

بررسی اثر نفت خام بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه منطقه پالایشگاه شازند اراک

رقیه حسنی^۱، ابراهیم اصغری کلجاهی*^۲، سینا مجیدیان^۳

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی اراک
^۲ دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران

دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۹ بازننگری: ۱۴۰۱/۱۲/۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۶ نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۱/۱۶

چکیده

با گسترش صنایع نفتی و همچنین با فرسودگی تأسیسات و خطوط لوله، نشت مواد نفتی بیشتر می‌شود. نشت نفت علاوه بر تأثیرات منفی محیط زیستی، باعث ایجاد تغییراتی در خواص فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک می‌شود. این تغییرات در خاک‌های درشت‌دانه به‌صورت فیزیکی و در خاک‌های ریزدانه به‌صورت تغییرات فیزیکی و ساختاری رخ داده و منجر به کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست‌پذیری خاک زیر پی می‌شود. به‌منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه در اثر نفوذ نفت، نمونه خاکی از محدوده پالایشگاه شازند اراک برداشته شده و با نسبت‌های وزنی ۰-۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد نفت خام مخلوط شده و نمونه‌سازی با تراکم ۹۰ درصد دانسیته حداکثر (روش پروکتور) صورت گرفته و آزمایشات مختلف فیزیکی و مکانیکی انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزودن نفت تا ۱۰ درصد، حد روانی ۲۱ درصد کاهش یافته و در ادامه با افزایش آن تا ۱۵ درصد، حد روانی افزایش یافته و با افزودن ۲۰ درصد دوباره کاهش می‌یابد. البته شاخص خمیری تقریباً با افزایش مقدار نفت، روند کاهشی دارد. در آزمایش تراکم، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با افزودن نفت خام افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه نیز با افزایش مقدار نفت تا ۱۰ درصد کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین افزودن نفت به‌طور کلی باعث کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود. افزایش مقدار نفت در تحکیم خاک اثری متفاوت داشته و ضریب تحکیم خاک با افزایش مقدار نفت، افزایش می‌یابد. ضمناً مقاومت فشاری تک‌محوری خاک با افزایش مقدار نفت کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: نفت خام، نشت نفت، ضریب تحکیم، خاک ریزدانه، ضریب نفوذپذیری، لایه آب دوگانه.

۱- مقدمه

(توزیع اندازه منافذ، ساختمان و بافت خاک، نسبت تخلخل، پتانسیل خاک و آب)، خواص سیال نفوذ کننده (دانسیته، فشار و ویسکوزیته سیال) و اثر اندرکنش خاک رس با سیال (غلظت یونی، ایجاد لایه آب دوگانه و ضخامت آن، اندرکنش بین خاک-سیال-آب) می‌باشد (ترابی و حسنلو، ۱۳۹۷).

Horgan و Ball (۱۹۹۴) مقدار فضای خالی و تخلخلی که بر جریان سیال در خاک اثرگذار است را به چند گروه تقسیم کرده‌اند:

- تخلخل اولیه^۱: سیستم اصلی تخلخل در یک توده خاک محصور نشده یا یک توده خاک آبرفتی است.
- تخلخل ثانویه^۲: یک سیستم جداگانه معرف حفره‌های درون توده خاک است که اغلب باعث افزایش میزان تخلخل کلی

هر توده خاک از ذرات با اندازه‌های مختلف و فضای خالی به‌هم پیوسته تشکیل شده است. فضای خالی بین ذرات خاک این امکان را به یک سیال می‌دهد که از گرادیان هیدرولیکی بیشتر به گرادیان هیدرولیکی کمتر حرکت کند. حرکت و انتقال سیال در خاک به عوامل متعددی از جمله انرژی پتانسیل سیال، سازوکارهای درونی و بیرونی، نیروی محرک حرارتی، یونی، اسمزی، گرادیان هیدرولیکی، ویسکوزیته سیال، دانسیته و غیره بستگی دارد. تعیین نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه به‌دلیل تخلخل مفید کم، دشوارتر از خاک‌های درشت‌دانه بوده و وابسته به پارامترهای متعددی چون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

2. Secondary porosity

1. Primary porosity

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۷۲۴

تأثیرگذار است. خاک رس کائولونیت و بنتونیت آلوده به سیال آلی سبب ازدیاد تورم اولیه خاک شده و به علاوه روغن کاری ذرات خاک به دلیل حضور سیال نفتی موجب افزایش تراکم‌پذیری خاک خواهد شد (حمیدی و جداری، ۱۳۹۲).

تغییرات دمای محیط، نوع خاک منطقه و pH خاک آغشته به نفت، تأثیرات زیادی بر پارامترهای فیزیکی و مقاومتی خاک زیر پی می‌گذارد. با توجه به این که نفوذپذیری خاک‌های رسی وابسته به سیال درون حفرات خاک می‌باشد (Mitchell و Moore، ۱۹۷۶).

انتشار نفت در خاک به سبب نیروی وزن خود در لایه‌های خاک نفوذ می‌کنند. تحرک و پویایی نفت و مشتقات آن در خاک به ویسکوزیته، مقدار نشت و نفوذپذیری خاک وابسته می‌باشد. در هنگام نفوذ نفت به لایه‌های خاک، در حالتی که عمق سطح آب-های زیرزمینی زیاد باشد، نفت قبل از رسیدن به آب‌های زیرزمینی در خاک‌های غیراشباع حرکت کرده و تا حدود زیادی جذب می‌شود. نفت خام جذب شده توسط خاک سبب تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها از قبیل حد خمیری و حد روانی می‌شود (Rahman و همکاران، ۲۰۱۰؛ Rajabi و Sharifipour، ۲۰۱۷).

نشت مشتقات نفتی مثل بنزین بر اثر طبیعت ترکیبات آلی بسیار فرار، تمایل به تبخیر زیادی دارند. بنابراین نفت خام و مشتقات آن، به دلیل حضور در مقادیر زیاد و در مدت زمان طولانی، به تدریج در لایه‌های خاک نفوذ کرده و باعث تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجه می‌شود (Xu و همکاران، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر خاک‌های آلوده به دلیل میزان زیاد نشت نفت و مشتقات آن بر اثر حوادث و حمل و نقل جاده‌ای، در نقاط مختلف کشور افزایش یافته و از همین‌رو، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات زیادی در زمینه تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه آلوده صورت نگرفته و بیشتر آزمایش‌ها در مورد خاک‌های درشت-دانه می‌باشد. در این پژوهش‌ها، خاک با مقادیر مختلف وزنی با نفت خام مخلوط و پس از گذشت مدت زمان چند روز تا چند ماه، مورد آزمایش قرار گرفته است. تغییرات قابل توجه در خصوصیات ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی خاک‌ها با آلاینده‌های نفتی، باعث علاقه‌مندی پژوهشگران به تحقیق روی این نوع خاک‌ها شده است. آزمایش‌هایی را به منظور بررسی تأثیر نفت بر پارامترهای تراکم‌پذیری و مقاومت برشی ماسه انجام دادند که این بررسی‌ها نشان‌دهنده کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش تراکم‌پذیری بوده است. تأثیر آلودگی نفت بر پارامترهای مقاومت، نشست و تراکم‌پذیری ماسه توسط Sedghyani و Jiriae Sharahi (۲۰۰۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌های آن‌ها

محیط می‌شوند. این سیستم بر اثر فروشویی شیمیایی مواد معدنی یا تشکیل درزه‌ها به وجود می‌آید. تخلخل ثانویه یا جایگزین تخلخل اولیه می‌شود یا در کنار آن قرار می‌گیرد. - تخلخل مؤثر^۳ یا تخلخل باز^۴: نسبتی از حجم کل که سیال می‌تواند به طور مؤثر درون آن جریان داشته باشد را نشان می‌دهد. این نوع تخلخل، حفره‌های کور و به هم پیوسته را در نظر می‌گیرد و حفره‌های بسته (غیرمتصل) را شامل نمی‌شود. تخلخل مؤثر اهمیت زیادی در جریان آب‌های زیرزمینی، جریان نفت و همچنین انتقال مواد محلول دارد. - تخلخل غیرمؤثر^۵ یا تخلخل بسته^۶: نسبتی از حجم کل که سیال در آن حضور دارد اما نمی‌تواند به‌طور مؤثر جریان داشته باشد. در این نوع تخلخل، تنها حفره‌های بسته در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعریف تخلخل مؤثر و غیرمؤثر، درک مناسب مورفولوژی یک محیط متخلخل از اهمیت بالایی برای مطالعه جریان آب‌های زیرزمینی و یا جریان نفت برخوردار است.

جنس رسوبات در حفظ و پایداری آلودگی‌های نفتی مؤثر است، چنان که معمولاً رابطه مستقیمی بین مقدار رس و هیدروکربن‌های آروماتیک وجود دارد. شاید این پدیده مربوط به سطح ویژه بالا در کانی‌های رسی باشد. ورقه‌های کانی‌های رسی در سطح خود حاوی بارهای منفی بوده و این ناپایداری در بارهای الکترونی باعث افزایش تبادلات کاتیونی می‌شود. در نتیجه رس‌ها می‌توانند مواد نفتی را بهتر از ماسه‌ها جذب و نگهداری کنند. با افزایش کانی‌های رسی در رسوبات، ظرفیت تبادل یونی بالا می‌رود، بنابراین تأثیر آلودگی‌های نفتی بر خاک‌های رسی بیشتر است (تاجیک و همکاران، ۱۳۸۸).

