



University Of Qom



Consolidation Behavior of the Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil Treated with Polypropylene

Abdolghafour Khademalrasoul¹, Hossein Ghorbani²

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: ag.khadem@scu.ac.ir
2. Faculty of Civil Engineering, Institute for Higher Education ACECR Khouzestan, Ahvaz, Iran. E-mail: ghorbanihossein63@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 29 Jun 2023
Revised 13 Sep 2023
Accepted 29 Sep 2023

Keywords:
Contaminated Soil,
Petroleum Hydrocarbon,
Soil Improvement,
Polypropylene Fiber,
Consolidation Test.

ABSTRACT

Soil pollution by oil hydrocarbons is one of the most important kinds of pollution. In this study, clay soil from the CL class were contaminated with gasoil synthetically in 3, 6 and 9 percent by weight, and then the soil containing 6 percent of pollution reinforced with polypropylene fibers at amounts of 0.25, 0.5, 0.75 and 1 percent by weight. According to the results in all samples, Atterberg limits were reduced compared to the base soil. By increasing the percentage of contamination from 0 to 6 percent, the liquid limit and plastic index of the contaminated samples decreased. Moreover by increasing the amount of contamination to 9 percent, these values increased. Investigation of changes trend and amount of compaction characteristics (maximum dry density and optimum moisture) of samples also showed that with soil contamination, maximum dry density and optimum moisture content, had an upward and descending trend compared to the corresponding values in base soil, respectively. According to the results, the presence of contaminant in the soil was led to a decrease of consolidation coefficient, decrease of void ratio, increase of coefficient of volume compressibility and increase of permeability coefficient. The highest rate of decrease in consolidation coefficient (equivalent to 1.7 percent) and the highest increase in permeability coefficient (equivalent to 23.01 percent) was related to the contaminated sample reinforced with 0.75 percent by weight of fibers.

Cite this article: Khademalrasoul A, Ghorbani H. Consolidation Behavior of The Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil Treated with Polypropylene. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 15-31. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9636.1492>



ارزیابی رفتار تحکیمی خاک آلوده به مواد نفتی پس از تسلیح تصادفی با الیاف پلی‌پروپیلن

عبدالغفور خادم الرسول^۱✉، حسین قربانی^۲

۱. نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: ag.khadem@scu.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران. رایانامه: ghorbanihossein63@gmail.com

چکیده

با توجه به تأثیر آلاینده‌ها بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، تمایل به بهسازی خاک‌های آلوده، جهت اطمینان از مقاومت و ظرفیت باربری خاک آلوده برای انجام پروژه‌های عمرانی افزایش یافته است. در این مطالعه، خاک رس از طبقه CL با گازوییل در مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی آلوده شده و پس از آن خاک آلوده، با الیاف پلی‌پروپیلن در مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی مسلح گردیده است. به منظور بررسی تأثیر آلودگی بر ویژگی‌های خاک، نمونه‌های آلوده شده با گازوییل، تحت آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ و تراکم به روش پراکتور استاندارد قرار گرفته‌اند. پس از آن آزمایش تحکیم یک‌بعدی، بر روی نمونه‌های فاقد آلاینده (خاک شاهد)، نمونه‌های آلوده و نمونه‌های آلوده مسلح شده با الیاف انجام شده است. براساس نتایج حاصل، وجود آلاینده نفتی در خاک، منجر به کاهش حدود آتربرگ، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر، کاهش رطوبت بهینه، کاهش ضریب تحکیم، کاهش نسبت تخلخل، افزایش ضریب فشردگی حجمی و افزایش ضریب نفوذپذیری شده است. در نمونه‌های آلوده مسلح شده با الیاف، با افزایش مقدار الیاف از ۰/۲۵ درصد به ۰/۵ درصد، کاهش ضریب تحکیم، افزایش ضریب فشردگی حجمی، کاهش نسبت تخلخل و افزایش ضریب نفوذپذیری، نسبت به مقدار آن در نمونه آلوده فاقد الیاف مشاهده شده و پس از آن با افزایش بیشتر الیاف به ۱ درصد، روند تغییرات در هریک از پارامترها معکوس شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان از الیاف پلی‌پروپیلن به نحو مؤثری در بهسازی خاک‌های آلوده استفاده نمود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۷

کلیدواژه‌ها:

خاک آلوده،
هیدروکربن نفتی،
بهسازی خاک،
الیاف پلی‌پروپیلن،
آزمایش تحکیم یک‌بعدی.

استناد: خادم الرسول عبدالغفور، قربانی حسین. ارزیابی رفتار تحکیمی خاک آلوده به مواد نفتی پس از تسلیح تصادفی با الیاف پلی‌پروپیلن.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۱۵-۳۱. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9636.1492>

۱- مقدمه

هیدروکربن‌های نفتی ارزیابی شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها، حاکی از کاهش شاخص خمیری، کاهش میزان رطوبت بهینه، کاهش اعداد CBR، کاهش پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و افزایش نشست تحکیمی، با افزایش میزان آلاینده در خاک بوده‌اند [۴].

در پژوهش دیگری، تأثیر آهک زنده بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های سطحی آلوده به مواد نفتی بررسی شد. براساس نتایج حاصل، با افزودن آهک زنده به خاک آلوده، خواص خمیری کاهش یافته و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن افزایش یافته‌اند [۵]. در پژوهش انجام شده توسط اوتونیو و اوماسیریچی^۱ در رابطه با اثر آلودگی روغن موتور بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس، مشخص گردید که افزایش مقدار روغن موتور، کاهش چگالی ویژه و حد خمیری، افزایش مقادیر انقباض خطی، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه و کاهش مقاومت برشی و اعداد CBR خاک را به دنبال داشته است [۶].

چوداری و سینگ^۲، با انجام یک بررسی آزمایشگاهی در مورد اثر بنزین بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، افزایش اندک چسبندگی، افت زاویه اصطکاک داخلی، افزایش درصد تورم، افزایش حدود آتربرگ و عدم تأثیر منفی بنزین بر اعداد CBR را در نمونه‌های خاک ماسه آلوده گزارش نموده‌اند [۷]. در مطالعه کارکوش و عبدالکریم^۳، با ارزیابی اثرات آلودگی با گازوییل بر ویژگی‌های خاک چسبنده، مشخص گردید که آلودگی با گازوییل، منجر به افزایش نسبت تخلخل اولیه، افزایش ضریب تراکم‌پذیری حجمی، افزایش ضریب نفوذپذیری، افزایش ضریب تحکیم، کاهش مقاومت برشی و کاهش چسبندگی خاک گردیده است [۸].

ایران یکی از بزرگترین تولیدکننده‌های نفت در جهان است. مواد نفتی حین حفاری و استخراج در سایت‌های نفتی یا هنگام نقل و انتقال زمینی و دریایی آنها، با وجود تدابیری که جهت کنترل آلودگی آنها در نظر گرفته می‌شود، به محیط اطراف نشت می‌کنند. وارد شدن نفت تولیدی و مشتقات آن در اثر حوادث گوناگون به محیط، باعث ایجاد آلودگی شدید زیست‌محیطی از جمله آلودگی خاک می‌گردد [۱]. ترکیبات نفتی، اثرات شگرفی بر ویژگی‌های رس‌ها دارند. همچنان که مواد نفتی و رس‌ها بر هم اثر می‌گذارند، مواد نفتی به دانه‌های خاک ملحق می‌شوند و در نتیجه ویژگی‌های آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۲]. در اثر فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی که بین خاک و آلاینده‌ها رخ می‌دهد، خصوصیات مقاومتی، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک تغییر می‌کنند. تغییر پارامترهای مقاومتی خاک، می‌تواند بر میزان نشست‌پذیری و ظرفیت باربری یک پی که بر خاک آلوده قرار گرفته، تأثیرگذار باشد [۳]. بنابراین، نیاز به مطالعات جامع و همه‌جانبه در شرایط طبیعی، بر روی ترکیبات نفتی وارد شده به محیط‌زیست کاملاً ملموس است تا بتوان از طریق این نتایج واقعی، اثرات مواد نفتی در خاک را بیشتر مورد بررسی قرار داد و در صورت نیاز به اصلاح و بهسازی این نوع خاک‌ها، اطلاعات کافی در مورد ویژگی‌های آنها در خاک و انجام عملیات و طریقه برخورد با آنها جمع‌آوری نمود [۲]. در راستای دستیابی به این امر مهم، در گذشته، پژوهش‌هایی راجع به خاک‌های آلوده و تأثیر آلاینده‌های نفتی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی مختلف خاک‌ها انجام شده است. همچنین، مطالعاتی در رابطه با بهسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، با روش‌های مختلف نظیر تثبیت شیمیایی و غیره وجود دارد که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

در پژوهش انجام شده توسط محمدی و محرم‌زاده‌سرای، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به

¹- Otunyo and Omasirichi

²- Chaudhary and Singh

³- Karkush and Abdul Kareem

تحکیم، شاخص تورم، نفوذپذیری، مقاومت برشی زهکشی‌نشده، پارامترهای مقاومت برشی مؤثر و نرخ کاهش فشار آب منفذی اولیه، کاهش قابل توجهی داشته‌اند [۱۳]. محققان، با تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی خاک رس آلوده به روغن موتور، نتیجه گرفتند که با افزایش درصد مواد آلاینده در خاک رس، مقاومت برشی و نرخ تحکیم کاهش یافته و تراکم‌پذیری افزایش یافته است [۱۴].

