب می‌آیند. پژوهش حاضر به بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های رسی آلوده به نفت و مشتقات آن پرداخته است. هدف اصلی، تعیین پارامترهای مرتبط با میزان و سرعت نشست خاک آلوده به سیالات نفتی می‌باشد. جهت تحلیل، اثر متغیرهای مختلفی از جمله درصد آلودگی، نوع آلاینده و درصد تراکم بر رفتار تحکیمی رس کائولینیت آلوده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد آلودگی، میزان تراکم پذیری خاک آلوده نسبت به خاک تمیز افزایش می‌یابد، اما پارامترهای مرتبط با سرعت تحکیم از جمله ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری با ازدیاد درصد آلاینده کاهش خواهند یافت. میزان کاهش مرتبط با نوع آلاینده می‌باشد. ضریب تحکیم رس آلوده به نفت خام با افزایش درصد آلودگی از صفر تا ۹، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بسته به تراکم نسبی خاک کاهش می‌یابد حال آنکه در رس آلوده به گازوئیل، با افزایش صفر تا ۹ درصدی آلودگی، میزان کاهش در حدود ۵۰ درصد خواهد بود.

واژه های کلیدی: رس کائولینیت، تحکیم، ضریب تحکیم، ضریب نفوذپذیری، آلاینده نفتی.

۱. مقدمه

خاک‌ها با انواع و ترکیبات متعدد در مناطق مختلف، مخلوطی از مواد معدنی و آلی هستند که از تجزیه و تخریب سنگ‌ها در نتیجه هوازدگی بوجود می‌آیند. خاکها به دلیل عمده فعالیت‌های انسانی دچار آلودگی می‌شوند. اکثر این آلودگی‌ها به علت بروز تصادفات وسایل نقلیه حامل سیالات آلاینده، نشت شیرابه از کف و جداره مدافن پسماندها و زباله های شهری و یا نشت مواد نفتی از خطوط و شریانهای انتقال نفت و گاز به داخل محیط متخلخل خاک اتفاق می افتد. مواد نفتی و مشتقات آنها در اثر حمل و نقل یا ذخیره سازی موجب بروز آلودگی در خاکها می شوند. هر قدر مواد نفتی به عمق بیشتری از خاک نفوذ کنند، رفع آلودگی و لکه نفتی پروسه مشکل تر و پیچیده تری را به دنبال خواهد داشت. آلودگی‌های نفتی یک پیامد اجتناب ناپذیر از افزایش سریع جمعیت و فرآیند صنعتی شدن است که به دنبال آن آلودگی خاک توسط مواد هیدروکربنی نفتی به شکل وسیع در اطراف تاسیسات اکتشاف و پالایش و به شکل موضعی در مسیرهای انتقال این مواد قابل مشاهده است. نشت آلاینده نفتی موجب آلودگی خاک و سبب تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود. تغییر در خواص فیزیکی خاک‌های آلوده به نفت و مشتقات آن، پایداری شيروانی‌ها، ظرفیت باربری پی‌ها و دیگر سازه‌های بنا شده بر آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به نفت خیز بودن کشور ایران و مجاورت با خاک و ضرورت احداث پالایشگاه‌ها و سازه‌های عظیم روی این نوع بستر، مطالعه رفتار مکانیکی خاک‌های آلوده به منابع نفتی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این زمینه تحقیقاتی صورت گرفته است که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط السند و همکاران [۱] اشاره کرد. ایشان با بررسی رفتار تحکیمی رس‌های آلوده به نفت دریافتند که با افزایش آلودگی نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد. خامه چیان و همکاران [۲] طی تحقیق بر روی خواص ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای و رسی به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد نفت، چگالی خشک حداکثر، درصد رطوبت بهینه و نسبت تخلخل خاک کاهش خواهد یافت. عبادی و کرمانی [۳] نیز با مطالعه خاک رس آلوده به نفت، کاهش نفوذپذیری و افزایش تراکم پذیری خاک را مشاهده کردند. راتناواریا و میگودا [۴]، الرحمن و همکاران [۵]، معاونیان و یثربی [۶]، حمیدی و جداری [۷]، خسروی و همکاران [۸] و استبرق و همکاران [۹] از دیگر محققینی می‌باشند که در این زمینه به مطالعه و بررسی پرداخته و به نتایجی مشابه موارد یاد شده دست یافتند.

هدف اصلی در پژوهش پیش روی، ارزیابی رفتار تحکیمی خاک رس با کانی کائولینیت آلوده به نفت سفید و گازوئیل است. در این راستا، نمونه‌های خاک رس کائولینیت با درصد آلودگی صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد آلاینده نفتی در دو درصد تراکم ۷۰ و ۹۰ درصد تهیه شده و مورد آزمایش تحکیم قرار گرفته است.

۲. روش کار

به منظور انجام آزمایش تحکیم، خاک رس با کانی کائولینیت با درصدهای مختلف نفت سفید و گازوئیل آلوده شده است. جدول ۱ و ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی آلاینده و خاک رس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی رس کائولینیت

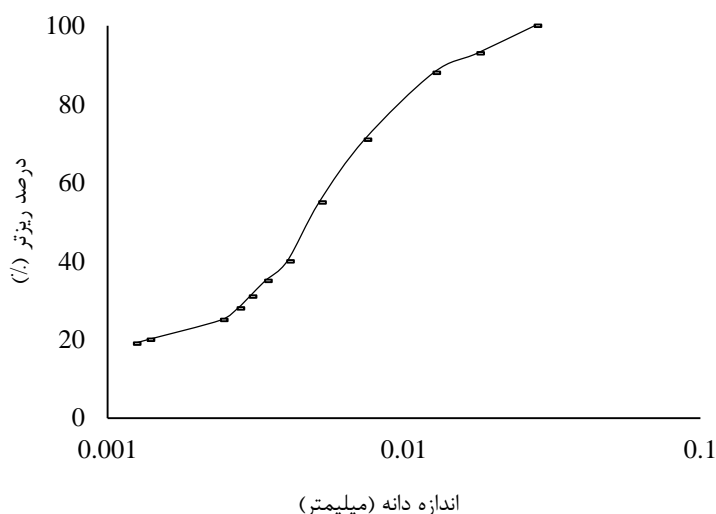
خاک	کائولینیت
سیستم طبقه بندی خاک	CL
حد روانی (درصد)	۳۲
حد خمیری (درصد)	۲۲
نشانه خمیری (درصد)	۱۰