هر تغییری در مشخصات مهندسی خاک می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست پی سازه شود، اگرچه CPT و SPT آزمایشات منحصر به فردی برای تخمین خواص مهندسی هستند که برای مناطق خشکی ایده‌آل هستند، این آزمایش‌ها برای خاک‌های ساحلی با سطوح اشباع مختلف قابل انطباق هستند که تعیین مدول تغییرشکل میدان را تسهیل می‌کند ولی نفوذ نفت که تأثیر مستقیم بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک داشته و سبب تغییر در رفتار خاک (تغییرات حجمی، مقاومت برشی و هیدرولیسی) می‌شود (Poor و همکاران، ۲۰۲۲).

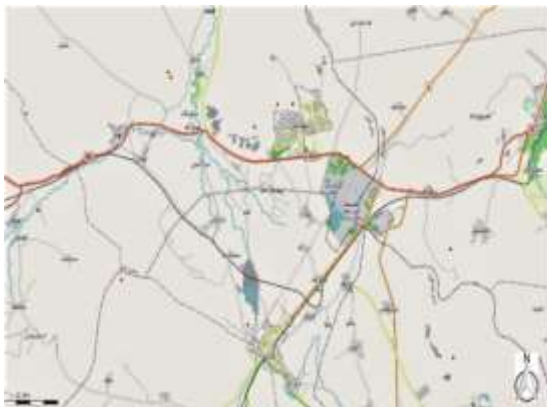
با توجه گسترش صنایع نفتی و استفاده از فرآورده‌های نفتی، نشت نفت و آغستگی خاک زیر پی سازه‌ها، مخازن و خطوط لوله انتقال نفت هم بیشتر می‌شود. این خاک‌ها در معرض آلودگی‌های فراوان در اثر نشت از مخازن نفتی، چاه‌های نفت و سدهای باطله هستند که این آلودگی بر خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک

عبادی و کرمانی (۱۳۸۸) به تأثیر آلودگی نفت خام بر حدود اتربرگ و خصوصیات تراکمی خاک‌های ریزدانه پرداختند. نمونه‌های حاوی ۵ تا ۱۰ درصد نفت خام، موجب تثبیت خاک رسی و بهبود رفتار خاک آغشته به نفت شده و در برخی پروژه‌های راهسازی به‌عنوان مصالح جایگزین و جهت فرایند تثبیت و بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Amini و همکاران، ۲۰۰۸؛ Okagbue و Onyeobi، ۱۹۹۹؛ Olgun و Yildiz، ۲۰۱۰).

همان‌گونه که اشاره شد، مطالعات قابل توجهی در خصوص خاک‌های آغشته به مواد نفتی انجام شده است. اما مطالعات جامعی در خصوص تأثیر نفت روی خاک‌های ریزدانه به‌ویژه بر روی تحکیم خاک‌های رسی انجام نگرفته است. بر همین اساس در این تحقیق، آزمایش‌هایی در مورد پارامترهای ژئوتکنیک خاک‌های ریزدانه آغشته به نفت از جمله حدود اتربرگ، مقاومت، تراکم و نفوذپذیری و تحکیم خاک انجام گرفته است. هدف این مقاله بررسی تأثیر مواد نفتی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه با تأکید بر خاک‌های ریزدانه محدوده پالایشگاه شازند اراک می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده نمونه خاک محدوده پالایشگاه شازند و نمونه نفت خام خوراک پالایشگاه شازند می‌باشد. پالایشگاه شازند در ۲۵ کیلومتری غرب اراک واقع است (شکل (۱)).



شکل ۱- موقعیت پالایشگاه شازند اراک

در محدوده پالایشگاه با هدف بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی، تعداد ۷۰ گمانه به اعماق ۵۰ تا ۶۰ متر به‌وسیله شرکت پژوهش عمران راهوار (۱۳۹۸) حفاری شده است. در حفاری برخی گمانه‌ها مغزه‌گیری صورت گرفته است. در شکل (۲) تصویری از جعبه‌های مغزه‌های حفاری نشان داده شده است.

نشان داد که در اثر آلوده شدن خاک به نفت، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته و نشست آبی افزایش می‌یابد. همچنین بر روی خاک‌های ریزدانه آلوده نیز تحقیقاتی انجام شده است.

Khamehchiyan و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که در خاک‌های رسی افزایش مقدار نفت خام باعث کاهش چشمگیر چسبندگی می‌شود.

Lekmine (۱۹۹۱) نشان داد که برای رس‌های فعال مانند مونت‌موریونیت، تراکم‌پذیری با افزایش زمان نفوذ هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد.

Acar و همکاران (۱۹۸۵) نتیجه گرفتند که با کاهش ثابت دی الکتریک، نیروهای دافعه کاهش می‌یابد و بنابراین ضخامت لایه آب دوگانه و حد روانی کاهش می‌یابد.

Meegoda و Ratnaweera (۱۹۹۴) مطالعاتی بر روی

شاخص فشردگی خاک‌های ریزدانه آلوده شده به مواد نفتی انجام دادند. نتایج آزمایش‌های این محققین نشان می‌دهد که عواملی مثل ویسکوزیته مواد نفتی، باعث روغن کاری و سهولت لغزش ذرات خاک شده و افزایش شاخص فشردگی را در پی دارد. همچنین آن‌ها تحقیقاتی روی تراکم‌پذیری خاک‌های آلوده ریزدانه با حدروانی کم و زیاد به وسیله آزمایش تحکیم انجام دادند. Al-Sanad و Ismael (۱۹۹۷) به بررسی خاک‌های ماسه‌ای آلوده شده بر اثر تخریب تأسیسات استخراج و ذخیره نفت خام و نشأت آن در موقع جنگ خلیج فارس در کشور کویت پرداختند. نتایج نشان داد که نفوذپذیری و مقاومت خاک آلوده کاهش یافته و تراکم‌پذیری آن افزایش یافته است.

Ashraf (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر آلودگی روغن موتور روی خاک رسی پیش تحکیم یافته پرداخته و از کاهش حدود اتربرگ و مقاومت فشاری محدود نشده و افزایش نفوذپذیری، تراکم و پتانسیل تورم خاک آلوده به نفت گزارش دادند.

همچنین Shah و همکاران (۲۰۰۳) یک سری آزمایش‌های ژئوتکنیک خاک‌های آلوده به روغن موتور برای دو نوع خاک رسوبی از منشأ گرانیته و بازالتی، آزمایش‌هایی انجام داد. Rahman و همکاران (۲۰۱۰) به‌منظور بررسی مشخصات ژئوتکنیک خاک‌های آلوده به روغن موتور برای دو نوع خاک رسوبی از منشأ گرانیته و بازالتی، آزمایش‌هایی انجام داد.

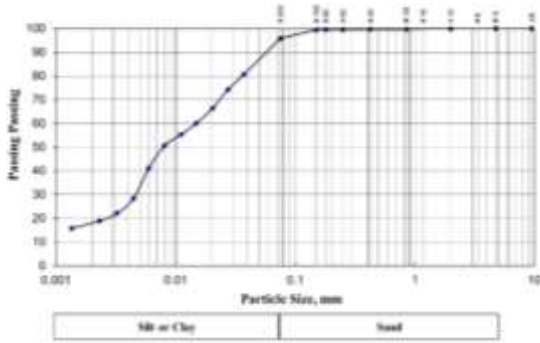
Trzcinski و Izdebska-Much (۲۰۰۸) به‌منظور بررسی تغییرات ریزساختاری خاک رس آلوده به گازوئیل، آزمایش‌هایی را انجام دادند. Olgun و Yildiz (۲۰۱۰) به‌منظور بررسی تأثیر آلودگی متانول، اتانول، ایزوپروپیل الکل و اسیداستیک بر خاک رس، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تحکیم و مقاومت برشی انجام دادند. Oyegbile و Ayininuola (۲۰۱۳) آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین اثر آلودگی نفت خام بر مقاومت برشی خاک‌های سرخ (لاتریت) انجام دادند.



شکل ۴- تصویری از خاک پایه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک پایه

قهوه‌ای روشن	رنگ خاک
CL	رده خاک
۴۷	LL%
۲۱	PI%
۲/۶۵	G _s
۹/۳	pH
۰/۲۲	SO ₃ ^۲ %
۰/۰۱۴	CL %
۱/۳	مواد آلی %



شکل ۵- نمودار دانه‌بندی خاک پایه

نفت خام مورد استفاده از پالایشگاه شازند دریافت شده است (شکل (۶)).

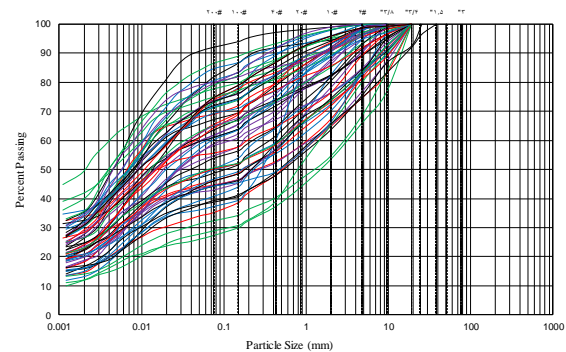


شکل ۶- تصویری از نفت خام مورد استفاده در آزمایشات



شکل ۲- مغزه‌های حفاری یکی از گمانه‌های حفاری شده در محدوده پالایشگاه شازند (شرکت پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۸)

نتایج حفاری‌ها نشان داد که اغلب لایه‌های زمین تا عمق ۵۰ متری از خاک‌های ریزدانه با طبقه بندی یونیفاید CL تشکیل یافته است. نمودار دانه بندی برخی از نمونه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. نمونه برداری از آب زیرزمینی و انجام آزمایشات تجزیه شیمیایی نشان داد که در محل برخی گمانه‌ها آلودگی نفتی وجود دارد. بنابراین نشت مواد نفتی در این محدوده جدی بوده و با گذشت زمان و فرسوده شدن تاسیسات پالایشگاه و مخازن، احتمال نشت مواد نفتی بیشتر خواهد شد.