در مطالعه صورت گرفته توسط پژوهشگران، با بررسی امکان‌سنجی تثبیت خاک ماسه SP آلوده شده با گازوییل و نفت خام، با کاربرد سیمان پرتلند معمولی و مصالح مکمل سیمانی، چنین نتیجه‌گیری شد که بهسازی خاک آلوده با مواد سیمانی، موجب بهبود ویژگی‌های تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده و مقاومت در برابر نفوذپذیری شده است [۱۵]. بجنوردی و همکاران، در مطالعه‌ای با تعیین ویژگی‌های هیدرومکانیکی مخلوط‌های ماسه- بنتونیت آلوده شده با روغن موتور، در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن، دریافتند که هنگام آلودگی خاک با روغن موتور، مقاومت فشاری محصورنشده تضعیف شده و نفوذپذیری کاهش یافته است. از سوی دیگر، با افزودن الیاف به خاک آلوده، بهبود مقاومت برشی و مقاومت فشاری محصورنشده گزارش شده است [۱۶].

در پژوهش صورت گرفته توسط سلیم‌نژاد و همکاران، آلودگی خاک رس با خاصیت خمیری بالا با نفت خام، کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر، مقاومت فشاری، مقاومت برشی، فشار تورم و ضریب تحکیم خاک، همچنین، افزایش شاخص‌های تورم و فشردگی و تراکم‌پذیری خاک را به دنبال داشته است [۱۷]. احمدی و همکاران، مطالعه‌ای برای بررسی اندرکنش بین نفت خام، کانی‌های رسی و ذرات ماسه در خاک آلوده و تأثیر نفت خام بر ویژگی‌های مهندسی مخلوط‌های ماسه- کائولن انجام داده‌اند. مخلوط‌ها، با نسبت‌های وزنی مختلف

در بررسی دیگری که توسط چونگ^۴ و همکاران انجام شد، تثبیت خاک رس آلوده شده با نفت، با استفاده از سیمان پرتلند مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج، با افزایش مقدار نفت، کاهش مقاومت فشاری محصورنشده و پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت شده با سیمان و با افزایش مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری، بهبود مقاومت فشاری محصورنشده و پارامترهای مقاومت برشی گزارش شده است [۹]. جداری و فراهانی، در مطالعه‌ای به بررسی ویژگی‌های تحکیمی خاک رس آلوده شده با نفت سفید و گازوییل پرداخته‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده، مقادیر پارامترهای تحکیم، شامل ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری، با افزایش درصد آلاینده در خاک کاهش یافته و میزان کاهش ضریب تحکیم، در آلودگی با گازوییل، نسبت به نفت سفید کمتر بوده است [۱۰].

در مطالعه انجام شده توسط روشن‌قیاس و باقری‌پور، با هدف بررسی اثر آلودگی خاک رس کائولینیت با نفت خام بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، کاهش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری، کاهش ضریب نفوذپذیری، همچنین، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر، با افزایش درصد نفت خام در خاک گزارش شده است. ظاهرمنند و همکاران، مطالعه‌ای با تمرکز بر تحلیل ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک آلوده شده با هیدروکربن‌های نفتی انجام داده‌اند. نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ در خاک رس، افزایش حدود خمیری و مایع، همچنین کاهش شاخص خمیری را با افزایش غلظت آلاینده نشان داده‌اند [۱۲].

کارکوش و جهاد^۵، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس آلوده شده با نفت سفید را مطالعه نمودند. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، ثابت شده است که با افزایش مقدار نفت سفید در خاک، نسبت تخلخل اولیه و نهایی، ضریب

4- Chuang

5- Karkush and Jihad

کاهش حدود آتربرگ، پارامترهای تراکم، مقاومت فشاری خاک و مدول الاستیسیته، در مقایسه با خاک فاقد آلاینده شده است. همچنین، اکسید منیزیم و آهک هیدراته، هر دو سبب افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته مربوط به ۵۰ درصد از مقاومت نهایی (E_{50}) شده‌اند. در مجموع، از لحاظ کارایی، اکسید منیزیم در درصدهای بسیار پایین، تأثیر مطلوب‌تری در بهسازی خاک نسبت به آهک داشته است. بنابراین، براساس نتایج این پژوهش، برای بهسازی خاک، نیازی به اکسید منیزیم در درصدهای بالا نمی‌باشد. بنابراین استفاده از آن مقرون به‌صرفه بوده و در پروژه‌های عمرانی توصیه می‌شود [۲۱].

فلامکی و همکاران، پژوهشی با هدف استفاده از کامپوزیت پلیمری الیاف کربن غنی شده با خاک دیاتومه (PCD) برای بهسازی خاک رس آلوده شده با نفت انجام داده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که وجود نفت در خاک رسی در مقادیر صفر تا ۱۲ درصد، منجر به کاهش مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت تک‌محوری شده است. ضمن این که نفت در مقدار ۱۲ درصد، بیشترین تغییرات را در مقاومت خاک رس ایجاد نموده است. با توجه به نتایج حاصل، کاربرد ۵/۵ درصد PCD، موجب افزایش مقاومت برشی برای خاک شاهد و خاک آلوده با ۱۲ درصد نفت، همچنین کاهش ضریب نفوذپذیری خاک شده است [۲۲].

با وجود مطالعات انجام شده بر روی خاک‌های آلوده با مواد نفتی مختلف و روش‌های بهسازی آنها، بهسازی این خاک‌ها از طریق تسلیح تصادفی با الیاف، همچنین، تأثیر الیاف بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده از جمله ویژگی‌های تحکیمی آنها، چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا، با توجه به تأثیر آلاینده‌های نفتی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک، از جمله رفتار تحکیمی آن، اهمیت بهسازی خاک‌های آلوده به مواد و مشتقات نفتی، بیش از پیش آشکار می‌شود.

با عنایت به کمبود مطالعات در رابطه با بهسازی این نوع خاک‌ها به ویژه با روش تسلیح با الیاف، در این

کائولینیت به ماسه آماده شده و با مقادیر مختلف نفت خام آلوده شده‌اند. براساس نتایج حاصل، با افزایش مقدار آلاینده، مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر، میزان رطوبت بهینه، مقادیر نفوذپذیری و pH کاهش یافته‌اند. نسبت‌های مختلف رس به ماسه، تأثیر قابل توجهی بر مقدار WHC و پارامترهای مقاومت برشی خاک در حضور نفت خام داشته‌اند. در نمونه‌های ماسه با مقدار رس کم و زیاد، افزودن نفت خام، به ترتیب، کاهش و افزایش زاویه اصطکاک داخلی را به دنبال داشته است [۱۸].

در مطالعه انجام شده توسط محققان، اثر گازوئیل به عنوان آلاینده بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه رس‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل، حد روانی و خمیری برای خاک آلوده با ۱۶ درصد گازوئیل، به ترتیب به میزان ۲۸/۹ و ۵۴/۴۷ درصد نسبت به خاک تمیز کاهش یافته و شاخص خمیری برای نمونه‌های آلوده شده با گازوئیل در مقادیر کمتر از ۸ درصد، روند افزایشی داشته و پس از آن کاهش یافته است. همچنین، با افزایش درصد آلودگی تا ۸ درصد، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش یافته و در مقادیر بالاتر آلاینده افزایش یافته است. همچنین، با افزایش درصد آلودگی در خاک، مقاومت فشاری محصورنشده کاهش یافته است [۱۹].