۲/۶۶	چگالی ویژه
۱۶۸۴	دانسیته خشک حداکثر (kg/m^3)
۱۹	رطوبت بهینه (درصد)

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مشتقات نفتی

گازوئیل	نفت سفید	آلاینده نفتی
۸۳۵	۷۹۵	چگالی (kg/m^3)
۲/۰	۱/۸	ثابت دی الکتریک (-)
$۱۳/۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۷۱ \times ۱۰^{-۶}$	ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد (kPa.s)

خاک رس مصرفی از کارخانه صنایع کاشی و سرامیک سازی و نفت سفید و گازوئیل مورد استفاده جهت آلوده کردن خاک، از جایگاه عرضه سوخت تهیه شده است. شکل (۱) دانه بندی خاک رس کائولینیت که بر اساس استاندارد ASTM D422-63 [۱۰] تعیین شده است را نشان می دهد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک رس کائولینیت

به منظور بررسی رفتار خاک آلوده و ارزیابی پارامترهای تحکیمی آن، آزمایش‌های مختلفی در دو بخش فیزیکی و مکانیکی بر روی خاک رس انجام شده است. آزمایش‌های فیزیکی به منظور دستیابی به خواص فیزیکی خاک انجام شده است که شامل آزمایش‌های تراکم اصلاح شده می باشد که مطابق استاندارد ASTM D698-78 [۱۱] صورت گرفته است. آزمایش‌های مکانیکی جهت ارزیابی رفتار و پارامترهای تحکیمی خاک آلوده انجام شده است. بدین منظور آزمایش تحکیم یک بعدی (ادئومتری) بر روی نمونه‌های خاک آلوده و تمیز بر اساس استاندارد ASTM D2435-04 انجام گرفته است [۱۲]. در خصوص هر یک از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیک انجام شده در این تحقیق، برای هر نسبت تراکم، نوع و درصد آلاینده، حداقل دو آزمایش انجام گرفته و میانگین نتایج گزارش شده است. این موضوع موجب کم شدن خطای آزمایشگاهی شده و باعث می شود حساسیت نتایج نسبت به خطای آزمایشگاهی کاهش یابد.

۱-۲ آزمایش تراکم اصلاح شده

آزمایش تراکم اصلاح شده جهت تعیین وزن مخصوص حداکثر و رطوبت بهینه خاک، بر روی نمونه های رس آلوده به درصد های صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد نفت سفید و گازوئیل انجام شده است.

۲-۲ آزمایش تحکیم

شکل (۲) نمایی از دستگاه ادنومتر مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. این دستگاه از بخشهای مختلفی شامل ۱. وزنه تعادل ۲. اهرم انتقال نیرو ۳. میله بارگذاری ۴. بخش انتقال نیرو ۵. نشانگر تغییر مکان ۶. سلول تحکیم ۷. نشانگر تراز اهرم و ۸. بدنه اصلی تشکیل شده است. پس از اینکه نمونه با نسبت تراکم مورد نظر (۷۰ یا ۹۰ درصد) ساخته شد داخل سلول تحکیم قرار داده شده و سپس گیج اندازه گیری تغییر مکان که دقت آن برابر ۰/۰۱ میلی متر می باشد روی درپوش برنجی قرار داده می شود تا در حین اشباع نمونه بتوان تغییر مکان نمونه را به صورت دقیق اندازه گرفت و تخلخل اولیه نمونه را به صورت دقیق محاسبه نمود. پس از صفر کردن عدد گیج تغییر مکان، آب مقطر در داخل سلول تحکیم ریخته شد و عملیات اشباع سازی نمونه شروع می شود. پس از اشباع کامل نمونه، بارگذاری آن آغاز می گردد. گام های بارگذاری نمونه ها با دو برابر کردن بار در هر مرحله انجام می شود. در این تحقیق از ضریب اهرم ۱ به ۱۰ استفاده شده است. برای شروع بارگذاری، ابتدا رینگ حاوی نمونه را درون سلول تحکیم قرارداده شده و پیستون بارگذاری روی نمونه قرار می گیرد. سلول، در مکان مخصوص آن گذاشته می شود. سپس پیچ زیر اهرم انتقال نیرو آنقدر چرخانده می شود تا اهرم در حالت تراز قرار بگیرد. سیستم انتقال نیرو در مکان مورد نظر قرار داده شده و با تغییر مکان، وزن ۵ تعادل به نحوی قرار می گیرد که اهرم انتقال نیرو بدون وجود پیچ زیر اهرم در حالت تراز بایستد. این حالت نشان می دهد که هیچ فشاری به نمونه وارد نمی شود و نمونه تنها تحت تنش ناشی از وزن پیستون بارگذاری قرار دارد. بعد از انجام مراحل فوق، نشانگر تغییر مکان در محل مخصوص تعبیه شده و با چرخاندن صفحه روی آن، نشانگر صفر می شود. حال دستگاه آماده بارگذاری و انجام آزمایش خواهد بود.

در تحقیق حاضر برای ساخت نمونه، به مقدار نیاز از خاک مورد نظر درون آون خشک و از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده است. خاک عبوری از الک با درصد های صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد گازوئیل و نفت سفید به روش دستی مخلوط شده و مدت سه روز در محلی گذاشته شده است. این مدت زمان، مدت زمان عمل آوری نمونه نامیده می شود و جهت انجام واکنش های احتمالی بین دانه های خاک و آلاینده می باشد. پس از گذشت مدت زمان سه روز، نمونه هایی با نسبت تراکم (γ/γ_{max}) برابر ۷۰ و ۹۰ درصد ساخته شده و جهت اشباع کامل به مدت ۹۶ ساعت در سلول تحکیم پر از آب قرار داده شده است. پس از اطمینان از اشباع کامل نمونه ها، آزمایش تحکیم با اعمال بار ۲ کیلوگرم که تنشی معادل ۵/۹ کیلو پاسکال می باشد، آغاز شده است. سپس تغییر شکل نمونه در زمان های صفر، ۶، ۱۵ و ۳۰ ثانیه و ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۵ و ۳۰ دقیقه قرائت می شود. در سیکل های بعدی بارگذاری، بار ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ کیلوگرم به نمونه اعمال شده و با ثبت مقادیر تغییر شکل خاک، منحنی تغییر شکل - لگاریتم زمان و حجم ویژه - تنش سربار ترسیم می شود. با استفاده از این منحنی ها می توان ضرایب ضریب فشردگی (C_c) ، ضریب تحکیم (C_v) و ضریب نفوذپذیری (k) را استخراج کرد.

