

بررسی خصوصیات تحکیمی خاک‌های رسی آلوده به سیال آلی

امیر حمیدی* (دانشیار)

سیروس جداری (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی تهران

خاک‌ها در معرض آلودگی‌های فراوان در اثر نشست از مخازن نفتی، چاه‌های نفت، و سدهای باطله هستند، و این آلودگی در خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مؤثر است. در این تحقیق، با انجام آزمایش‌های تحکیم اذئومتر، خصوصیات تراکم‌پذیری خاک‌های رسی آلوده به سیال آلی بررسی شده است. خاک رس کاتولونیت و بنتونیت به‌منزله‌ی مصالح پایه و آلاینده‌های آلی شامل نفت سفید و نفت گاز در درصد‌های وزنی صفر، ۳، ۶ و ۹ به آن اضافه شده است. آزمایش‌ها در دو تراکم نسبی ۵۰٪ و ۷۰٪ انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشانگر ازدیاد تورم اولیه‌ی خاک آلوده به سیال آلی در هنگام اشباع شدن است. به‌علاوه روغن‌کاری ذرات خاک به‌دلیل حضور سیال نفتی نیز موجب افزایش تراکم‌پذیری خاک خواهد شد، که دلیل آن ویژگی‌های شیمیایی سیال منفذی، ازدیاد فعالیت کانی‌های رسی و افزایش ضخامت لایه‌ی جذب سطحی است.

واژگان کلیدی: خاک آلوده، سیال نفتی، تحکیم یک بعدی، تراکم نسبی، ویژگی‌های شیمیایی.

hamidi@khu.ac.ir
sirusjedari@gmail.com

۱. مقدمه

پژوهش‌هایی ازدیاد شاخص خمیری خاک با اضافه‌کردن سیال آلی به آن گزارش شده است،^[۱۴،۱۱] حال آنکه در پژوهش‌های دیگری کاهش در حدود اتربرگ^۲ با افزایش درصد سیال آلی در خاک ریزدانه عنوان شده است.^[۱۸،۱۵] همچنین با انجام آزمایش‌های تراکم‌پذیری، پژوهشگرانی کاهش چگالی خشک بیشینه با ازدیاد درصد سیال آلی در خاک ریزدانه را نشان داده‌اند،^[۱۷،۱۵] پژوهشگران دیگری روند افزایشی آن با درصد آلاینده در خاک را بیان کرده‌اند.^[۱۶] به‌طورکلی خاک‌های رسی دارای ساختاری با ویژگی‌های شیمیایی هستند و تغییر در مشخصات سیال منفذی موجب اثرگذاری بر مکانیزم‌های رفتار فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها می‌شود. به‌منظور بررسی این تفاوت‌ها و تفسیر آن‌ها و همچنین بررسی خصوصیات تحکیمی خاک‌های ریزدانه‌ی آلوده به سیال آلی، در این پژوهش به مطالعه‌ی اثر دو آلاینده‌ی نفتی بر مشخصات فیزیکی، تراکم‌پذیری، و تحکیم خاک‌های رسی پرداخته شده است.

۲. مشخصات مواد استفاده‌شده در آزمایش‌ها

دو نوع خاک رسی بنتونیت^۳ و کاتولونیت^۴ که به ترتیب نماینده‌ی خاک ریزدانه با خصوصیات خمیری بالا و پایین هستند، برای خاک پایه استفاده شده است. این خاک‌ها در سیستم طبقه‌بندی متحد^۵ به ترتیب CH و CL هستند. مشخصات فیزیکی این دو خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

آلودگی خاک‌ها به مواد نفتی نه فقط یک مسئله‌ی زیست‌محیطی است، بلکه از نقطه‌نظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت فراوانی است. نشست نفت در بسیاری از موارد در حین انتقال از دریا به ساحل و بالعکس به‌صورت تصادفی اتفاق می‌افتد. موارد دیگری همچون نشست از زیر مخازن در جایگاه‌های توزیع سوخت، تصادف تانکرهای نفتی، و نشست در اطراف چاه‌های نفتی نیز از جمله منابع نشست مواد نفتی هستند. یکی از حادثه‌هایی که اخیراً در دنیا باعث نشست نفت به‌صورت گسترده شده است، انفجار یکی از چاه‌های نفتی متعلق به شرکت نفتی انگلستان^۱ در خلیج مکزیک است که از آن به‌منزله‌ی یک فاجعه‌ی زیست‌محیطی در دنیا نام برده شده است. نشست آلاینده‌ی نفتی موجب آلودگی خاک و سبب تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود. تغییر در خواص فیزیکی خاک‌های آلوده به نفت خام، پایداری شيروانی‌ها، ظرفیت باربری پی‌ها و دیگر سازه‌های بناشده بر آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مطالعات محدودی در ارتباط با خواص فیزیکی و شیمیایی خاک آلوده به مواد نفتی انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات به بررسی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های دانه‌ی پرده‌آخته‌اند.^[۲۱] همچنین در زمینه‌ی بررسی رفتار مکانیکی خاک‌های ریزدانه‌ی آلوده به سیال آلی تاکنون تحقیقات بسیاری را می‌توان نام برد.^[۱۸-۲۱]

بررسی تحقیقات قبلی در زمینه‌ی خصوصیات فیزیکی و ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک‌های ریزدانه، حاکی از وجود تفاوت‌هایی در نتایج به‌دست‌آمده است. مثلاً در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۰/۳/۲۸، پذیرش ۱۳۹۰/۶/۲۲.

جدول ۱. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها.