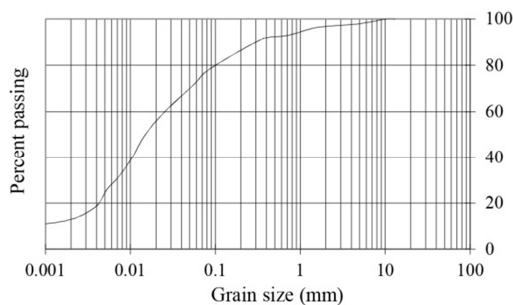
نوکنده و همکاران، اثر آلاینده‌های نفتی شامل نفت سفید و بنزین را بر رفتار مکانیکی خاک‌های رمبنده بررسی نمودند. نتایج، حاکی از کاهش خاصیت خمیری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری محصورنشده، با افزایش آلاینده بوده‌اند [۲۰]. محققان، در پژوهش خود، به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رس آلوده شده به ماده آلی متیل‌ترت‌بوتیل‌اتر (MTBE) و امکان بهسازی آن با مواد افزودنی اکسید منیزیم و آهک هیدراته پرداخته‌اند. نتایج استخراج شده از این تحقیق نشان داد که افزودن MTBE به خاک رس، منجر به

⁶- Methyl tert-butyl ether

طبقه CL (رس با خاصیت خمیری کم، همراه با ماسه) بوده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح خاکی

CL	طبقه‌بندی براساس سیستم طبقه‌بندی متحد
۱۵/۳	ω_{opt} (%)
۱/۶۳	γ_{dmax} (gr/cm ³)
۲/۶۶۷	G _s
۱۰/۸۳	ω (%)
۱۲	PI (%)
۱۹	PL (%)
۳۱	LL (%)



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک رس مورد استفاده در پژوهش حاضر

۲-۱-۲- آلاینده (هیدروکربن نفتی)

هیدروکربن نفتی مورد استفاده جهت آلوده‌سازی مصنوعی خاک و شبیه‌سازی خاک آلوده، از نوع گازوییل بوده که از جایگاه عرضه سوخت شهریار در استان تهران تهیه شده است. ویژگی‌های گازوییل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های هیدروکربن مورد استفاده [۲۳]

واحد	مقدار		ویژگی
	حداکثر	حداقل	
کیلوگرم بر مترمکعب	۸۶۰	۸۲۰	وزن مخصوص
درجه سانتیگراد	-----	۶۰	نقطه اشتعال (Flash point)
درجه سانتیگراد	۳۸۵	-----	نقطه جوش نهایی (F.B.P)
درصد حجمی	۰/۰۱	-----	درصد آب
-----	-----	۴۹	شاخص ستان
PPM	۵۰۰۰	-----	گوگرد موجود در گازوئیل

پژوهش، سعی بر آن است که رفتار تحکیمی خاک رس آلوده به گازوییل، در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن (PP)، با استفاده از آزمایش تحکیم یک‌بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. از این‌رو، انجام این پژوهش می‌تواند گام مؤثری در جهت بهسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، از طریق روش تسلیح و تسهیل استفاده از آنها در پروژه‌های مختلف باشد.

۲- مواد و روش‌ها

این مطالعه، با هدف تعیین تأثیر آلودگی نفتی بر برخی ویژگی‌های خاک رس، همچنین بررسی اثرات الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار تحکیمی خاک رس آلوده شده با گازوییل انجام شده است.

۲-۱- مصالح مورد استفاده

۲-۱-۱- مصالح خاکی

در این پژوهش، از خاک رس مورد استفاده در صنایع کاشی‌کاری، به عنوان خاک شاهد استفاده شده است. مشخصات خاک رس پس از انجام آزمایش‌های مربوطه، در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است. خاک رس مورد استفاده در این پژوهش، مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد (ASTM-D2487)، از

۳-۱-۲- الیاف مورد استفاده

خاک خشک شده به مقدار کافی توزین شده و براساس وزن خاک خشک و با توجه به وزن مخصوص گازوییل، خاک خشک با مقادیر مختلف گازوییل، شامل ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک، به صورت مصنوعی مخلوط شده است. انتخاب مقادیر گازوییل، با استناد به مطالعات قبلی صورت گرفته است [۱۰ و ۱۴].

لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن مقدار گازوییل به صورت درصدی از وزن خشک خاک، وزن گازوییل مربوطه به ۳ بخش مساوی تقسیم شده و پس از افزودن هر بخش به صورت دوش مانند یا اسپری کردن، توده خاک آلوده به گازوییل، با دو کاردک به طور کامل مخلوط گردیده است. با توجه به ریزدانه بودن خاک مورد استفاده و برای انجام واکنش‌های احتمالی بین ذرات خاک و آلاینده، توده نهایی خاک گازوییل زده، جهت عمل‌آوری، به مدت ۱۶ ساعت درون نایلون زیپ‌دار نگهداری شد. تصویر خاک شاهد و خاک آلوده به گازوییل، در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در مرحله بعد، برای بررسی تأثیر تسلیح خاک آلوده با الیاف پلی پروپیلن بر ویژگی‌های آن، نمونه‌های آلوده با اختلاط خاک و گازوییل آماده شده و سپس با توزیع تصادفی الیاف در این مخلوط، در مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی مسلح شده و تحت آزمایش قرار گرفته‌اند.



(ب)

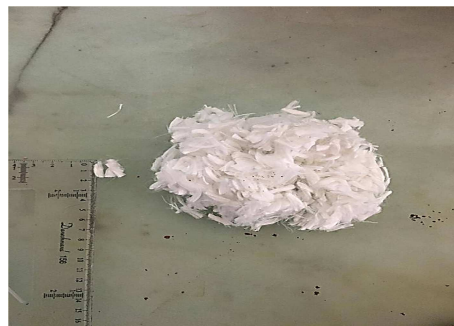


(الف)

شکل ۳- (الف) خاک رس شاهد و (ب) خاک رس آلوده شده با گازوییل

با الیاف پلی پروپیلن در مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد مسلح شده و تحت آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم، UCS و نفوذپذیری قرار گرفته است [۱۶].

الیاف مورد استفاده برای مسلح‌سازی خاک آلوده، از نوع پلی پروپیلن بوده که تصویر آن در شکل ۲ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن، در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در پژوهش حاضر

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف [۲۴]

پلی پروپیلن	مصالح
سفید	رنگ
۰/۹۱	چگالی (gr/cm^3)
۱۲	طول (میلیمتر)
۲۰	قطر (میکرون)
۳۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۱۶۰	نقطه ذوب (درجه سانتیگراد)

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌های خاک آلوده، خاک رس در گرمخانه به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و پس از آن،

مقدار الیاف، با توجه به محدوده مورد استفاده در مطالعه بجنوردی و همکاران انتخاب شده است. در مطالعه مذکور، مخلوط ماسه و بنتونیت آلوده شده با روغن موتور،

تصویر خاک آلوده مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن، در

شکل ۴ نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴- (الف) خاک رس آلوده و الیاف پلی پروپیلن قبل از اختلاط و (ب) خاک رس آلوده مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن

۳-۲- آزمایش‌ها

در این پژوهش، در ابتدا خاک رس شاهد، تحت آزمایش‌های تحلیل اندازه ذرات و هیدرومتری (ASTM-D422)، تعیین حدود آتربرگ (ASTM-D4318)، تعیین درصد رطوبت طبیعی (ASTM-D2216)، تعیین چگالی ویژه ذرات جامد (ASTM-D854) و تراکم به روش پراکتور استاندارد (ASTM-D698) و پس از آن، نمونه‌های آلوده شده با گازوییل، تحت آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ و تراکم به روش پراکتور استاندارد قرار گرفته‌اند [۲۵-۲۹]. در مرحله بعد، آزمایش تحکیم یک‌بعدی، مطابق استاندارد ASTM-D2435 بر روی نمونه‌های فاقد آلاینده (خاک شاهد)، نمونه‌های آلوده و نمونه‌های آلوده مسلح شده با الیاف، در محدوده فشارهای ۰/۲۵ تا ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، شامل ۷ روز بارگذاری و ۲ روز باربرداری انجام شده است [۳۰]. برای ترسیم منحنی تحکیم، از

روش جذر زمان استفاده شده است. جهت قالب‌گیری نمونه برای آزمایش تحکیم، با توجه به وزن مخصوص خشک حداکثر و میزان رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم، همچنین درصد گازوییل و حجم قالب، وزن ۳ لایه مربوطه توزین شده و پس از متراکم کردن هر لایه با خطکش فلزی لبه تیز، ضخامت یکسان هر ۳ لایه تأمین شده است. یادآوری می‌گردد که قبل از ریختن لایه بالایی، می‌بایست سطح لایه متراکم شده قبلی، جهت همگنی خراش داده شود. لازم به ذکر است که برای کم شدن خطای آزمایشگاهی، هریک از آزمایش‌های مذکور، حداقل ۳ مرتبه بر روی نمونه انجام شده و میانگین نتایج گزارش شده است. نحوه بازسازی نمونه و قرار گرفتن آن در سلول دستگاه تحکیم، در شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵- (الف) بازسازی نمونه و (ب) قرارگیری نمونه در سلول دستگاه آزمایش تحکیم

۳- نتایج و بحث و بررسی

۳-۱- بررسی رفتار خاک آلوده

همان‌طور که اشاره شد، برای بررسی رفتار خاک آلوده، آزمایش‌های پایه شامل آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ و تراکم همچنین آزمایش تحکیم، بر روی نمونه‌های حاوی خاک رس و مقادیر مختلف گازوییل (۳، ۶ و ۹ درصد وزن خاک خشک) انجام شده‌اند.

