بررسی تأثیر باکتری در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس آلوده به نفت خام

حسام امینی[۱] و روزبه دبیری[۲*]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

نویسنده مسئول: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir *

دریافت: ۱۴۰۲/۹/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۰ نوع مقاله: کاربردی

چکیده

آلودگی خاک‌ها ناشی از آلاینده نفت‌خام یکی از موضوعات مهم در ژئوتکنیک زیست‌محیطی می‌باشد. به ویژه این آلودگی در لایه‌های خاکی مناطق نفت‌خیز که لوله‌های انتقال نفت در آن‌ها قرار دارند به دلیل نشت مواد نفتی می‌تواند مشاهده گردد. اگرچه نوع جنس خاک (دانه‌ای یا ریزدانه) در میزان توسعه آلایندگی ناشی از نفت‌خام تأثیر گذار است. امروزه جهت رفع آلودگی آلاینده‌های هیدروکربنی از روش‌های مختلف نوین استفاده می‌شود که یکی از انواع آن کاربرد مواد زیستی (Bio material) است. هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی تأثیرگذاری کاربرد باکتری بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس آلوده به نفت خام است. بدین منظور، ابتدا نفت خام به میزان ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی با خاک رس مخلوط می‌گردد. سپس، باکتری JQ963328.1 به خاک آلوده اضافه شده و به مدت ۳۰ روز عمل‌آوری انجام گرفته است. جهت ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده آزمون‌های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و تحکیم صورت گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد با افزایش حضور نفت خام در خاک رس توانایی باربری کاسته شده و میزان تورم و نشست افزایش یافته است. از سوی دیگر، با مخلوط کردن باکتری به خاک رس حاوی ۵ درصد نفت خام و پس از عمل‌آوری مشاهده شد مقاومت فشاری تک‌محوری ۳۳ درصد، مقاومت برشی ۹/۸ درصد افزایش و پتانسیل تورم ۲۳ درصد کاسته شده است.

واژه‌های کلیدی: خاک رس، آلودگی، نفت خام، باکتری، تثبیت

۱- پیشگفتار

آلودگی را می‌توان ناشی از ترکیبات شیمیایی دانست که باعث می‌شود زندگی انسان در مدت زمان کوتاه یا طولانی تحت تأثیر قرار گیرد. آلوده‌کننده‌ها شامل آلاینده‌های آلی و معدنی می‌باشند. منشاء آلوده‌کننده‌های آلی نفت‌خام، محصولات نفتی و پتروشیمی است. پالایشگاه‌ها با تولید مشتقات نفتی از نفت‌خام بعنوان اولین منبع آلاینده‌های آلی محسوب می‌شوند. دومین منبع آلاینده‌های آلی نشت ترکیبات نفتی از مخازن احداث شده روی زمین و زیر زمین، خرابی و فرسوده بودن تأسیسات انتقال مواد نفتی و غیره است. آلودگی موجب بروز پاره‌ای مسائل در آب و خاک می‌شود که باید راه حل جلوگیری از آن و بهسازی محیط آلوده را بررسی نمود. بعضی از آلاینده‌های آلی به دلیل دوام در برابر تجزیه و همچنین خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی که دارند به عنوان آلوده‌کننده‌های خطرناک محسوب می‌شوند (ویلسون و جونس، ۱۹۹۳؛ گائو و همکاران، ۲۰۰۶). علاوه بر خطرات زیست‌محیطی، آلودگی خاک موجب تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود. از سوی دیگر، نیاز به اصلاح محیط‌های آلوده، سبب توسعه فناوری‌های گوناگونی برای رفع آلودگی‌های آلی از خاک شده است (یوسفی کبریا و همکاران، ۲۰۰۹). روش‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر تصفیه حرارتی، تثبیت، سوزاندن و جامدسازی جهت حذف آلودگی از مناطق با وسعت نسبتا کم کاربرد دارند ولی برای رفع آلودگی‌های گسترده صرفه اقتصادی ندارند. بنابراین، نیاز به روش‌های اقتصادی‌تر جهت پاک‌سازی خاک‌های آلوده احساس می‌گردد (آلکساندر، ۱۹۹۵؛ لی و همکاران، ۱۹۹۵؛ محسن‌زاده و همکاران، ۲۰۰۹؛ یوسفی کبریا و همکاران، ۲۰۰۹). زیست پالائی و گیاه پالایی یک فناوری نسبتاً نوین پالایش خاک‌های آلوده است که در آن از موجودات زنده و گیاهان جهت حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های معدنی، رادیواکتیو و آلی به ویژه ترکیبات نفتی از محیط‌زیست استفاده می‌شود (لیهای و کولول، ۱۹۹۰). زیست پالائی خاک‌های آلوده به مواد نفتی از جدیدترین روش‌های مطرح

در زمینه پاکسازی خاک‌ها از مواد نفتی است و همچنین ابزاری مهم جهت کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست می‌باشد (آئوتری، ۱۹۹۱؛ ووگل، ۱۹۹۶؛ مارگسین، ۲۰۰۰). پژوهش‌های متعددی در دست است که نشان می‌دهد، سویه‌های مختلف باکتریایی نه تنها نسبت به آلودگی‌های نفتی مقاوم هستند، بلکه برخی از آن‌ها قادرند از این ترکیبات به عنوان منبع کربن استفاده کنند (طلائی، ۲۰۰۸؛ یوسفی کبریا و همکاران، ۲۰۰۹). در اثر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی که بین خاک و آلاینده‌ها رخ می‌دهد، خصوصیات مقاومتی، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک تغییر می‌کند، تغییر پارامترهای مقاومتی خاک می‌تواند بر میزان نشست‌پذیری و ظرفیت باربری یک پی که بر خاک آلوده قرار گرفته، تأثیرگذار باشد و همچنین ممکن است منجر به ناپایداری بستر مخزن نفتی و ایجاد مشکلات محیط زیستی بیشتری شود. این در حالی است که طراحی شالوده مخازن و بقیه سازه‌هایی که در محل تاسیسات نفتی قرار دارند، بدون در نظر گرفتن این پدیده صورت می‌پذیرد. در نتیجه ضروری است که اثرات مواد نفتی بر ویژگی‌های خاک بررسی شود تا بدین وسیله بتوان احتمال تامین پایداری مورد نظر توسط بستر مخازن یا پی سازه‌های دیگری که آلوده به مواد نفتی است را تعیین نمود. محققان روش‌های متعددی را برای پاکسازی خاک‌های آلوده پیشنهاد کردند (الیس و همکاران، ۱۹۸۴؛ آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا، ۱۹۸۵). این روش‌ها بصورت بیولوژیکی، شیمیایی، حرارتی و ترکیبی فیزیکی و شیمیایی قابل طبقه‌بندی می‌باشد. انتخاب روش مورد نظر به پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک، تخلخل، درصد اشباع خاک، زمین‌شناسی منطقه، نوع آلودگی، وسعت و عمق آلودگی، توپوگرافی منطقه، موقعیت آب و هوایی، کاربری زمین، وضعیت آب زیرزمینی منطقه، در دسترس بودن روش مورد نظر و هزینه اجرای عملیات بستگی دارد (میگورا و راتنتورا، ۱۹۹۵). در سال‌های اخیر مطالعات گسترده در مورد استفاده از میکروارگانیسم جهت بهسازی و رفع آلودگی از خاک‌ها انجام گرفته و روش‌هایی ارائه شده است که می‌توان به روش‌هایی مثل گرفتگی زیستی توسط یاسوهارا و همکاران (۲۰۱۲)، بارش کلسیتی ناشی از میکروب توسط سون و همکاران (۲۰۱۳)، سیمان زیستی توسط سون و همکاران (۲۰۱۴) اشاره نمود. این طریقه‌ها مبتنی بر میکروارگانیسم‌ها می‌باشد که می‌تواند خصوصیات خاک را تقویت نماید. در زمینه کاربرد باکتری به منظور رفع آلودگی‌های نفتی از خاک و تأثیر آن بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی مطالعات گسترده‌ای توسط محققین انجام یافته است که خلاصه آن در جدول (۱) ارائه شده است. طبق جدول (۱) اگرچه پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی و اصلاح شده آن‌ها انجام گرفته است ولی بکار بردن باکتری به منظور تأثیرگذاری در رفع آلودگی نفتی و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی با شاخص خمیری پایین در مقایسه با تحقیقات موجود از نوع‌آوری‌های مطالعه حاضر می‌باشد.