خاک پایه	نام خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	دامنه‌ی خمیری (%)	چگالی ویژه دانته‌های جامد	چگالی خشک بیشینه (kN/m ³)	رطوبت بهینه (%)
بنتونیت	CH	۲۳.۸	۶۶	۱۷.۲	۲,۰۲	۱۱,۷	۳۳
کانولینیت	CL	۳۲	۲۲	۱۰	۲,۶۶	۱۶,۵	۱۳

جدول ۲. مشخصات آلاینده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها.

نام آلاینده	ثابت دی الکتریک	لزجت (سانتی استوکس *)
نفت سفید	۱,۸	۲,۷۱
نفت گاز	۲,۰	۱۳,۹

* Centi Stokes

رسد. انتخاب زمان مذکور براساس تحقیقات مشابه انجام شده^[۱۶] بوده است. در آزمایش‌های تحکیم یک بعدی، پس از آماده‌سازی خاک، وزن مورد نیاز برای رسیدن به تراکم مورد نظر در سلول تحکیم محاسبه شد و نمونه در داخل آن قرار گرفت. برای سنجش میزان تورم نمونه در فرایند اشباع‌سازی، درجه دقیق تغییر مکان با دقت ۰,۰۱ میلی‌متر بر پیستون بارگذاری قرار داده شد.

نمونه با استفاده از آب مقطر به روش اشباع نرمال^{۱۱} و قراردادن ظرف در داخل آب به مدت ۴۸ ساعت اشباع شد، اما در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ آلاینده، از خود سیال آلی برای اشباع نمونه استفاده شد. برای بارگذاری نمونه، پیچ زیر اهرم انتقال نیرو چرخانده می‌شود تا تراز شود. سیستم انتقال نیرو قرار داده می‌شود و با تغییر مکان وزنه‌ی تعادل، این وزنه در حالتی قرار می‌گیرد که اهرم انتقال نیرو بدون وجود پیچ زیرین در وضعیت تراز بایستد. در این شرایط، فشاری به نمونه وارد نمی‌شود و فقط تحت تأثیر وزن پیستون بارگذاری خواهد بود. در آزمایش‌ها از ضریب اهرم ۱ به ۱۰ استفاده شد. این مقدار براساس کالیبراسیون دقیق سیستم پیش از انجام آزمایش‌ها محاسبه شده است. گام‌های بارگذاری با ۲ برابر کردن بار در هر مرحله از ۵۰ تا ۱۶۰۰ (کیلو نیوتن بر متر مربع) ادامه یافت. نظر به آنکه بیشینه‌ی بار قابل تحمل اهرم بارگذاری ۳۲ کیلوگرم است، انجام بارگذاری تا سقف تنش (kN/m²) ۱۶۰۰ مقدور بود. هر مرحله‌ی بارگذاری، تا تثبیت کامل تغییر مکان قائم نمونه ادامه پیدا کرد.

۴. نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در ۲ بخش فیزیکی و مکانیکی بررسی می‌شود.

۱.۴. نتایج آزمایش‌های فیزیکی

۱.۱.۴. حدود اتربرگ

نتایج حاصل از آزمایش‌های حدود اتربرگ به صورت تغییرات حد روانی و شاخص خمیری با درصد آلاینده‌ی نفت سفید و نفت گاز در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان‌دهنده‌ی افزایش در حد روانی و شاخص خمیری با افزایش درصد آلاینده در خاک هستند.

علت افزایش حد روانی در آزمایش‌های انجام شده را می‌توان به لزجت بالای دو سیال نفت سفید و نفت گاز نسبت داد. لزجت بالای سیال باعث ایجاد چسبندگی بیشتر بین ذرات خاک رس می‌شود. بدین ترتیب برای تغییر از فاز جامد به مایع (حد روانی) و غلبه به این چسبندگی، نیاز به آب بیشتری خواهد بود.

با توجه به حلال‌نودن نفت سفید و نفت گاز در آب، این سیالات تأثیری بر ویژگی‌های فیزیکی آب ندارند و در نتیجه ثابت دی‌الکتریک سوسپانسیون آب و خاک بدون تغییر باقی خواهد ماند. این نتایج با یافته‌های سایر محققان تطابق دارد.^[۱۶ و ۱۱]

همچنین نفت سفید و نفت گاز که احتمال آلودگی خاک به این مواد در جایگاه‌های توزیع سوخت و در مجاورت مخازن ذخیره وجود دارد، و از سوخت‌های رایج در صنعت حمل و نقل و صنعت در ایران هستند؛ به منزله‌ی سیال آلی آلاینده‌ی خاک انتخاب شدند. ویژگی‌های این دو سیال نیز در جدول ۲ آورده شده است.