۳-۱-۱- بررسی تأثیر آلاینده بر حدود آتربرگ و ویژگی‌های تراکم خاک

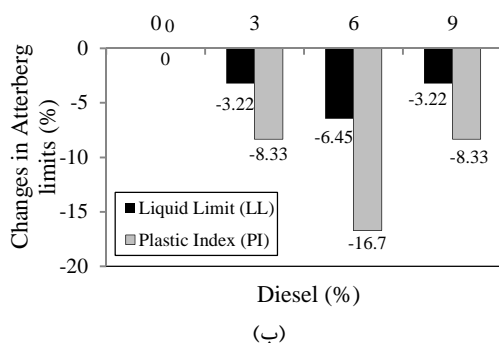
نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین حدود آتربرگ و تراکم، در جدول ۴ خلاصه شده و برای مقایسه، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک رس فاقد آلاینده نیز در این جدول ارائه شده‌اند. در این جدول، CL و G به ترتیب، به خاک رس شاهد و گازوییل اشاره دارند. منحنی‌های تراکم خاک شاهد و مخلوط‌های خاک آلوده، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های پایه انجام شده بر روی نمونه‌های خاک شاهد و خاک آلوده به گازوییل

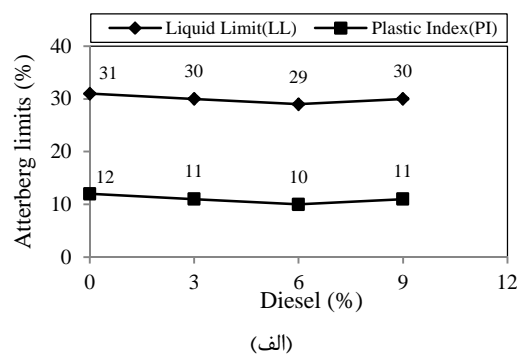
ویژگی‌های تراکم		حدود آتربرگ		نمونه
ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (gr/cm ³)	PI (%)	LL (%)	
۱۵/۶	۱/۶۳	۱۲	۳۱	CL
۱۵/۵	۱/۶۷	۱۱	۳۰	CL+3%G
۱۵/۲	۱/۷۱	۱۰	۲۹	CL+6%G
۱۴/۸	۱/۷۶	۱۱	۳۰	CL+9%G

شکل ۶- منحنی‌های تراکم نمونه‌های خاک شاهد و خاک آلوده به گازوییل

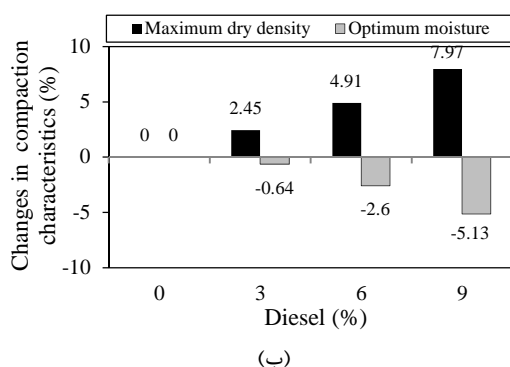
به منظور بررسی تأثیر گازوییل بر حدود آتربرگ و ویژگی‌های تراکم خاک رس، روند و میزان تغییرات حدود آتربرگ و ویژگی‌های تراکم مخلوط‌های ساخته شده با خاک رس و گازوییل، نسبت به خاک فاقد آلاینده، به ترتیب، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با بررسی روند و میزان تغییرات حدود آتربرگ در شکل ۷ می‌توان دریافت که در تمام نمونه‌های آلوده، حدود آتربرگ نسبت به خاک شاهد کاهش یافته‌اند. با افزایش درصد آلودگی از صفر به ۶ درصد، حد روانی و شاخص خمیری نمونه‌های آلوده در مقایسه با نمونه خاک شاهد، کاهش یافته و با افزایش بیشتر مقدار آلودگی به ۹ درصد، این مقادیر افزایش یافته‌اند. میزان کاهش حد روانی و شاخص خمیری، در نتیجه افزودن آلاینده از صفر تا ۹ درصد، به ترتیب در محدوده ۶/۴۵-۳/۲۲ درصد و ۱۶/۷-۸/۳۳ درصد بوده است.



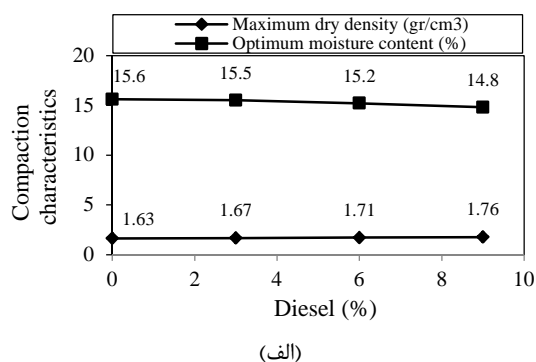
شکل ۷- (الف) روند و (ب) میزان تغییرات حدود آتربرگ در مقادیر مختلف گازوییل



محققان گزارش شده است. میزان کاهش شاخص خمیری در این مطالعات، به ترتیب در محدوده‌های ۳۰/۷۰-۵/۷۱، ۳۱/۲۵-۶/۲۵ و ۴۷/۴۰-۲۱/۰۵ درصد بوده است [۴، ۱۱ و ۱۲]. با توجه به تنوع خاک‌های مورد استفاده و نوع آلاینده‌ها و درصدهای اضافه شده، میزان تغییرات در این مطالعات با مطالعه فعلی متفاوت بوده است. بررسی روند و میزان تغییرات ویژگی‌های تراکم (وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه) نمونه‌ها در مقادیر مختلف آلودگی در شکل ۸ نشان می‌دهد که با آلوده شدن خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، به ترتیب روندی صعودی و نزولی، نسبت به مقادیر متناظر آن در خاک شاهد طی نموده‌اند.



بیشترین کاهش در مقادیر حد روانی و شاخص خمیری، در مقدار آلودگی ۶ درصد حاصل شده و میزان این کاهش، به ترتیب معادل ۶/۴۵ درصد و ۱۶/۷ درصد بوده است. دلیل کاهش حد روانی و شاخص خمیری در نمونه‌های خاک آلوده نسبت به خاک شاهد را می‌توان اینگونه تفسیر نمود که مولکول‌های هیدروکربن‌های نفتی، برعکس مولکول‌های آب، قطبی نبوده و قادر به تشکیل لایه دوگانه با خاک نیستند. بنابراین وجود این مواد در خاک با ثابت دی‌الکتریک پایین‌تر، موجب خنثی شدن بار ذرات رس و کاهش ضخامت لایه آب دوگانه در اطراف ذرات رس و در نتیجه، کاهش حد روانی و شاخص خمیری خاک آلوده شده است [۴ و ۱۱]. کاهش شاخص خمیری با افزایش میزان آلودگی، پیش از این، در مطالعه

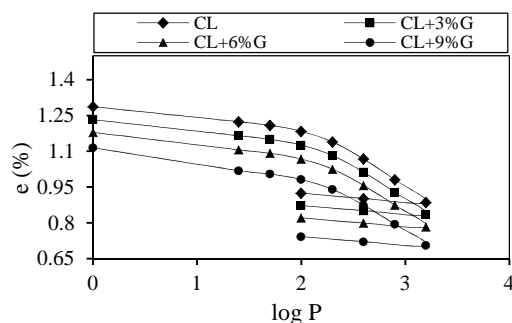


شکل ۸- (الف) روند و (ب) میزان تغییرات ویژگی‌های تراکم در مقادیر مختلف گازوییل

بر روی یکدیگر، افزایش تراکم خاک و میزان ذرات در واحد حجم و در نتیجه، افزایش وزن مخصوص خشک می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک آلوده را می‌توان به ویسکوزیته بالاتر و ثابت دی‌الکتریک پایین‌تر هیدروکربن نفتی، در مقایسه با ویژگی‌های متناظر آب نسبت داد. ویسکوزیته بالاتر سیال نفتی، منجر به روغن‌کاری بهتر ذرات می‌شود. بنابراین، زمانی که انرژی تراکم اعمال می‌شود، انرژی کمتری برای غلبه بر نیروی تماسی و اصطکاک بین ذرات نیازمند بوده و ذرات بر روی یکدیگر می‌لغزند. به‌طور کلی، وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک، نیروی دافعه بین ذرات رس را کاهش داده و موجب تغییر رفتار خاک از ریزدانه

میزان افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و میزان کاهش رطوبت بهینه در نمونه‌های آلوده، نسبت به مقدار این پارامترها در خاک شاهد، به ترتیب در محدوده ۲/۴۵-۷/۹۷ و ۵/۱۳-۰/۶۴ درصد محاسبه شده است؛ به گونه‌ای که وزن مخصوص خشک حداکثر، از ۱/۶۳ گرم بر سانتیمترمکعب در خاک شاهد، به ۱/۷۶ گرم بر سانتیمترمکعب در ۹ درصد آلودگی و مقدار رطوبت بهینه، پس از آلودگی خاک با ۹ درصد گازوییل، از ۱۵/۶ به ۱۴/۸ درصد رسیده است. به‌طور کلی، نمونه‌های با آلودگی بیشتر، با درصد رطوبت بهینه کمتری به وزن مخصوص خشک حداکثر رسیده‌اند. احاطه شدن ذرات خاک با آلاینده، موجب سهولت حرکت ذرات و لغزش آنها

