Sharif Civil Engineering Journal (2025), **41**(3), 117-127

Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

Investigating the Effect of Diesel Pollution on Marl Parameters-A Case Study in Qom City

Morteza Namati, Majid Yazdandoust* and Mahdi Khodaparast

Faculty of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
* corresponding author:(M.yazdandoust@qom.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 18 August 2024

Revised: 19 January 2025

Accepted: 16 February 2025

Keywords:

Marl soil,
gas oil contamination,
shear strength,
consolidation,
electron microscopy.

Abstract

Considering population growth, industrialization, and pollutant sources, soil contamination by hydrocarbons is one of the most significant risks to humans. Besides its adverse environmental effects, soil pollution also alters the geotechnical properties of soils. Soils around refineries, fuel stations, and oil and gas pipelines, especially in oil-rich countries like Iran, are constantly exposed to contamination due to the extensive transportation of hydrocarbons. Given the prevalence of marl soil in Iran, particularly in Qom city, studying the properties of contaminated soil is crucial for various engineering purposes. Despite various methods for bioremediation of contaminated soil, these methods have limitations. Therefore, a detailed study of the geotechnical behavior of hydrocarbon-contaminated soil and its potential use for civil and economic projects is essential. In this study, we investigated the impact of diesel pollution on the strength and consolidation parameters of Qom's marl soil using uniaxial and consolidation tests, along with electron microscope images. For this purpose, marl soil samples were prepared with 0%, 3%, 6%, and 9% diesel contamination by weight and tested at different time intervals (0, 7, 14, and 28 days). The results of the uniaxial compressive strength test indicate that the marl sample increases by approximately 68% with 3% pollutant content, but with further pollutant increase, the compressive strength decreases. The effect of time also manifests as a reduction in strength for contaminated samples. On the other hand, consolidation test results show that pollution leads to an increase in the compression index and swelling in marl soil. The coefficient of consolidation also follows a decreasing trend with increasing pollutant content. Additionally, electron microscope images reveal reduced porosity and increased cohesion in the contaminated sample compared to the 7-day diesel-polluted sample. Moreover, a linear relationship with a correlation coefficient of 0.73 was obtained between the compressive strength and the secant modules.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Namati, M., Yazdandoust, M. and Khodaparast, M. 2025. Investigating the effect of diesel pollution on marl parameters-a case study in Qom city, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(3), 117-127.
https://doi.org/10.24200/j30.2025.65025.3361

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

بررسی تأثیر آلودگی ناشی از گازوئیل در رفتار خاک مارن (مطالعه‌ی موردی شهر قم)

مرتضی نعمتی، مجید یزدان‌دوست * و مهدی خداپرست

گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول (M.yazdandoust@qom.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

واژگان کلیدی:

خاک مارن،

آلودگی گازوئیل،

مقاومت برشی،

رفتار تحکیمی،

میکروسکوپ الکترونیکی.

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر میزان و مدت آلودگی ناشی از گازوئیل در پارامترهای مقاومتی و تحکیمی خاک مارن قم با استفاده از آزمایش‌های تک‌محوری و تحکیم و همچنین با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی بررسی شده است. نتایج نشان داده که مقاومت فشاری محصورنشده‌ی نمونه‌ی مارن با افزایش آلودگی تا ۳٪ وزنی، حدود ۶۸٪ افزایش و سپس کاهش می یابد. این در حالی است که افزایش زمان آلودگی همواره موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های آلوده می‌شود. از سوی دیگر، مشخص شده که آلودگی منجر به افزایش شاخص فشردگی و تورم در خاک مارن می‌شود و ضریب تحکیم نیز از یک روند کاهشی ضمن افزایش میزان آلاینده تبعیت می‌کند. همچنین، نتایج تصاویر میکروسکوپ الکترونی حاکی از کاهش حفره‌ها و افزایش پیوستگی نمونه‌ی آنی نسبت به نمونه‌ی ۷ روزه‌ی آلوده به گازوئیل است.

۱. مقدمه

همواره به کاربردهای گوناگون مواد آلاینده، از جمله: نفت خام، گازوئیل، و ..... در صنعت مورد توجه بوده است؛ این امر سبب شده است که خسارت‌های ناشی از انتشار آلودگی از تولید تا بهره‌برداری، یکی از مشکلات اصلی مطرح و در راستای حل آن زمینه‌های پژوهشی فراوانی مطرح گردد.[۱] انتشار آلودگی با مواد آلاینده ممکن است منجر به نفوذ به اعماق مختلف خاک شود و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک را تحت تأثیر قرار دهد.[۲] اثر نیروی ثقل نیز می‌تواند باعث افزایش آلودگی آب و خاک شود؛ چه بسا که رسیدن آن به سطح آب زیرزمینی، تأثیر مضاعفی در تشدید آلودگی‌های اخیر داشته باشد.[۳] مقاومت برشی، چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، و تحکیم از جمله پارامترهایی هستند که ممکن است پس از آلودگی تغییرکنند.[۴] لذا ضروریست که خواص ژئوتکنیکی خاک آلوده با توجه به شرایط محیطی، نوع خاک، و نوع ماده‌ی آلاینده دقیقاً برآورد شود.[۳] در این راستا، مطالعات وسیعی بر روی تأثیر آلودگی انواع خاک به مشتق‌های نفتی صورت گرفته است، که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می شود.