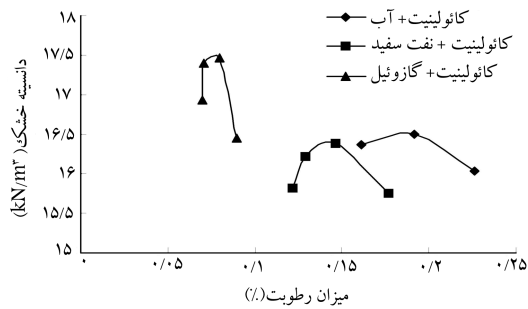
۳. روند انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق در ۲ گروه آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی تقسیم‌بندی شده‌اند. در بخش آزمایش‌های فیزیکی، آزمایش‌های حد روانی^۶، حد خمیری^۷، چگالی ویژه^۸، و تراکم استاندارد^۹ انجام شده است. در بخش آزمایش‌های مکانیکی نیز با انجام یک سری منظم آزمایش‌های تحکیم یک بعدی سعی شده است تا به بررسی رفتار تحکیمی خاک‌های رسی آلوده به سیال نفتی پرداخته شود. درصد آلاینده در خاک‌ها صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی و در یک مورد ۱۰٪ وزنی انتخاب شده و نمونه‌ها در دو تراکم نسبی ۱۰^{۱۰} و ۷۰٪ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جدول ۳ نمایی از آزمایش‌ها و متغیرهای در نظر گرفته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا خاک عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ به مدت ۱۶ ساعت در گرم‌خانه و در دمای ۱۱۰°C قرار داده شد تا رطوبت آن از بین رود و خشک به دست آید. پس از آن، خاک با آلاینده‌ی مورد نظر در درصد‌های مختلف وزنی به روش اختلاط دستی مخلوط شد. این اختلاط تا جایی ادامه پیدا کرد که آلاینده و خاک به صورت کاملاً همگن مخلوط شدند. پس از آن، ترکیب به دست آمده در ظرف‌های مخصوص فلزی و در بسته قرار گرفت و با استفاده از کیسه‌های پلی‌اتیلن بسته‌بندی شد تا از تبخیر سیال موجود در خاک جلوگیری به عمل آید. این عمل به مدت ۷ شبانه‌روز ادامه یافت تا مخلوط خاک و سیال از لحاظ شیمیایی به تعادل

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده در این پژوهش.

نوع آزمایش	نام آزمایش	استاندارد	درصد وزنی آلاینده	تراکم نسبی (%)
حدود اتربرگ	حدود اتربرگ	ASTM D-۴۳۱۸	۹ و ۳,۰	-
فیزیکی	چگالی ویژه	ASTM D-۰ ۸۵۴	۹ و ۳,۰	-
	تراکم استاندارد	ASTM D-۰ ۶۹۸	۹ و ۳,۰	-
مکانیکی	تحکیم یک بعدی	ASTM D-۴۲۵۳	۱۰ و ۹,۳,۰	۷ و ۵۰



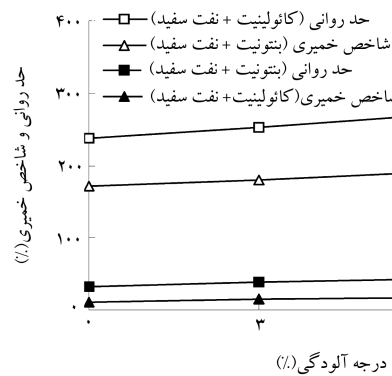
شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس کائولینیت آلوده به نفت سفید و نفت گاز.

رس کائولینیت (kN/m^3) ۱۶٫۵ به دست آمده است. در شرایطی که به جای آب از نفت سفید یا نفت گاز استفاده شده باشد، نتایج آزمایش تراکم بر رس کائولینیت، و نیز نمودار تراکم برای سیال آب جهت مقایسه در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل، به دلیل آلودگی کائولینیت به نفت سفید، نمودار تراکم به سمت رطوبت بهینه کمتر حرکت می‌کند، هر چند وزن مخصوص خشک بیشینه تغییر چندانی نمی‌کند. اما در شرایط آلودگی به نفت گاز، علاوه بر کاهش شدیدتر رطوبت بهینه، مقدار وزن مخصوص بیشینه افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش تراکم پذیری خاک در حالت آلودگی به این ماده نفتی است. علت این موضوع لزجت بالاتر نفت سفید و نفت گاز نسبت به آب است که موجب حرکت راحت تر دانه‌های خاک حین تراکم می‌شود و خاک را با درصد رطوبت پایین‌تری به چگالی خشک بیشینه می‌رساند. با توجه به لزجت بیشتر نفت گاز نسبت به نفت سفید، کاهش در رطوبت بهینه در شرایط آلودگی به نفت گاز بیشتر خواهد بود. در نتیجه خاک متراکم‌تر می‌شود و به چگالی خشک بیشینه‌ی بالاتری نسبت به آب و نفت سفید خواهد رسید.

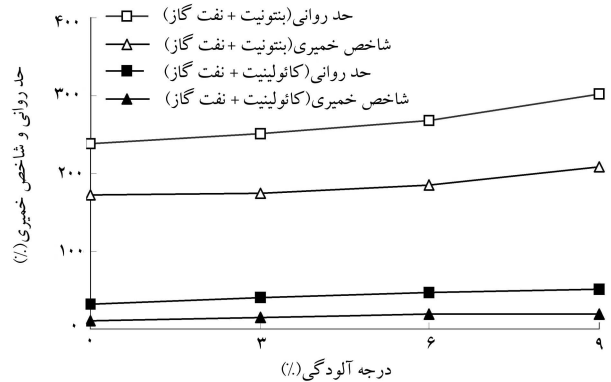
در مطالعات الرحمن و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۶] کاهش در رطوبت بهینه و افزایش چگالی خشک بیشینه‌ی خاک با آلودگی به نفت خام گزارش شده است. این نتایج در تطابق با یافته‌های به دست آمده در این پژوهش است. اما خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۵] با انجام آزمایش بر خاک رس با حالت خمیری پایین نتیجه‌گیری کردند که افزودن درصد‌های متفاوتی از نفت خام به خاک رس موجب کاهش رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه می‌شود. با توجه به همخوانی نتایج از لحاظ کاهش در میزان رطوبت بهینه، علت کاهش در وزن مخصوص خشک بیشینه را می‌توان به درصد‌های آلودگی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ استفاده شده در تحقیقات ایشان مرتبط کرد که مقادیر بالاتری نسبت به این پژوهش و یا مطالعات الرحمن و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۶] بوده است.