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی خاک‌های محدوده پالایشگاه شازند (شرکت پژوهش عمران راهوار، ۱۳۹۸)

۲-۱- مواد مورد استفاده

نمونه‌های خاک از گمانه‌های حفاری شده در محدوده پالایشگاه شازند برداشته شده و به آزمایشگاه انتقال داده شده است. خاک چند عمق مختلف از ۵ گمانه با هم مخلوط شده و نمونه خاک پایه به دست آمده و در آزمایشات بررسی تأثیر نفت بر خاک ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل (۴) تصویری از خاک پایه و در شکل (۵) نمودار دانه‌بندی خاک پایه و در جدول (۱) مشخصات آن ارائه شده است.

شده و آزمایشات تعیین حدود اتربرگ مطابق ASTM D4318 صورت گرفت. در شکل (۸) تصویری از این آزمایشات ارائه شده است. در جدول (۳) نتایج آزمایشات تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های با مقادیر مختلف نفت نشان داده شده است.

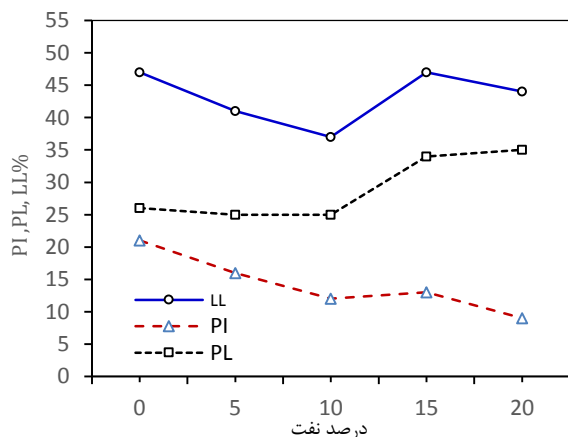


شکل ۸- تصویری از آزمایشات تعیین حدود اتربرگ

جدول ۳- نتایج آزمایشات تعیین حدود اتربرگ خاک دارای مقادیر مختلف نفت

درصد نفت	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰
حدود اتربرگ	۴۷	۴۱	۳۷	۴۷	۴۴
LL %	۲۶	۲۵	۲۵	۳۴	۳۵
PL %	۲۱	۱۶	۱۲	۱۳	۹

همان‌طور که در نمودار شکل (۹) دیده می‌شود، در ابتدا با افزایش مقدار نفت تا ۱۰ درصد، حد روانی خاک کاهش می‌یابد و در ادامه با افزایش نفت تا ۱۵ درصد، حد روانی افزایش یافته و در مقدار ۲۰ درصد، حد روانی دوباره کاهش می‌یابد. البته شاخص خمیری تقریباً با افزایش مقدار نفت، روند کاهشی دارد به نحوی که از خاک بدون نفت تا خاک با حدود ۲۰ درصد نفت، مقدار آن تقریباً نصف می‌شود.



شکل ۹- تأثیر نفت بر خواص خمیری خاک

۳-۲- بررسی تأثیر نفت روی تراکم خاک

آزمایش تراکم بر روی نمونه خاک با مقادیر نفت خام ۰-۵-

این نفت از میدان نفتی مارون که متشکل از مخازن آسماری، بنگستان و خامی، نفت‌های مخازن آسماری و بنگستان از لحاظ ژئوشیمیایی بسیار شبیه به یکدیگر است. در جدول (۲) مشخصات فیزیکی و شیمیایی نفت خام مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نفت خام مورد استفاده (آزمایشگاه پالایشگاه شازند، ۱۴۰۰)

مشخصات	واحد	مقدار
وزن API	API°	۳۱/۳
مقدار آب	%	۰/۱
ویسکوزیته در دمای ۱۰ درجه	mm ² /s	۲۷/۲
ویسکوزیته در دمای ۲۰ درجه	mm ² /s	۱۷/۳
ویسکوزیته در دمای ۴۰ درجه	mm ² /s	۸/۱
مقدار نمک	PTB	۷/۵
فشار بخار نفت خام	kPa	۶۰

۲-۲- روش تهیه و عمل‌آوری نمونه‌ها

حدود ۳۰ کیلو از خاک پایه مورد نظر خشک شده و از الک شماره ۱۰ (اندازه منافذ ۲ میلی‌متر) عبور داده شد. سپس نمونه خاک به ۵ قسمت تقسیم شده و به هر قسمت مقادیر ۰-۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد وزنی خاک خشک، نفت خام به صورت اسپری افزوده شده و بهم‌زده شد تا به صورت همگن درآید. بلافاصله هر قسمت در کیسه‌های پلاستیکی ریخته شده و سر آن‌ها بسته شد تا از تبخیر مواد نفتی جلوگیری شود. در شکل (۷) تصویری از نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است. این نمونه‌ها حداقل به مدت ۷ روز در همین وضعیت نگهداری شد تا نفت جذب ذرات خاک شود.



شکل ۷- تصویری از نمونه‌های آغشته با مقادیر مختلف نفت

۳- نتایج آزمایشات

بر روی نمونه‌های تهیه شده با مقادیر مختلف نفت، آزمایشات مختلفی انجام شده که در ادامه نتایج آن‌ها ارائه شده است.

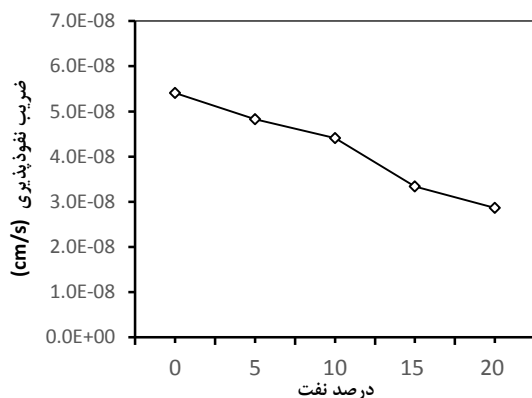
۳-۱- بررسی تأثیر نفت روی خواص خمیری خاک

از هر نمونه به مقدار ۳۰۰ گرم از الک شماره ۴۰ عبور داده

مخصوص، ویسکوزیته و دما) و درجه اشباع^۹ که در خاک‌های نیمه‌اشباع، گاز یا هوای موجود در حفره‌ها، مانع از عبور راحت آب شده و به این ترتیب، نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد. به‌طور کلی خاک‌های اشباع، نفوذپذیری بیشتری نسبت به خاک‌های نیمه‌اشباع دارند. برای انجام آزمایشات نفوذپذیری، نمونه‌هایی به قطر ۱۰ و به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر داخل استوانه دستگاه نفوذپذیری با تراکم ۹۰ درصد وزن مخصوص حداکثر (۱/۵۴ گرم بر سانتی متر مکعب) تهیه شده است. آزمایش نفوذپذیری به‌روش بار افتان بر روی نمونه خاک با مقادیر نفت ۰-۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد انجام گردیده است. نتایج آزمایشات مذکور در جدول (۵) ارائه و در شکل (۱۱)، تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به مقدار نفت نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایشات تعیین نفوذپذیری خاک با مقادیر مختلف نفت

ضریب نفوذپذیری cm/s	درصد نفت
۵/۴۱E-۰۸	۰
۴/۸۳E-۰۸	۵
۴/۴۱E-۰۸	۱۰
۳/۳۴E-۰۸	۱۵
۲/۸۶E-۰۸	۲۰



شکل ۱۱- تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک نسبت به مقدار نفت

همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، ضریب نفوذپذیری خاک پایه ۵/۴-۸ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد و با افزودن نفت مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

۳-۴- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری

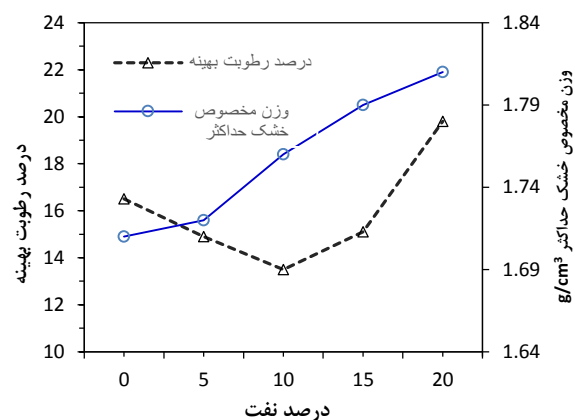
مقاومت خاک‌ها از دو بخش مقاومت اصطکاکی و مقاومت ناشی از چسبندگی خاک‌های رسی تشکیل شده است. مقاومت اصطکاکی تابعی از فشار محصورکننده بوده و به قفل و بست ذرات

۱۰-۱۵-۲۰ درصد انجام شده است. آزمایش تراکم به‌روش استاندارد مطابق ASTM D698 انجام گردیده است. نتایج آزمایشات تراکم در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایشات تراکم خاک به‌روش استاندارد (پروکتور) با مقادیر مختلف نفت

درصد نفت	وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm ³)	درصد رطوبت بهینه (%)
۰	۱/۷۱	۱۶/۵
۵	۱/۷۲	۱۴/۹
۱۰	۱/۷۶	۱۳/۵
۱۵	۱/۷۹	۱۵/۱
۲۰	۱/۸۱	۱۹/۸