مصطفی و همکاران (۲۰۱۸)، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر روی خاک مارن آغشته به گازوئیل نشان دادند که حد روانی با افزایش آلودگی تا ۹٪ به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، در حالیکه برای درصدهای بالاتر سیر نزولی تجربه می‌کند. از سوی دیگر بیشینه‌ی چگالی خشک با افزایش سطح آلودگی روند کاهشی نشان می‌دهد، ولی رطوبت بهینه و مقاومت فشاری محدودنشده افزایش می‌یابد. همچنین چسبندگی خاک تا سطح آلودگی ۳٪ به میزان ۲۵٪ افزایش یافته و سپس تا آلودگی ۱۲٪، روند کاهشی را دنبال می‌کند و پس از آن دوباره افزایش می‌یابد.[۵] کررات[1] (۲۰۱۹)، تأثیر آلاینده‌ی بنزین و اشباع آب را در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک (SM) بررسی نموده و دریافتند که ظرفیت باربری نهایی، برای هر دو مورد کاهش می‌یابد، که البته مقدار آن برای نمونه‌ی اشباع‌شده با آب قابل‌توجه است. همچنین نشان دادند که زاویه‌ی اصطکاک داخلی برای هر دو مورد به‌صورت خطی کاهش و چسبندگی نمونه‌ی آلوده به بنزین، با افزایش محتوای آلاینده افزایش می‌یابد.[۶] مندوزا و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی ماندگاری گازوئیل و تأثیر آن بر خواص ژئوتکنیکی خاک رس غیراشباع پرداختند و دریافتند که خاک فقط می‌تواند ۱۲/۶٪ از آلاینده‌ی اضافه‌شده را حفظ کند؛ به بیان دیگر، خاک فقط میزان لازم برای برآورد نیازهای هیدراتاسیون خود را تأمین می‌کند. آنها نشان دادند که چسبندگی خاک آلوده به میزان ۲۰٪ کاهش می‌یابد؛ در حالی که زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن، ۳۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که مکش اسمزی ایجادشده، به افزایش مقاومت برشی خاک آلوده در مقایسه با خاک طبیعی کمک

[1] Kererat

استناد به این مقاله:

نعمتی، مرتضی، یزدان‌دوست، مجید و خداپرست، مهدی، ۱۴۰۴. بررسی تأثیر آلودگی ناشی از گازوئیل در رفتار خاک مارن(مطالعه‌ی موردی شهر قم). مهندسی عمران شریف، ۴۱(۳)، صص.۱۱۷-۱۲۷. https://doi.org/10.24200/j30.2025.65025.3361

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

می کند.[۷] السایی و همکاران (۲۰۲۲)، به مروری بر نتایج حاصل از پژوهش-های مختلف در زمینه‌ی آلودگی نفتی خاک پرداخته و دریافتند که به‌طورکلی نفت خام، باعث کاهش خواص فیزیکی- شیمیایی، به ویژه G_s و CEC [1] خاک می‌شود؛ فرآورده‌های نفتی، آثار متفاوتی در حدود اتربرگ و تراکم خاک دارند. همچنین آنها نتیجه‌گیری نمودند که نفت خام تأثیر منفی در مقاومت برشی خاک آلوده دارد و چسبندگی و اصطکاک خاک دست‌نخورده قبل از آلودگی می‌توانند به‌طور مثبت یا منفی در خواص مقاومت برشی خاک آلوده تأثیرگذار باشد.[۸] آل- اقبری[2] و همکاران (۲۰۱۱)، ضمن بررسی تأثیر آلاینده-های گازوئیل و بنزین بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی دو نوع خاک (SP) و (SC-SP)، نشان دادند که حد مایع و خمیری و همچنین بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک با افزایش درصد آلاینده، در هر دو نوع خاک مذکور افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که نفوذپذیری، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک با افزایش آلاینده در هر دو نمونه، روند کاهشی را تجربه می کنند. ولی میزان آن برای چسبندگی در خاک آلوده به گازوئیل، بیشتر از آلاینده‌ی بنزین می باشد.[۹] شهیدی و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی اثر آلاینده‌ی گازوئیل بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ی رس‌دار پرداخته و نشان دادند نمونه‌هایی با آلودگی ۶٪ و بیشتر، رفتاری متفاوت نسبت به سایر نمونه‌ها از خود بروز می دهند همچنین نشان داند که افزایش میزان آلودگی، اندازه‌ی ذرات خاک را افزایش داده و مجر به کاهش حد روانی و خمیری خاک و همچنین کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش گسیختگی می‌شود.[۱۰] ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)، با بررسی تاثیر آلودگی نفت گاز بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی برخی از نمونه‌های خاک رسی و سیلتی دریافته‌اند که برخلاف خاک رسی، مقاومت فشاری خاک سیلتی با افزایش درصد نفت گاز کاهش یافته و افزایش آلاینده موجب افزایش چسبندگی، کاهش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، و بیشینه‌ی چگالی خشک، و همچنین رطوبت بهینه‌ی خاک می‌شود.[۱۱] در یک پژوهش مشابه، یزدی و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر گازوئیل را بر برخی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک سیلتی از دشت مشهد بررسی نموده و دریافتند که کاهش زاویه‌ی اصطکاک و افزایش چسبندگی خـاک با افزایش درصد آلاینده همراه می‌باشد. مشخص شد که افزایش گازوئیل تا ۶٪، اثر مستقیمی در افزایش حد روانی و خمیری خاک سیلتی دارد؛ اما در درصدهای بالاتر، این تاثیر کمرنگ می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش زمان عمل‌آوری منجر به کاهش شدید خصوصیات ژئوتکنیکی مانند: چگالی خشک، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، مدول کشسانی، و پارامترهای مقاومت برشی می‌شود.[۱۲] حمیدی و جداری (۲۰۱۳)، با انتخاب نفت گاز و نفت سفید، تأثیر آلودگی خاک رس کائولینیت و بنتونیت به دو مشتق نفتی مذکور را بررسی و دریافتند که آلودگی خاک رس، موجب افزایش تراکم‌پذیری آن و سبب رسیدن خاک با درصد رطوبت کمتری به وزن مخصوص خشک بیشینه می‌شود.آنها نشان دادند که آلاینده باعث افزایش تورم اولیه‌ی خاک بعد از اشباع با آب می‌شود و همچنین ضریب فشردگی خاک با ازدیاد درصد آلاینده افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش-ها نشان داد که نوع آلاینده، تأثیر چندانی در ویژگی‌های تراکم‌پذیری خاک ندارند.[۱۳] قاسم‌زاده و همکاران (۲۰۱۷)، با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، شامل مقاومت فشاری محدودنشده و برش مستقیم نتیجه گرفتند که افزودن خاکستر پوسته‌ی برنج، آهک و سیمان، استحکام نمونه‌های تمیز و آلوده را افزایش می‌دهد. همچنین مشخص شد که مقاومت فشاری محدودنشده، چسبندگی و مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت‌شده با خاکستر پوسته‌ی برنج و آهک ضمن افزایش محتوای گازوئیل‌کاهش می‌یابند.[۱۴] در پژوهشی دیگر، احمدی و همکاران (۲۰۲۱)، آثار ساختاری نفت خام در مخلوط‌های ماسه و کائولینیت را بررسی و دریافتند که افزایش نفت خام به‌طورکلی، چگالی خشک بیشینه، محتوای بهینه‌ی آب و نفوذپذیری را کاهش می‌دهد و کاهش مقدار رس در نمونه‌ی آلوده، منجر به افزایش چسبندگی خاک می‌شود. همچنین آلودگی مذکور باعث کاهش PH در خاک‌های کائولینیتی شده و نسبت خاک رس به ماسه، تأثیر واضحی در روند اخیر نشان نمی‌دهد.[۱۵] آقاجانی (۲۰۱۶)، با انجام آزمایش‌های مختلف، به بررسی تأثیر نشت نفت خام در خاک ماسه‌ای پالایشگاه تبریز پرداختند و دریافتند که در حالت کلی، با گذر زمان، نفوذپذیری خاک کاهش و براساس نتایج آزمایش برش مستقیم، با افزایش حفره‌ها در خاک، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نیز کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که هر چه نمونه‌هایی با حفره‌های یکسان، زمان بیشتری تحت تأثیر آلاینده قرار گرفته‌اند، پارامترهای مقاومت برشی آن‌ها بیشتر کاهش می یابد.[۱۶] صدقیانی و همکاران (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌های سه‌محوری، تحکیم و تراکم نتیجه گرفته‌اند که با افزایش نفت خام در خاک ماسه‌ای، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد و افزایش نشانه‌ی فشردگی (Cc)، به نحوی می‌باشد که در ۸٪ آلاینده، Cc به دو برابر افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تراکم‌پذیری در اثر آلـوده‌شدن به نفت خـام تا میزان ۴٪ افـزایش و برای درصد آلاینده‌ی بالاتر، کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش میزان آلودگی به نفت خام به بیشتر از ۸٪، باعث می‌شود تا ماسه به‌صورت لجن درآید و پایداری و تراکم‌پذیری آن بسیار ناچیز شود.[۱۷] خداپرست و همکاران (۲۰۱۷)، نیز با انجام یک سری آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس به بررسی تأثیر نفت گاز در خاک شن رس‌دار (GW-GC) پرداخته و نشان داده‌اند که در تراکم کم، با افزایش آلودگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی ابتدا کاهش و سپس در حد معینی ثابت می‌ماند؛ در حالی که در خاک با تراکم بالا، با افزایش آلودگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی ثابت و سپس به مقدار معینی کاهش و نهایتاً ثابت می‌شود. درخصوص چسبندگی نیز در دو حالت تراکمی مختلف، با افزایش آلودگی تا ۹٪، چسبندگی تا حد معینی افزایش یافته و بعد از آن ثابت می‌ماند.[۱۸]