با توجه به آنکه پدیده تحکیم به عنوان یک پروسه زمان مند مطرح می باشد، ضریب تحکیم نرخ وقوع تحکیم در لایه رسی را براساس رابطه زیر بیان می نماید:



شکل (۲): نمای کلی دستگاه ادنومتر استفاده شده در این تحقیق

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2} \quad (1)$$

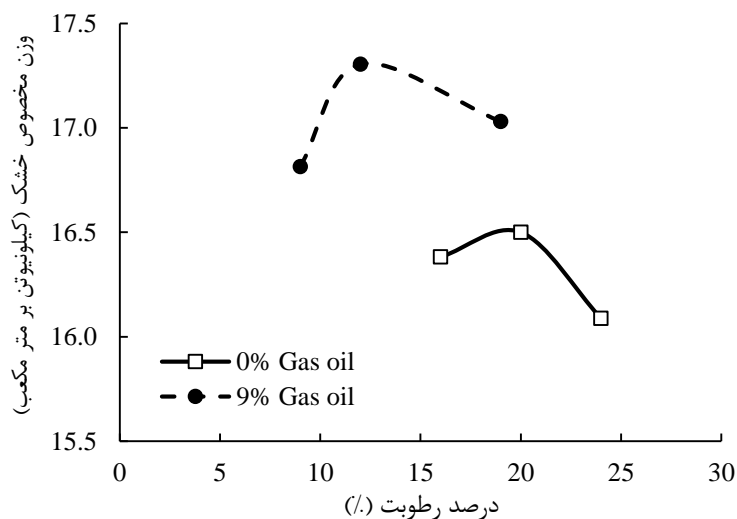
در این رابطه T_v فاکتور بدون بعد زمان، t زمان سپری شده از شروع تحکیم لایه رسی و H طول کوتاه ترین مسیر زهکشی آب حفره ای است. بر اساس ضریب تحکیم (c_v)، ضریب نفوذپذیری خاک (k) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (2)$$

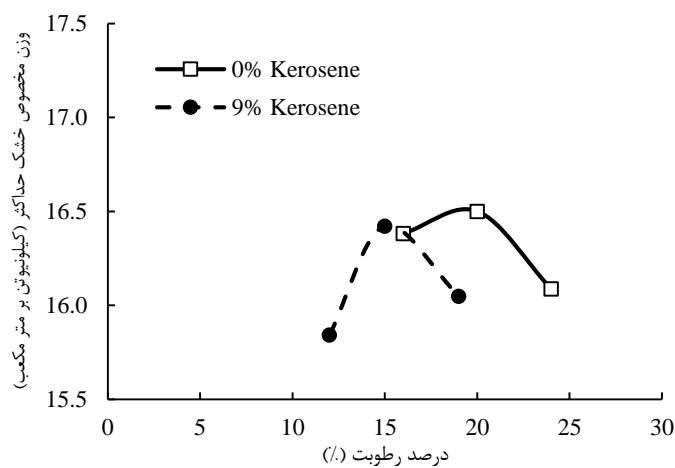
در این رابطه m_v ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی خاک و γ_w وزن مخصوص آب است.

۳. نتایج و بحث

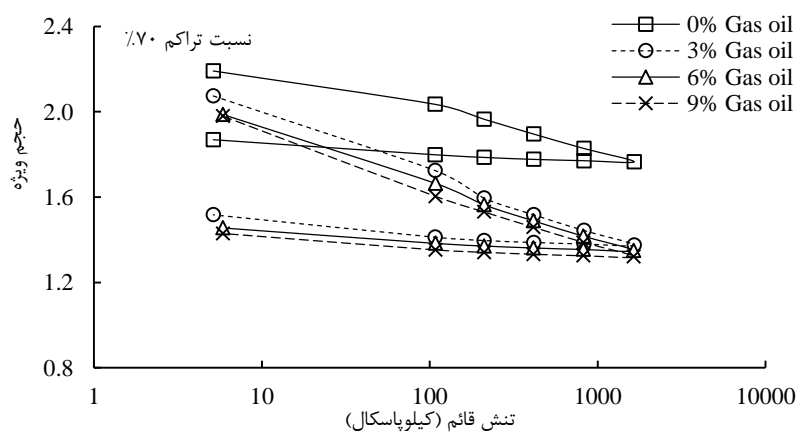
شکل‌های (۳) و (۴) نتایج حاصل از آزمایش تراکم اصلاح شده را نشان می‌دهند. بر این اساس وزن مخصوص اولیه خاک رس کائولینیت تمیز که $16/5 \text{ kN/m}^3$ می‌باشد با افزایش آلودگی به میزان ۹ درصد گازوئیل به $17/3 \text{ kN/m}^3$ افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش ۹ درصدی نفت سفید تأثیر چندانی بر وزن مخصوص حداکثر خاک نداشته و وزن مخصوص $16/4 \text{ kN/m}^3$ را نشان می‌دهد. در عین حال درصد رطوبت بهینه خاک در هر دو حالت کاهش خواهد داشت. به دلیل ویسکوزیته بیشتر نفت سفید و گازوئیل نسبت به آب، عمل لغزیدن دانه‌های خاک بر روی یکدیگر آسان می‌شود و به موجب آن خاک در رطوبت کمتری به حداکثر وزن مخصوص خود می‌رسد. همچنین با افزایش میزان آلودگی ۹ درصد گازوئیل، وزن مخصوص خاک افزایش می‌یابد که این امر با توجه به ویسکوزیته بالاتر سیال گازوئیلی قابل توجیه است.



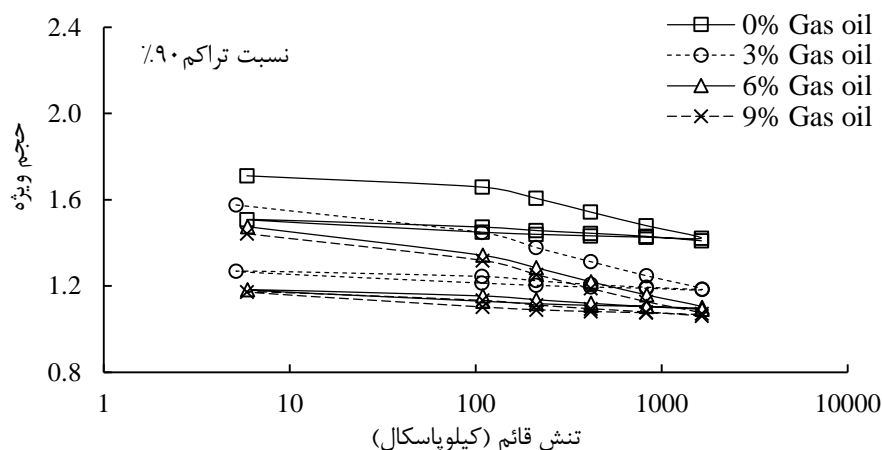
شکل ۳- منحنی تراکم خاک تمیز و آلوده به ۹ درصد گازوئیل