منحنی‌های تراکم خاک شاهد و نمونه‌های خاک آلوده، در شکل ۹ ارائه شده‌اند. همچنین، روند تغییرات پارامترهای حاصل از آزمایش تحکیم در مقابل مقادیر مختلف آلودگی و به‌ازای تنش‌های سربار مختلف، در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۹- منحنی‌های تحکیم خاک شاهد و نمونه‌های خاک آلوده

با بررسی نمودارهای ترسیم شده و مشاهده تغییرات ضریب تحکیم میانگین در فشارهای سربار مختلف، برای مقادیر مختلف آلاینده، می‌توان دریافت که با افزایش درصد آلودگی، ضریب تحکیم کاهش یافته است. میزان کاهش ضریب تحکیم در نمونه‌های آلوده در مقایسه با خاک شاهد، در محدوده ۳/۲۰-۰/۶۰ درصد به‌دست آمده است. این کاهش را می‌توان به کاهش نرخ نشست خاک رس آلوده، به علت ماهیت ویسکوز آن نسبت داد. ماهیت ویسکوز خاک آلوده، مستلزم فشار بسیار بالا و صرف زمان بیشتر برای فشرده شدن، در مقایسه با خاک رس غیرآلوده است [۱۴]. وجود هیدروکربن در خاک، موجب تغییر رفتار کانی‌های رسی ناشی از اندرکنش بین ذرات رس و گازوییل، کاهش حد روانی و کاهش ضریب تحکیم می‌شود [۱۳]. کاهش ضریب تحکیم با افزایش میزان آلودگی، در نتایج حاصل از مطالعه کارتیگیان و رامچاندران^۷ ارائه شده است. حداکثر میزان کاهش ضریب تحکیم در این پژوهش، ۴۲ درصد بوده است [۱۴]. جداری و فراهانی نیز کاهش ضریب تحکیم را با افزایش میزان آلودگی و افزایش سربار گزارش

به سمت خاک دانه‌ای می‌شود. با تغییر رفتار خاک به دانه‌ای، میزان رطوبت کمتری برای رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر موردنیاز است [۴]. در واقع، با پوشش سطح بیرونی ذرات خاک توسط هیدروکربن، این مواد از اندرکنش بین خاک و آب جلوگیری کرده و مقدار آبی را که برای رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر لازم است کاهش می‌دهند.

با برازش بهترین خط بر داده‌های حاصل برای حد روانی، شاخص خمیری، وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه، برحسب مقادیر آلودگی، معادله کلی این پارامترهای رفتاری به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$LL (\%) = -0.1333(G \%) + 30.6 \quad (R^2 = 0.40) \quad (1)$$

$$PI (\%) = -0.1333(G \%) + 11.6 \quad (R^2 = 0.40) \quad (2)$$

$$\gamma_{dmax} (gr/cm^3) = 0.01433(G \%) + 1.628 \quad (R^2 = 0.99) \quad (3)$$

$$\omega_{opt} (\%) = -0.09(G \%) + 15.68 \quad (R^2 = 0.94) \quad (4)$$

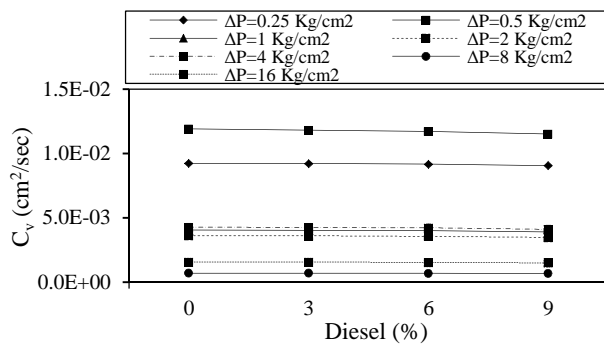
افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش میزان رطوبت بهینه خاک رس CL در نتیجه افزایش آلودگی، در پژوهش‌های محققان گزارش شده است [۴] و [۱۱]. میزان افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه در مطالعه محمدی و محرم‌زاده سرای، به ترتیب در محدوده ۶/۵۰-۱/۶۲ و ۶/۹۵-۲۱/۷۴ درصد بوده است [۴]. محدوده‌های متناظر در پژوهش انجام شده توسط روشن‌قیاس و باقری‌پور، به ترتیب به صورت ۲/۴۲-۱۰/۵۰ و ۳/۶-۵۰/۰ درصد به‌دست آمده‌اند [۱۱]. با مقایسه محدوده‌های افزایش و کاهش مشخصه‌های تراکم در این پژوهش‌ها با پژوهش فعلی، چنین نتیجه می‌شود که افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر تقریباً در محدوده مشابهی بوده است، ضمن این که تأثیر نوع و ترکیب کانی‌شناسی خاک مورد بررسی و نوع و مقدار آلاینده بر نتایج را نمی‌توان نادیده گرفت.

۳-۱-۲- بررسی تأثیر آلاینده بر رفتار تحکیمی خاک

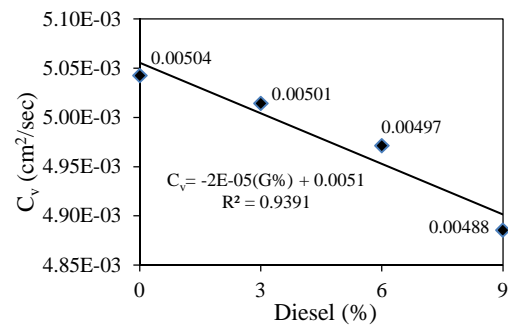
⁷- Karthigeyan and Ramachandran

نموده‌اند [۱۰]. اما در این تحقیق، تراکم نسبی خاک متغیر بوده و از دو مقدار ۷۰ و ۹۰ درصد استفاده شده

است.

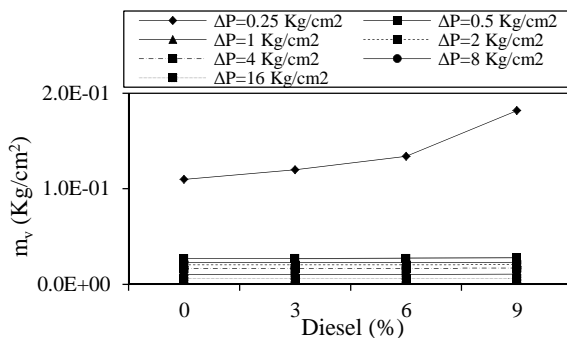


(ب)

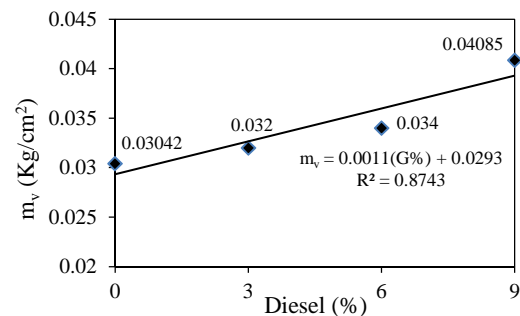


(الف)

شکل ۱۰- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین ضریب تحکیم در مقابل درصد آلودگی و (ب) تغییرات ضریب تحکیم در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف آلاینده



(ب)

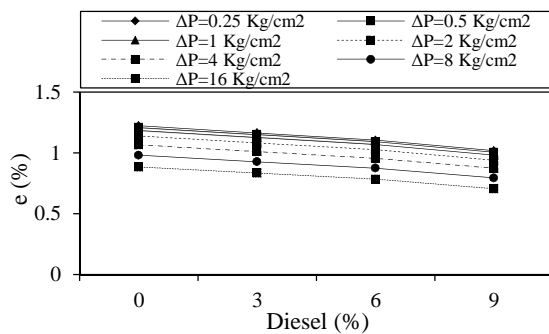


(الف)

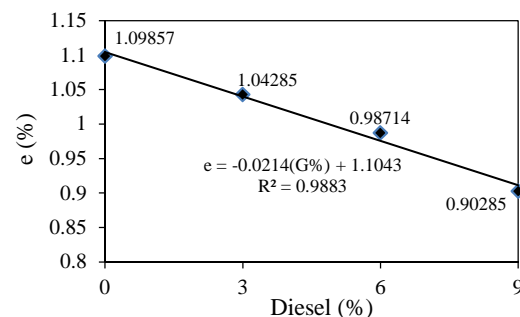
شکل ۱۱- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین ضریب فشردگی حجمی در مقابل درصد آلودگی و (ب) تغییرات ضریب فشردگی حجمی در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف آلاینده

۲۰ درصد وزنی، افزایش ضریب تحکیم، به ترتیب به میزان ۵۴/۸۲ و ۶۶/۴۳ درصد نسبت به خاک فاقد آلاینده گزارش شده است [۸].