احتمال آلودگی خاک به مشتق‌های نفتی از یک سو و وابستگی تبعات ناشی از آلودگی به نوع خاک و نوع آلاینده از سوی دیگر، لزوم گسترش شناخت پیرامون این موضوع را مسجل می‌سازد. لذا، در پژوهش حاضر، با انتخاب خاک مارن قم به‌عنوان خاکی با گستردگی قابل‌توجه در شهر قم، به بررسی تأثیر آلودگی خاک مذکور با گازوئیل پرداخته شده است. برای این منظور، در پژوهش حاضر، پس از آلوده‌ساختن نمونه‌های خاک مارن قم با ۳ نسبت وزنی مختلف از گازوئیل، مقاومت فشاری تک‌محوری، و پارامترهای تحکیمی نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف تعیین و ارزیابی شده است. همچنین از نتایج عکسبرداری الکترونیکی نیز جهت ارزیابی رفتار میکروسکوپی خاک‌های آلوده استفاده شده است.

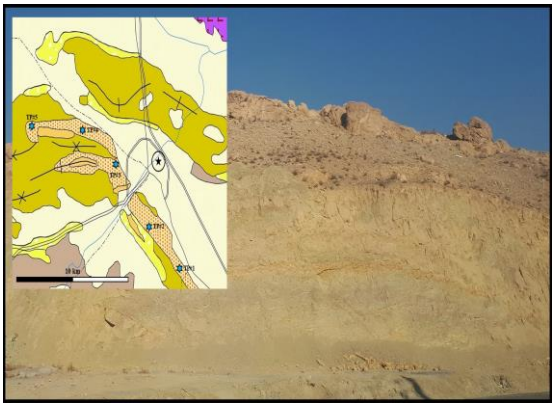
۲. مطالعات آزمایشگاهی

۱.۲. خاک استفاده‌شده

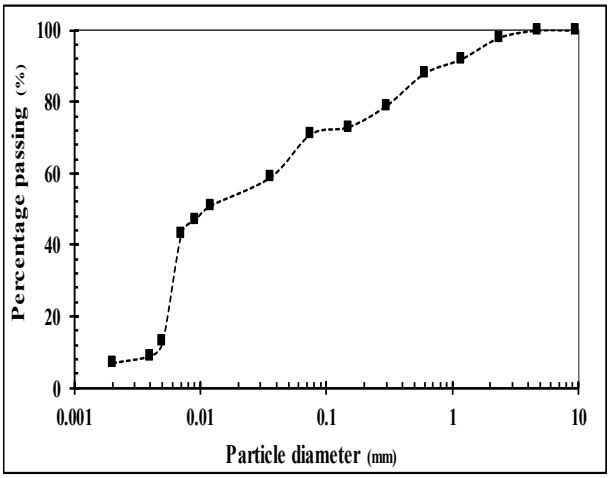
در مطالعه‌ی حاضر از خاک مارن قم به عنوان خاک مرجع استفاده شده است؛ که مطابق شکل ۱، زردرنگ و لایه‌های سطحی آن شامل خاک دستی و هوازده بوده است. لذا نمونه‌های موردنیاز از عمق ۱/۵ متری به‌صورت دستی برداشت