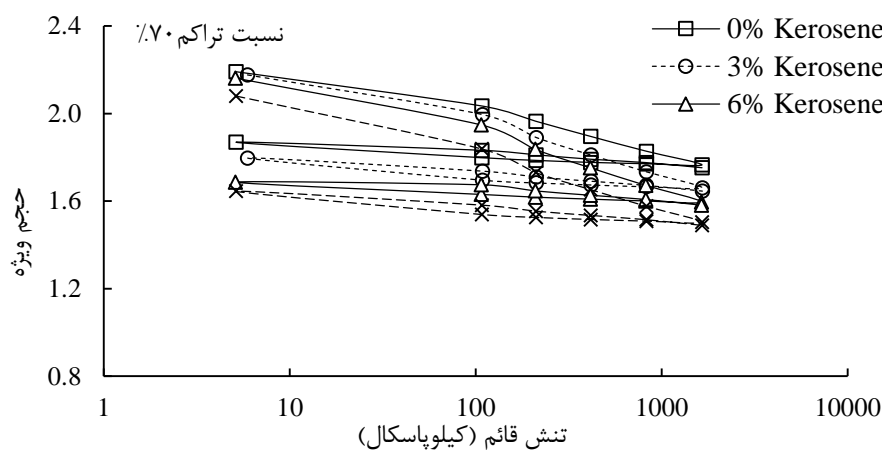
شکل ۴- منحنی تراکم خاک تمیز و آلوده به ۹ درصد نفت سفید



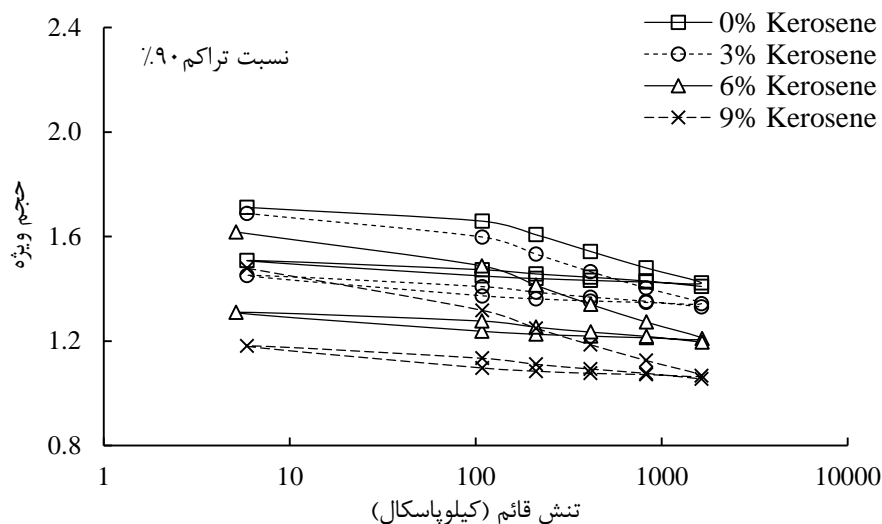
شکل ۵- تغییرات حجم ویژه-تنش سربار خاک آلوده به گازوئیل در نسبت تراکم ۷۰ درصد



شکل ۶- تغییرات حجم ویژه-تنش سربار کاتولینیت آلوده به گازوئیل در نسبت تراکم ۹۰ درصد



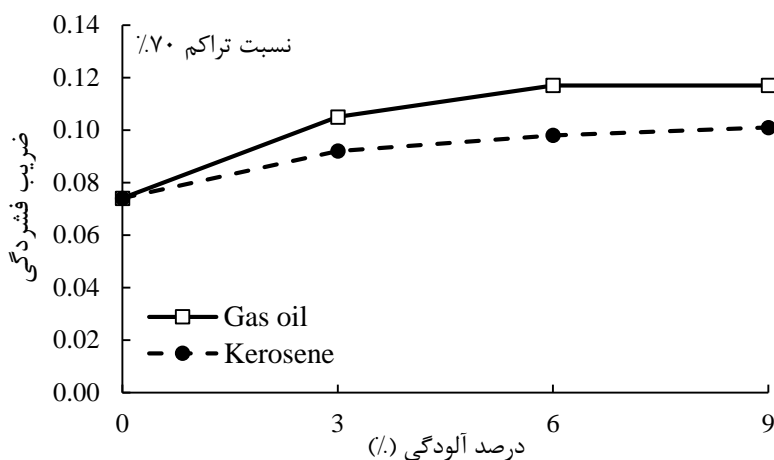
شکل ۷- تغییرات حجم ویژه-تنش سربار کاتولینیت آلوده به نفت سفید در نسبت تراکم ۷۰ درصد



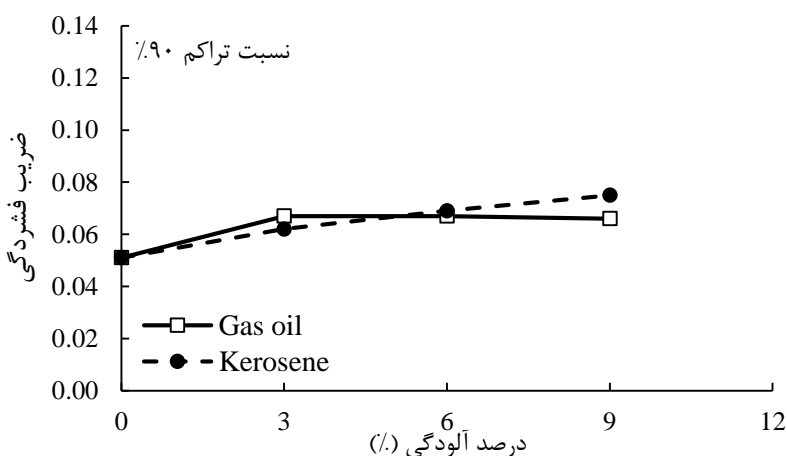
شکل ۸- تغییرات حجم ویژه-تنش سربار کاتولینیت آلوده به نفت سفید در نسبت تراکم ۹۰ درصد