براساس نتایج این مطالعه، نمونه‌های با تراکم نسبی کمتر، ضریب تحکیم بالاتری داشته‌اند. در مطالعه کارکوش و عبدالکریم، با افزودن گازوئیل در مقادیر ۱۰ و

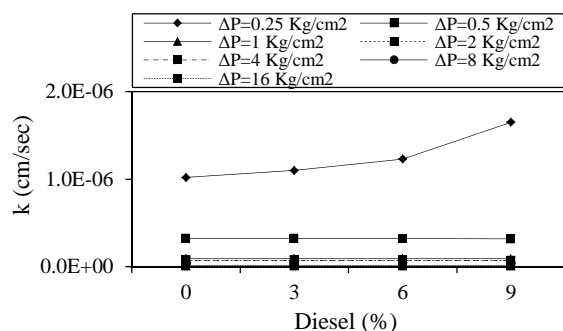


(ب)

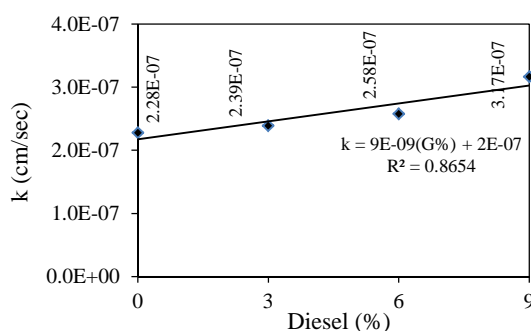


(الف)

شکل ۱۲- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین نسبت تخلخل در مقابل درصد آلودگی و (ب) تغییرات نسبت تخلخل در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف آلاینده



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- روند (الف) تغییرات میانگین ضریب نفوذپذیری در مقابل درصد آلودگی و (ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف آلاینده

پارامترها، به ترتیب در محدوده ۳۴/۳-۵/۲ و ۳۹/۰۳-۴/۸۲ درصد به دست آمده است. افزایش ضریب فشردگی حجمی با افزایش آلاینده، ناشی از بازآرایش ذرات، ناشی از کاهش درصد ذرات ریزدانه به علت ایجاد پیوندهای جدید بین آنها و تشکیل ذرات با اندازه مشابه ماسه و در نتیجه، شکل‌گیری فضاهای خالی و حفرات بزرگ بین ذرات می‌باشد [۸].

افزایش ضریب نفوذپذیری را نیز می‌توان به انقباض لایه دوگانه اطراف ذرات رس نسبت داد. علت انقباض نیز پایین بودن ثابت دی‌الکتریک هیدروکربن نفتی در مقایسه با آب است. انقباض خاک، منجر به توسعه حفرات و فضاهای بزرگ و ترک‌ها بین ذرات خاک و در نتیجه، افزایش ضریب نفوذپذیری می‌شود [۳۱].

افزایش ضریب فشردگی حجمی و ضریب نفوذپذیری با افزایش مقدار آلاینده، قبلاً در مطالعه انجام شده توسط کارکوش و عبدالکریم و افزایش ضریب نفوذپذیری با افزایش درصد آلودگی نیز در نتایج پژوهش صورت گرفته توسط نذیر گزارش شده است [۸ و ۳۱]. میزان افزایش ضریب فشردگی حجمی و ضریب نفوذپذیری در مطالعه کارکوش و عبدالکریم، به ترتیب در محدوده ۹۳/۶۱-۵/۹۸ و ۱۷/۵۳-۲/۹۵ درصد به دست آمده است [۸]. همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، مقدار گازوئیل مورد استفاده در این تحقیق، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی بوده است. در پژوهش انجام شده توسط نذیر، مقدار ضریب نفوذپذیری خاک آلوده، ۳ برابر مقدار آن در خاک

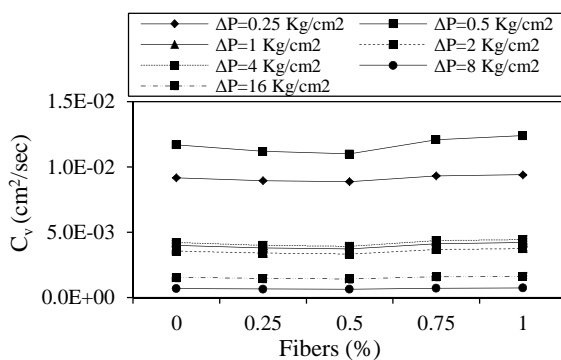
مغایرت نتیجه این تحقیق با نتایج حاصل از مطالعه فعلی را می‌توان به تفاوت مقادیر گازوئیل مورد استفاده نسبت داد. از سوی دیگر، در مقدار آلودگی ثابت با افزایش فشار سربار، ضریب تحکیم روند مشخصی را دنبال نکرده است؛ به طوری که در مقدار آلودگی ثابت، بیشترین مقدار ضریب تحکیم، به ترتیب در فشارهای سربار ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع رخ داده است. همچنین با افزایش میزان آلودگی در نمونه‌های خاک، نسبت تخلخل به علت کاهش درصد ذرات ریزدانه در ماتریس خاک کاهش یافته است. میزان کاهش، در محدوده ۱۷/۸۱-۵/۱۰ درصد محاسبه شده است. همچنین در مقدار آلودگی ثابت با افزایش فشار سربار از ۰/۲۵ به ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، نسبت تخلخل یک روند کاهشی داشته است. کاهش ضریب تحکیم را می‌توان به کاهش نسبت تخلخل نیز نسبت داد که موجب افزایش زمان موردنیاز برای تحکیم می‌شود. کاهش نسبت تخلخل با افزایش میزان آلودگی توسط کارکوش و جهاد ارائه شده است. میزان کاهش نسبت تخلخل در پژوهش مذکور، در محدوده ۵۲/۴۷-۵/۹۴ درصد به دست آمده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس (از طبقه CH)، پس از آلوده شدن با مقادیر مختلف نفت سفید (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی) بررسی شده‌اند [۱۳].

ضریب فشردگی حجمی و نفوذپذیری با افزایش درصد آلودگی افزایش یافته‌اند. میزان افزایش این

نامطلوب را از لحاظ ویژگی‌های تحکیم بر رفتار خاک دارد، معادل ۶ درصد تعیین شده است. در واقع، با مشاهده رفتار تحکیمی خاک رس آلوده می‌توان به تغییر رفتار خاک، پس از گذر از مقدار آلودگی ۶ درصد پی برد. بنابراین جهت بررسی تأثیر تسلیح خاک آلوده با الیاف پلی‌پروپیلن، نمونه‌های آلوده با اختلاط خاک و ۶ درصد گازوییل آماده شده و با توزیع تصادفی الیاف در مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی مسلح شده‌اند. نمونه‌های خاک آلوده مسلح شده، تحت آزمایش تحکیم قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی این نمونه‌ها نیز در ادامه ارائه شده است.

۳-۲-۱- بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار تحکیمی نمونه‌های آلوده مسلح شده با الیاف

پس از آماده‌سازی نمونه‌های آلوده مسلح شده، آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌ها، در محدوده فشارهای ۰/۲۵ تا ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع انجام شده و برای ترسیم منحنی تحکیم، از روش جذر زمان استفاده شده است. روند تغییرات مقادیر میانگین پارامترهای تحکیم در مقابل مقادیر مختلف الیاف، همچنین روند تغییرات این پارامترها برای نمونه‌های آلوده مسلح شده با مقادیر مختلف الیاف در فشارهای سربار مختلف، در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ ارائه شده است.



(ب)

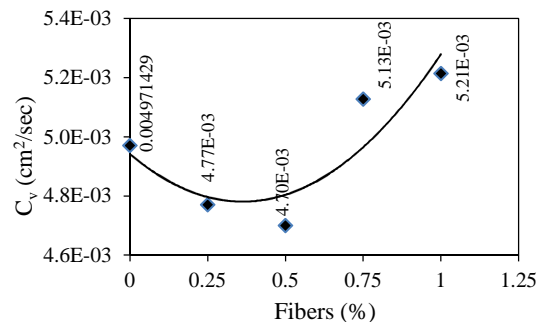
شاهد گزارش شده است. در پژوهش وی، اثر آلودگی روغن موتور بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس پیش‌تحکیم‌یافته (از طبقه CH) مورد ارزیابی قرار گرفته است [۳۱].

در مقدار آلودگی ثابت، بیشترین مقدار ضریب فشردگی حجمی و ضریب نفوذپذیری، در فشار سربار ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع به دست آمده و پس از آن با دنبال نمودن یک روند کاهشی تا فشار سربار ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، به کمترین مقدار خود رسیده‌اند.

با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای فوق، می‌توان دریافت که افزودن آلاینده، موجب افزایش ظاهری درجه اشباع و به تبع آن، افزایش ضریب نفوذپذیری می‌شود. پارامترهایی نظیر ضریب تحکیم و نسبت تخلخل، جزو خواص ذاتی نمونه بوده و رفتار آنها در قبال روش انجام آزمایش، تقریباً غیرقابل پیش‌بینی است. چه بسا اگر روش محاسباتی پارامترهای تحکیم از جذر زمان به لگاریتم زمان تغییر یابد، باز هم شاهد این تغییرات خواهیم بود.