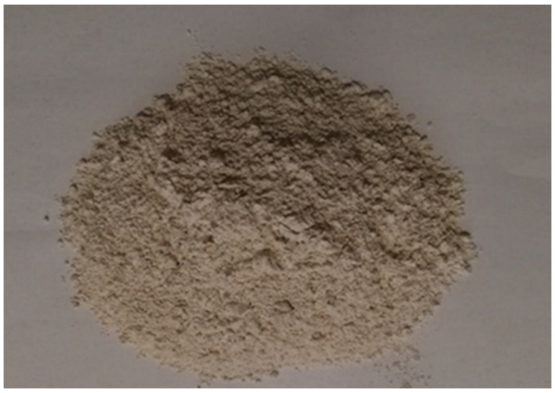
۲- مواد و مصالح

همچنان‌که در بخش گذشته به آن اشاره گردید، هدف از پژوهش حاضر، امکان بررسی تأثیر باکتری بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتاری خاک رس آلوده به مواد نفتی می‌باشد. برای این مطالعه، خاک رس کائولن با شاخص خمیری پایین از کارخانه صنایع چینی ایران در نزدیکی شهر مرند با نام تجاری ZMK2 تهیه گردیده است. تصویر نمونه‌ای از خاک رس کائولن در شکل (۱) ارائه شده و همچنین خصوصیات شیمیایی و درصد کانی آن طبق جدول (۲) قابل مشاهده است. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D421 و ASTM D422 تعیین گردیده است و می‌توان آن را در شکل (۲) مشاهده نمود. براساس سیستم نام‌گذاری متحد، خاک رس کائولن مورد مطالعه از نوع CL می‌باشد. خصوصیات خمیری (PI) آن طبق استاندارد ASTM D4318-95a و چگالی ویژه (Gs) نیز طبق استاندارد ASTM D854 برآورد شده و در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین نوع کانی و درصدهای آن در خاک رس مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول (۴) قابل مشاهده است. همچنین در تحقیق حاضر، نفت‌خام مورد مطالعه از پالایشگاه تبریز تهیه گردید و مشخصات اصلی آن در جدول (۵) قابل مشاهده می‌باشد. در ادامه، لیست باکتری‌هایی که می‌توانند مواد نفتی را تجزیه کند و در مناطق جنوبی ایران از آن استفاده شده است از طریق موسسه تحقیقاتی علوم کاربردی که در تهران مستقر می‌باشد تهیه گردیده است. نام علمی سویه باکتری که در خاک مورد مطالعه استفاده شده عبارت است از JQ963328.1 که میکرو ارگانیسم آن در جدول (۶)

می‌توان دید. مواد معدنی تغذیه کننده برای رشد باکتریایی شامل مونو پتاسیم فسفات (KH_2PO_4) و کلریدآمونیم (NH_4CL) می‌باشد و به عنوان فسفر و منبع نیتروژن به ترتیب مورد استفاده قرار گرفت. جهت تهیه ترکیب مناسب باکتری، از دستورالعمل موسسه تحقیقاتی علوم کاربردی پیروی شده است که بصورت خلاصه می‌توان بدین صورت بیان کرد که PH=6.5-9.5، درجه حرارت محیط کشت ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد، میزان شوری، 0-80.000 ppm و رطوبت نسبی برابر با ۳۰ تا ۵۰ درصد و تهویه مطبوع به صورت نرمال باید در نظر گرفته شود.

جدول ۱. مرور مطالعات گذشته در زمینه کاربرد باکتری و تاثیر آن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به نفت خام.

نام محقق	نوع خاک مورد مطالعه	نتایج
اوگین و داس (۱۹۹۲)	ماسه	تأثیر نفت خام بر روی مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای تحت با استفاده از آزمون سه‌محوری استاتیکی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داده است که زاویه اصطکاک داخلی بطور قابل‌توجهی کاسته می‌شود و افزایش قابل‌ملاحظه در کرنش حجمی ماسه‌های شل تا متراکم به وقوع می‌پیوندد.
الساناد و همکاران (۱۹۹۵)	ماسه	تأثیر آلودگی نفتی را بر روی خاک‌های ماسه‌ای ساحل کشور کویت مطالعه نمودند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد موجود بودن ۶ ٪ وزنی نفت خام در خاک ماسه باعث کاهش میزان توانایی باربری و نفوذپذیری شده است.
خامچیان و همکاران (۲۰۰۷)	رس، ماسه بد دانه‌بندی شده، ماسه لای‌دار	ایشان خاک‌های مورد مطالعه را با ۲، ۴، ۸، ۱۲و ۱۶ درصد نفت خام مخلوط نمودند. نتایج مطالعات نشان داد وجود نفت خام میزان نفوذپذیری، مقاومت، وزن مخصوص خشک حداکثر، رطوبت بهینه، شاخص خمیری در خاک‌های مورد را کاسته است.
کرمانی و عبادی (۲۰۱۲)	رس	ایشان دریافتند در خاک رسی ریزدانه حاوی نفت در حوالی پالایشگاه تهران میزان زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خشک حداکثر، شاخص خمیری و شاخص خمیری افزایش می‌یابد و مقدار رطوبت بهینه و چسبندگی کاهش یافته است.
خسروی و همکاران (۲۰۱۳)	رس	ایشان مشاهده کردند با تغییر میزان نفت گاز از ۲ تا ۳۰ درصد در خاک رس کائولینیت میزان چسبندگی افزایش و مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش می یابد.
تاجیک و همکاران (۲۰۱۳)	لجن سیلتی، لجن ماسه‌ای	ایشان تاثیر آلودگی نفتی را بر روی رسوبات ساحلی شهر بوشهر مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش کانی‌های رسی در رسوبات، ظرفیت تبادل یونی بالا می‌رود. بنابراین تأثیر آلودگی‌های نفتی بر این رسوبات بیشتر است.
استبراق و همکاران (۲۰۱۴)	رس	تأثیر نفت را بر روی رفتار تحکیمی خاک‌های رسی CL و CH (خاک رسی با شاخص خمیری بالا) مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده از تحقیق آن‌ها نشان داده است میزان شاخص خمیری با افزایش نفت کاهش یافته است.
سلطانی جیقه و همکاران (۲۰۱۷)	ماسه	با استفاده از روش تجزیه زیستی خاک ماسه‌ای آلوده به مواد نفتی را در نزدیکی پالایشگاه تبریز را اصلاح نمودند. نتایج بدست آمده توسط ایشان نشان داد با افزودن باکتری، تقریبا ۵۰ تا ۸۰ درصد آلودگی نفتی پاکسازی شده و از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی وزن مخصوص خشک حداکثر، چسبندگی، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافته است.
آقاجانی و همکاران (۲۰۲۰)	ماسه لای‌دار	تأثیر میزان نفوذپذیری نفت خام را بر روی خاک ماسه‌ای سیلتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد با افزایش زمان نشتی، پارامترهای مقاومت برشی افزایش یافته و نفوذپذیری به طور قابل‌توجهی کاهش یافته و با افزایش تخلخل نمونه‌های خاک، مقادیر پارامترهای برشی کاهش و نفوذپذیری افزایش یافته است.
سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۰)	رس با خاصیت خمیری بالا	تأثیر کاربرد باکتری در رفع آلودگی نفتی در خاک‌های رسی با خاصیت خمیری بالا را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند با استفاده از روش زیست پالایی تا ۵۰ درصد از خاک رفع آلودگی شده است. از نقطه نظر خصوصیات ژئوتکنیکی در نمونه خاک‌هایی که آلودگی در آن‌ها رفع شده بود وزن مخصوص خشک حداکثر، مقاومت فشاری تک محوری و تورم کاهش یافته و در مقابل میزان رطوبت بهینه، مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته است.



شکل ۱. تصویر خاک رس کائولن ZMK2

Fig. 1. Picture of Kaolin clayey soil ZMK2.

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی و عناصر تشکیل دهنده خاک رس کائولن (کارخانه صنایع چینی ایران).

Table 1. Chemical properties and mineral percentage of Kaolin clay components (Iran chine Clay Industries Company)

مادهٔ تشکیل‌دهنده	درصد وزنی در رس کائولن ZMK2
L.O.I	۶
SiO_2	۷۴
Al_2O_3	۱۵
Fe_2O_3	۰/۴۵
TiO_2	۰/۰۴
CaO	۱/۵
MgO	۰/۴
Na_2O	۰/۳۵
K_2O	۰/۳
SO_4	-

جدول ۳. ویژگی ژئوتکنیکی خاک رس کائولن

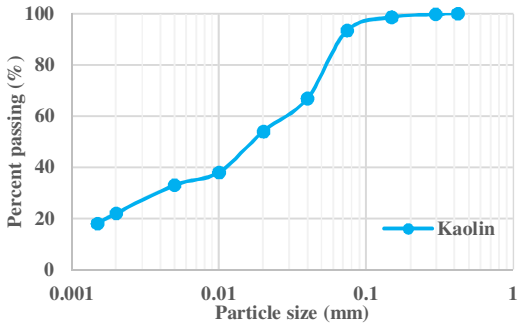
Table 2. Geotechnical properties of Kaolin clay soil.

رس کائولن	خصوصیات ژئوتکنیکی
۳۲	LL
۲۱	PL
۱۱	PI
۲/۶۵	Gs

جدول ۴. نوع و درصد وزنی کانی‌ها در خاک رس کائولن مورد استفاده (کارخانه صنایع چینی ایران).

Table 3. The type and weight percentage of minerals in Kaolin clay (Iran chine Clay Industries Company).

نوع کانی	رس کائولن
کائولینیت	۴۱
کوارتز	۵۲
کلسیت	۳
سایر	۴



شکل۲. منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولن ZMK2.

Fig. 2. Particle passing curve of Kaolin clay soil ZMK2.

جدول ۵. خصوصیات نفت خام

Table 4. Properties of crude oil.

پارامترها	واحد	مقدار
ویسکوزیته	g/ms	۴۱/۲
تراکم (density) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	g/cm^3	۰/۸۹۵
چگالی (API)- American petroleum institute در دمای ۱۵/۵۶ درجه سانتی‌گراد	-	۲۶/۸
نقطه اشتعال (flashpoint)	°C	۴۴/۲
چگالی ویژه در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	-	۰/۸۹

جدول ۶. جزئیات سویه‌های باکتری مورد استفاده جهت اصلاح خاک‌های آلوده به نفت‌خام.
Table 5. Details of bacterial strains used to improve soils contaminated with crude oil.