همان‌گونه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام وزن مخصوص خشک حداکثر به‌ترتیب ۵ و ۶ درصد افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه با افزودن ۱۰ درصد نفت خام ۱۸ درصد کاهش داشته است و در ادامه با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام، رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات دانسیته خشک و رطوبت بهینه خاک نسبت به نفت در آزمایشات تراکم استاندارد

۳-۳- نتایج آزمایشات تعیین اثر نفت بر نفوذپذیری خاک

به‌طور کلی، به توانایی خاک در انتقال سیال را نفوذپذیری^۷ می‌گویند. هرچه تخلخل مفید خاک بالا باشد، نفوذپذیری هم بیشتر است. در خاک‌های رسی علاوه بر تخلخل، ساختار خاک تأثیر به‌سزایی بر ضریب نفوذپذیری^۸ دارد. سایر عوامل مهمی که بر ضریب نفوذپذیری خاک تأثیر می‌گذارند عبارتند از: ابعاد و شکل ذرات خاک، سطح ویژه ذرات خاک، خصوصیات سیال (وزن

9. Degree of Saturation

7. Permeability

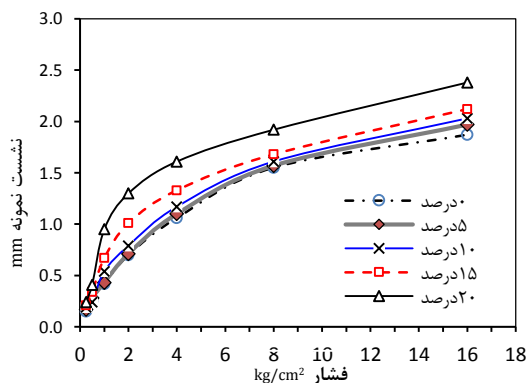
8. Coefficient of permeability

۳-۵- نتایج آزمایشات تعیین اثر نفت بر تحکیم خاک

نمونه‌هایی با مقادیر مختلف نفت با نسبت تراکم ۹۰ درصد (وزن مخصوص خشک ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در داخل حلقه دستگاه تحکیم ادومتر ساخته شده و جهت اشباع کامل حدود ۴ روز در حوضچه دستگاه تحکیم نگهداری شد. سپس آزمایش تحکیم با اعمال فشارهای ۵/۱-۲-۴-۸-۱۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انجام شده است (شکل ۱۴). منحنی تغییر شکل - لگاریتم زمان هر مرحله بارگذاری ترسیم شده و سپس نمودار $e-\log p$ ترسیم گردیده و ضرایب شاخص فشردگی C_c ، ضریب تحکیم C_v و ضریب نفوذپذیری k استخراج گردید. بر اساس ضریب تحکیم می‌توان نرخ وقوع تحکیم خاک را براساس رابطه زیر تعیین نمود:

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

در این رابطه T_v فاکتور بدون بعد زمان t زمان سپری شده از شروع تحکیم لایه رسی و H طول کوتاه‌ترین مسیر زهکشی آب حفره‌ای است. نتایج حاصل از آزمایشات با نتایج به‌دست آمده از تحکیم خاک بدون نفت مقایسه شده تا میزان تغییرات پارامترهای نشست خاک در اثر نفوذ مواد نفتی مشخص شود. ضرایب تحکیم خاک، مانند ضریب تحکیم (C_v) ، شاخص فشردگی، ضریب نفوذپذیری (k) و غیره به عوامل زیادی مانند نوع خاک، نسبت فضای خالی، درجه اشباع، ساختار خاک، تاریخچه تنش، ماهیت سیال منفذی بستگی دارد. نتایج آزمایشات تحکیم با مقادیر مختلف نفت در جدول (۷) ارائه شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه خاک بدون نفت، ضریب تحکیم (C_v) و ضریب قابلیت فشردگی حجمی (m_v) به ترتیب برابر $۰.۲-۱/۰۹e$ سانتی‌مترمربع بر ثانیه و $۰.۳-۴/۰۷e$ سانتی‌مترمربع بر کیلوگرم تعیین شده است. درصد رطوبت خاک اولیه قبل از انجام آزمایش $۲۰/۹$ درصد و نسبت تخلخل اولیه خاک برابر $۰/۵۳$ به‌دست آمده است.



شکل ۱۴- نمودار نشست نمونه خاک با مقادیر مختلف نفت در فشارهای مختلف طی آزمایشات تحکیم

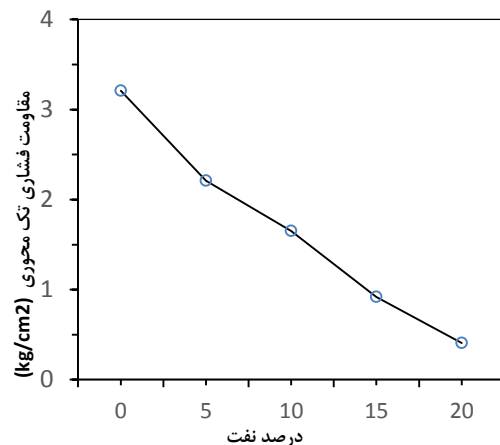
بستگی دارد. این مقاومت بیشتر در خاک‌های دانه‌ای قابل توجه است. مقاومت چسبندگی ناشی از نیروهای سطحی ذرات رسی است. نیروهای سطحی بر روی ذرات خاک تاکنون به‌صورت کامل شناخته نشده است. این مقدار از چسبندگی همواره مقدار ثابتی نیست و تابع مقدار بار اعمالی به خاک است. مقاومت فشاری تک-محوری مطابق با استاندارد ASTM D2166 بر نمونه‌های با مقادیر نفت ۰-۵-۱۰-۱۵-۲۰ درصد انجام شده است. در شکل (۱۲) تصویری از نمونه‌های آزمایش شده نشان داده شده است. نتایج آزمایشات در جدول (۶) ارائه شده است. در شکل (۱۳) نیز روند تغییرات آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری را به‌ازاء مقادیر مختلف نفت خام نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نفت مقاومت فشاری تک‌محوری خاک کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- تصویری از نمونه‌های آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری

جدول ۶- نتایج آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری با مقادیر مختلف نفت

درصد نفت	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰
مقاومت فشاری (kg/cm²)	۳/۲۱	۲/۲۱	۱/۶۵	۰/۹۲	۰/۴۱



شکل ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری خاک با مقدار نفت

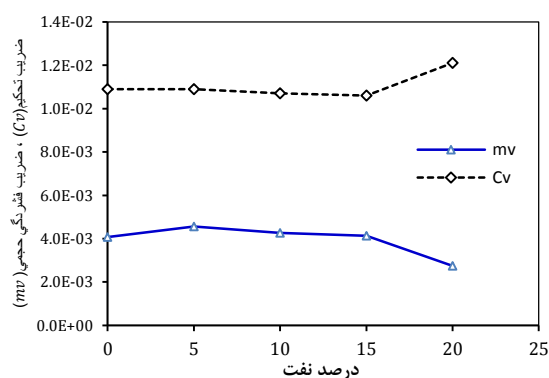
است. افزایش نفت باعث کاهش نشست پذیری خاک در فشارهای یکسان می‌شود ولی با افزایش مقدار نفت در همان فشارها، نشست بیشتری ایجاد می‌کند (شکل ۱۶)). بر اساس نمودارها با افزایش تنش سربار، ضریب تحکیم کاهش می‌یابد.

پس از انجام آزمایش نمونه با ۱۵ درصد نفت خام، نسبت تخلخل نمونه برابر ۰/۴۷ و مقدار رطوبت خاک برابر ۱۸/۵ درصد تعیین شده است. در شکل (۱۵) تغییرات ضریب تحکیم و ضریب فشرده‌گی خاک به‌ازاء مقادیر مختلف نفت خام نشان داده شده

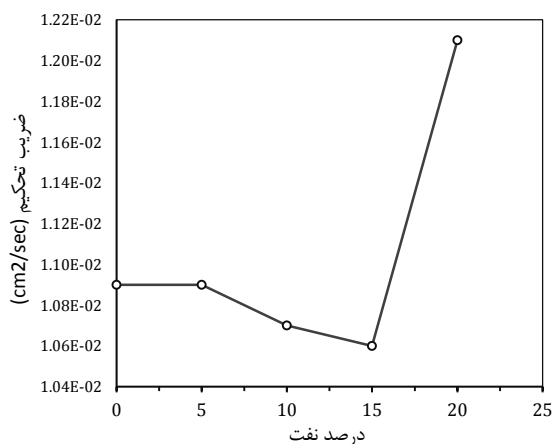
جدول ۷- نتایج آزمایشات تحکیم در مقادیر مختلف نفت

درصد نفت	e_0	W %	Sr %	C_v , cm ² /s	m_v , cm ² /kg	k cm/s
۰	۰/۵۳	۲۰/۹	۷۹/۰	۱/۰۹E-۰۲	۴/۰۷E-۰۳	۵/۴۱E-۰۸
۵	۰/۵۲	۲۰/۲	۷۹/۱	۱/۰۹E-۰۲	۴/۵۶E-۰۳	۴/۸۳E-۰۸
۱۰	۰/۴۹	۱۹/۴	۷۹/۴	۱/۰۷E-۰۲	۴/۲۷E-۰۳	۴/۴۱E-۰۸
۱۵	۰/۴۷	۱۸/۵	۸۱/۵	۱/۰۶E-۰۲	۴/۱۴E-۰۳	۳/۳۴E-۰۸
۲۰	۰/۴۷	۱۷/۹	۹۲/۹	۱/۲۱E-۰۲	۲/۷۵E-۰۳	۲/۸۶E-۰۸