۳-۲-۲- بررسی رفتار خاک آلوده مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن

با بررسی رفتار تحکیمی خاک آلوده در فشارهای سربار مختلف، درصدی از گازوییل که بیشترین تأثیر



(الف)

شکل ۱۴- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین ضریب تحکیم در مقابل درصد الیاف پلی‌پروپیلن و (ب) تغییرات ضریب تحکیم در

فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن

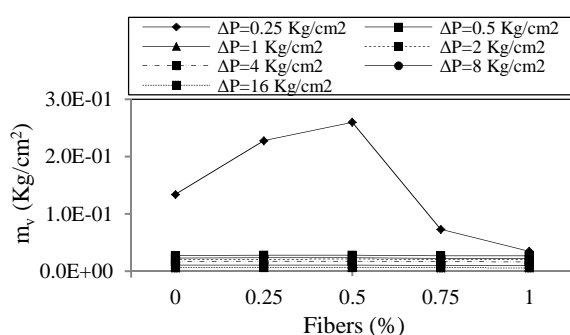
درصدهای مختلف الیاف، نشان می‌دهد که در نمونه‌های

تغییرات مقادیر میانگین ضریب تحکیم در مقابل

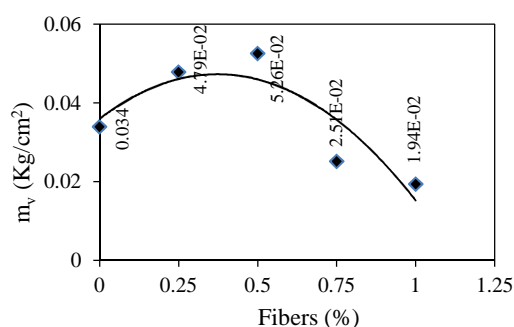
آلاینده بر رفتار خاک داشته و با دارا بودن ماهیت تراکم‌پذیر، نرخ نشست خاک رس و در نتیجه ضریب تحکیم را افزایش می‌دهند.

همچنین در مقدار الیاف مشخص، با افزایش فشار سربار، ضریب تحکیم روند مشخصی طی نموده است؛ به طوری که در یک مقدار مشخص الیاف برای مثال، ۰/۲۵ درصد وزنی الیاف، بیشترین مقدار ضریب تحکیم، به ترتیب، در فشارهای سربار ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رخ داده است.

آلوده مسلح شده با الیاف، با افزایش درصد الیاف به ۰/۵ درصد، ضریب تحکیم نسبت به مقدار آن در نمونه آلوده فاقد الیاف، روندی کاهشی داشته و پس از آن، با افزایش بیشتر الیاف به ۱ درصد، افزایش یافته است. ضریب تحکیم در مقدار پایین الیاف (تا ۰/۵ درصد)، تحت تأثیر ویژگی‌های خاک رس (میزان آلاینده موجود در آن و ترکیب کانی‌شناسی) و ماهیت ویسکوز خاک آلوده بوده است که منجر به کاهش سرعت تحکیم و در نتیجه، کاهش ضریب تحکیم می‌شود. در مقادیر بالاتر الیاف (بیش از ۰/۵ درصد)، الیاف نقش بیشتری نسبت به



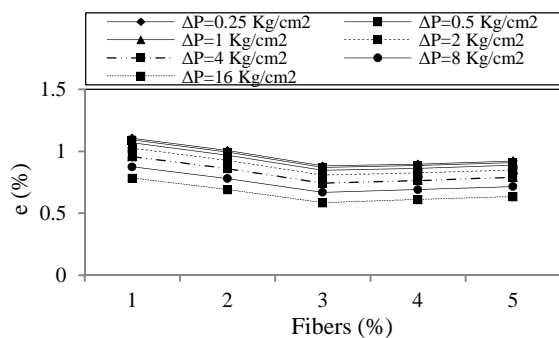
(ب)



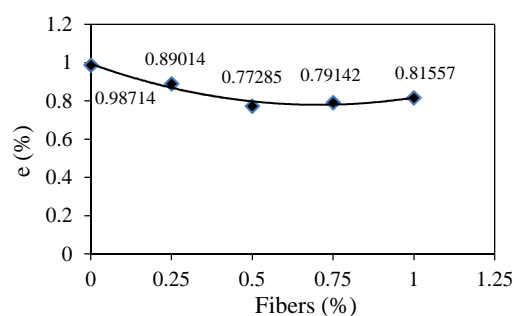
(ف)

شکل ۱۵- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین ضریب فشردگی حجمی در مقابل درصد الیاف پلی پروپیلن و (ب) تغییرات ضریب فشردگی

حجمی در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن



(ب)



(ف)

شکل ۱۶- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین نسبت تخلخل در مقابل درصد الیاف پلی پروپیلن و (ب) تغییرات نسبت تخلخل در

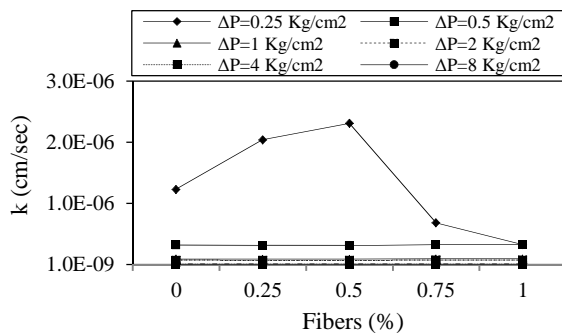
فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف الیاف پلی پروپیلن

نقش غالب آلاینده در مقادیر پایین الیاف در خاک آلوده مسلح شده، دلیل افزایش ضریب فشردگی حجمی در بخش قبل توضیح داده شد. کاهش ضریب فشردگی حجمی در مقادیر بالاتر الیاف (بیش از ۰/۵ درصد) را می‌توان به کاهش فضاهای خالی ناشی از قرار گرفتن

در رابطه با تغییرات مقادیر میانگین ضریب فشردگی حجمی در مقابل درصد الیاف، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش درصد الیاف به ۰/۵ درصد وزنی، ضریب فشردگی حجمی، نسبت به نمونه آلوده مسلح نشده، افزایش یافته و با افزایش الیاف به ۱ درصد، کاهش یافته است. با توجه به

الیاف، بیانگر آن است که با افزودن الیاف تا مقدار ۰/۵ درصد، نسبت تخلخل روندی نزولی داشته و با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد، این روند صعودی شده است، ولی مقادیر نسبت تخلخل با وجود افزایش نسبت به مقدار تخلخل در درصد الیاف معادل ۰/۵ درصد، کمتر از مقادیر تخلخل در نمونه‌های فاقد الیاف بوده‌اند.

همچنین، با بررسی تغییرات نسبت تخلخل در فشارهای سربار مختلف، چنین نتیجه می‌شود که در مقدار الیاف ثابت با افزایش فشار سربار از ۰/۲۵ به ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، نسبت تخلخل، یک روند کاهشی دنبال نموده است.

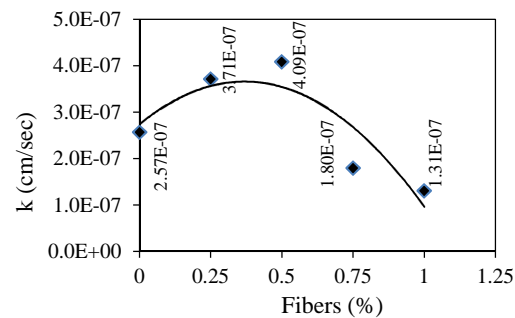


(ب)

الیاف در حفرات و فضاهای بین‌دانه‌ای موجود و شکل‌گیری یک ماتریس متراکم‌تر ناشی از حضور الیاف نسبت داد.

با بررسی تغییرات ضریب فشردگی حجمی در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف الیاف، می‌توان نتیجه گرفت که در مقدار الیاف ثابت، بیشترین مقدار ضریب فشردگی حجمی در فشار سربار ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع به‌دست آمده و پس از آن با طی یک روند کاهشی تا فشار سربار ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، به کمترین مقدار خود رسیده است.

مشاهده تغییرات نسبت تخلخل در مقادیر مختلف



(الف)

شکل ۱۷- روند (الف) تغییرات مقادیر میانگین ضریب نفوذپذیری در مقابل درصد الیاف پلی‌پروپیلن و (ب) تغییرات ضریب نفوذپذیری در فشارهای سربار مختلف به ازای مقادیر مختلف الیاف پلی‌پروپیلن

نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در خاک آلوده مسلح شده با الیاف، واکنش‌های فیزیکی-شیمیایی بین خاک، هیدروکربن و الیاف نیز می‌توانند موجب کاهش ضریب نفوذپذیری شوند [۱۶].