۲.۴. نتایج آزمایش‌های تحکیم

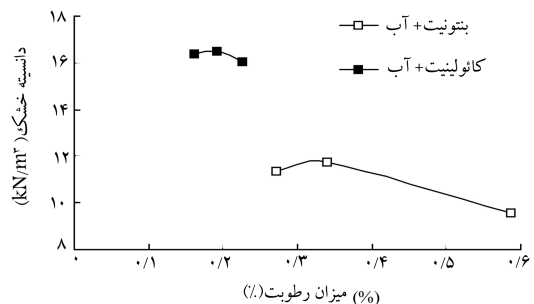
آزمایش‌های تحکیم یک بعدی بر خاک رس کائولینیت و بنتونیت در تراکم نسبی ۵۰٪ و ۷۰٪ در مقادیر آلودگی ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد انجام شد. در تمامی موارد پس از ساخت نمونه‌ی آلوده در تراکم مورد نظر، اشباع نمونه با آب انجام شد. اما برای بررسی شرایط بدون آب، یک آزمایش تحکیم نیز بر خاک رس بنتونیت آلوده به ۱۰۰٪ نفت گاز انجام شد. نتایج آزمایش‌های تحکیم در فضای $e - \log(p)$ برای بنتونیت آلوده به نفت سفید و نفت گاز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ و برای کائولینیت آلوده به نفت سفید و نفت گاز نیز به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. تراکم نسبی نمونه‌ها بر اساس رابطه‌ی ۱ به صورت نسبت وزن مخصوص نمونه‌ی تهیه شده (γ_d) به وزن مخصوص خشک بیشینه $(\gamma_{d,max})$ به دست آمده از آزمایش تراکم



شکل ۱. حد روانی و شاخص خمیری خاک آلوده به نفت سفید.



شکل ۲. حد روانی و شاخص خمیری خاک آلوده به نفت گاز.

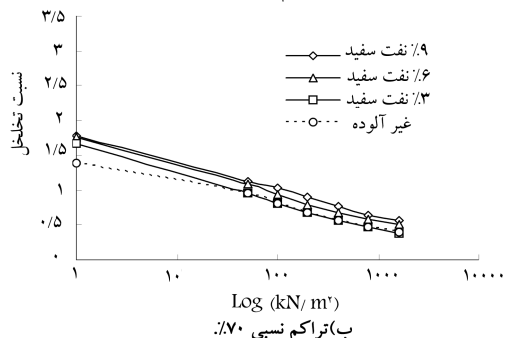
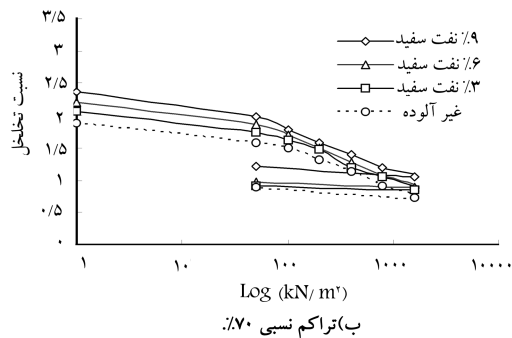
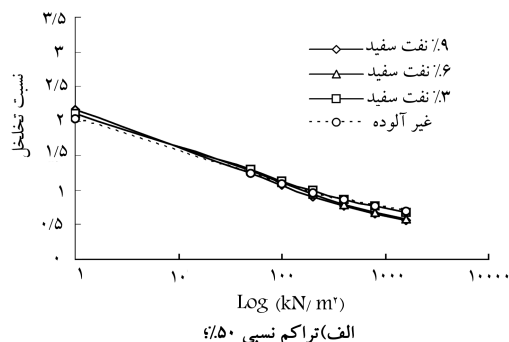
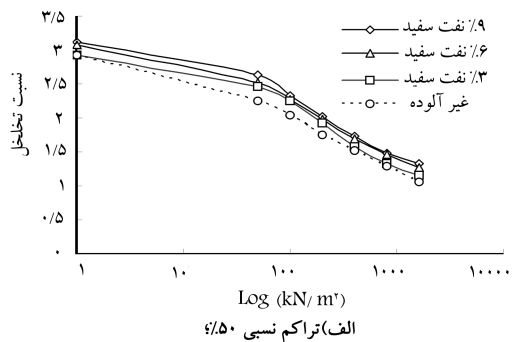


شکل ۳. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس کائولینیت و رس بنتونیت با سیال آب.

در تحقیقاتی دیگر در طالقان، مطالعاتی بر روی خاک رس آلوده به اتیلن گلیکول و تولوئن برای کاهش حد روانی خاک با ازدیاد درصد آلاینده‌ی آلی انجام شده است.^[۱۸] این دو سیال در آب قابل حل هستند و با توجه به ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین سیالات آلی در مقایسه با آب، از ثابت دی‌الکتریک مجموعه سیال منفذی کاسته می‌شود. این امر موجب کاهش شدید ضخامت لایه‌ی آب دوگانه در اطراف کانی رس و تغییر ساختار آن به حالت مجتمع خواهد شد که موجب نزدیکی رفتار به خاک‌های دانه‌ی و کاهش شدید خصوصیات خمیری رس می‌شود.