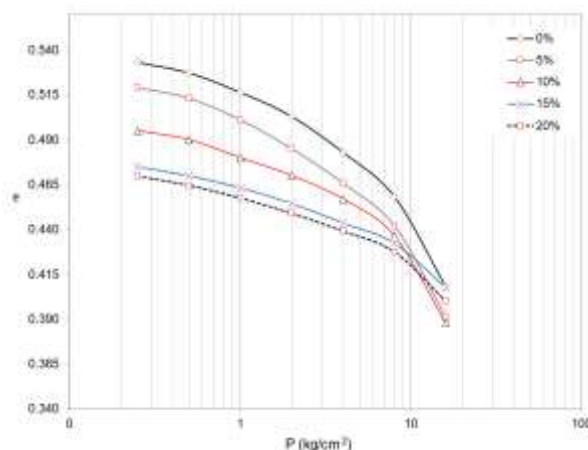
می‌یابد. همچنین در نمونه‌هایی با مقادیر مختلف نفت، نمونه‌هایی با مقدار نفت کم، نسبت تراکم کمتر و ضریب تحکیم بیشتری دارند. این امر به دلیل نسبت تخلخل و فضای خالی بیشتر مابین دانه‌های خاک است. تحکیم در خاکی که حفرات خالی بیشتری در بین دانه‌های خود دارد، سریع‌تر اتفاق می‌افتد و این امر در نمونه‌هایی با نسبت تراکم کمتر به خوبی قابل مشاهده است. البته با افزایش درصد نفت در خاک از سرعت وقوع تحکیم کاسته می‌شود. در شکل (۱۷) متوسط ضرایب تحکیم محاسبه شده در تنش‌های سربار مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به لزجت زیاد نفت نسبت به آب، مقادیر ضریب تحکیم به دست آمده برای خاکی با (۱۵) درصد نفت کمتر از خاک آغشته به ۲۰ درصد نفت می‌باشد. در واقع سیال نفت خام با توجه به ویسکوزیته بالاتر نسبت به آب نمی‌تواند از بین حفرات خاک خارج شود. مقدار ضریب تحکیم (C_v) با افزایش درصد نفت خام در بیشتر موارد کاهش می‌یابد. کاهش نفوذپذیری ممکن است به دلیل کاهش حجم منافذ خاک باشد.



شکل ۱۵- تغییرات ضریب تحکیم و ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی نسبت به درصد نفت



شکل ۱۷- تغییرات ضریب تحکیم نسبت به مقدار نفت



شکل ۱۶- نمودار $e - \log P$ نسبت به مقادیر مختلف نفت

همان طوری که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود با افزایش تنش سربار، ضریب تحکیم کمتر می‌شود، زیرا خاک ریزدانه اعم از خاک بدون نفت و خاک آغشته به نفت، عمدتاً در تنش‌های کم و در همان ابتدای اعمال تنش، بخش عمده‌ای از تحکیم خود را تجربه کرده و پس از آن سرعت تحکیم و پیرو آن ضریب تحکیم کاهش

خاک ریزدانه در مقدار کم نفت موجب افزایش چسبندگی خاک شده و با افزایش مقدار نفت، خاک شبیه یک خاک دانه‌ای بدون چسبندگی رفتار کرده و در نتیجه حد روانی کاهش می‌یابد.

افزودن ۲۰ درصد نفت خام سبب افزایش تراکم‌پذیری خاک ریزدانه شده است. علت فیزیکی افزایش تراکم‌پذیری، روغن کاری دانه‌های این نوع خاک است که موجب لغزش راحت‌تر دانه‌های خاک شده و خاک بیشتری در قالب تراکم جای می‌گیرد. از نظر شیمیایی نفت خام به علت واکنش‌های شیمیایی با خاک، سبب کاهش تورم خاک می‌شود که در نتیجه فضای بیشتری برای دانه‌های خاک ایجاد شده و دانسیته افزایش می‌یابد (خوش‌نشین لنگرودی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Rehman و همکاران، ۲۰۰۷؛ Khamechiyan و همکاران، ۲۰۰۷).

با افزایش مقدار نفت در خاک، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد. با افزایش ۵ درصد نفت خام حدود ۳۰ درصد کاهش و با افزایش ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام، به ترتیب ۷۱ و ۸۱ درصد کاهش می‌یابد. در بررسی‌هایی که روشن قیاس و باقری‌پور (۱۳۹۸) بر تأثیر آلودگی نفت خام بر خصوصیات ژئوتکنیک خاک رس انجام داده‌اند، نتیجه گرفتند که با افزودن نفت ذرات رس توسط نفت خام پوشیده شده و در نتیجه ذرات راحت‌تر روی یکدیگر می‌لغزند. این عامل سبب افزایش کرنش گسیختگی در نمونه‌های با مقدار بیشتر نفت خام می‌شود. نتایج آزمایش تحکیم بیانگر این است که با افزودن نفت خام، منحنی تحکیم نمونه‌ها به سمت پایین منتقل شده و شیب منحنی نمونه‌ها کمتر شده است؛ به عبارت دیگر در یک تنش ثابت، وجود نفت خام باعث کاهش تخلخل گردیده که مشابه این نتیجه در یافته‌های محققین دیگر نیز مشاهده شده است (Salimnezhad و همکاران، ۲۰۲۱؛ Estabrag و همکاران، ۲۰۱۴).

دلیل این رفتار را می‌توان این گونه تشریح کرد که وجود نفت خام به دلیل پایین بودن مقدار ثابت دی الکتریک نفت (E)، باعث کاهش نیروی دافعه بین ذرات و کاهش ضخامت لایه دوگانه گردیده (Bolt، ۱۹۵۶) و کاهش ضخامت لایه دوگانه سبب نزدیک شدن ساختار خاک به هم شده و سبب کاهش فضای بین ذرات می‌شود. بنابر این حجم ویژه (تخلخل) در هر مرحله بارگذاری برای نمونه‌های آغشته به نفت خام، کمتر از نمونه‌های بدون نفت خام شده است (Estabrag و همکاران، ۲۰۱۴) مشاهده می‌شود که با افزودن نفت خام در اثر کاهش نیروی دافعه و کاهش ضخامت لایه دوگانه، ساختار خاک به هم نزدیک شده و در اثر توده‌ای شدن به حالت درهم می‌رسد.

بر اساس نتایج آزمایش‌های تحکیم، با افزایش مقدار نفت ضریب فشردگی خاک کاهش یافته و همچنین افزایش ۱۱ درصدی ضریب تحکیم با افزودن ۲۰ درصد نفت خام دیده می‌شود که نتایج به دست آمده با مطالعات سایر محققان مطابقت خوبی

به دلیل نفوذپذیری کمتر، زمان مورد نیاز برای تحکیم افزایش می‌یابد و از این رو ضریب فشردگی کاهش می‌یابد، زیرا ضریب تحکیم (C_v) همان‌طوری که Mitchell Moore (۱۹۷۴) نشان داده، مستقیماً با نفوذپذیری خاک متناسب است. از طرف دیگر می‌توان این موضوع را ناشی از واکنش‌های شیمیایی بین ذرات خاک ریزدانه و نفت دانست که باعث ایجاد پیوند بین ذرات خاک ریزدانه شده و سبب اشغال بخشی از حجم حفره‌های موجود در خاک گردیده و موجب کاهش حجم بین ذرات خاک‌های ریزدانه می‌شود. با افزودن نفت خام تا ۱۵ درصد در خاک، مقادیر ضریب قابلیت فشردگی کاهش یافته و با ادامه افزایش مقدار نفت تا ۲۰ درصد، ضریب تحکیم افزایش می‌یابد.

۴- بحث

در این تحقیق اثر نفت خام بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه محدوده پالایشگاه شازند اراک بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار نفت خام تا ۱۰ درصد، کاهش حد روانی و در ادامه با افزایش مقدار نفت تا ۱۵ درصد، حد روانی افزایش یافته و با مقدار ۲۰ درصد، حد روانی دوباره کاهش می‌یابد. Mojid و همکاران (۲۰۱۱) معتقدند که چنین تغییراتی در حد روانی را می‌توان به تأثیر لایه آب مضاعف (DDL) رس و همچنین با ماهیت آب در ساختار کانی‌های رسی نسبت داد. خاک‌های رسی خشک و خاک‌های رسی با سیالات غیرقطبی خاصیت خمیری ندارند (Gillott، ۱۹۸۷).

نفت خام یک سیال غیرقطبی است. در نمونه‌های آزمایشی چون نفت خام با خاک خشک مخلوط می‌شود، ذرات خاک را احاطه کرده و واکنش آب با ذرات خاک را کاهش می‌دهد. در ابتدا با مقدار نفت کم، خاک ریزدانه به دلیل کاهش ضخامت لایه آب دوگانه، پایداری ساختار را تا حدودی حفظ می‌کند و با افزایش مقدار نفت، فضای حفره‌های بیشتری توسط نفت پر می‌شود، در نتیجه ضخامت لایه آب دوگانه کاهش می‌یابد و با اضافه شدن ۲۰ درصد نفت به خاک شاهد کاهش حد روانی هستیم. همچنین می‌توان مشاهده کرد که حد روانی خاک به عوامل فیزیکی و شیمیایی (Acar و Olivieri، ۱۹۹۰) و به میزان کمتری به عوامل مکانیکی غیر از چگالی سیال منفذی بستگی (Meegoda و Ratnaweera، ۱۹۹۴).