همچنین، در مقدار الیاف ثابت تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، در فشار سربار ۰/۲۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، ضریب نفوذپذیری افزایش یافته و پس از آن، با افزایش مقادیر الیاف تا ۱ درصد وزنی، کاهش یافته است. با افزایش فشار سربار تا ۱۶ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، این روند کاملاً معکوس شده است.

۴- نتیجه‌گیری کلی

نتایج کلی حاصل از این پژوهش به صورت زیر

تغییرات مقادیر میانگین ضریب نفوذپذیری در مقابل درصد الیاف، حاکی از آن است که با افزایش الیاف تا مقدار ۰/۵ درصد وزنی، ضریب نفوذپذیری در مقایسه با نمونه آلوده فاقد الیاف، افزایش یافته و پس از آن با افزایش بیشتر الیاف تا ۱ درصد وزنی، کاهش یافته است. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در مقدار پایین الیاف، تأثیر ویژگی‌های ذاتی خاک رس و ماهیت آلاینده غالب بوده و به دلایلی که در بخش ۳-۱-۲ ذکر شد، ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. در مقادیر بالاتر الیاف (بیش از ۰/۵ درصد)، با افزایش تعداد و مقدار الیاف مصرفی و قرارگیری الیاف در فضاهای خالی و حفرات موجود، همچنین قفل‌وبست بین ذرات خاک و الیاف، ساختار بسته و متراکم‌تری ایجاد می‌شود و ضریب

- است:
- و پس از آن، با افزایش بیشتر الیاف به ۱ درصد، روند تغییرات مذکور در هریک از پارامترها معکوس شده است.
- ۴- بیشترین میزان کاهش ضریب تحکیم (معادل ۱/۷ درصد) و بیشترین میزان افزایش ضریب نفوذپذیری (معادل ۲۳/۰۱ درصد)، مربوط به نمونه آلوده مسلح شده با ۰/۷۵ درصد وزنی الیاف بوده است.
- ۵- بیشترین میزان افزایش ضریب فشردگی حجمی (معادل ۲۴/۳ درصد)، در نمونه آلوده مسلح شده با یک درصد الیاف رخ داده است.
- ۶- بیشترین میزان کاهش نسبت تخلخل (معادل ۲۰/۵ درصد)، مربوط به نمونه آلوده مسلح شده با ۰/۲۵ درصد الیاف بوده است.
- ۱- آلوده شدن خاک با گازوییل، موجب کاهش حدود آتربرگ، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه شده است.
- ۲- وجود آلودگی در خاک و افزایش مقدار آن در خاک، کاهش ضریب تحکیم، کاهش نسبت تخلخل، افزایش ضریب فشردگی حجمی و افزایش ضریب نفوذپذیری را به دنبال داشته است.
- ۳- در نمونه‌های آلوده مسلح شده با الیاف، با افزایش مقدار الیاف به ۰/۵ درصد، کاهش ضریب تحکیم، افزایش ضریب فشردگی حجمی، کاهش نسبت تخلخل و افزایش ضریب نفوذپذیری، نسبت به مقدار آن در نمونه آلوده فاقد الیاف مشاهده شده

References

- [1] Golestanifar H. Methods for cleaning soils contaminated with petroleum compounds, *Scientific Journal of Oil & Gas Exploration and Production*. 2019; 168: 89-94. [In Persian]
- [2] Asadi Alasvand P, Heidari A. Impact of Waste Materials Resulting from the Refining of Crude Oil on Some Soil Physico-Chemical Properties. *Water and Soil*. 2016; 30(3): 867-879. doi: 10.22067/jsw.v30i3.40716 [In Persian]
- [3] Sabour MR, Ghadrddan M, Ahmadi MK. The Study of Uncertainty in the Effect of Oil Contamination on Geotechnical Behavior of Sandy Soil beneath Oil Storage Tanks. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2018 Feb 20; 49(4): 813-820. doi: 10.22060/ceej.2016.854 [In Persian]
- [4] Mohammadi SD, Moharamzade Saraye K. Investigation of engineering geological behavior of surface oil hydrocarbons contaminated soils in tabriz oil refinery area. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*. 2014 Aug 23; 7(1 & 2): 41-56. [In Persian]
- [5] Mohammadi SD, Moharamzade Saraye Kh. The study of workability of lime on improvement of oil materials contaminated soils around the Tabriz oil refinery. *Modares Civil Engineering journal*. 2015 Sep 10; 15(5): 223-34. [In Persian]
- [6] Otunyo AW, Anele O. Effect of waste engine oil contamination on geotechnical properties of clay soil. *European International Journal of Science and Technology*. 2015; 4(8): 28-37.
- [7] Chaudhary A, Singh A. Study of Behavioural Change in the Soil Contaminated with Petrol. *Civil & Environmental Engineering*. 2016; 6(2): 1-3.
- [8] Karkush MO, Kareem ZA. Investigation of the impacts of fuel oil on the geotechnical properties of cohesive soil. *Engineering Journal*. 2017 Jul 31; 21(4): 127-37. doi: 10.4186/ej.2017.21.4.127
- [9] Yu C, Liao R, Zhu C, Cai X, Ma J. Test on the stabilization of oil-contaminated Wenzhou clay by cement. *Advances in Civil Engineering*. 2018 Jan 1; 2018. doi: 10.1155/2018/9675479
- [10] Jedari C, Farahani M. Permeability and compression characteristics of clay contaminated with kerosene and gasoil. *Mapta Journal of Architecture, Urbanism and Civil Engineering (MJAUCE)*. 2018 Dec 20; 1(3): 1-10.
- [11] Roshanghiyas SM, Bagheri PM. Effect of crude oil contamination on the geotechnical properties of kaolinite clay soil in the road. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 2019; 5(2): 101-112. doi: 10.22075/jtie.2019.17368.1371 [In Persian]
- [12] Zahermand S, Vafaeian M, Baziyar MH. Analysis of the physical and chemical properties of soil contaminated with oil (petroleum) hydrocarbons. *Earth sciences research journal*. 2020 Jun; 24(2): 163-8. doi: 10.15446/esrj.v24n2.76217

- [13] Karkush MO, Jihad AG. Studying the geotechnical properties of clayey soil contaminated by kerosene. *Key engineering materials*. 2020 Sep 7; 857: 383-393. doi: **10.4028/www.scientific.net/KEM.857.383**
- [14] Karthigeyan S, Ramachandran A. Physical and engineering properties of oil contaminated clay soil. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2020; 9(5): 766-763.
- [15] Ahmad S, Al-Amoudi OS, Mustafa YM, Maslehuddin M, Al-Malack MH. Stabilization and solidification of oil-contaminated sandy soil using portland cement and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020 Aug 1; 32(8): 04020220. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003169
- [16] Bojnourdi S, Narani SS, Abbaspour M, Ebadi T, Hosseini SM. Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures. *Engineering geology*. 2020 Dec 20; 279: 105886. doi: **10.1016/j.enggeo.2020.105886**
- [17] 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 and Geotechnical Engineering*. 2021 Jun 1; 13(3): 653-670. doi: **10.1016/j.jrmge.2020.11.011**
- [18] Ahmadi M, Ebadi T, Maknoon R. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures. *Engineering geology*. 2021 Mar 20; 283: 106021. doi: **10.1016/j.enggeo.2021.106021**
- [19] Shahidi M, Asemi F, Farrokhi F. Influence of Gas Oil Contamination on Geotechnical Properties of Clayey Sand. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2022 May 22; 52(106): 217-226. doi: **10.22034/jcee.2020.11226**
- [20] Nokande S, Khodabandeh MA, Besharatinezhad A, Nagy G, Török Á. Effect of oil contamination on the behavior of collapsible soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2022 Jun 30; 66(3): 775-784. doi: **10.3311/PPci.19636**
- [21] Ansar Shourijeh A, Raesi Estabragh A, Amini M. Effect of Magnesium Oxide and Lime on the Improvement a Clay Soil Contaminated with MTBE. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Aug 23; 9(1): 29-45. doi: **10.22091/cer.2022.8328.1409** [In Persian]
- [22] Falamaki A, Zahmatkesh S, Mehravaran M, Ghodrat H. Improvement of petroleum contaminated clayey soil by carbon fiber polymeric composite and diatomic soil. *Journal of Advanced Environmental Research and Technology*. 2023 Mar 10; 1(1): 3-16.
- [23] Oil and Petrochemical Products [Internet]. OPAP. [cited 2023 Apr 22]. Available from: <http://www.opap.ir>
- [24] Main Page [Internet]. Beton Azma Engineering Group. [cited 2023 Apr 22]. Available from: <http://www.aebeton.com>
- [25] ASTM-D422. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2007.
- [26] ASTM-D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2010.
- [27] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM, 2005.
- [28] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM international; 2006.
- [29] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³)) 1. ASTM international; 2007.
- [30] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM International; 2004.
- [31] Nazir AK. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alexandria Engineering Journal*. 2011 Dec 1; 50(4):331-5.