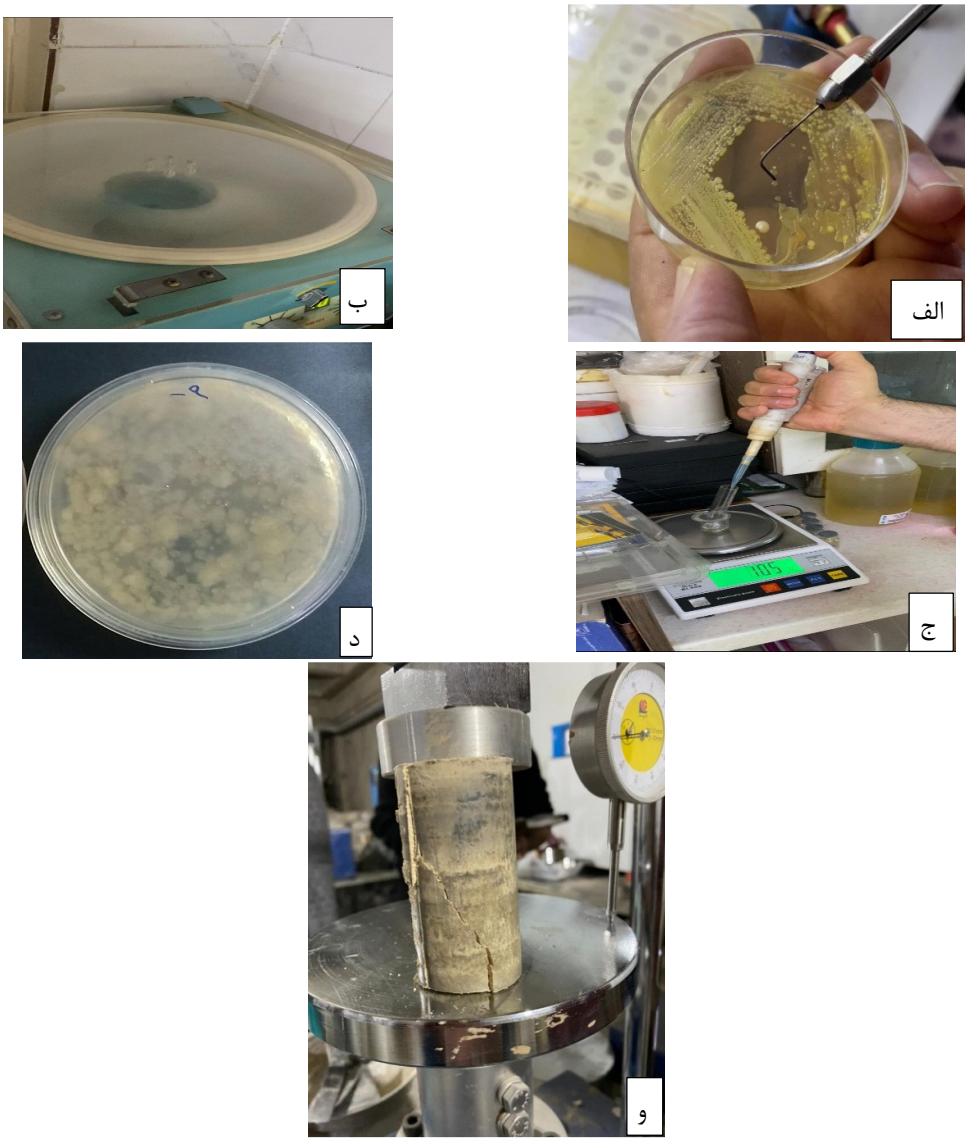
میکرو ارگانیسم	شماره دسترسی در بانک ژن	سایت جداسازی
Rhodococcus ruber Strain KE1	JQ963338.1	استان خوزستان، ایران
Microbacterium sp. Strain K-2-4	JQ963328.1	جزیره خارک، ایران
Gracilibacillus Dipsosauri strain MK-1	JQ963330.1	استان خوزستان، ایران
Thalassospira Xianhensis strain PM01	HM587995.1	واحد نفتی شرکت مناطق نفت خیز جنوب
Vibrio sp. Strain PM-06	JQ963335.1	شرکت مناطق نفت خیز جنوب، استان خوزستان

۳- کارهای آزمایشگاهی

به منظور انجام تحقیق حاضر، ابتدا، نمونه‌های آزمایشی آماده شده‌اند. نحوه آماده‌سازی آن‌ها در دو مرحله انجام گرفته است. در مرحله اول، نمونه‌های خاکی مورد مطالعه در دستگاه اتوکلاو قرار داده شده و استریلیزه شده‌اند. سپس نفت خام به میزان ۱، ۳ و ۵ درصد به خاک خشک شده با استفاده از دستگاه اسپری با فشار کم پخش شده است (با نام CO، یعنی نمونه‌های آلوده به نفت‌خام). در ادامه نمونه‌های خاکی آلوده شده به نفت‌خام در ظرف پلاستیکی به صورت سربسته بدون آنکه رطوبت جذب شود و یا نفت‌خام تبخیر گردد به مدت ۳۰ روز عمل‌آوری گردید. در مرحله دوم، جهت آماده‌سازی نمونه‌های خاکی آلوده به مواد نفتی حاوی باکتری (COB، یعنی نمونه‌های آلوده به نفت‌خام حاوی باکتری)، مشابه مرحله اول، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها پودر باکتریایی در آب مقطر حل می‌شود (شامل ۱×۱۰^{۷} واحد باکتری در هر میلی‌لیتر محیط) و به نمونه‌های خاکی آلوده به نفت‌خام تا میزان ۱ درصد وزنی ترکیبات هیدروکربن اسپری می‌شود. میزان پودر باکتری تجزیه کننده نفت‌خام برای یک کیلوگرم خاک آلوده شده به مواد نفتی تقریبا برابر با ۱ به ۱۰ واحد وزن خاک آلوده می‌باشد. دستورالعمل موسسه تحقیقاتی علوم کاربردی، یک درصد جرم خالص مواد هیدروکربنی بایستی باکتری به خاک آلوده افزوده شود. بنابراین میزان پودر برای خاک رس به وزن ۱۰۰۰ گرم که آلوده به نفت خام به میزان ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نفت‌خام است به ترتیب ۱۰۰ میلی‌گرم، ۳۰۰ میلی‌گرم و ۵۰۰ میلی‌گرم برآورد شده است. با توجه به اینکه آب و نفت‌خام به عنوان دو سیال متفاوت در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، به منظور تعیین میزان رطوبت در نمونه‌ها از رابطه ارائه شده توسط ژنگ و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است:

$$w_w=[\frac{m_t}{m_r}(1+n-n\gamma)-1-n]\times100\%$$

در این رابطه، w_w میزان آب، m_t میزان وزن کل محیط متخلخل قبل از خشک شدن در گرمخانه، m_r میزان وزن محیط متخلخل بعد از خشک شدن در گرمخانه، n میزان نفت‌خام برای هر نمونه و γ ضریب افت خشک‌شدگی نفت خام که تقریبا برابر ۰/۶۷۶ می‌باشد. در ادامه، نمونه‌هایی که پودر باکتری اسپری شده است در ظرف سر بسته به مدت یک هفته در دمای محیط نگهداری شده و عمل‌آوری مجدد انجام یافته است. برای تعیین پارامترهای رفتاری خاک رسی در حالت‌های خالص، آلوده به مواد نفتی و اصلاح شده با استفاده از باکتری ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. سپس، آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D2166 صورت پذیرفت. در ادامه، آزمون برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 بر روی نمونه‌های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر مربع بصورت کنترل کرنش تحت تأثیر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال صورت گرفت. در انتها، به منظور ارزیابی میزان نشست تحکیم و مقدار تورم در نمونه‌های مورد مطالعه آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 انجام گرفت. برنامهٔ آزمایشگاهی صورت گرفته برروی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۷) قابل مشاهده است. لازم بذکر است که ۲۵ ٪ از مجموع آزمایش‌های انجام‌یافته روی نمونه‌ها جهت تدقیق نتایج دوباره تکرار شده است. تصاویری از مراحل انجام آزمایش در شکل (۳-الف، ب، ج، د، و) ارائه شده است.



شکل ۳. تصویرهای مربوط به مراحل انجام آزمایش، الف- کشت باکتری، ب- سانتریفیوز پودر باکتری در آب مقطر، ج- رسوب باکتری، د- شمارش باکتری، و- نمونه‌ای از خاک رس کائولن آلوده به ۳ ٪ وزنی نفت‌خام همراه با باکتری در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری.

Fig. 3. The experiment stages include: a- Cultivating bacteria, b- Centrifugation of bacterial powder in distilled water, c- Bacteria deposition, d- Bacteria count, and f) Compressive strength test uniaxial using a sample of kaolin clay contaminated with 3% crude oil with bacteria.

جدول ۷. برنامهٔ آزمون‌های صورت‌گرفته برروی نمونه‌ها.