نتایج نشان می‌دهد که اگر از آب به عنوان سیال منفذی استفاده شود، تأثیر عوامل مکانیکی ثابت می‌ماند. با این حال اگر به جای آب از یک سیال آلی مانند نفت استفاده شود، ویژگی‌های فیزیکی سیال مانند ویسکوزیته بر حد روانی تأثیر گذاشته و در خاک‌های دانه‌ای موجب افزایش چسبندگی می‌شود (خداپرست و حاجی، ۱۳۹۹). اما در خاک‌های ریزدانه، عوامل فیزیکی و شیمیایی به دلیل مقادیر ثابت دی الکتریک پایین باعث می‌شود که

افزایش یافته و در مقدار ۲۰ درصد، دوباره حد روانی کاهش می‌یابد. البته شاخص خمیری با افزایش ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام، به ترتیب ۳۸ و ۵۷ درصد کاهش نشان می‌دهد.

(۲) در آزمایش تراکم با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام، وزن مخصوص خشک حداکثر به ترتیب ۵ و ۶ درصد افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه با افزودن ۱۰ درصد نفت، حدود ۱۸ درصد کاهش یافته و در ادامه با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد نفت، مقدار رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

(۳) نفت خام سبب کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود. این موضوع به دلیل پر شدن بخشی از حفرات خاک با نفت است.

(۴) به دلیل لزجت بیشتر نفت خام نسبت به آب، با افزایش مقدار نفت، تراکم پذیری خاک‌های ریزدانه افزایش یابد.

(۵) با افزودن ۵ درصد نفت خام، مقاومت فشاری تک‌محوری به میزان ۳۰ درصد و در ادامه با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری به ترتیب ۷۱ و ۸۱ درصد کاهش می‌یابد.

(۶) در آزمایشات تحکیم با ازدیاد تنش سربار، تخلخل خاک دارای نفت کاهش یافته و با کاهش تنش سربار در زمان باربرداری، این مقادیر افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار نفت، نمودار تحکیم به سمت کاهش مقادیر حجم ویژه میل می‌نماید. مقادیر تخلخل خاک آغشته به نفت کمتر از خاک بدون نفت بوده و با افزایش نسبت تراکم، خاک از مقادیر حجم ویژه کمتری برخوردار خواهد بود. مقادیر ضریب فشردگی در نمونه‌های با نسبت تراکم کمتر، در خاک ۱۵ درصد نفت خام بیش از خاک ۲۰ درصد نفت خام است. به طور کلی با افزایش مقدار نفت، ضریب فشردگی و در نتیجه پتانسیل نشست پذیری افزایش می‌یابد.

(۷) ضریب تحکیم خاک با افزایش مقدار نفت افزایش یافته و مقادیر این ضریب در خاک دارای ۱۵ درصد نفت کمتر از خاک با ۲۰ درصد نفت است. با افزایش تراکم، ضریب تحکیم خاک افزایش می‌یابد.

۶- سپاسگزاری

از پالایشگاه سازند اراک به خاطر ارائه اطلاعات و از آزمایشگاه تدبیر خاک صبا به خاطر فراهم ساختن امکان انجام آزمایشات قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

آزمایشگاه پالایشگاه سازند، "گزارش نتایج آزمایش نفت خام خوراک پالایشگاه سازند" مرداد ماه ۱۴۰۰.

تاجیک م، خامه‌چیان م، چرخانی ا، "بررسی زمین زیست محیطی توزیع آلودگی‌های نفتی در رسوبات ساحلی"، نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۸۸، ۱۵ (۳)، ۵۳-۶۵.

ترابی ع، حسنلوراد م، "اثر آلاینده اسید سولفوریک بر مقاومت

دارد. به‌طور مثال زنجرانی فراهانی و حمیدی (۱۳۹۳) در مطالعه رفتار و پارامترهای تحکیمی خاک رس کائولینیت آغشته به مشتقات نفتی مشاهده کردند که با افزودن ۰ تا ۹ درصد نفت خام به خاک رس کائولینیت، افزایش ضریب تحکیم و سپس افزایش نشست رخ می‌دهد.

در تحقیق Khamechiyan و همکاران (۲۰۰۷) با افزودن ۱۵ درصد نفت خام، حد روانی ۳۱ درصد کاهش نشان داده است. حال آن که در پژوهش حاضر با افزودن ۱۰ درصد نفت خام حدود ۴۳ درصد کاهش شاخص خمیری و با افزودن ۱۵ و ۲۰ درصد نفت خام، به ترتیب ۳۸ و ۵۷ درصد کاهش دوباره شاخص خمیری را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج آزمایشات تحکیم، ضریب نفوذپذیری به دست آمده با افزودن ۱۵ درصد نفت خام، حدود ۳۸ درصد کاهش داشته و با افزایش ۲۰ درصد نفت، نفوذپذیری به میزان ۴۷ درصد کاهش یافته است. فضاهای خالی پر شده با نفت خام مانع از حرکت آب درون این حفرات می‌شود. در نتیجه با افزایش درصد نفت خام، فضاهای بیشتری اشغال شده و باعث کندتر شدن حرکت آب در خاک می‌شود. با توجه به این که لزجت نفت خام در مقایسه با آب بیشتر است، در نتیجه باعث سخت‌تر شدن عبور آب در بین فضاهای خالی خاک شده و ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. از جهتی افزایش نفوذپذیری به انقباض لایه دوگانه اطراف ذرات رس نسبت داده می‌شود که این انقباض ناشی از کاهش ثابت دی الکتریک نفت در مقایسه با آب است. با انقباض خاک، ماکروسپورها و ترک‌ها ایجاد شد که منجر به افزایش ضریب نفوذپذیری می‌گردد (Nazir, ۲۰۱۱). با افزایش مقدار نفت، کاهش قابل توجهی در ضریب نفوذپذیری تا تنش تحکیم ۲۰۰ کیلوپاسکال دیده می‌شود که تغییر در نفوذپذیری خاک رس به دلیل پایین بودن مقدار ثابت دی الکتریک نفت است. طبق تئوری لایه دوگانه، کاهش مقدار ثابت دی الکتریک در سیال منفذی مستلزم کاهش ضخامت این لایه است (Daniel و Bowders, ۱۹۹۰).

۵- نتیجه‌گیری

یک تحقیق آزمایشگاهی به‌منظور بررسی اثر نفت خام بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه پالایشگاه سازند اراک انجام شده است. برای این منظور نمونه خاک از چند نقطه محدوده پالایشگاه سازند برداشته شده و بعد از اختلاط یک نمونه خاک پایه تهیه شد. همچنین از نفت خام خوراک پالایشگاه مذکور یک نمونه اخذ شد. نمونه‌هایی با مقادیر مختلف نفت خام تهیه شده و بعد از عمل آوری آزمایشات مختلف آزمایشگاهی انجام شده و مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

(۱) با افزایش مقدار نفت تا ۱۰ درصد، حد روانی خاک کاهش یافته و در ادامه با افزایش مقدار نفت تا ۱۵ درصد، حد روانی