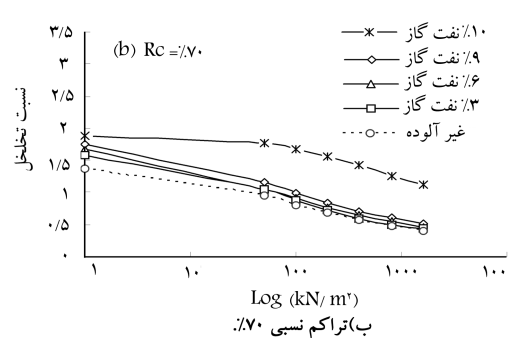
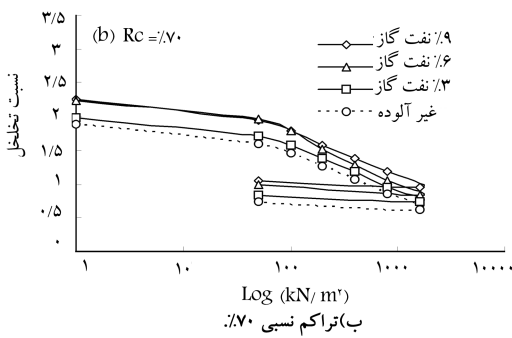
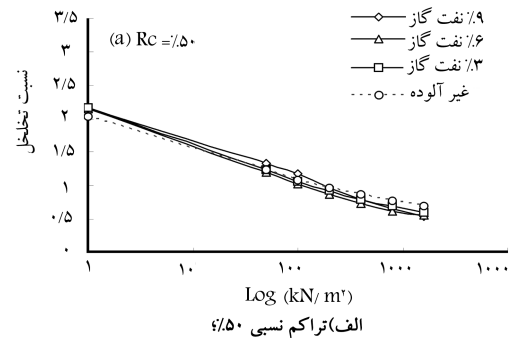
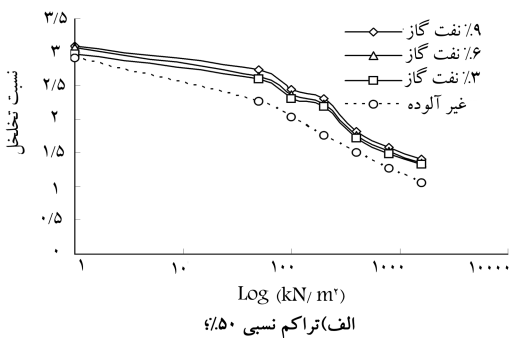
۲.۱.۴. تراکم استاندارد

در شکل ۳، نمودار تغییرات وزن مخصوص خشک در مقابل درصد رطوبت به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد بر خاک رس بنتونیت نشان داده شده است. مطابق این شکل، چگالی خشک بیشینه برای رس بنتونیت (kN/m^3) ۱۱٫۷ و برای



شکل ۷. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس بنتونیت آلوده به نفت سفید.

شکل ۵. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس کائولینیت آلوده به نفت سفید.



شکل ۸. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس بنتونیت آلوده به نفت گاز.

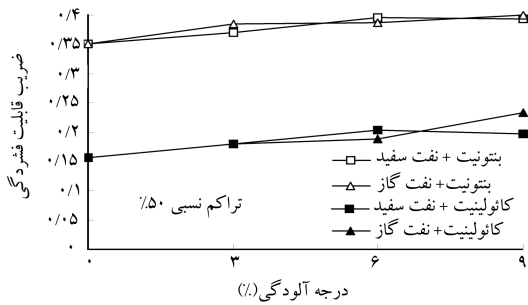
شکل ۶. نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر رس کائولینیت آلوده به نفت گاز.

تعریف می‌شود.

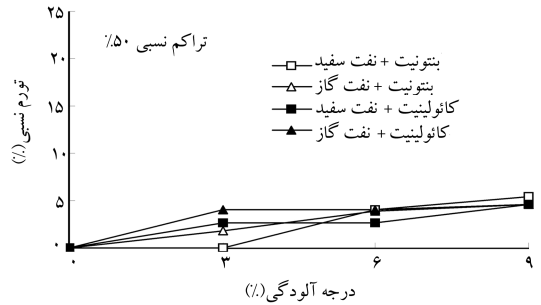
$$R_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \quad (1)$$

اشباع نرمال با آب می‌شود. تورم نسبی^{۱۲} نمونه‌ها در روند اشباع‌سازی آن‌ها با آب براساس تغییرات نسبت تخلخل (Δe_s) به نسبت تخلخل اولیه‌ی نمونه قبل از اشباع (e_0) مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه و منحنی تغییرات آن با درصد آلاینده‌ی آلی برای هر دو خاک در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. در واقع ازدیاد تورم نسبی با افزایش درصد آلاینده‌ی آلی در خاک رس، دلیل اصلی حرکت منحنی‌های تحکیم به سمت بالا در فضای $e - \log(p)$ است. این موضوع به‌ویژه در منحنی‌های مربوط به تراکم نسبی ۷۰٪ در شکل‌های ۵ تا ۸ مشخص است. در تراکم نسبی

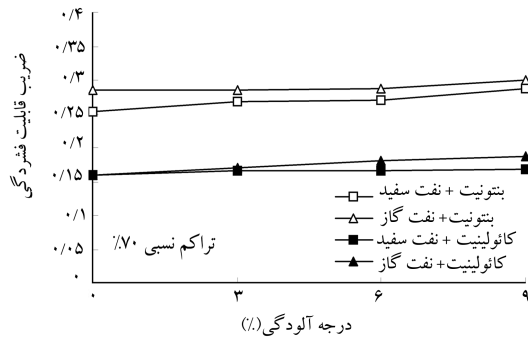
با محاسبه‌ی وزن مخصوص بر مبنای تراکم نسبی نمونه، و با توجه به چگالی ویژه محاسبه‌شده برای کائولینیت و بنتونیت که در جدول ۱ ارائه شده است، نسبت تخلخل اولیه نظیر هر تراکم نسبی نیز قابل محاسبه خواهد بود. در تمامی آزمایش‌ها مشخص شد که آلودگی به نفت سفید و نفت گاز سبب ازدیاد تورم اولیه‌ی نمونه پس از عملیات



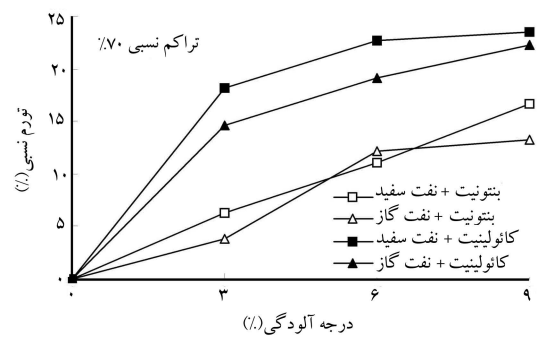
شکل ۱۱. ضریب فشردگی نمونه‌های رسی آلوده به نفت سفید و نفت گاز در تراکم نسبی ۵۰٪.