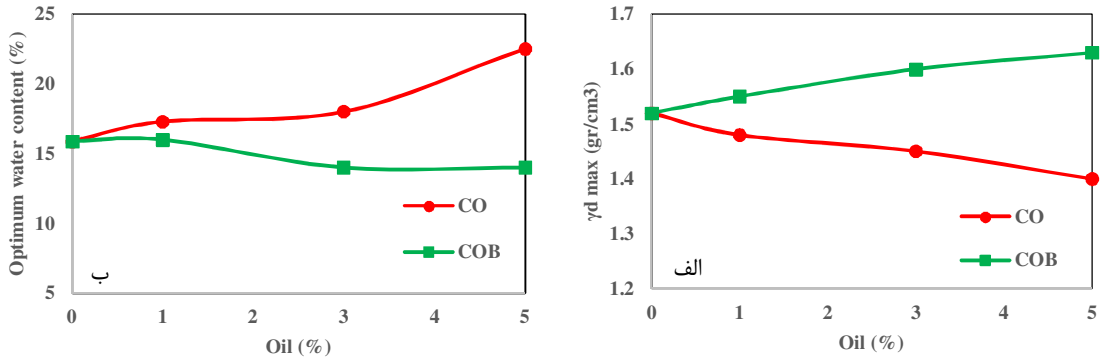
Table 6. The program of tests conducted on the specimens.

ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	درصد نفت‌خام	درصد باکتری	آزمایش های انجام یافته			
					تراکم	تک‌محوری	برش مستقیم	تحکیم
۱	CO0	رس	۰	۰	*	*	*	*
۲	CO1	رس	۱	۰	*	*	*	*
۳	CO3	رس	۳	۰	*	*	*	*
۴	CO5	رس	۵	۰	*	*	*	*
۵	COB1	رس	۱	۱	*	*	*	*
۶	COB3	رس	۳	۱	*	*	*	*
۷	COB5	رس	۵	۱	*	*	*	*

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمون تراکم آزمایشگاهی در شکل (۴- الف و ب) ارائه شده است. با توجه به نمودارهای شکل (۴-الف) مشاهده می‌گردد، هنگامی‌که به نمونه خاک رس با شاخص خمیری پایین مورد مطالعه نفت‌خام افزوده می‌شود فضای خالی بین ذرات افزایش یافته و مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) کاسته شده است. این کاهندگی وقتی مقدار نفت خام به ۵ درصد وزنی می‌رسد تقریبا برابر با ۸ درصد نسبت به وزن مخصوص خشک حداکثر در خاک رس خالص است. همزمان در شکل (۴- ب) می‌توان دریافت مخلوط نمودن نفت خام به خاک رس سبب شده است تا با افزایش مقدار نفت‌خام، رطوبت بهینه در نمونه‌ها افزایش یابد. بطوری‌که با رسیدن مقدار نفت‌خام به ۵ درصد، رطوبت بهینه تقریبا به ۴۲ درصد می‌رسد. این نتایج بدست آمده مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط خامچیان و همکاران (۲۰۰۷) و سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد. در ادامه، وقتی به نمونه‌های خاک آلوده به نفت خام باکتری افزوده شده است. طبق شکل (۴- الف) دیده می‌شود به دلیل تغییر ساختار و بافت خاک مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر رفتاری معکوس یافته و روندی افزایشی را طی نموده است. حتی با رسیدن میزان نفت‌خام به ۵ درصد، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ۷/۲ درصد نسبت به رس خالص افزایش می‌یابد. همچنین مقدار رطوبت بهینه طبق نمودار شکل (۴- ب) به میزان ۲ درصد کاسته شده است. این روند مشابه با مطالعات صورت گرفته توسط سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد.

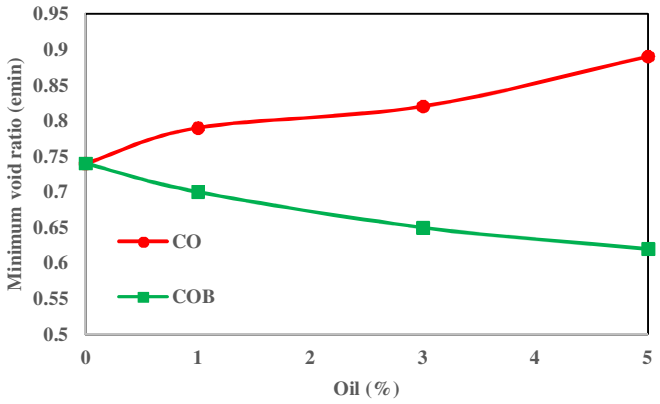


شکل ۴. نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم بر روی مصالح مورد مطالعه، الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.

Fig. 4. The obtained results from the compaction test on the studied clay, a- maximum dry density, b- optimum water content.

نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم را این‌گونه می‌توان تحلیل نمود، در حالتی که خاک رس با نفت خام مخلوط نشده است، مولکول‌های آب دوقطبی توسط بار سطحی منفی ذرات رس و همچنین توسط کاتیون‌هایی مانند Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+} و K^{+} جذب می‌شوند. علاوه بر این، اتم‌های اکسیژن در سطح ذرات، اتم‌های هیدروژن مولکول‌های آب و برخی کاتیون‌های هیدراته آب منفذی را جذب می‌کنند که منجر به پیوند هیدروژنی می‌شود. کل آب که توسط نیروهای جاذبه در تماس با خاک رس نگه داشته می‌شود ذرات آب دو لایه نامیده می‌شود و داخلی‌ترین لایه آب دو لایه که چسبناک‌تر از آب آزاد است آب سطحی جذب شده نامیده می‌شود. سپس، با افزودن نفت‌خام به خاک رس، بدلیل آنکه نفت‌خام از پیوند مولکول‌های آب با ذرات رس جلوگیری می‌کند و آب نمی‌تواند به لایه دوگانه ذرات رس برسد. در نتیجه برای اینکه ذرات خاک رس خاصیت پلاستیکی خود را نشان دهند به آب بیشتری نیاز خواهد بود که منجر به افزایش حد پلاستیک می‌شود. مولکول‌های نفت‌خام دوقطبی نیستند، بنابراین قادر به ایجاد پیوند قطبی با ذرات رس مانند مولکول‌های آب نیستند (سریدهاران و همکاران، ۱۹۷۳). همچنین آب و نفت‌خام غیر قابل اختلاط هستند و مخلوط آن‌ها از دو فاز مایع مجزا تشکیل شده است که به امولسیون معروفند (مانینگ و تامسون، ۱۹۹۵). همچنین، وجود نفت‌خام در اطراف ذرات رس باعث کاهش مساحت سطح ویژه ذرات خاک می‌شود. در نتیجه واکنش آب با ذرات رس را کاهش می‌دهد. عوامل دیگری مانند ثابت دی‌الکتریک و ویسکوزیته

سیال منفذی به تغییرات در خواص شکل‌پذیری خاک کمک می‌کنند (میگودا و راتوانیوا، ۱۹۹۴). در نتیجه میزان وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و مقدار رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، هنگامی‌که به نمونه‌های خاک رس آلوده به نفتخام باکتری افزوده می‌شود، مشاهده می‌گردد که فعالیت باکتری‌های تجزیه کننده نفت می‌تواند منجر به تجمع ذرات خاک شود که نتیجه آن تشکیل ذرات با اندازه بزرگتر شده و در این شرایط آب نمی‌تواند به تمام ذرات خاک دسترسی داشته باشد و فقط سطح بیرونی توده‌های خاک را خیس می‌کند. بنابراین، آب نمی‌تواند نقش روانکاری کارآمدی در تراکم داشته باشد و تراکم ناشی از زیست‌پالایی، ساختارهایی با فضاهای منفذی کوچک ایجاد می‌کند که در نتیجه، تراکم کلی خاک فشرده افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۵) می‌توان شرایط تغییر یافته در میزان نسبت تخلخل حداقل نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه نمود.

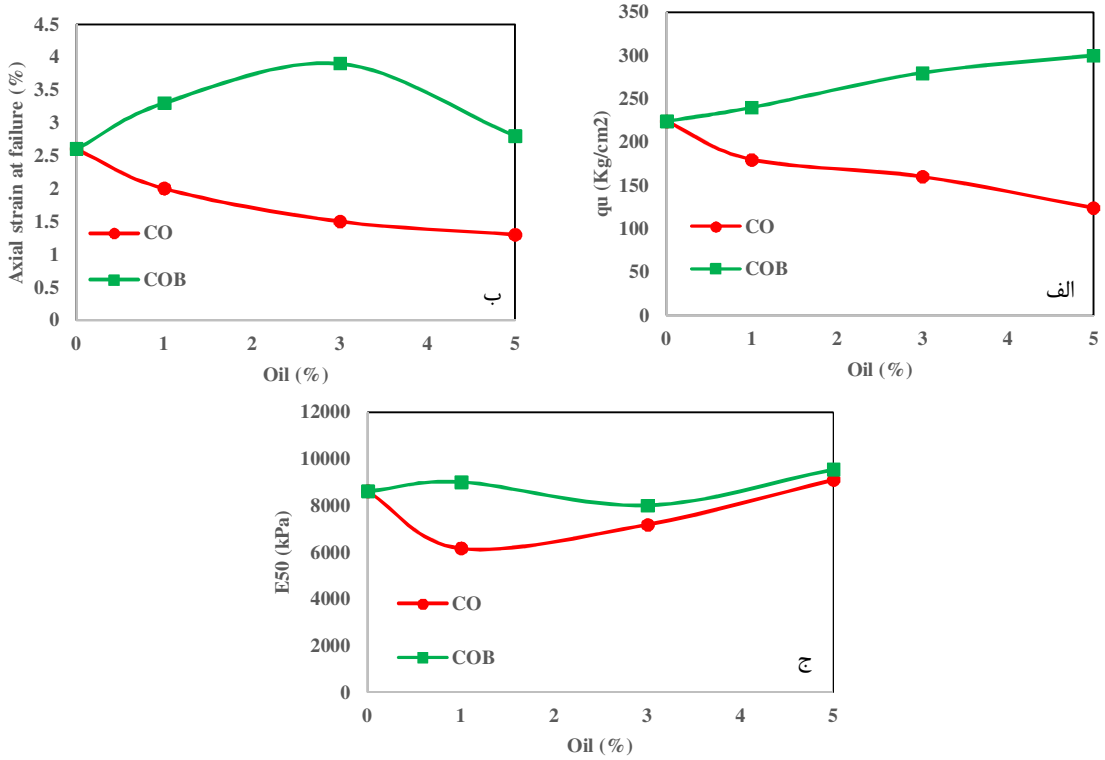


شکل ۵. تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه‌های مورد مطالعه.
Fig. 5. The minimum void ratio changes in the studied specimens.