[1] Cations Exchange Capacity

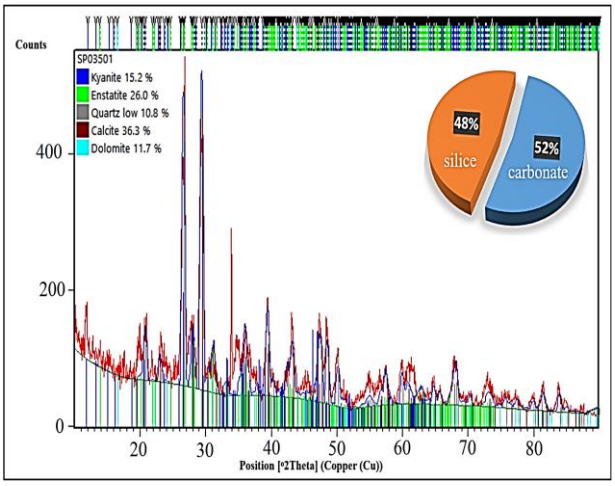
[2] Al-Aghbari



شکل ۱. نمایی از توده‌ی خاک مارن مصرفی در پژوهش حاضر.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک استفاده‌شده در پژوهش حاضر.



شکل ۳. نتایج XRD نمونه‌ی مارن مطالعه‌شده.

شده و سپس بر روی آن‌ها، آزمایش‌های شناسایی، شامل: تعیین درصد رطوبت، حدود اتربرگ، چگالی در محل، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، تراکم اصلاح‌شده، و XRD انجام شده است. نتایج آزمایش دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM-D۴۲۲ (شکل ۲) نشان می‌دهد که بیش از ۵۰٪ ذرات خاک (۷۱٪) از الک ۲۰۰ عبور کرده‌اند.[۱۹] همچنین با توجه به متوسط شاخص خمیری و حد روانی خاک مذکور، که به ترتیب برابر ۱۹/۱۷ و ۴۰/۱۳ درصد است، خاک موردمطالعه براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در رده‌ی CL قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های شناسایی و همچنین آنالیز XRD (شکل ۳) به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مواد تشکیل‌دهنده‌ی خاک مارن.

Ingredient		Content (%)
Calcite	$Ca_{5.62}Mg_{0.38}(CO_3)_6$	36.3
Enstatite	$MgSiO_3$	26
Kyanite	Al_2SiO_5	15.2
Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$	11.7
Quartz	SiO_2	10.8

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مارن.

Properties	Standard	Value	Ref.
Moisture content (%)	ASTM-D2216	5	20
Liquid limit (%)	ASTM- D4318	40.13	21
Plastic limit (%)		20.95	
Plastic Index (%)		19.17	
In situ dry density (gr/cm^3)	ASTM- D1556	1.6	22
Maximum dry density (gr/cm^3)	ASTM- D1557	1.79	23
Optimum moisture content (%)		14.6	
Specific density	ASTM- D854	2.58	24
Soil classification	USCS[۱]	CL	---

۲.۲. آلاینده‌ی نفتی

ماده‌ی آلاینده در مطالعه‌ی حاضر، گازوئیل بوده است، که از جایگاه ارائه‌ی سوخت مصرفی برای موتورهای دیزل تهیه و ویژگی‌های آن در جدول ۳ ارائه شده است. دلیل انتخاب آلاینده‌ی نفتی گازوئیل، فراوانی آن، مطالعات محدود، و وجود گزارش‌های فراوان درخصوص آلودگی خاک با آن بوده است.

۲.۳.آماده سازی نمونه‌ها جهت آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

دستگاه استفاده‌شده برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده در پژوهش حاضر، یک دستگاه تک‌محوری با ظرفیت ۵ کیلونیوتن بوده است، که با استفاده از یک موتور گیربکس الکترونیکی، قابلیت اعمال بار به‌صورت جابجایی-کنترل با نرخ‌های مختلف (۰/۱ تا ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه) را داشته است. دستگاه مذکور مجهز به یک نیروسنج و یک جابجایی‌سنج با دقت ۰/۱٪ جهت ثبت نیرو- تغییرشکل بوده است. آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصورنشده در پژوهش حاضر مطابق با استاندارد ASTM-D۲۱۶۶ انجام شده است.[۲۵] برای این منظور، نمونه‌ها براساس وزن مخصوص خشک ۱/۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب و رطوبت ۵٪، که از آزمایش‌های شناسایی بر روی ۵ نقطه‌ی شهر قم به‌دست آمده بود، بازسازی شده‌اند. موقعیت جغرافیایی نقاط

جدول ۳. مشخصات آلاینده‌ی استفاده‌شده.

Properties	Value
Density at 15°C (kg/m^3)	840
Distillation temperature (C°)	250
Cetane index[1]	50
Kinematic viscosity (c.St)[1] at 37.8°	4
Mass of carbon, sulfur, ash (mass percent)	1
Water and sediments (volume percentage)	5

جدول ۴. نام‌گذاری نمونه‌ها.

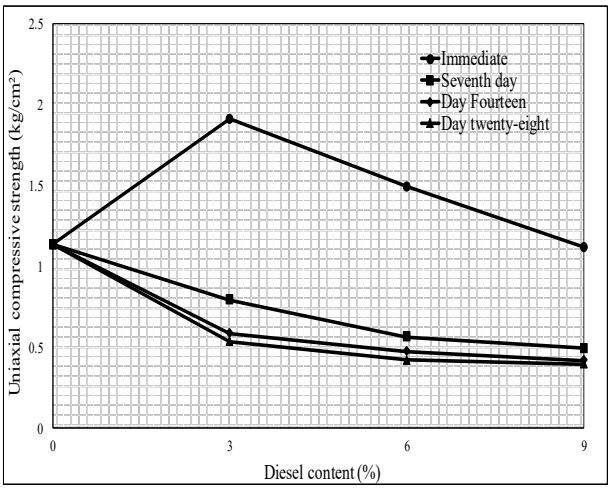
Time (day)	Pollutant content (%)			
	0%	3%	6%	9%
0	G_0-C_0	G_3-C_0	G_6-C_0	G_9-C_0
7	-	G_3-C_7	G_6-C_7	G_9-C_7
14	-	G_3-C_{14}	G_6-C_{14}	G_9-C_{14}
28	-	G_3-C_{28}	G_6-C_{28}	G_9-C_{28}

شناسایی‌شده در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. جهت ساخت نمونه‌ها، ابتدا به خاک خشک عبوری از الک ۲۰۰، که درون یک کیسه‌ی نایلونی قرار داده شده بود، به میزان ۵٪ وزنی رطوبت اسپری و اقدام به وَرزدادن خاک از روی کیسه‌ی دربسته شده است. پس از اختلاط خاک و نگهداری آن به مدت ۲۴ ساعت درون کیسه‌ی دربسته، جهت اطمینان از توزیع یکنواخت رطوبت، اضافه‌کردن گازوئیل با نسبت وزنی مدنظر به خاک مرطوب طبق فرایند اخیر انجام شده است. پس از طی مراحل ذکرشده، مخلوط خاک و آلاینده در ۵ لایه‌ی مساوی، داخل قالب‌های استوانه‌ای تا رسیدن به وزن مخصوص موردنظر کوبیده شدند.