شکل‌های (۵) تا (۸) تغییرات حجم ویژه (نسبت تخلخل +۱) در برابر تنش سربار قائم وارده بر نمونه را نشان می‌دهد. با افزایش تنش قائم، حجم ویژه کاهش می‌یابد. کاهش حجم ویژه با ازدیاد سربار قائم تا تنش حدود ۱۰۰ کیلوپاسکال که

بیانگر تنش پیش تحکیمی وارده در زمان ساخت نمونه هاست با نرخ کمتری صورت می پذیرد حال آنکه در تنشهای قائم بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال، کاهش حجم ویژه با نرخ بیشتری بوقوع می پیوندد. با کاهش سربار در خلال باربرداری نیز حجم ویژه افزایش خواهد یافت. همچنین حجم ویژه نمونه ها با افزایش درصد آلودگی کاهش می یابد. دلیل این امر افزایش ویسکوزیته سیال نفتی می باشد که موجب روغنکاری دانه های خاک شده و عمل تراکم براحتی بیشتری نسبت به آب صورت می گیرد و کاهش نسبت تخلخل و به تبع آن کاهش مقادیر حجم ویژه را سبب می شود. بر اساس نتایج حمیدی و جداری [۷]، در صورتیکه در شرایط عمل آوری به نمونه اجازه تورم داده نشود، روند تغییرات ارائه شده در شکل های (۵) تا (۸) برعکس خواهد بود. با توجه به پتانسیل وقوع تورم در نمونه هایی که تحت اعمال سربار عمل آوری می شوند، امکان ازدیاد حجم مخصوص به مقادیر بیشتر از خاک تمیز وجود خواهد داشت (حمیدی و جداری ۱۳۹۲).



شکل ۹- تغییرات ضریب فشردگی خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید در تراکم نسبی ۷۰ درصد

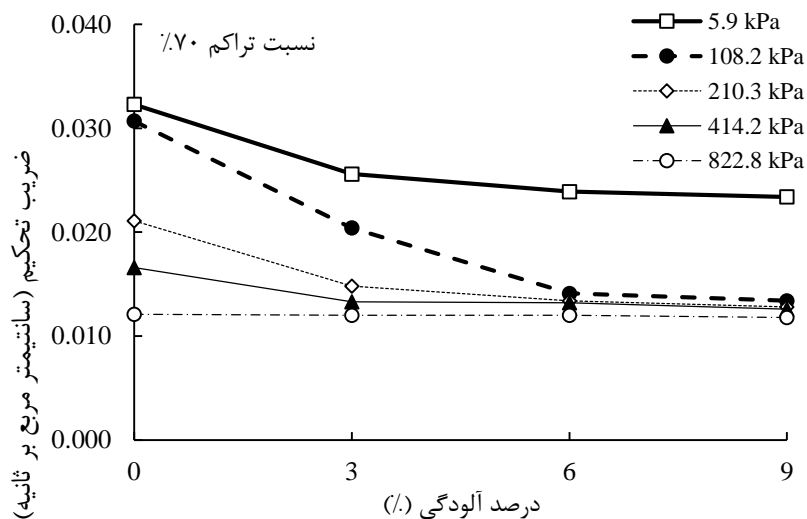


شکل ۱۰- تغییرات ضریب فشردگی خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید در تراکم نسبی ۹۰ درصد

بر اساس منحنیهای تحکیم بدست آمده، تغییرات ضریب فشردگی با درصد آلاینده در خاک مطابق شکل های (۹) و (۱۰) بدست می آید. همانطور که در این شکلها مشاهده می شود، با افزایش درصد آلودگی، ضریب فشردگی خاک افزایش می یابد و مقادیر بدست آمده برای خاک آلوده به گازوئیل تا حدی بیشتر از نمونه های آلوده به نفت سفید است. بدین ترتیب مشخص

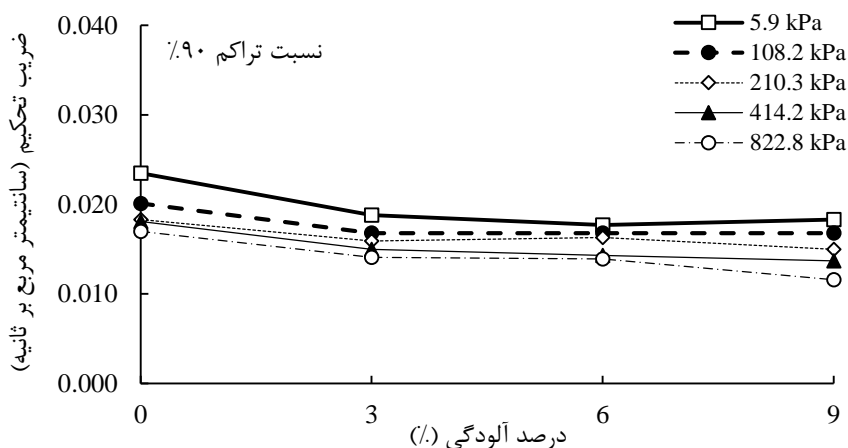
می شود که با افزایش آلایندگی نفتی در خاک میزان نشست آن افزایش خواهد یافت. براساس شکل (۹) و مقایسه مقادیر ضریب فشردگی در درصد‌های آلودگی با گازوئیل صفر تا ۹٪ در نسبت تراکم ۷۰٪ مشخص می شود که مقادیر نشست در حدود ۵۸٪ افزایش خواهند داشت. این مقدار در خاک آلوده به ۹٪ نفت سفید در حدود ۳۶٪ خواهد بود. البته بر اساس شکل (۱۰) با ازدیاد درصد تراکم نمونه ها به ۹۰٪ از تاثیر درصد آلودگی بر نشست پذیری خاک رس کائولینیت کاسته خواهد شد. در واقع در نمونه‌های با درصد تراکم ۹۰٪ ضریب فشردگی تا حدی افزایش داشته ولی بدلیل تراکم بالای دانه‌های خاک، نوع سیال نفتی تاثیر چندانی بر مقدار ضریب فشردگی نداشته است و تنها موجب افزایش کمی در مقدار آن شده که این موضوع در تطابق با نتایج تحقیقات سایر محققین از جمله الرحمن و همکاران [۵] می باشد.

به منظور محاسبه پارامترهای زمانی مرتبط با سرعت تحکیم، ضریب تحکیم خاک با استفاده از روش ارائه شده توسط رابینسون و آلام^۱ [۱۳] با در نظر گرفتن بخش اولیه منحنی تغییرشکل قائم نمونه در برابر لگاریتم زمان سپری شده از ابتدای تحکیم استفاده شده است و مقادیر بدست آمده در قالب نمودارهای (۱۱) تا (۱۴) ارائه شده است.