۴-۲- نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های مورد مطالعه طبق نمودارهای شکل (۶- الف، ب و ج) می‌توان مشاهده نمود. نمودار شکل (۶- الف) نشان می‌دهد زمانی‌که به نمونه خاک رس نفتخام افزوده می‌شود مقاومت و توانایی باربری خاک آلوده کاسته می‌شود. بطوری‌که مقدار کاهش با افزوده ۵ درصد نفت خام به ۴۵ درصد می‌رسد که مشابه با مطالعات انجام یافته توسط خامچیان و همکاران (۲۰۰۷)، ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)، صافحیان و همکاران (۲۰۱۸)، سلطانی جیقه و همکاران (۲۰۱۷) و سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۰) است. علت وقوع این شرایط آن است که نفتخام و رطوبت موجود در خاک دو فازی می‌باشند و در یکدیگر مخلوط نمی‌شوند که نتیجه کاهش مقدار چسبندگی در بین ذرات خاک رس می‌باشد. در ادامه، در شکل (۶- الف) دیده می‌شود، با اضافه کردن باکتری به نمونه‌های خاک رس آلوده و پس از انجام عمل‌آوری مشاهده می‌شود برخلاف حالت قبل مقاومت و توانایی برابری نمونه خاک آغشته به نفتخام به میزان ۳۳ درصد افزایش یافته است. با توجه به اینکه ترشحات باکتریایی که پس از عمل‌آوری در خاک رسی با شاخص خمیری کم بین ذرات ایجاد شده باعث شده است که فضای خالی بین ذرات را پر کرده و ساختار دانه‌ای قوی بوجود آورد و نتایج بدست آمده برخلاف مطالعات صورت گرفته توسط سلیم‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. با در نظر گرفتن دلایل ذکر شده فوق، مطابق شکل‌های (۶- ب) و (۶- ج) می‌توان دریافت با افزایش میزان نفتخام تا ۵ درصد در خاک رس مقدار کرنش محوری کاهش یافته است و همزمان در میزان مدول سکانت (E_{50}) ابتدا کاهش و سپس افزایش مشاهده گردیده که بیانگر آن است، افزودن نفتخام به خاک رس با خصوصیات خمیری پایین باعث رفتار ترد و شکننده شده است. از سوی دیگر، با توجه به نمودارهای شکل (۶- ب)، افزودن ترشحات باکتریایی به خاک مورد مطالعه نشان داده است که در نمونه‌های حاوی ۳ درصد نفتخام، سبب شده است رفتار کمی انعطاف‌پذیر تر شده و کرنش محوری در لحظه گسیختگی افزایش بیابد ولی در ادامه با بالا رفتن

حضور نفت‌خام رفتار خاک اصلاح شده ترد و شکننده شده است. در عین حال مدول‌سکانت در نمونه‌های آلوده به نفت خام که ترشحات باکتریایی به آن اضافه شده است تغییر یافته بطوریکه مقدار E_{50} در نمونه دارای ۵ درصد نفت خام در مقایسه با شرایط خاک رس خالص ۱۱ درصد افزایش یافته است.



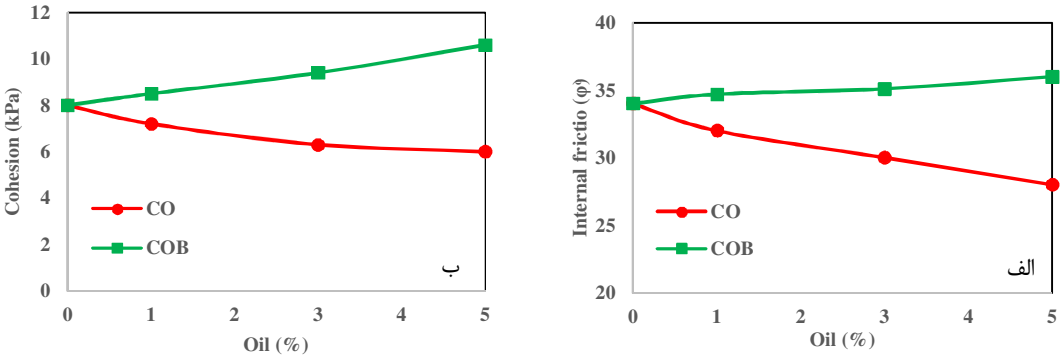
شکل ۶. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی خاک رس مورد مطالعه، الف- مقاومت فشاری، ب- کرنش محوری در لحظه گسیختگی، ج- مدول سکانت (E_{50}).

Fig. 6. The obtained results from uniaxial compressive test on studied clay soil, a-compressive strength, b- axial strain at failure moment, c- Secant modulus (E_{50}).

۴-۳- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

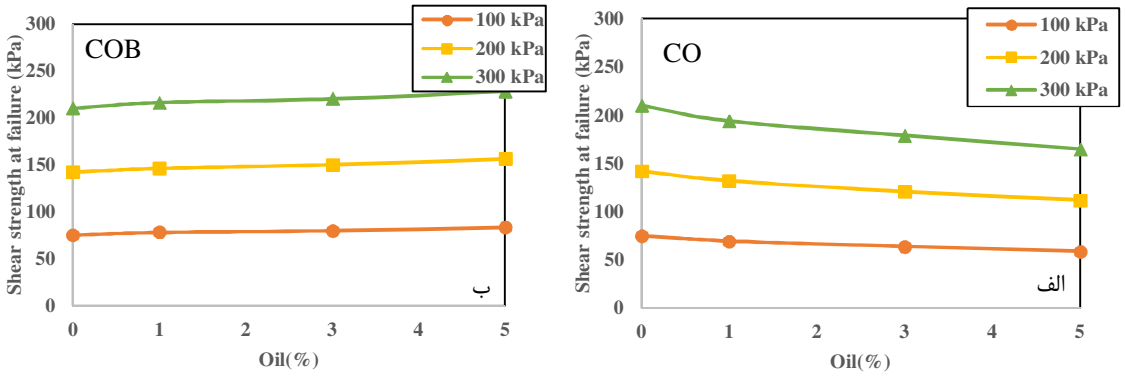
مطابق نمودارهای شکل (۷- الف و ب) می‌توان نتایج بدست آمده از آزمون برش مستقیم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان داد. همانطور در شکل (۷- الف) دیده می‌شود، هنگامی‌که نفت‌خام، به خاک رس افزوده می‌شود، میزان زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات خاک رس کاهش می‌یابد. بطوری‌که افزودن ۵ درصد نفت-خام مقدار زاویه اصطکاک داخلی را ۱۸ درصد کاسته است. علت وقوع این شرایط آن است که نفت‌خام و رطوبت موجود در خاک دو فازی می‌باشند که در یکدیگر مخلوط نمی‌شوند که نتیجه کاهش مقدار اصطکاک در بین ذرات خاک رس است. در ادامه، در شکل (۷- الف) مشاهده می‌شود زمانی‌که خاک رس آلوده به نفت‌خام با باکتری مخلوط می‌گردد، بعد از اتمام عمل‌آوری میزان زاویه اصطکاک داخلی تا حدودی بهبود یافته است. بطوری‌که در نمونه حاوی ۵ درصد نفت خام تثبیت شده زاویه اصطکاک داخلی ۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. این روند به دلیل وجود ترشحات باکتریایی و کاهش فضای خالی بین ذرات قابل تایید است. همچنین، مشابه این روند در دیاگرام‌های شکل (۷- ب) می‌توان دید زمانی‌که خاک رس دارای ۵ درصد نفت خام می‌شود، چسبندگی ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. این روند بدلیل خاصیت روغنی و ویسکوزی نفت‌خام است که در بین ذرات ورقه‌ای شکل رس نفوذ کرده و باعث کاهش میزان چسبندگی در بین آن‌ها شده است. در ادامه با افزودن باکتری به نمونه‌های رس حاوی نفت دیده می‌شود، بعد از عمل‌آوری مقدار چسبندگی تا حدودی بهبود یافته و ۲/۴۵ درصد رشد پیدا کرده است. در شکل (۸- الف و ب) می‌توان اثرگذاری نفت خام را بر روی تغییرات مقاومت برشی

نمونه‌های خاک رسی را مشاهده نمود. همانگونه که در شکل (۸- الف) به نمایش در آمده است در تمامی بارهای وارده، مقاومت برشی در نمونه‌های خاک رس دارای نفت خام کاسته شده است. مقاومت برشی در نمونه خاک رس دارای ۵ درصد نفت خام در تمامی بارها بطور میانگین ۲۱ درصد کاهش یافته است. از سوی دیگر، طبق نمودارهای شکل (۸- ب) نشان می‌دهد با افزودن باکتری به نمونه‌های مورد مطالعه و پس از اتمام عملیات عمل‌آوری، مقاومت برشی خاک تا حدودی افزایش یافته و بیشترین مقدار در نمونه حاوی ۵ درصد نفت خام مشاهده می‌شود. مقاومت برشی بطور میانگین در تمامی بارها ۹/۸ درصد رشد داشته است.