طبق نام‌گذاری انجام‌شده (جدول ۴) برای هر نمونه، اندیس بعد از حرف G[3] بیانگر درصد گازوئیل و اندیس بعد از حرف C[4] بیانگر زمان نگهداری نمونه است. به‌عنوان مثال، $C_{۲۸}$-$G_۳$ بیانگر خاک با ۳٪ آلاینده‌ی گازوئیل و زمان نگهداری ۲۸ روزه است. نمونه‌ها پس از آماده سازی، تحت بار قائم با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه به‌صورت جابجایی کنترل، تا رسیدن به کرنش ۱۵٪ قرار گرفت و براساس تنش و کرنش‌های قرائت‌شده، منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به هر نمونه ترسیم شده است. این آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی گازوئیل،[۱۱-۱۴] در زمان‌های آنی، ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه انجام شده است.

۴.۲. آماده سازی نمونه‌ها جهت آزمایش تحکیم

دستگاه استفاده‌شده جهت انجام آزمایش‌های تحکیم در پژوهش حاضر، یک دستگاه تحکیم تمام اتوماتیک با قابلیت برنامه‌ریزی جهت اعمال پله‌های بارگذاری- باربرداری و ثبت خودکار نتایج بوده است، که قابلیت انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی با قطر ۲ اینچ را داشته است. در پژوهش حاضر، مطابق با



شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب تغییرات زمان و درصد آلاینده.

استاندارد ASTM D۲۴۳۵، تعدادی آزمایش تحکیم نیز جهت تعیین پارامترهای تحکیمی خاک آلوده انجام شده است.[۲۶] در این خصوص، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها مشابه آنچه در آزمایش تک‌محوری تشریح شده است، آزمایش تحکیم بر روی سه نمونه با ۳، ۶، و ۹ درصد وزنی آلاینده‌ی گازوئیل، به همراه یک نمونه‌ی بدون آلاینده به‌عنوان نمونه‌ی شاهد برای مقایسه‌ی بهتر انجام شده است. برای این منظور، پس از درنظرگرفتن ۲۴ ساعت زمان برای اشباع نمونه‌ها، نمونه‌ها با گام‌های ۲ برابر تا فشار ۱۶ (kg/cm^2)، بارگذاری و سپس تا فشار ۱ (kg/cm^2) باربرداری و درنهایت، نتایج در قالب نمودارهای نیمه‌لگاریتمی حفره‌ها بر حسب لگاریتم تنش برای هر نمونه ترسیم شده است.

۵.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آنالیز SEM

عکس‌برداری نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در پژوهش حاضر توسط دستگاه مستقر در دانشگاه الزهرا انجام شده است. به‌منظور انجام آنالیز SEM، ابتدا نمونه‌های آماده‌شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، تحت بارگذاری قرار گرفته و توسط قالبی با ابعاد ۱×۱×۱ سانتی‌متر نمونه‌برداری شده‌اند. عکس‌برداری SEM مطابق تحلیل نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه با ۳٪ آلاینده‌ی آنی و ۷ روزه انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

در بخش حاضر، نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، شامل: مقاومت فشاری تک‌محوری، تحکیم، و عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی به تفکیک بررسی و تحلیل شده‌اند.

۱.۳. مقاومت فشاری و مدول سکانتی

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تک‌محوری در دو قالب مقادیر مقاومت فشاری و مدول سکانتی بررسی شده است. در شکل ۴، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب تغییرات زمان و درصد آلاینده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آنی تا ۳٪ آلاینده، روندی افزایشی داشته و پس از آن روندی کاهشی را دنبال کرده است.

این موضوع را می‌توان به ایجاد ساختار منعقد در درصد آلاینده‌ی پایین مرتبط دانست؛ به این صورت که گازوئیل با ثابت دی‌الکتریک کم، سطح ذرات را