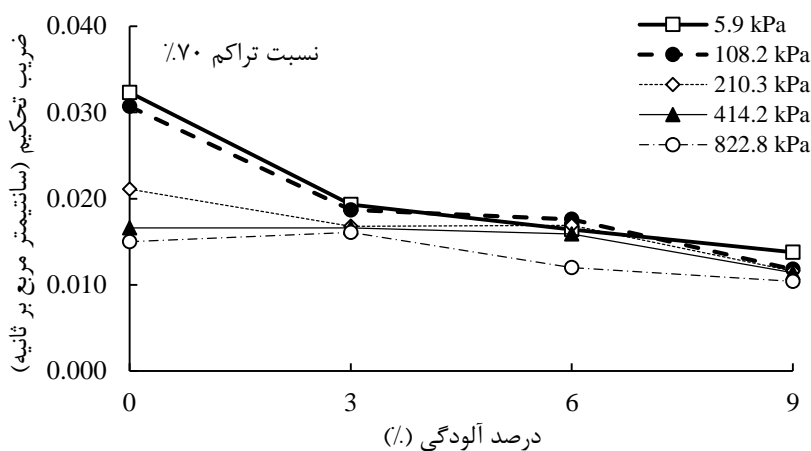


شکل ۱۱- تغییرات ضریب تحکیم کائولینیت آلوده به نفت سفید با نسبت تراکم ۷۰ درصد

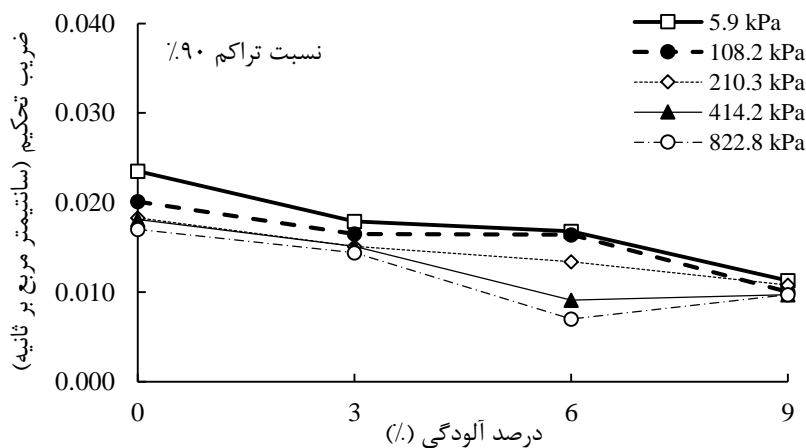
¹ Rabinson and Allam



شکل ۱۲- تغییرات ضریب تحکیم کاتولینیت آلوده به نفت سفید با نسبت تراکم ۹۰ درصد



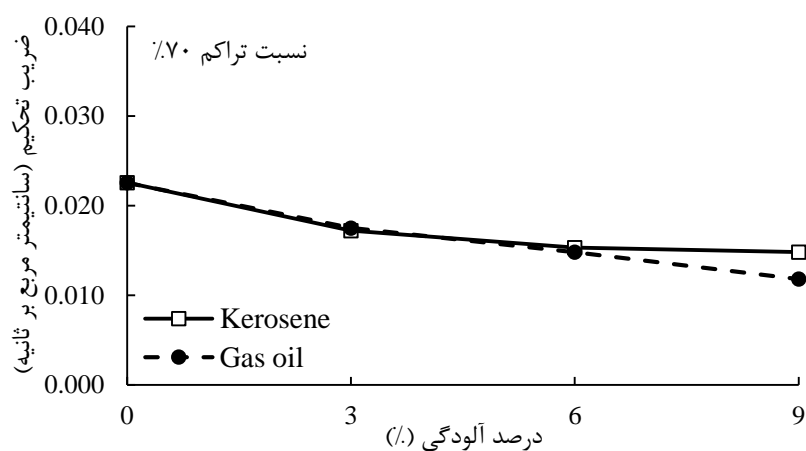
شکل ۱۳- تغییرات ضریب تحکیم کاتولینیت آلوده به گازوئیل با نسبت تراکم ۷۰ درصد



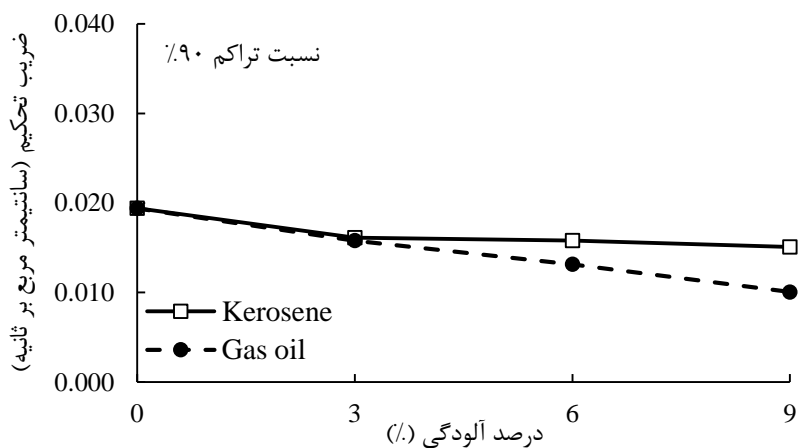
شکل ۱۴- تغییرات ضریب تحکیم کاتولینیت آلوده به گازوئیل با نسبت تراکم ۹۰ درصد

بر اساس نمودارها با افزایش تنش سربار، ضریب تحکیم کاهش می‌یابد. بطوریکه در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) مشاهده می‌شود با افزایش تنش سربار، ضریب تحکیم به سمت مقادیر کمتر حرکت می‌کند زیرا رس کاتولینیت اعم از آلوده و غیرآلوده، عمدتاً در تنش‌های کم و در همان ابتدای اعمال تنش، بخش عمده‌ای از تحکیم خود را تجربه می‌نماید و پس از آن سرعت