شکل ۷. نتایج بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بر روی مصالح مورد مطالعه، الف- زاویه اصطکاک داخلی، ب- چسبندگی.

Fig. 7. The obtained results from direct shear test, a-internal friction angle, b-cohesion.



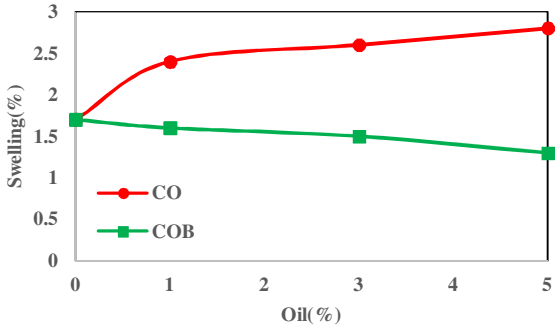
شکل ۸. تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های خاک رس مورد مطالعه حاوی نفت‌خام، الف- بدون حضور باکتری ، ب- با حضور باکتری.

Fig. 8. Variations in shear strength of studied clay specimens containing crude oil, a-without bacteria, b- with bacteria.

۴-۴- نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

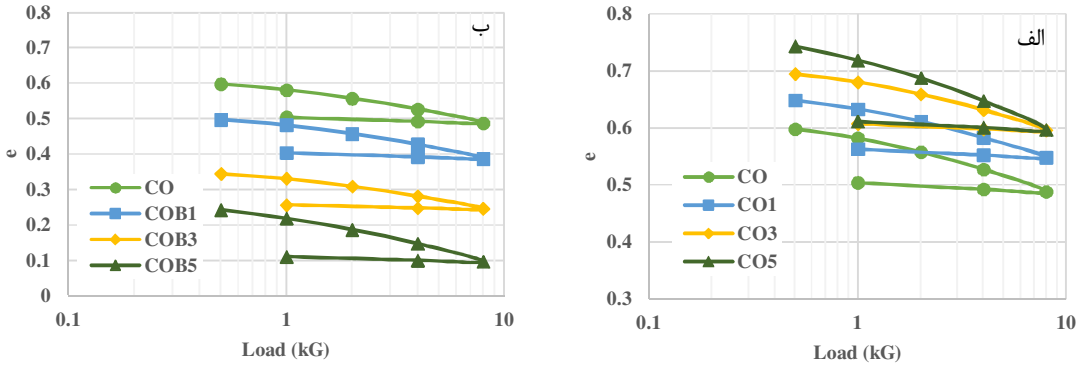
یکی از مسائل مهم مطرح در خاک‌های ریزدانه رسی وقوع نشست تحکیم و تورم ناشی از جذب آب و رطوبت می‌باشد که می‌تواند بر سازه‌ها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی سطحی و زیرسطحی آسیب برساند. در این مطالعه، تأثیر ترشحات باکتری بر روی میزان نشست و تورم خاک رس آلوده به نفت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل (۹) تأثیر پخش باکتری پس از عمل‌آوری بر روی میزان تورم آزاد خاک رس قابل مشاهده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت میزان تورم در خاک رس با افزایش میزان نفت تقریبا ۶۵ درصد رشد داشته است. البته با توجه به اینکه آب و نفت دو مایعی می‌باشند که دارای غلظت‌های متفاوت بوده و با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند، بنابراین جذب آب توسط رس ادامه یافته و تورم بوقوع پیوسته است. از سوی دیگر، هنگامی‌که نمونه‌های خاک رس آلوده به نفت با باکتری مخلوط می‌شوند، پس از عمل‌آوری دیده می‌شود میزان تورم در خاک تثبیت شده به مقدار تقریبی ۲۳ درصد کاسته شده است. علت این شرایط را تغییر ساختار و بافت خاک رس در اثر افزودن باکتری و در نتیجه آن کاهش میزان جذب آب توسط خاک تثبیت شده می‌توان بیان نمود. همچنین تغییرات میزان نسبت تخلخل و شاخص نشست تحکیم (Cs) بر روی خاک رس حاوی نفت

خام مورد مطالعه تحت اثر باکتری به ترتیب در شکل‌های (۱۰- الف و ب) و (۱۱) ارائه شده است. با مشاهده نمودارهای شکل (۱۰- الف وب) می‌توان دریافت در حالت کلی افزودن باکتری باعث کاهش میزان نسبت تخلخل و نشست تحکیم در نمونه‌های خاکی حاوی نفت خام مورد مطالعه شده است. همچنین، با توجه به دیاگرام‌های شکل (۱۱) مشاهده می‌شود در حالت تثبیت نشده میزان نشست تحکیمی خاک رس با افزایش مقدار نفت خام روند رو به بالایی را طی نموده است. زمانی‌که باکتری به خاک رس آلوده به نفت خام افزوده می‌شود، مقدار شاخص فشردگی که بیان کننده احتمال میزان وقوع نشست تحکیم می‌باشد، کاسته شده است. بطوری‌که در خاک رس حاوی ۵ درصد نفت خام با حضور باکتری، مقدار شاخص فشردگی (C_C)، ۴۴ درصد کاسته شده است.



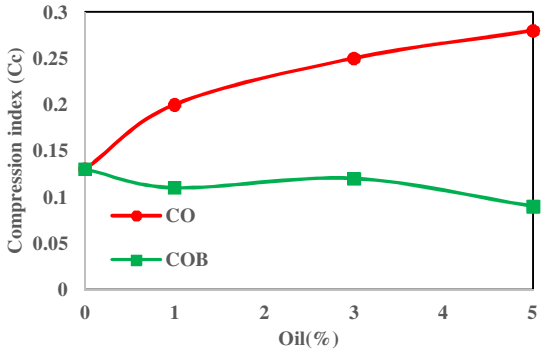
شکل ۹. تأثیر باکتری بر روی میزان تورم آزاد خاک رس حاوی نفت خام.

Fig. 9. The effect of bacteria on the free swelling rate of clay soil containing crude oil.



شکل ۱۰. تغییرات نسبت تخلخل خاک رس مورد مطالعه حاوی نفت‌خام، الف- بدون حضور باکتری، ب- با حضور باکتری.

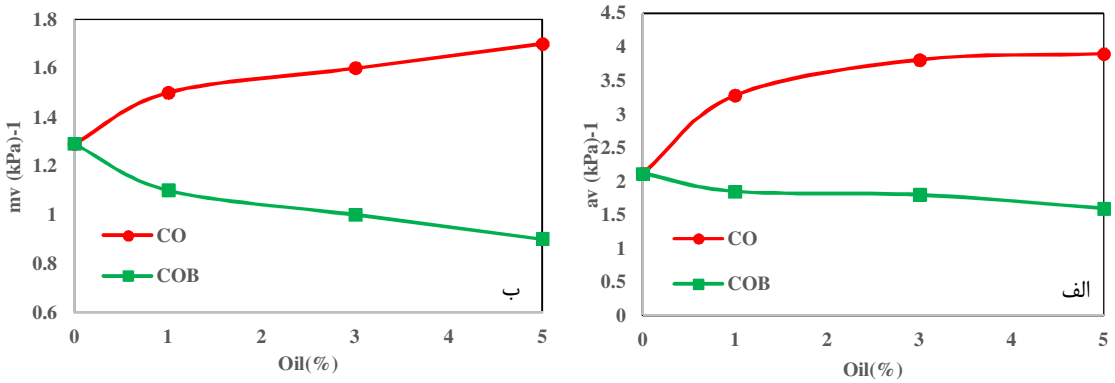
Fig. 10. Variations of void ratio of clay soil containing crude oil, a-without bacteria, b-with bacteria.



شکل ۱۱. تاثیر باکتری بر روی میزان شاخص فشردگی خاک رس حاوی نفت خام.

Fig. 11. The effect of bacteria on the compression index rate of clay soil containing crude oil.

در ادامه، تأثیر ترشحات باکتری بر روی پارامترهای نشست تحکیم همچون ضریب تراکم‌پذیری (av) و ضریب تغییر حجم (mv) نمونه‌های مورد مطالعه طبق شکل (۱۲- الف و ب) ارائه شده است. با مشاهده نتایج بدست آمده می‌توان دریافت مشابه حالت‌های ذکر شده در بالا میزان av و mv در خاک رس با بالا رفتن مقدار نفت‌خام افزایش می‌یابند. زمانی‌که به نمونه‌های مورد مطالعه ۵ درصد نفت‌خام مخلوط گردید تراکم‌پذیری و تغییر حجم به ترتیب ۸۴ درصد و ۳۲ درصد افزایش داشته است. همچنین، با افزودن باکتری به نمونه‌های خاک رس آلوده به نفت‌خام مشاهده می‌شود تراکم‌پذیری و تغییر حجم کاسته می‌شوند. بیشترین کاهش در نمونه خاک رس دارای ۵ درصد نفت خام مشاهده شده است که مقادیر a_v و m_v به ترتیب ۳۲/۵ درصد و ۳۰ درصد کاسته شده است.