[3] Gas Oil

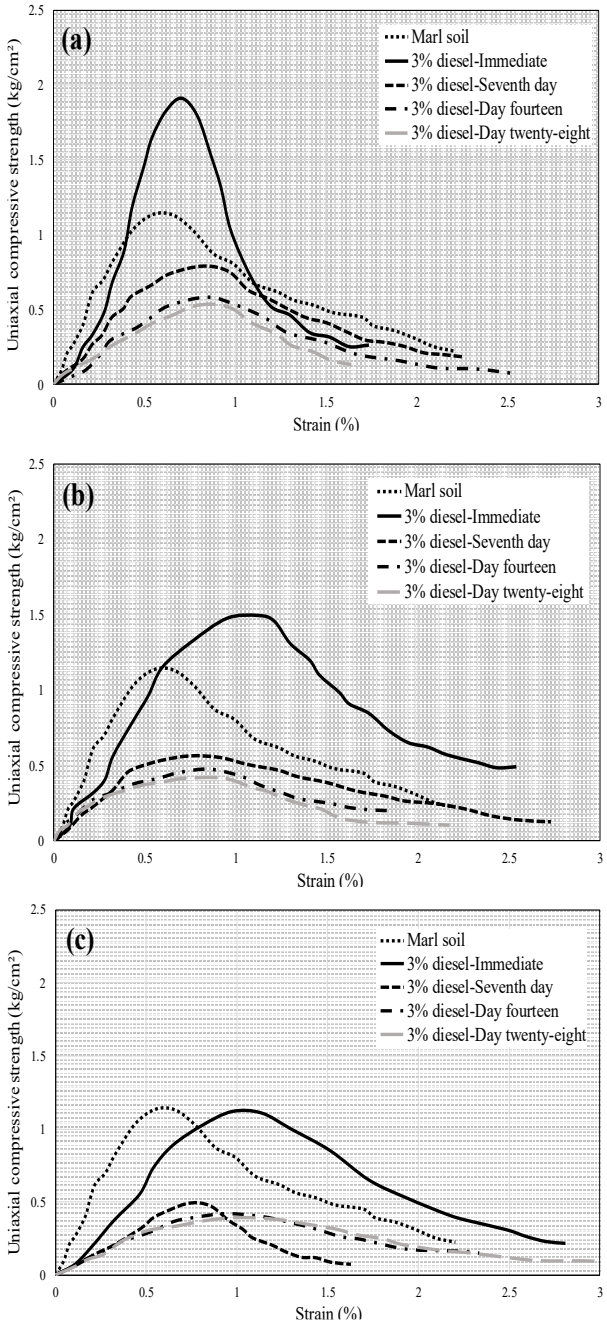
[4] Curing Time

می‌پوشاند و با جهت‌گیری جدید در ساختار تبادلی خاک منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه می‌شود. این روند در مطالعه‌ی ناصحی و همکاران (۲۰۱۶) نیز مشاهده شده است.[۱۱] در مطالعاتی مشابه، یزدی و همکاران (۲۰۲۱)، ابراز داشته‌اند که درصد پایین آلاینده، افزایش مقاومت فشاری خاک سیلتی را در پی دارد؛ اما برای بیش از ۳٪، سیال گازوئیل نوعی اثر تسهیل حرکتی داشته است، که باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.[۱۲] این موضوع با مطالعات ابوثنین[5] و همکاران (۲۰۱۵) و خامه‌چیان و همکاران (۲۰۰۷) نیز مطابقت دارد.[۲ و ۲۷] البته لیو و همکاران (۲۰۱۵)، امیری و همکاران (۲۰۲۲)، و فاضلی و همکاران (۲۰۲۱)، کاهش مستمر مقاومت فشاری خاک با افزایش محتوای آلاینده‌ی گازوئیل را گزارش کرده و روند اخیر را به ویسکوزیته‌ی متفاوت سیال گازوئیل و آب موجود در نمونه‌های آزمایش مرتبط دانسته‌اند.[۲۸-۳۰]

مقایسه‌ی نتایج در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نشان داده است که با گذشت زمان، افزایش درصد آلودگی سبب کاهش مقاومت فشاری مارن شده است. همچنین مشاهده شده است که شیب تغییرات در درصدهای اولیه بیشتر بوده و با افزایش درصد آلاینده، مقدار آن کاهش یافته است. مورد اخیر، در مطالات یزدی و همکاران (۲۰۲۱) نیز مشاهده شده است.[۱۲] در مطالعه‌ی شهیدی و همکاران (۲۰۲۲)، نیز کاهش مستمر مقاومت فشاری، با افزایش درصد آلاینده گزارش شده است. همچنین ایشان بیان کرده‌اند که بیشترین تغییرات صورت‌گرفته در مقاومت فشاری، با افزودن آلاینده در درصدهای ابتدایی رخ داده و تحت تأثیر زمان مقاومت فشاری افزایش یافته است.[۱۰] البته فاضلی و همکاران (۲۰۲۱)، یک روند کاهشی برای نمونه‌ها تحت تأثیر زمان گزارش داده و ماهیت فرار آلاینده را دلیل آن عنوان کرده‌اند؛[۳۰] که دلیل کاهش مقاومت را می‌توان با غیرقطبی‌بودن آلاینده‌ی گازوئیل برخلاف آب و ایجاد پیوند ضعیف بین ذرات خاک که کاهش چسبندگی را به‌همراه دارد، مرتبط دانست. با افزایش درصد آلاینده، سطح مخصوص خاک کاهش می‌یابد، که کاهش آن باعث کاهش جذب سیال منفذی و کاهش تماس ذرات رس می‌شود؛ که در نتیجه، روند نزولی برای مقاومت را در پی دارد. همچنین برای درصدهای بالاتر آلاینده، گازوئیل نقش روان‌کننده دارد؛ در نتیجه، دانه‌های خاک راحت‌تر بر روی هم می‌لغزند، که باعث ایجاد روند نزولی در مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌شود. مطابق برخی مطالعات پیشین در اندرکنش آلاینده و خاک با نیروی ضعیف واندروالسی، نیروهای تجمعی مذکور با ایجاد تمایل به بازآرایی و داشتن بیشترین تماس با سطح خاک، باعث تبدیل ساختار پراکنده‌ی رس به مجتمع می‌شود که کاهش چسبندگی را در پی دارد.

همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که اختلاف قابل‌توجهی میان مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌ها ایجاد نشده است. این موضوع که توسط شهیدی و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است،[۱۰] را می‌توان به تبخیر بخش اثرگذار گازوئیل در ساختار کلوئیدی خاک در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۲۸ روزه نسبت داد. تکمیل فرایند تبخیر گازوئیل در بازه‌ی زمانی ۱۴ تا ۲۸ روز سبب می‌شود که اختلاف بین مقاومت فشاری نمونه‌ها در بازه‌ی زمانی ۱۴ تا ۲۸ روز به میزان کمینه برسد.

در شکل ۵، نمودارهای تنش- کرنش حاصل از آزمایش تک‌محوری مشاهده می‌شوند؛ که مطابق شکل ۵-الف، برای نمونه‌های آغشته به ۳٪ وزنی گازوئیل،

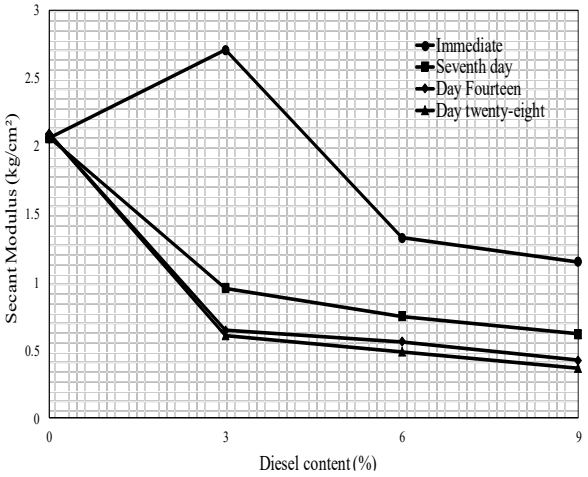


شکل ۵. نمودار تنش کرنش نمونه‌های آلوده به: (الف) ۳، (ب) ۶ ، و (ج) ۹ درصد وزنی آلاینده‌ی گازوئیل.