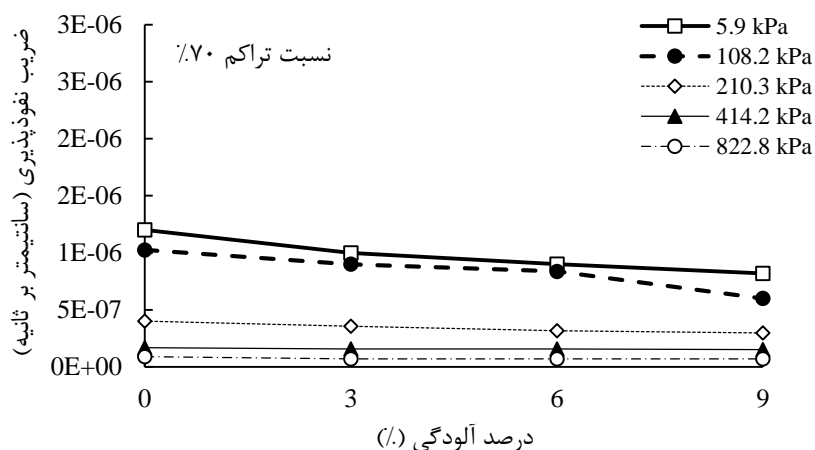
انجام تحکیم و در نتیجه آن ضریب تحکیم کاهش می‌یابد. همچنین نمونه‌های آلوده به گازوئیل و نفت سفید، نمونه‌های با نسبت تراکم کمتر، ضریب تحکیم بیشتری دارند. این امر بدلیل نسبت تخلخل و فضای خالی بیشتر مابین دانه‌های خاک است. تحکیم خاکی که حفرات خالی بیشتری در بین دانه‌های خود دارد، سریع‌تر اتفاق می‌افتد و این امر در نمونه‌های با نسبت تراکم ۷۰ بخوبی قابل مشاهده است گرچه با افزایش درصد آلاینده در خاک از سرعت وقوع تحکیم کاسته می‌شود. شکل‌های (۱۵) و (۱۶) متوسط ضرایب تحکیم محاسبه شده در تنش‌های سربار مختلف را ارائه می‌نمایند. با توجه به لزجت بیشتر، مقادیر ضریب تحکیم بدست آمده برای کائولینیت آلوده به گازوئیل کمتر از کائولینیت آلوده به نفت سفید می‌باشد. در واقع سیال گازوئیل با توجه به ویسکوزیته بالاتر به راحتی نفت سفید نمی‌تواند از بین حفرات خاک خارج شود. با در دست داشتن مقادیر ضریب تحکیم، ضریب نفوذپذیری خاک محاسبه و تغییرات آن با درصد آلاینده نفتی در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) نشان داده شده است.



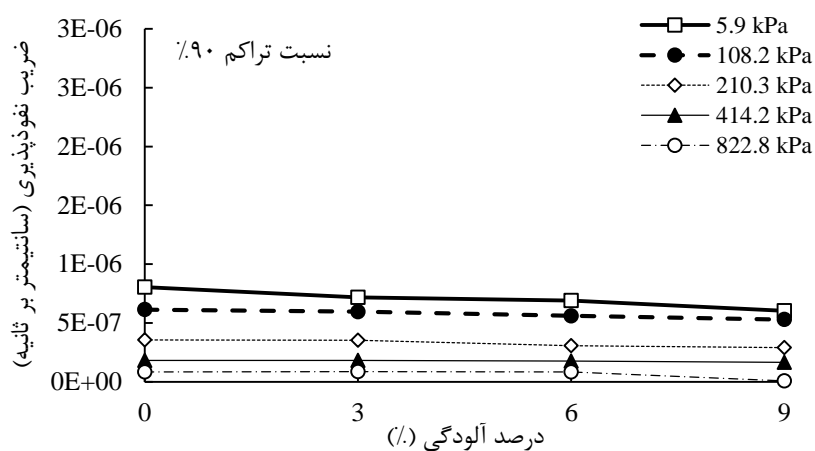
شکل ۱۵- میانگین ضریب تحکیم در تنش‌های سربار مختلف برای نمونه‌های با نسبت تراکم ۷۰٪



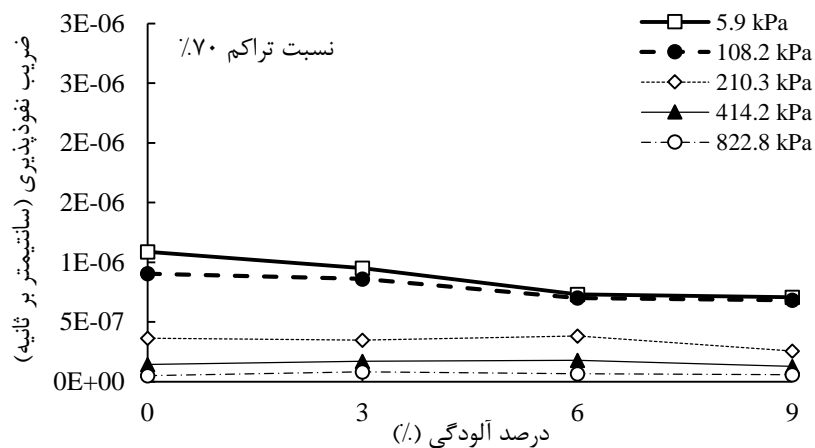
شکل ۱۶- میانگین ضریب تحکیم در تنش‌های سربار مختلف برای نمونه‌های با نسبت تراکم ۹۰٪



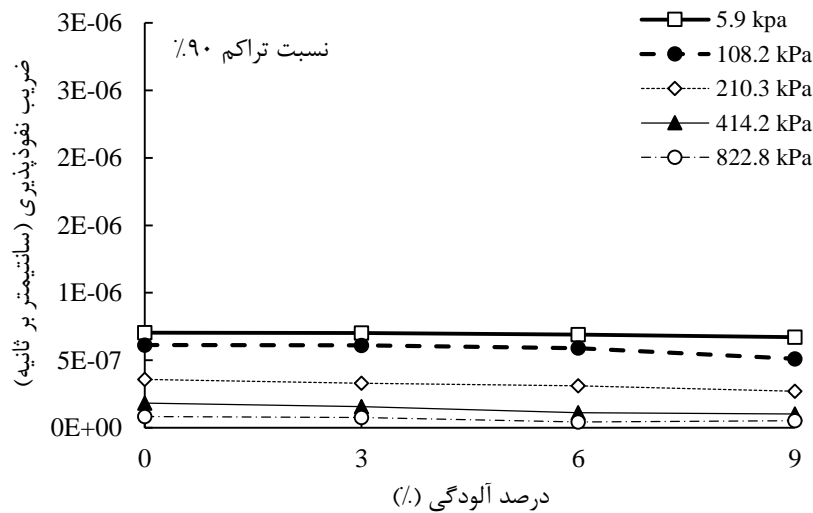
شکل ۱۷- تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های آلوده به نفت سفید با نسبت تراکم ۷۰ درصد