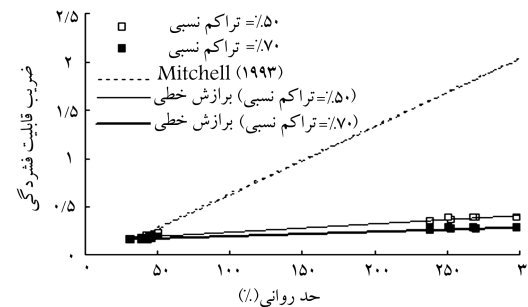
شکل ۹. تورم نسبی نمونه‌های رسی آلوده به نفت سفید و نفت گاز در تراکم نسبی ۵۰٪.



شکل ۱۲. ضریب فشردگی نمونه‌های رسی آلوده به نفت سفید و نفت گاز در تراکم نسبی ۷۰٪.



شکل ۱۰. تورم نسبی نمونه‌های رسی آلوده به نفت سفید و نفت گاز در تراکم نسبی ۷۰٪.



شکل ۱۳. تغییرات ضریب فشردگی نمونه‌های رسی آلوده با حد روانی سیال آلاینده.

رابطه‌ی ۳ برای برقراری این ارتباط ارائه شده است: [۱۹]

$$c_c = 0.7007(LL - 10) \quad (3)$$

در این پژوهش نیز سعی بر آن است تا ارتباطی مشابه بین خصوصیات تراکم‌پذیری و حدود اتربرگ خاک رسی آلوده به سیال آلی ارائه شود. شکل ۱۳ تغییرات ضریب فشردگی خاک رسی آلوده به سیال آلی را در برابر حد روانی آن نشان می‌دهد. براساس این شکل، رابطه‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای تراکم‌های نسبی ۵۰٪ (R_c) و ۷۰٪ جهت تعیین ضریب فشردگی (c_c) براساس حد روانی (LL) خاک رسی ارائه می‌شود:

$$R_c = 50\% \therefore c_c = 0.70009(LL + 170) \quad R^2 = 0.998 \quad (4)$$

$$R_c = 70\% \therefore c_c = 0.70005(LL + 300) \quad R^2 = 0.998 \quad (5)$$

با تلفیق رابطه‌های ۴ و ۵ می‌توان رابطه‌ی ۶ را برای تغییرات ضریب فشردگی خاک رسی آلوده با حد روانی سیال آلاینده پیشنهاد داد. همان‌طور که ذکر شد، تراکم نسبی

۵۰٪، تأثیر درصد آلاینده بر رفتار تحکیمی خاک به‌وضوح کمتر است. با توجه به مقیاس یکسان شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که میزان تورم نسبی اولیه در نمونه‌های با تراکم نسبی ۷۰٪ به مراتب بیشتر از مقدار نظیر در نمونه‌های با تراکم نسبی ۵۰٪ است.

$$R_s = \frac{\Delta e_s}{1 + e_s} \quad (2)$$

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ضریب فشردگی^{۱۳} محاسبه‌شده برای خاک آلوده به دو نوع سیال آلی در تراکم‌های نسبی متفاوت را ارائه می‌کند. نمای کلی این دو شکل حاکی از افزایش اندک ضریب فشردگی با ازدیاد درصد آلودگی در خاک است. این موضوع نشانگر افزایش تراکم‌پذیری خاک آلوده با توجه به لغزندگی سطوح و سهولت امکان حرکت دانه‌ها در خلل و فرج مابین آن‌هاست. به‌علاوه، با توجه به مقیاس یکسان دو شکل معین می‌شود که با ازدیاد تراکم نسبی نمونه، ضرایب فشردگی و به عبارتی تراکم‌پذیری خاک کاهش یافته است. البته تفاوت در مقادیر ضریب فشردگی کم بوده است و می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر آلودگی بر ویژگی‌های تحکیمی خاک رسی در تراکم‌های نسبی پایین کم است؛ گرچه آلودگی خاک در تراکم‌های نسبی بالا می‌تواند به عاملی بسیار تأثیرگذارتر تبدیل شود. با مقایسه‌ی وضعیت تراکم‌پذیری دو نوع خاک مختلف مشخص می‌شود که ضریب تراکم‌پذیری بنتونیت نسبت به کائولینیت بالاتر بوده است، ولی نوع سیال آلاینده تأثیر چندانی بر تغییرات آن نمی‌گذارد. بدین ترتیب افزایش تراکم نسبی عاملی در جهت ازدیاد تورم اولیه و کاهش تراکم‌پذیری در اثر اعمال مراحل بارگذاری خواهد بود.