- ASTM D4318, "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil", Annual Books of ASTM Standards, 2000. doi/10.1520/D4318-17E01
- ASTM D698, "Standard test methods for laboratory compaction characteristic", Annual Books of ASTM Standard, 2000. doi/10.1520/D0698-12R21
- Bolt GH, "Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays", *Geotechnique* 6, 1956, 86-93. doi/10.1680/geot.1956.6.2.86
- Bowders JJ, Daniel DE, "Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals", *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 113 (12), 1432-1448. doi/10.1180/claymin.2011.046.1.47 doi/10.1061/(ASCE)07339410(1987)113:12(1432)
- Estabrag AR, Betolahpour I, Moradi M, Javadi AA, "Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol", *Engineering Geology*, 2014, 178, 102-108. doi/10.1016/j.enggeo.2014.05.017
- Gillott JE, "Clay in Engineering Geology", Elsevier, 1987.
- Horgan GW, Ball BC, "Simulating diffusion in a Boolean model of soil pores", 1994, *European Journal of Soil Science*. 45 (4), 483-91. doi/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00534.
- Izdebska-Mucha D, Trzcinski J, "Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure", *Geologija*, 2008, 50, S68-S74.
- Khamehchayan M, Charkhabi A, Tajik M, "Effects of crude oil contamination on geotechnical of clayey and sandy soils, *Engineering Geology*", 2007, 89, 220-229. Doi:10.1016/j.enggeo.2006.10.009
- Lekmine, DE, "Effect of Petroleum Hydrocarbons on the Shear Strength and Compressibility of Soils", Ph.D thesis, Stevens Institute of Technology, New Jersey. 1991.
- Meegoda NJ, Ratnaweera P, "Compressibility of contaminated fine-grained soils", *International Journal of Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17. doi/101-112.
- Mojid MA, Gliński J, Horabik J, Lipiec J, "Diffuse Double Layer (DDL), *Encyclopedia of Agrophysics*", Springer Netherlands, Dordrecht, 2011, 213-214. doi/10.1007/978-90-481-3585-1_41
- Moore CA, Mitchell J K, "Electromagnetic forces and soil strength", *Geotechnique*, 1974, 24 (4), 627-640. doi/10.22059/IJSWR.2015.54303
- Nazir AK, "Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay", *Alexandria Engineering Journal*, 2011, 50 (4), 331-35. doi/10.1016/j.aej.2011.05.002
- Olgun M, Yildiz M, "Effect of organic fluids on the geotechnical behaviour of a highly plastic clayey soil", *International Journal of Applied Clay Science*. 2010, 4, 615-621. doi/10.1016/j.clay.2010.03.015
- Okagbue CO, Onyeobi TUS, "Potential of marble dust to stabilize red tropical soils for road construction", *Engineering Geology*, 1999, 53, 371-380. doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00036-8
- Oyegbile OB, Ayininuola GM, "Laboratory studies on the influence of crude oil spillage on lateritic soil shear strength: A case study of Niger Delta Area of Nigeria", *International Journal of Earth Science* برشی و پارامترهای تحکیمی خاک رس"، نشریه مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۹۷، ۵۰(۶)، ۱۱۲۷-۱۱۳۶. doi/10.22060/ceej.2017.12875.5281
- حمیدی ا، جداری س، "بررسی خصوصیات تحکیمی خاک‌های رسی آلوده به سیال آلی"، نشریه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۲، ۲۹ (۲)، ۲۹-۳۵.
- خداپرست م، حاجی ح، "مطالعه تأثیر آلودگی‌های نفتی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های دانه‌ای با تأکید بر اثر مقیاس آزمایش برش مستقیم"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۹، ۵۰ (۱)، ۱۱۸-۱۰۷. doi/10.22034/CEEJ.2020.11131
- خوش‌نشین لنگرودی م، یثربی س، محمدی اکبرآبادی م، "بررسی تأثیر آلودگی نفتی بر پارامترهای مقاومتی خاک رسی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۸۹، ۴۵-۵۶.
- روشن قیاس س، باقری‌پور م، "تأثیر آلودگی نفت خام بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت در بستر راه"، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۳۸۹، ۵ (۲)، ۱۰۱-۱۱۲. doi/10.22075/JTIE.2019.17368.1371
- زنجرائی فراهانی م، حمیدی ا، "بررسی رفتار و پارامترهای تحکیمی خاک رس کائولینیت آلوده به مشتقات نفتی"، نشریه زمین‌شناسی نفت ایران، ۱۳۹۳، ۴ (۸)، ۱-۱۵. doi/20.1001.1.22518738.1393.4.8.1.4
- شرکت پژوهش عمران راهوار، "گزارش مطالعات حفاری گمانه‌های پی‌زومتری پالایشگاه شازند و نتایج آزمایشات، ارائه شده به شرکت پالایشگاه نفت امام خمینی (شازند)"، ۱۳۹۸.
- عبادی ت، کرمانی م، "بررسی تأثیر آلودگی خاک به نفت خام بر پارامترهای ژئوتکنیکی آن"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران ایران، شیراز، ۱۳۸۸.
- Acar YB, Hamidon A, Field SD, "The Effect of organic fluids on hydraulic conductivity of compacted kaolinite", *American Society for Testing and Materials*, 1985, 874, 171-187. doi.org/10.1520/STP34577S
- Acar YB, Olivieri I, "Pore Fluid Effects on the Fabric and Hydraulic Conductivity of Laboratory Compacted Clay", *Transportation Research Board*, Washington, 1990, 144-159. doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.006
- Al-Sanad H, Ismael N, "Aging effects on oil-contaminated Kuwaiti sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(3), 290-293. doi/10.1061/(ASCE)10900241(1997)123:3(290)
- Amini HR, Saeedi M, Baghvand A, "Solidification/stabilization of heavy metals from air heater washing wastewater treatment in thermal power plants", *International Journal of Environmental Research*, 2008, 2 (3), 297-306. doi/10.22059/IJER.2010.208
- Ashraf, KN, "Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay", *Int. J. Alexandria Eng.*, 2011, 50: 331-335.

- Geotechnical Engineering, 2013, 2, 73-83.
doi.org/10.1080/15320383.2023.2286021
- Poor MM, Azarafza M, Derakhshani R, "A correlation based on pressuremeter, SPT and CPT tests for characterizing of coastal alluvium: A study for phase 14 South Pars", Iran, Methods X, 2022, 101938. doi.org/10.1016/j.mex.2022.101938
- Rahman ZA, Hamzah U, Taha MR, Ithnain NS, Ahmad N, "Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil", American Journal of Applied Sciences, 2010, 7 (7), 954-961. doi.org/10.3844/ajassp.2010.954.961
- Rehman HU, Abduljauwad SN, Akram T, "Geotechnical behavior of oil contaminated fine-grained soils", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 12 (A), 1-12.
doi.org/10.22059/ijswr.2021.329800.669061
- Rajabi H, Sharifipour M, "Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooch sand", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017, 23 (11), 1351-1367.
doi.org/10.1080/19648189.2017.1347525
- Salimnezhad A, Soltani-Jigheh H, Soorki AA, "Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil", Journal of Rock Mechanics Geotechnical Engineering, 2021, 13, 653-670.
doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011
- Sedghyani M, Jiriaee Sharahi M, "Effect of oil pollution on strength parameters, settlement and compressibility of sand", 1st National Congress of Civil Engineering, 2004.
doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011
- Shah SJ, Shroff AV, Patel JV, Tiwari KC, Ramakrishnan D, "Stabilization of fuel oil contaminated soil-A case study", International Journal Geotechnical and Geological Engineering, 2003, 21, 415-427.
doi.org/10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.1a
- Xu J, Pancras T, Grotenhuis T, "Chemical oxidation of cable insulating oil contaminated soil", Chemosphere, 2011, 84 (2), 272-277.
doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.044.

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Crude Oil on the Physical and Mechanical Properties of Fine-Grained Soils of Arak Shazand Refinery Zone

Roghayeh Hasani^a, Ebrahim Asghari-Kaljahi^{a, b,*}, Sina Majidian^{a, c}

^a Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

^b Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Iran

^c Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Iran

Received: 20 November 2022; Review: 23 February 2023, Accepted: 05 April 2023

Keywords:

Crude oil, Oil leakage, Coefficient of consolidation, Fine-grained soil, Permeability, Double layer of water.

1. Introduction

Each soil mass is composed of particles with different sizes and connected voids. The voids between the soil particles allows a fluid to flow from a higher hydraulic gradient point to a lower hydraulic gradient point. The flow and transmission of fluid in the soil depends on several factors, including fluid potential energy, internal and external mechanisms, temperature, osmotic driving force, hydraulic gradient, fluid viscosity, density, etc. Horgan and Ball (1994) showed that the amount of void space and porosity affects fluid flow in soil. The type of soil is effective in the preservation and stability of oil pollution, as there is usually a direct relationship between the clay content and aromatic hydrocarbons. With the increase of clay minerals in soil, the ion exchange capacity increases, so the effect of oil pollution on clay soils is greater. Kaolinite and bentonite clay minerals contaminated with organic fluid causes an increase in initial swelling of the soil and also lubrication of soil particles. Due to the presence of petroleum fluid, it will increase the compressibility of the soil. The effect of oil contamination on the parameters of strength, settlement and compressibility of sand has been studied by Sedghyani and Jiriaee Sharahi, (2004). Khomehchiyan et al. (2007) showed that in clay soils, increasing the crude oil content causes a significant decrease in cohesion. Lekmine (1991) showed that for active clays such as montmorillonite, the compressibility as time increases, the penetration of petroleum hydrocarbons increases. In this paper the effect of crude oil on the physical and mechanical properties of fine-grained soils of Arak Shazand refinery zone is investigated.

2. Materials and methods

The materials used are soil samples from Shazand Refinery area and crude oil sample from Shazand Refinery feed. Shazand refinery is located 25 km west of Arak. In the area of this refinery, 70 boreholes with a depth of 50 to 60 meters have been drilled by Pazhohesh Omran Rahvar Company (2019), with the aim of investigating groundwater pollution. Drilling of some boreholes was as continues coring. Soil samples were taken from boreholes drilled in Shazand Refinery and transferred to the laboratory. The soil of several different depths from 5 boreholes was mixed together and the base soil sample was obtained and used in the experiments to investigate the effect of crude oil on the fine-grained soil. The particle size of base soil is illustrated in the Fig. 1.

For preparation of samples, about 30 kg of the desired base soil was dried and passed through sieve No. 10 (size 2mm). Then, the soil sample was divided into 5 parts and 0-5-10-15-20 percent by weight of dry soil,

* Corresponding Author

E-mail addresses: royahasani22764@gmail.com (Roghayeh Hasani), e-asghari@tabrizu.ac.ir (Ebrahim Asghari-Kaljahi), sina.majidian@mazust.ac.ir (Sina Majidian).

crude oil was added to each part in the form of a spray and mixed until it became homogeneous. Immediately, each part was put in the plastic bags and were closed to prevent the evaporation of crude oil. These samples were kept in this condition for at least 7 days so that the oil is absorbed by the soil particles.

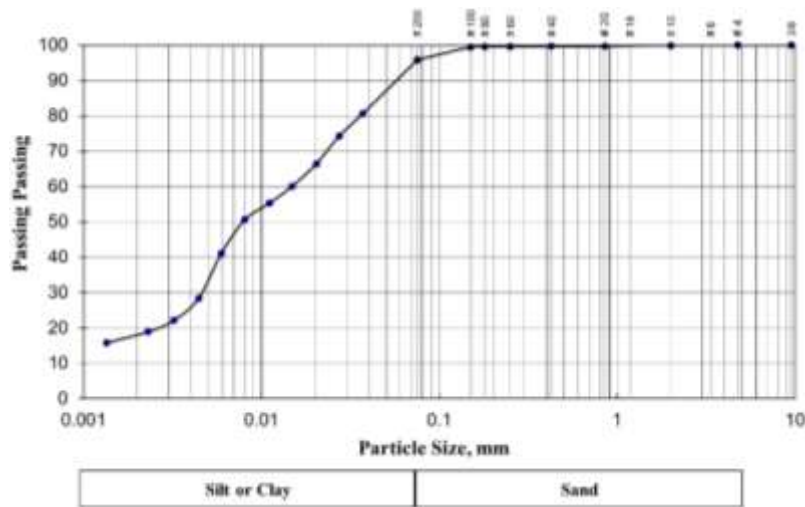


Fig. 1. The particle-size distribution curve of base soil sample

3. Test results and discussion

About 300 grams of each sample was passed through sieve No. 40 and Atterberg limit tests were conducted according to ASTM D4318. As it can be seen in the Fig. 2, at first, with an increase in the oil content up to 10%, the liquid limit of the soil decreases, and then with an increase of oil up to 15%, the liquid limit increases and in the amount of 20%, the liquid limit increases.