شکل ۱۲. تأثیر باکتری بر روی پارامترهای نشست تحکیم خاک رس حاوی نفت‌خام، الف-ضریب تراکم‌پذیری (a_v)، ب- ضریب تغییر حجم (m_v).

Fig. 12. Effect of bacteria on consolidation settlement parameters of clay soil containing crude oil, a- coefficient of compressibility (a_v), b-coefficient of volume variation (m_v).

۵- نتیجه‌گیری

آلودگی خاک توسط آلاینده‌های هیدروکربنی نفتی یکی از مهمترین مشکلات زیست‌محیطی در مناطق مختلف جهان است. در مناطق نفت‌خیز جنوب‌غرب و غرب کشور، در طی سالیان اخیر استهلاک سامانه‌های استخراج و بهره‌برداری از مخازن نفتی منجر به نشت یا نهشت آلاینده‌های نفتی در خاک و منابع زیست‌محیطی شده است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه استان‌های شمال غرب کشور به عنوان یکی از کریدورهای صادرات نفت‌خام مطرح است، مشکلات ذکر شده در خاک‌های اطراف خطوط انتقال نفت و مخازن انباشت آن در محل پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها مشاهده گردیده است. اگرچه نوع جنس خاک (دانه‌ای یا ریزدانه) در میزان توسعه آلایندگی ناشی از نفت‌خام تأثیرگذار است ولی امروزه جهت رفع آلودگی آلاینده‌های هیدروکربنی از روش‌های مختلف نوین استفاده می‌شود که یکی از انواع آن کاربرد مواد زیستی (Bio material) است. هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی تأثیرگذاری کاربرد باکتری بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس با خاصیت خمیری پایین آلوده به نفت‌خام است. با توجه به نتایج مهم بدست آمده می‌توان بیان کرد بخش‌های سبک‌تر نفت‌خام سریع‌تر از قطعات سنگین‌تر توسط باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت تجزیه می‌شوند. مولکول‌های مواد آلی با اندازه بزرگ‌تر به دلیل دسترسی بیشتر نیروهای لندن- وندروالس، تمایل بیشتری نسبت به کاتیون‌های معدنی توسط رس‌ها دارند. همانگونه مشاهده شده است جذب نفت‌خام خواص خاک رس را تغییر می‌دهد. سطوح ذرات رس از ترکیبات غیرقطبی آب‌دوست تا آب‌گریز دارای گشتاورهای دوقطبی کم (کمتر از ۱ دبای) تشکیل می‌شوند. بنابراین جذب آن‌ها بر روی سطوح ذرات رس یک پیوند ضعیف است و به طور کلی به سطوح خارجی خاک محدود می‌شود. بیشتر مولکول‌های هیدروکربن نفت‌خام در آب نامحلول هستند زیرا ساختار آب‌گریز آن‌ها منجر به کاهش تحرک و نگهداری بیشتر آلاینده‌ها در محیط می‌شود. هیدروکربن‌های سبک را می‌توان راحت‌تر شسته و تبخیر کرد، در حالی که اجزای سنگین‌تر تمایل دارند در خاک باقی بمانند. حلالیت بیشتر در آب باعث می‌شود که تعداد قابل‌توجهی از آلاینده‌های شیمیایی در فاز آبی باقی بماند. اگر هیدروکربن‌ها دارای غلظت کمتری در آب باشند باعث

جذب کمتر مواد جامد خاک می‌شود و نگرش بیشتری برای اتصال به سطح ذرات خاک خواهند داشت. بنابراین، در خاک‌های رسی آلاینده‌ها به شدت به سطح ذرات متصل می‌شوند و در دسترس بودن آلاینده‌ها به میکروارگانیسم‌ها کاهش می‌یابد. در انتها، می‌توان بیان کرد استفاده از ترشحات باکتریایی جهت اصلاح و تثبیت خاک‌های ریزدانه رسی با شاخص خمیری پایین که آلوده به نفت‌خام هستند امکان‌پذیر است. بطوری‌که می‌تواند خصوصیات رفتاری و توانایی باربری خاک رس تثبیت شده را بهبود ببخشد. البته نوع کانی خاک رس، خصوصیات خمیری آن، نوع ماده آلاینده نفتی و شرایط جوی می تواند در روش پیشنهاد شده تأثیرگذار باشد که بایستی در تحقیقات آینده مدنظر قرار بگیرد.

References

Aghajani, S., Katebi, H., and Davari Algoo, S (2020) Effect of Crude Oil Spill on Geotechnical Properties of Silty Sand Soil by Using Taguchi Method, Advance Researches in Civil Engineering, 2 (2): 1-14.

Alexander, M (1995) How toxic are toxic chemicals in soil. Environmental Science and Technology, 29: 2713-2717.

AL sanad, H. A., Eid, W. K., and Ismael, N. F (1995) Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand: Journal Geotechnical Engineering, 121 (5): 407–412.

ASTM D421 (1985) Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, Annual book of ASTM standards.

ASTM D422 (1963) Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils, Annual book of ASTM standards.

ASTM D 4318 (1995) Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards.

ASTM D854 (2002) Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards.

ASTM D698 (2000) Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), Annual book of ASTM standards.

ASTM D2166 (2016) Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual book of ASTM standards.

ASTM D3080 (2011) Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, Annual book of ASTM standards.

ASTM D2435 (2011) Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, Annual book of ASTM standards.

Autry, A. R. and Ellis, G. M (1991) Environmental progress, 11: 318-333.

Eliss, W. D., Payne, J. R., Tatuni, A. N., and Freestone, F. J (1984) The development of chemical countermeasures for hazardous waste contaminated soil, Conference of Hazardous Materials Spills, 116-125.

EPA (1985) Remedial action at waste disposal site, EPA-625, 6-85, 006, Office of research and development, Handbook, EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, Usa.

Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., Moradi, M., and Javadi, A. A (2014) Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol, Engineering Geology, 178: 102-108.

Evgin, E., Das, B. M (1992) Mechanical behavior of an oil contaminated sand, In H. Usman and Y. Acar (Eds.), Environmental Geotechnology, 101-108.

Gao, Y. Z., Ling, W. T (2006) Comparison for plant uptake of phenanthrene and pyrene from soil and water, Biology and Fertility of soils, 42: 387-394.

Iran China Clay Industries Company, Marand, East Azerbaijan, Iran. www.icckaolin.com.

Khamechiyan, M., Charkhabi, A. H., and Tajik, M (2007) Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils, Engineering Geology, 89 (3): 220–229.

Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., and Yazdani, H (2013) Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite, Engineering Geology, 166: 11-16.

Kermani, M., and Ebadi, T (2012) The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils, Soil and Sediment Contamination, 21 (5): 655-671.

Leahy, J. G., and Colwell, R. R (1990) Microbial degradation of hydrocarbons in the environment, Microbial, 54: 305-315.

Lee, K., Brand, J. M., and Gibson, D. T (1995) Stereo specific sulfoxidation by toluene and naphthalene dioxygenases, Biochemistry Biophysics Research Community, 212: 9-15.

Manning, F. S (1995) Oilfield processing of petroleum: Crude oil, Thompson R. E. Pennwell Books.

Margesin, R., Zimmerbauer, A., and Schinner, F (2000) Monitoring of bioremediation by soil biological activities, Chemosphere, 40: 339-346.

Meegoda, N. J., and Ratnaweera, P (1994) Compressibility of contaminated finegrained soils, Geotechnical Testing Journal, 17 (1): 101-12.

Meegoda, N. J., and Ratnaweera, P (1995) Treatment of Oil Contaminated Soils for identification and classification, Geotechnical Testing Journal, 18: 41-49.

Mohsenzadeh, F., Nasseri, S., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Zafari, D., and Chehregani, A (2009) Phytoremediation of petroleum contaminated soils: Prescreening for suitable plants and rhizospheral fungi, Toxicological & Environmental Chemistry, 91(8): 1443-1453.

Nasehi, S. A., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., and Morsali, A (2016) Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils, Geotechnical and Geological Engineering, 34 (1): 333-345.

Salimnezhad, A., Soltani Jigheh, H., and Abolhasani Soorki, A (2020) Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil, Journal of Rock mechanics and geotechnical engineering,

Safehian, H., Rajabi, A. M., and Ghasemzadeh, H (2018) Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil, Engineering Geology, 241: 55-63.

Semple, K. T., Reid, B. J., and Fermor, T. R (2001) Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants, Environment Pollution, 112: 269-283.

Soltani Jigheh, H., Molamahmood Vafaei, H., Ebadi, T., and Abolhasani Soorki, A (2017) Effect of Oil-Degrading Bacteria on Geotechnical Properties of Crude Oil–Contaminated Sand, Environmental and Engineering Geoscience, 24 93): 333-341.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S (2013) Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation: KSCE Journal Civil Engineering, 17 (4): 718–728.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S (2014) Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation, Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering, 140 (5): 04014006.

Sridharan, A., Rao, G. V., and Pandian, R. S (1973) Volume change behaviour of partly saturated clays during soaking and the role of effective stress concept, Soils and Foundations, 13 (3): 1-5.