در متون فنی مکانیک خاک روابط تجربی متعددی مابین ضریب فشردگی خاک (c_c) و حد روانی (LL) آن ارائه شده است. در خاک‌های رسی دست‌خورده

خاک بر میزان تأثیر آلاینده‌ی آلی بر رفتار تحکیمی آن مؤثر بوده است؛ به نحوی که در تراکم‌های نسبی پایین، اثر آلاینده بر تراکم‌پذیری خاک کمتر است. بر این اساس در رابطه‌ی پیشنهادی، تراکم نسبی خاک نیز به‌منزله‌ی پارامتری اثرگذار در نظر گرفته شده است. در این رابطه تراکم نسبی (R_c) خاک رس بر حسب درصد است.

$$c_c = 0.002(1 - 0.01R_c)[LL + 6.5(R_c - 24)] \quad (6)$$

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سری منظم از آزمایش‌های فیزیکی و تحکیم یک بعدی بر خاک رس آلوده به سیال آلی انجام شده است. دو نوع مختلف خاک با خصوصیات خمیری بالا و پایین برای خاک پایه انتخاب و از نفت سفید و نفت گاز نیز به‌عنوان سیال آلی هیدروکربنی برای شبیه‌سازی خاک آلوده استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش را می‌توان به‌این صورت بر شمرد:

۱. آلودگی خاک رس به سیال آلی موجب افزایش حد روانی و دامنه‌ی خمیری آن می‌شود. علت این امر لزجت بالای این سیالات نسبت به آب بوده است که سبب می‌شود خاک برای رسیدن به آستانه‌ی روان‌شدن و غلبه بر چسبندگی مضاعف ناشی از این ویسکوزیته‌ی بالا، آب بیشتری جذب کند و در نتیجه حد روانی آن افزایش یابد. این موضوع درخصوص هر دو نوع خاک رس آلوده به هر یک از آلاینده‌های نفت سفید و نفت گاز صادق است. با بررسی دقیق نتایج و مقایسه با نتایج دیگر پژوهشگران مشخص می‌شود، که به‌طورکلی در آلاینده‌هایی که به‌منزله‌ی سیال آلی به خاک وارد می‌شوند، دو دسته‌ی متفاوت قابل تفکیک هستند. دسته‌ی اول سیالاتی مانند: تولوئن، اتیلن گلیکول، پروپانول، و اتانول هستند که قابلیت انحلال در آب را دارند و دسته‌ی دوم شامل سیالاتی مانند: نفت خام، نفت گاز، و نفت سفید هستند که قابلیت انحلال در آب را

ندارند. دسته‌ی اول به‌دلیل قابلیت حل‌پذیری در آب می‌توانند تأثیر بیشتری بر ویژگی‌های شیمیایی سیال منفذی و خاک بگذارند. بدین ترتیب ارتباط متقابل ضخامت لایه‌ی آب دوگانه و ثابت دی‌الکتریک سیال آلی در مورد آن‌ها مطرح بوده است، و بنابراین با ازدیاد درصد آلاینده و کاهش ضخامت لایه‌ی آب دوگانه، رفتار خاک رسی به سمت مصالح دانه‌ی می‌ل می‌کند و از ویژگی‌های حالت خمیری آن کاسته می‌شود. اما در مورد سیالات دسته‌ی دوم که قابلیت انحلال در آب را ندارند، شرایط به‌گونه‌ی دیگری است و اساساً به‌دلیل حلال نبودن این سیالات در آب، تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی محیط آب و خاک نسبت به دسته‌ی اول کمتر است. لذا در مورد این سیالات خواص فیزیکی مانند لزجت و وزن مخصوص، با شدت بیشتری بر ارتباط نوع سیال منفذی و خاک رسی و به‌ویژه خصوصیات ناشی از این ارتباط مانند حدود اتربرگ و تراکم‌پذیری، تأثیرگذار است.

۲. نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد نشان داد که آلودگی خاک رس به نفت سفید و نفت گاز موجب افزایش تراکم‌پذیری خاک می‌شود. آلودگی به نفت سفید و نفت گاز باعث شد تا خاک با درصد وزنی کمتری از سیال منفذی به وزن مخصوص خشک بیشینه برسد. درواقع لزجت بالای نفت سفید و نفت گاز نسبت به آب باعث سهولت حرکت دانه‌ها و لغزش بهتر آن‌ها شده است که امکان دستیابی به تراکم‌های بالاتر را ممکن می‌سازد.

۳. در آزمایش‌های تحکیم یک بعدی بر روی خاک رس کائولینیت مشخص شد که آلودگی خاک رس به نفت سفید و نفت گاز با مقادیر وزنی مختلف ۳، ۶ و ۹ درصد باعث افزایش تورم اولیه‌ی خاک بعد از اشباع آن با آب می‌شود. همچنین ضریب فشردگی خاک با ازدیاد درصد آلاینده افزایش می‌یابد. البته میزان افزایش اندک این ضریب نشان‌دهنده‌ی تأثیر کم آلاینده بر خصوصیات تحکیمی خاک رس در تراکم‌های نسبی پایین است. همچنین آزمایش‌ها نشان داد که نوع سیال آلاینده تأثیر چندانی بر ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک نخواهد گذاشت. با استفاده از نتایج این تحقیق، مابین ضریب فشردگی خاک رس آلوده به سیال آلی و حد روانی خاک آلوده ارتباط برقرار شد.

پانوشته‌ها

1. British petroleum
2. Atterberg limits
3. Bentonite
4. Kaolinite
5. unified soil classification system
6. liquid limit
7. plastic limit
8. specific gravity
9. standard Proctor
10. relative compaction
11. normal saturation

12. relative swelling
13. compressibility coefficient

منابع (References)

1. Evgin, E. and Das, B.M. "Mechanical behavior of oil contaminated sand", *Environmental Geotechnology Conferences*, Usmen & Acar (eds), Balkema, Rotterdam (1992).
2. Al-Sanad, H.A., Eid, W.K. and Ismael, N.F. "Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand", *J. of Geotechnical Eng. ASCE*, **121**(5), pp. 407-412 (1995).