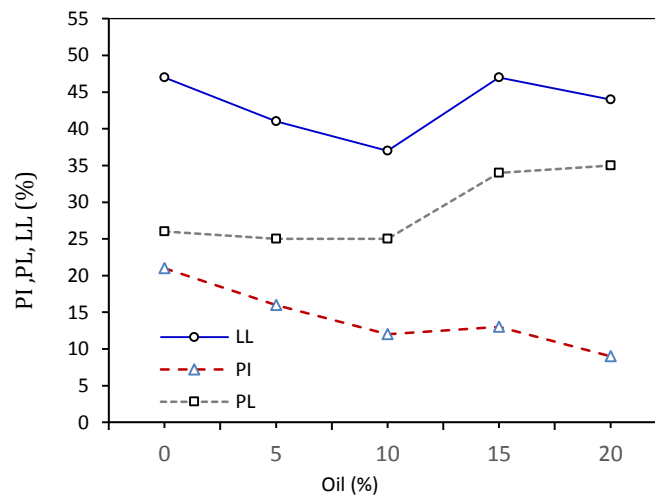


Fig. 2. The effect of oil on the plasticity properties of soil

Proctor compaction test has been done on the soil sample with 0-5-10-15-20 percent crude oil content. This test has been done according to ASTM D698. As shown in Fig. 3, with the addition of 15 and 20% of crude oil, the maximum dry density increased by 5 and 6%, respectively, and the optimum moisture content decreased by 18% with the addition of 10% of oil, and then with the addition of 15 and 20 percent of oil, the optimal moisture increases.

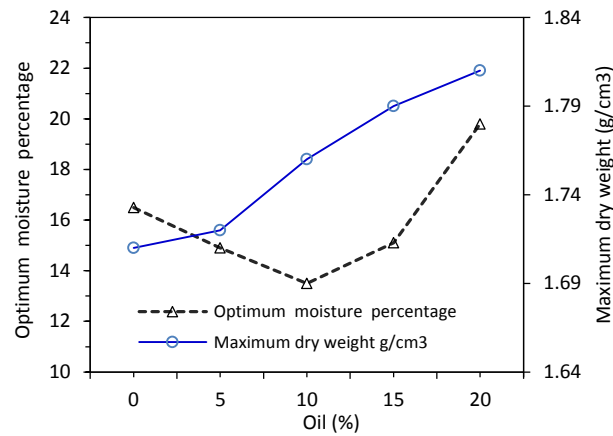


Fig. 3. Changes of dry density and optimum moisture content of soil vs oil content in Proctor compaction tests

The permeability test was performed by the falling head method on the soil sample with oil content of 0-5-10-15-20%. As seen in the Figure 4, the permeability coefficient of the base soil is 5.8×10^{-8} cm/s and the permeability decreases with increasing of the oil content.

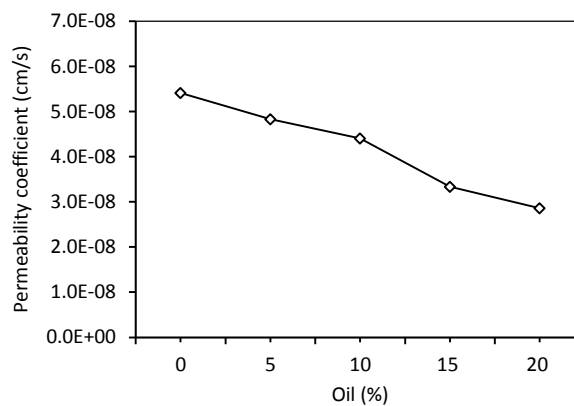


Fig. 4. Variation of permeability coefficient of the soil vs oil content

Uniaxial compressive strength tests were performed according to ASTM D2166 on samples with 0-5-10-15-20% oil. The results of the tests are illustrated in the Fig. 5. It can be seen that the uniaxial compressive strength of the soil decreases with the increase of oil content.

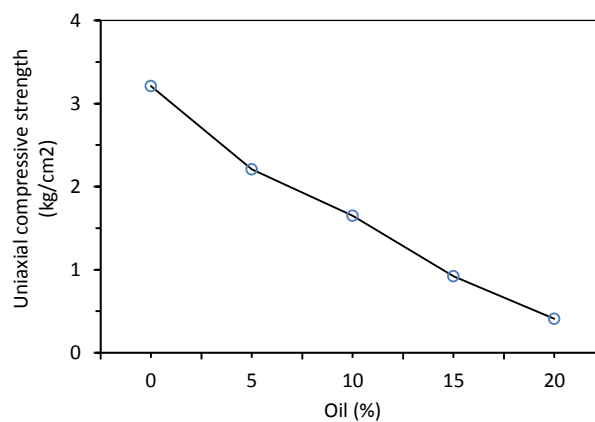


Fig. 5. Changes in soil compressive strength with oil content

Samples with different contents of oil with a compaction ratio of 90% (dry density of 1.54 g/cm^3) were made inside the ring of the oedometer consolidation device and were kept in the pool of the consolidation

device for about 4 days for complete saturation. Then the test was performed by applying pressures of 0.5-1-2-4-8-16 kg/cm². The samples settlements are shown in the Fig. 6.

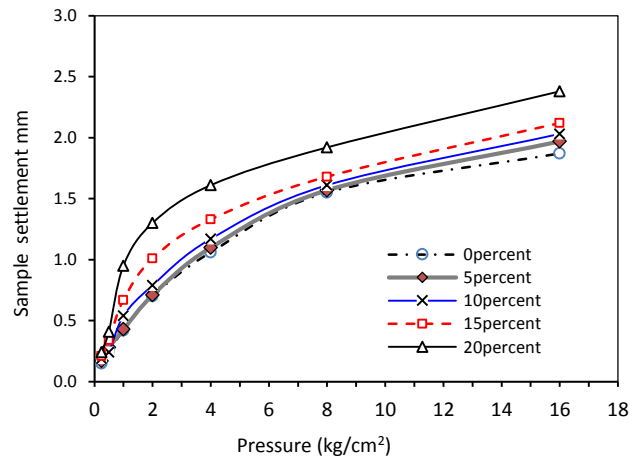


Fig. 6. The settlement curves of the soil samples with different amounts of oil at different pressures during consolidation tests

With the increase of overburden stress, the porosity of oil-containing soil decreases, and with the decrease of overburden stress during loading, these values increase. With the increase of oil amount, the consolidation diagram tends to decrease the values of specific volume. The porosity values of soil impregnated with oil are lower than those without oil, and with the increase of the density ratio, the soil will have lower specific volume values. The values of compression coefficient in samples with lower compression ratio are higher in soil with 15% crude oil than in soil with 20% crude oil. In general, with the increase of the amount of oil, the compression coefficient and as a result the potential of settlement increases.

4. Conclusions

The important results are as below:

- 1) With an increase in the crude oil content up to 10%, the liquid limit of the soil decreases, and then with an increase of oil up to 15%, the liquid limit increases and in the amount of 20%, the liquid limit increases.
- 2) With the addition of 15 and 20% of crude oil, the maximum dry density increased by 5 and 6%, respectively, and the optimum moisture content decreased by 18% with the addition of 10% of oil, and then with the addition of 15 and 20 percent of oil, the optimal moisture increases.
- 3) Crude oil reduces soil permeability. This is due to infilling of some soil voids by oil.
- 4) Due to the higher viscosity of crude oil compared to water, the compressibility of fine-grained soils increases with the increasing of oil content.
- 5) In the consolidation tests, with the increase of overburden stress, the porosity of oil-containing soil decreases, and with the decrease of overburden stress during loading, these values increase.
- 6) The soil consolidation coefficient increased with the increase of oil content, and the values of this coefficient in the soil with 15% oil are lower than the soil with 20% oil. With increasing density, soil consolidation coefficient increases.

5. Acknowledgments

Shazand Arak Refinery Co. is thanked for providing information and Saba Tadbir Khak Laboratory for providing the possibility to conducting tests.

6. References

- Horgan GW, Ball BC, "Simulating diffusion in a Boolean model of soil pores", *European Journal of Soil Science*, 1994, 45 (4), 483-91. Doi:10.1111/j.1365-2389.1994.tb00534.x
- Khamehchiyan M, Charkhabi A, Tajik M, "Effects of crude oil contamination on geotechnical of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, 2007, 89, 220-229. Doi:10.1016/j.enggeo.2006.10.009

Lekmine DE, "Effect of Petroleum Hydrocarbons on the Shear Strength and Compressibility of Soils", Ph.D thesis, Stevens Institute of Technology, 1991, N.J., P. 441.

Pazhohesh Omran Rahvar Company, "Excavation plan and equipment of underground water monitoring network of Imam Khomeini Refinery in Shazand, report of studies and results of soil tests in the area of the refinery", 2019.

Sedghyani M, Jiriae-Sharehi M, "Effect of oil pollution on strength parameters, settlement and compressibility of sand", 1st National Congress of Civil Engineering, 2004. doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011