شکل ۱۸- تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های آلوده به نفت سفید با نسبت تراکم ۹۰ درصد



شکل ۱۹- تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های آلوده به گازوئیل با نسبت تراکم ۷۰ درصد



شکل ۲۰- تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه‌های آلوده به گازوئیل با نسبت تراکم ۹۰ درصد

بر اساس شکل‌های (۱۷) تا (۲۰) مشاهده می‌شود ضریب نفوذپذیری خاک با افزایش درصد آلودگی کاهش می‌یابد. در تنش‌های سربار کم، میزان کاهش این ضریب در مقایسه با تنش‌های سربار بزرگ بیشتر است. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب نفوذپذیری خاک آلوده به نفت سفید در تراکم نسبی ۷۰ درصد بیش از نمونه‌های آلوده به گازوئیل می‌باشد که دلیل آن لزجت سیال موجود در محیط متخلخل و تاثیر آن بر نفوذپذیری خاک است. در نسبت تراکم ۹۰٪، ضریب نفوذپذیری خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید تفاوت چندانی نداشته که این امر نشان دهنده تاثیرات کمتر نوع الاینده بر رفتار تحکیمی خاک رسی در نسبت‌های تراکم بالا است.

۴. نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش تحکیم بر خاک رس کائولینیت آلوده شده با نفت سفید و گازوئیل نتایج مختلفی به شرح زیر بدست آمد:

۱- با افزایش میزان آلودگی در خاک آلوده، درصد رطوبت بهینه خاک کاهش می‌یابد. همچنین، در خاک آلوده به گازوئیل، وزن مخصوص خشک خاک افزایش داشته اما در مورد خاک آلوده به نفت سفید، به نظر می‌آید که با افزایش درصد آلودگی، وزن مخصوص خشک خاک کاهش خواهد یافت.

۲- با ازدیاد تنش سربار، حجم ویژه خاک آلوده و غیر آلوده کاهش خواهد داشت و با کاهش تنش سربار در زمان باربرداری، این مقادیر افزایش می‌یابد. در خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید، با افزایش درصد آلودگی، نمودار تحکیم به سمت کاهش مقادیر حجم ویژه میل می‌نماید. مقادیر حجم ویژه خاک آلوده به گازوئیل کمتر از خاک آلوده به نفت سفید بوده و با افزایش نسبت تراکم، خاک از مقادیر حجم ویژه کمتری برخوردار خواهد بود.

۳-مقادیر ضریب فشردگی در نمونه‌های با نسبت تراکم کمتر، در حالت آلوده به گازوئیل بیش از نمونه‌های آلوده به نفت سفید است اما در نمونه‌های با نسبت تراکم بیشتر اختلاف چندانی رویت نشده است. بطور کلی با افزایش درصد آلودگی در خاک رس کائولینیت ضریب فشردگی و در نتیجه آن پتانسیل نشست پذیری خاک افزایش می‌یابد.

۴-ضریب تحکیم خاک آلوده به گازوئیل و نفت سفید با افزایش درصد آلودگی کاهش خواهد داشت و مقادیر این ضریب در خاک آلوده به گازوئیل کمتر از خاک آلوده به نفت سفید است. با افزایش نسبت تراکم، ضریب تحکیم کاهش یافته و متعاقب آن سرعت عملیات تحکیم کمتر خواهد شد.

۵-بدلیل لزجت بیشتر، مقادیر ضریب نفوذپذیری خاک آلوده به گازوئیل کمتر از خاک آلوده به نفت سفید است اما با افزایش نسبت تراکم نمونه‌ها این اختلاف کاهش خواهد یافت.

۵. فهرست علائم و اختصارات

علامت	تعریف
γ	وزن مخصوص
γ_{max}	وزن مخصوص حداکثر
γ_w	وزن مخصوص آب
c_c	ضریب فشردگی
c_v	ضریب تحکیم
k	ضریب نفوذپذیری
T_v	فاکتور بدون بعد زمان
m_v	ضریب قابلیت فشردگی حجمی
t	زمان
H	طول کوتاه ترین مسیر زهکشی

تشکر و قدردانی

از آقایان دکتر ترابی آزاد و مهندس سلیمانی بخاطر داوری مقاله سپاسگزاری می‌گردد.

۶. منابع

- [1]- Al-Sanad H., W.K. Eid and N.F Ismael, 1995, Geotechnical properties of oil contaminated Kuwait sand, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, v. 121, no.5, p. 407-412.
- [2]- Khamechian M., A.H. Charkhabi and M. Tajik, 2006, The effects of crude oil contamination on geotechnical properties of Bushehr coastal soils in Iran, IAEG, p, 214-220,.
- [۳]- عبادی، ت.، کرمانی م.، ۱۳۸۸، بررسی تاثیر آلودگی خاک به نفت خام بر پارامترهای ژئوتکنیکی آن، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران ایران، شیراز.
- [4]- Ratnaweera P., and J.N. Meegoda, 2006, Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils, Geotechnical Testing Journal, v. 29, no. 2, p. 416-424,.
- [5]- Al-Rehman S., N. Abdoljauwad and T. Akram, 2007, Geotechnical behavior of oil-contaminated fine grained soils, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 7, no. 1, p. 1-12,.
- [6]- Moavenian M.H, and S.S., Yasrobi, 2008, Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as per meant, Applied Clay Science, v. 39, no. 1, p. 60-71.
- [۷]- حمیدی ا.، و جداری س.، ۱۳۹۲، بررسی خصوصیات تحکیمی خاکهای رسی آلوده به سیال آلی، مجله علمی پژوهشی شریف، سال ۲-۲۹، شماره ۲، صفحات ۲۹ تا ۳۵.
- [8]- Khosravi E., H. Ghasemzadeh, M.R. Sabour and H. Yazdani, 2013, Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite, Engineering Geology, v. 166, no. 7, p. 11-16.
- [9]- Estabragh A.R., I. Beytolahpour, M. Moradi and A.A. Javadi, 2014 Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol, Engineering Geology, v. 178, no. 2, pp.102-108.
- [10]- ASTM D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, <http://dx.doi.org/10.1520/D0422-63R07E02>, 2007.
- [11]- ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, <http://dx.doi.org/10.1520/D0698>, 2012.
- [12]- ASTM D2435 / D2435M-11, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, http://dx.doi.org/10.1520/D2435_D2435M-11, 2011.
- [13]- Robinson R.G, and Allam M.M, Determination of coefficient of consolidation from early stage of logt plot, Geotechnical Testing Journal, ASTM, v 19, no. 3, p. 316-320, 1996.