3. Fernandez, F. and Quigley, R.M. "Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons", *Canadian Geotechnical J.*, **22**(2), pp. 205-214 (1985).
4. Fernandez, F. and Quigley, R.M. "Viscosity and dielectric controls on the hydraulic conductivity of clays soils permeated with water soluble organics", *Canadian Geotechnical J.*, **25**(8), pp. 582-589 (1988).
5. Foreman, D.E. and Daniel, D.E. "Permeation of compacted clay with organic chemicals", *J. of Geotechnical Eng. ASCE*, **112**(7), pp. 669-681 (1986).
6. Acar, Y.B., and Gosh, A. "The role of activity in the hydraulic conductivity of compacted soils permeated with acetone", *Proceedings, Environmental Geotechnology Conference*, **1**, ENVO, Bethlehem, Pennsylvania, USA, pp. 403-410 (1986).
7. Bowders, J.J. and Daniel, D.E. "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals", *J. of Geotechnical Eng. ASCE*, **113**(12), pp. 1432-1449 (1987).
8. Acar, Y.B. and Olivieri, I. "Pore fluid effects on the fabric and hydraulic conductivity of laboratory compacted clay", *Transportation Research Record 1219, Geotechnical Eng., Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, D.C., pp. 144-159 (1989).
9. Barbour, S.L. and Fredlund, D.G. "Mechanisms of osmotic flow and volume change in clay soils", *Canadian Geotechnical J.*, **26**(4), pp. 551-562 (1989).
10. Yanful, E.K., Haug, M.D. and Wong, L.C. "The impact of synthetic leachate on the hydraulic conductivity of a smectitic tile underlying a landfill near Saskatoon, Saskatchewan", *Canadian Geotechnical J.*, **27**(4), pp. 507-519 (1990).
11. Meegoda, J.N. and Ratnaweera, P. "Compressibility of contaminated fine grained soils", *Geotechnical Testing J.*, **17**(1), pp. 101-112 (1994).
12. Anandarajah, A. and Zhao, D. "Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. Division ASCE*, **126**(2), pp. 148-155 (2000).
13. Kashir, M. and Yanful, E.K. "Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage", *Canadian Geotechnical J.*, **38**(5), pp. 1034-1048 (2001).
14. Ratnaweera, P. and Meegoda, J.N. "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing J.*, **29**(2), pp. 416-424 (2006).
15. Khamehchian, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M. "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Eng. Geology*, **89**(3), pp. 220-229 (2007).
16. Al-Rehman, S., Abdoljauwad, N. and Akram, T. "Geotechnical behavior of oil-contaminated fine grained soils", *Electronic J. of Geotechnical Eng.*, **7**(A), pp. 1-12 (2007).
17. Vipulanandan, C. and Elesvwarapu, P. "Index properties and compaction characteristics of kerosene contaminated clayey soil", *Geo-Congress, ASCE, Geotechnics of Waste Management and Remediation*, pp. 804-811 (2008).
18. Moavenian, M.H. and Yasrobi, S.S. "Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant", *Applied Clay Science*, **39**(1), pp. 60-71 (2008).
19. Mitchell, J.K., *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc., New York (1993).

INVESTIGATING THE CONSOLIDATION BEHAVIOR OF CONTAMINATED CLAY

A. Hamidi(corresponding author)

hamidi@tmu.ac.ir

S. Jedari

sirusjedari@gmail.com

**Dept. of Civil Engineering
Kharazmi University**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 29-35, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 8 March 2011; received in revised form 18 June 2011; accepted 13 September 2011.

Abstract

Soil is generally subjected to different contaminants that are being used and excreted into the environment. Leakage of these materials can influence its physical and mechanical characteristics. A review of technical literature in this field shows some contradictions between the results of different research, which reveals the impact of soil and contaminant type on the behavior of contaminated clayey soil. In order to investigate the effects of organic contamination on the physical and mechanical characteristics of clayey soil, in the present study, a series of index tests, besides one-dimensional consolidation (Oedometer tests), has been performed. Two types of clay, Kaolinite and Bentonite, with low and high plastic indexes are used as the base soils. Also kerosene and gasoil are applied as the organic contaminant in four different percentages of 0, 3, 6 and 9 to the base soil. All samples were kept for seven days in polyethylene bags to perform all chemical reactions before the tests. After that, water is used to saturate all samples normally within 48 hours. Results of physical tests reveal that Atterberg limits increase, by an increase in degree of contamination, for both considered soils. Also, maximum dry density increases with enhancement of the degree of contamination. However, according to the Proctor compaction tests, the optimum moisture content reduces with degree of contamination. This is illustrated due to the lubrication of grains during contamination with organic material. Consolidation tests are conducted on samples in two distinct relative compactions of 50% and 70%, and the results are investigated in e -Log(p) coordinates. Based on the results of one dimensional consolidation tests, compressibility coefficient increases, with an increase in contaminant percentage for both soils. Also, the effects of contamination on the consolidation behavior of clay increase with an enhancement in relative compaction. As a result, it is negligible in soil with low relative compaction. Using

the results of tests, an empirical relation is suggested between the compressibility coefficient of contaminated soil and its relative compaction and liquid limit. Comparison of the suggested equation with ordinary relations in soil mechanics texts shows a great difference, which proves the necessity for new suggested forms in contaminated soil. Finally, it was concluded that chemical and organic contaminants, like kerosene and gas oil, which are not soluble in water, are more effective in changing the physical characteristics of soil, like Atterberg limits and relative compaction. However, compared to the first category, soluble organic contaminants are more effective on the mechanical and consolidation characteristics of clayey soil.

Key Words: Index properties, consolidation behavior, contaminated clays, organic fluid, viscosity.