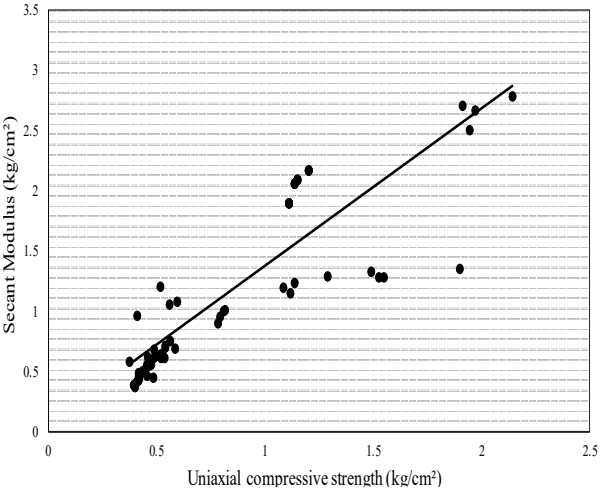
یک افزایش ۶۸ درصدی در مقاومت فشاری نمونه‌ی آنی شکل گرفته است، که باگذشت زمان، مقدار آن به کاهش مقاومت تبدیل شده است. این پدیده را می‌توان به ماهیت فرار آلاینده و ایجاد حفره‌ها در ساختار نمونه مطابق بر تصاویر میکروسکوپی مرتبط دانست. در شکل‌های ۵ (ب و ج)، که به ترتیب مربوط به نمونه‌های آغشته به ۶ و ۹ درصد آلاینده هستند، نیز روندی مشابه شکل ۵- الف، مشاهده و در آن‌ها برای نمونه‌های آنی به ترتیب ۳۱٪ افزایش و ۱/۵٪ کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی بدون آلاینده به‌دست آمده است.

جهت تعیین مدول سکانتی نمونه‌ها، از تقسیم بیشینه‌ی مقاومت فشاری بر کرنش نظیر آن در نمودارهای تنش- کرنش استفاده شده است. روند تغییرات مدول‌های سکانتی به‌دست‌آمده مشابهت چشمگیری با روند مقاومت فشاری

[5] Abousnina



شکل ۶. روند تغییرات مدول سکانتی برحسب تغییرات درصد آلاینده.



شکل ۷. مقادیر مدول سکانتی در برابر مقاومت فشاری تک‌محوری.

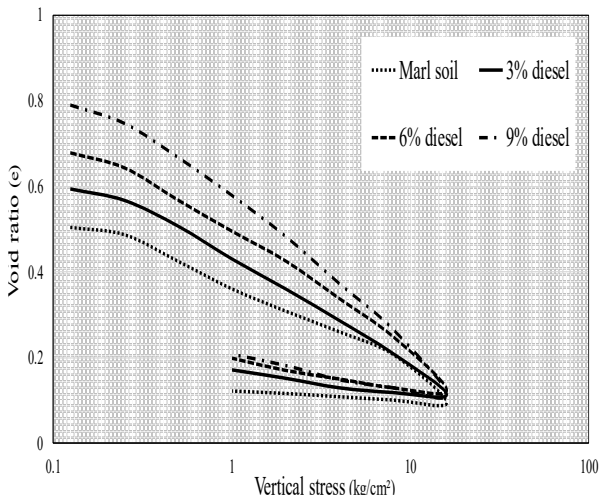
داشته است. در شکل ۶، روند تغییرات مدول سکانتی برحسب تغییرات درصد آلاینده و زمان مشاهده می‌شود. نحوه‌ی تأثیر گازوئیل در مدول سکانتی شباهت زیادی به نحوه‌ی تأثیر آلاینده‌ی گازوئیل در مقاومت فشاری داشته است. مطابق شکل ۶، با افزایش درصد آلاینده در نمونه‌های آنی تا ۳٪، افزایش مدول سکانتی رخ داده است؛ اما با افزایش بیشتر آلاینده، روند اخیر معکوس شده است. البته نسبت به نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری، شیب تغییرات مدول سکانتی از ۳ تا ۶ درصد آلاینده بسیار بیشتر شده و میزان مدول سکانتی در ۶٪ آلاینده نسبت به نمونه‌ی شاهد کمتر بوده و کاهش حدود ۳۵/۶ درصدی را تجربه کرده است.

به‌منظور بررسی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری با مدول سکانتی، مقادیر دو پارامتر اخیر برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بین مدول سکانتی و مقاومت فشاری تک‌محوری، یک رابطه‌ی خطی با ضریب همبستگی ۰/۷۳ وجود دارد؛ که می‌توات آن را به‌صورت رابطه‌ی ۱ تعریف کرد:

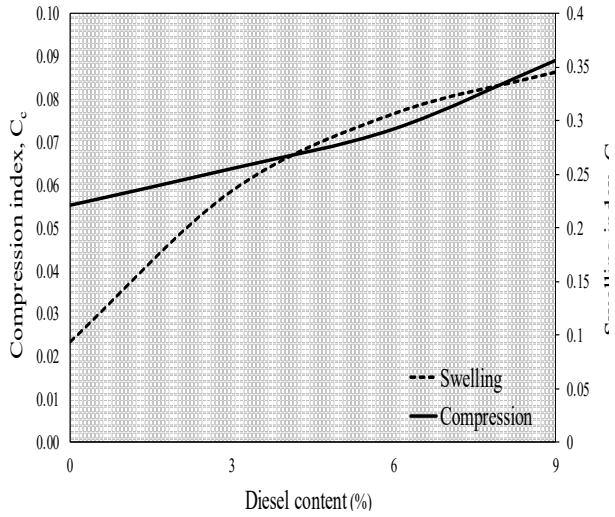
$$E = ۱/۳۰۷\ qu + ۰/۰۶۷ \qquad (1)$$

۲.۳. رفتار تحکیمی

جهت بررسی رفتار تحکیمی مارن آغشته به گازوئیل، ضمن یک‌سری آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های آغشته به ۳، ۶، و ۹ درصد آلاینده و همچنین یک نمونه‌ی بدون آلاینده به تعیین شاخص‌های فشردگی و تورم، و ضریب تحکیم پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌های تحکیم انجام‌شده در شکل ۸ مشاهده



شکل ۸. تغییرات حفره‌ها نسبت به تغییرات تنش وارد شده.