Tajik, M., Khamechiyan, M., and Charkhabi, A (2013) Geo-environmental investigation of the distribution of oil pollution in coastal sediments (Case study: Bushehr province), Environmental science and technology, 15: 53-65. (In Persian).

Talaie, A. R (2008) Parametric study of petroleum compounds biodegradation using microorganisms, M. Sc. Thesis of Environmental Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., and Okamura, M (2012) Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, Soils Foundations, 52 (3): 539–549.

Yousefi kebria, D., Khodadadi, A., Konji dust, H., Baad koobi, A., and Amuzgar, A (2009) Isolation of indigenous bacteria from soil Contaminated Tehran oil refinery with the ability to remove diesel, 8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Persian)

Vogel, T. M (1996) Bioaugmentation as a soil bioremediation approach, Current Opinion in Biotechnology, 7: 311-316.

Wilson, S. C., and Jones, K. C (1993) Bioremediation of soil contaminated with poly-cyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review, Environmental Pollution, 81: 229-249.

Zheng, X., Zhang, J., Zheng, T., Liang, C., and Wang, H (2014) A developed technique for measuring water content in oil-contaminated porous media, Environmental Earth Sciences, 71 (3): 1349–1356.

Evaluation of the Bacteria Effects on the Geotechnical Properties of Clay Soil Contaminated with Crude Oil

H. Amini [1] and R. Dabiri [2*]

1- M. Sc. (graduated), Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2- Assist. Prof., Dept., of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*** rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir**

Recieved: 2023.12.12 Accepted: 2024.4.8

Abstract

Soil pollution caused by crude oil is one of the important issues in environmental geotechnics. Especially, this type of pollution can be observed in the soil layers of oil-rich areas where oil transmission pipes are located due to the leakage of oil materials. Although the type of soil (granular or fine) is effective in the development of pollution caused by crude oil. Today, various modern methods are used to remove hydrocarbon pollutants, one of which is the use of biological materials. The main propose of present research is evaluate the effect of bacteria application on the geotechnical properties of clayey soil contaminated with crude oil. For this aim, first crude oil is mixed with clay at the rate of 1, 3 and 5 percent by weight. Then, JQ963328.1 bacteria was added to the contaminated soil and cured for 30 days. For evaluating geotechnical properties of improved soil standard compaction, uniaxial compressive strength, direct shear test and consolidation tests have been performed. The results of present study show that with the increase in the presence of crude oil in clay, the bearing capacity has decreased and the amount of swelling and settlement has increased. On the other hand, by mixing bacteria with clay containing 5% crude oil and after curing, it was observed that the uniaxial compressive strength by 33%, the shear strength by 9.8% increased respectively. The swelling potential decreased by 23%.

Keywords: Clay soil, Pollution, Crude Oil, Bacteria, Improvement

Introduction

Soil pollution caused by petroleum hydrocarbon pollutants is a significant global environmental issue. In recent years, the oil-rich regions of southwest and west Iran have experienced a decline in the efficiency of oil extraction and exploitation, resulting in the release or accumulation of oil pollutants in the soil and environment. On the other hand, because the northwestern provinces of the country are considered one of the crude oil export corridors, the soils around the oil transmission lines and storage tanks at the refineries and petrochemical sites have experienced the mentioned problems. The development of pollution caused by crude oil can be influenced by soil type, but modern techniques, such as the use of biological materials, are employed to eliminate hydrocarbon pollutants. Extensive studies have been conducted in the field of using bacterial secretions in the soil to remove oil pollution and improve its geotechnical characteristics, which can be attributed to the research done by Khamechiyan et al. (2007), Kermani and Ebadi (2007), Tajik et al. (2013), Soltani et al., (2017), Aghajani et al., (2020) and Salim Nejad et al., (2020). The primary focus of this research is to examine how bacteria application affects the geotechnical properties of clay with low plasticity index properties that has been contaminated with crude oil.

Material and methods

For this study, kaolin clay with a low plasticity index was obtained from Iran Chinese Industries Company near Marand city with the trade name ZMK2. The particle passing curve of the studied materials has been determined according to ASTM D421 and ASTM D422 standards and can be seen in Figure 1. According to the united category system, the type of kaolin clay is CL. The plasticity index (PI) of clay according to ASTM D4318-95a standard and specific density (Gs) were also estimated according to ASTM D854 standard and are presented in Table 1. Also, the crude oil was obtained from Tabriz Refinery. The

bacterial strain JQ963328.1 was used and studied in the soil research. The specimen preparation is done in two stages. In the first step, the studied soil samples were placed in an autoclave and sterilized. Then, crude oil was spread in the amount of 1, 3 and 5% to the dried soil using a low pressure sprayer. The soil samples contaminated with crude oil were cured in a closed plastic container for 30 days without absorbing moisture or evaporating the oil. In the second step, in order to prepare soil samples contaminated with crude oil materials containing bacteria, similar to the first step, after preparing the samples, bacterial powder is dissolved in distilled water and sprayed. Then it was kept in a closed container for a week at room temperature and cured again. In order to determine the behavioral parameters of clay soil in pure condition, contaminated with crude oil materials and modified using bacteria, first the compaction test according to the ASTM D698 standard was performed. Then, uniaxial compressive strength test based on ASTM D2166 standard was carried out. Next, the direct shear test according to the ASTM D3080-11 standard was performed on samples with dimensions of 10 x 10 square centimeters as strain control under the influence of vertical stresses of 100, 200 and 300 kPa. Finally, in order to evaluate the amount of consolidation settlement and the value of swelling in the studied samples, the consolidation test was performed according to the ASTM D2435 standard.

Results and discussions

1- Compaction test results

The compaction test results indicate that as the oil content in the clay increases, the maximum dry density (γ_{dmax}) decreases. This reduction is almost equal to 8% when the amount of crude oil reaches 5% by weight. On the contrary, with the increase in the amount of crude oil, the optimum water content in the samples increased and when the value of crude oil reached 5%, the optimum water content reached almost 42%. When bacteria are added to soil samples contaminated with crude oil. It was seen that when the amount of crude oil reached 5%, the amount of dry weight increased by 7.2% and the optimal moisture content decreased by 2%.

2- Uniaxial compressive strength test results

Results of uniaxial compressive strength test showed that when crude oil is added to the clay specimen, the uniaxial compressive strength of the contaminated soil decreases. The reduction reaches 45% with the addition of 5% crude oil. However, when bacteria are added to the contaminated clay samples and cured, contrary to the previous case, the resistance and bearing capacity of the soil sample with crude oil increase by 33%. Also, when the crude oil content in clay is raised to 5%, the axial strain decreases, while simultaneously, the modulus of secant initially decreases and then increases. Conversely, by adding the bacterial secretions into the soil under study indicates that in samples containing 3% crude oil, it leads to a slight increase in flexibility and axial strain at the failure moment. However, as the crude oil presence increases, the soil behavior tends to become more modified and brittle.

3-Direct shear test results

According to direct shear test can be explained when crude oil is mixed with clay, the internal friction angle between clay particles decreases. The addition of 5% crude oil results in an 18% reduction in the internal friction angle, and cohesion decreases by 25%. Following this, the adding of bacteria to the crude oil-contaminated clay, particularly in the sample containing 5% stabilized crude oil, leads to a 3% increase in the internal friction angle. Additionally, there is a slight improvement in cohesion, with an increase of 2.45%.

Also, in all applied loads, the shear strength of clay samples containing crude oil has decreased. Specifically, the shear strength in the clay sample containing 5% crude oil decreased by an average of 21% across all loads. Conversely, after adding bacteria to the studied samples and completing the curing, the soil's shear strength increased to some extent, with the highest value observed in the sample containing 5% crude oil. On average, shear resistance increased by 9.8% across all loads.

4-Consolidation test results

Results of consolidation test showed the size of swelling in the clay increased by almost 65% with the increase in the amount of oil. Conversely, when oil-contaminated clay samples are mixed with bacteria and cured, it can be observed that the swelling in the stabilized soil is reduced to approximately 23%.

Conclusion

In general, it can be explained that the lighter parts of crude oil are broken down faster than

the heavier parts by oil-degrading bacteria. Larger-sized organic molecules are more likely to be adsorbed by clays than inorganic cations due to greater access to London-van der Waals forces. As observed, the absorption of crude oil alters the properties of clay. The surfaces of clay particles are composed of non-polar hydrophilic to hydrophobic compounds with low dipole moments (less than 1 Debye). Consequently, their adsorption onto the surfaces of clay particles forms weak bonds, typically limited to the outer layers of the soil. Most hydrocarbon molecules in crude oil are insoluble in water due to their hydrophobic structure, which reduces mobility and retains pollutants in the environment. Lighter hydrocarbons can be washed away and evaporated more easily, while heavier components tend to remain in the soil. Higher solubility in water causes a significant number of chemical pollutants to remain in the aqueous phase. When hydrocarbons have a lower concentration in water, they absorb fewer soil solids and have a greater tendency to bind to the surface of soil particles. Therefore, in clay soils, pollutants are strongly attached to particle surfaces, reducing their availability to microorganisms. As a result, it can be concluded that bacterial secretions can be utilized to enhance and stabilize fine-grained clay soils contaminated with crude oil. However, the type of clay mineral, its plasticity properties, and atmospheric conditions may influence the effectiveness of the proposed method, which should be taken into account in future research.