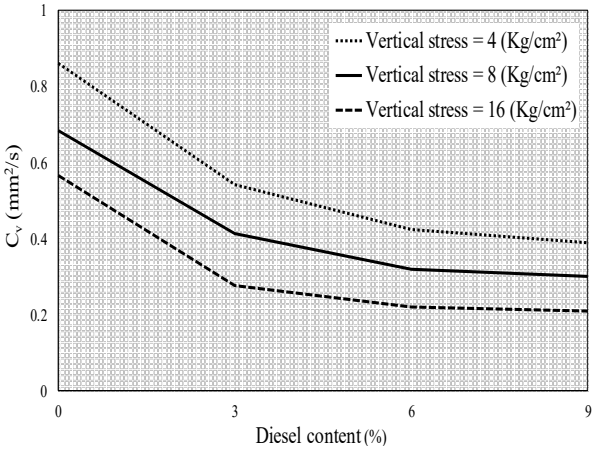


شکل ۹. تغییرات شاخص فشردگی و تورم نسبت به میزان آلاینده.

می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش درصد آلاینده، شیب نمودار تحکیم در هر دو شاخه‌ی بارگذاری و باربرداری افزایش یافته است. به بیان دیگر، علی‌رغم آنکه افزایش درصد آلایندگی موجب افزایش نسبت حفره‌های اولیه می‌شود، تمامی نمونه‌ها، پس از تجربه‌ی تنش قائم بیشینه به یک نسبت حفره‌های تقریباً یکسان می‌رسند. این بدان معناست که تمایل آن‌ها به تراکم‌پذیری فقط به‌دلیل حفره‌های اولیه، بیشتر ناشی از حجم بیشتر آلاینده نیست، بلکه به نقش برجسته‌ی گازوئیل در روان‌کاری دانه‌ها نیز دلالت دارد.

۱.۲.۳. شاخص فشردگی و تورم

در شکل ۹، تغییرات شاخص فشردگی و تورم با افزایش درصد آلاینده مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزودن آلاینده باعث افزایش شاخص فشردگی و تورم خاک شده است. این موضوع توسط خسروی و همکاران (۲۰۱۳) نیز گزارش شده است.[۳۹] کمترین شاخص فشردگی و تورم ثبت‌شده مربوط به نمونه با شناسه‌ی G.-C. بدون آلاینده است. با توجه به وجود امکان زهکشی در آزمایش تحکیم و عدم قطبیت مولکول‌های گازوئیل، ذرات خاک راحت‌تر توانسته‌اند بر روی هم بلغزند و نشست بیشتری داشته باشند. با افزایش درصد آلاینده، شاخص تورم نیز افزایش یافته است، اما میزان تغییرات آن بسیار بیشتر از شاخص فشردگی بوده است. روند اخیر با مطالعات حمیدی و همکاران



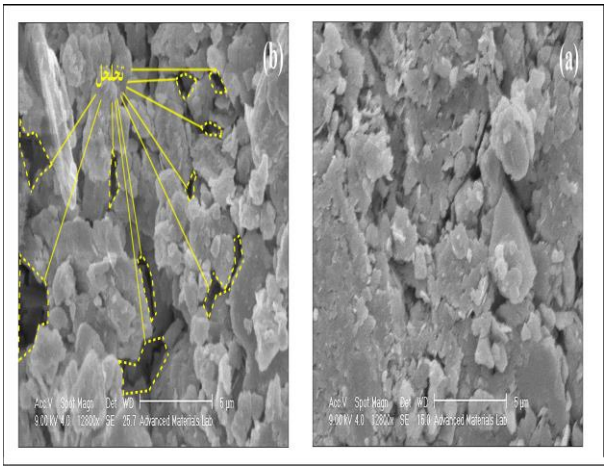
شکل ۱۰. تغییرات ضریب تحکیم با افزایش آلاینده در تنش‌های مختلف.

(۲۰۱۳)، صدقیانی و همکاران (۲۰۰۴)، ال‌سند[6] و همکاران (۱۹۹۵)، مطابقت داشته و آن‌ها افزایش شاخص فشردگی را تا ۲ برابر نمونه بدون آلاینده نیز گزارش کرده‌اند.[۱۳، ۱۷، و ۳۱]

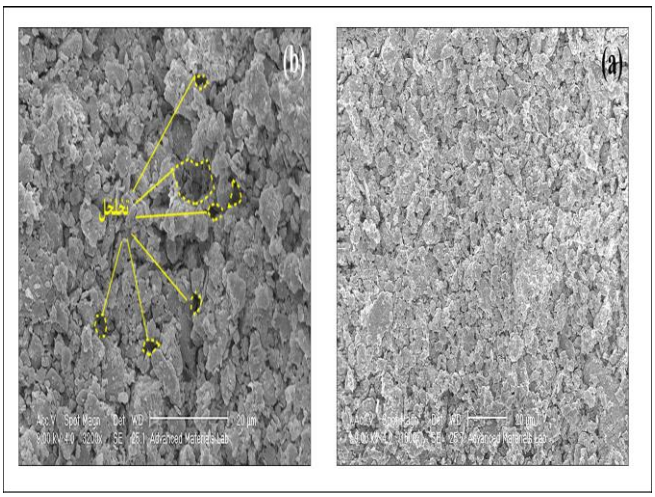
۲.۲.۳. ضریب تحکیم

همان‌طور که مشخص است، ضریب تحکیم نشانگر سرعت تحکیم است؛ و به‌طور چشمگیری، به جنس خاک وابسته است. در شکل ۱۰، تغییرات ضریب تحکیم در اثر تغییرات آلاینده، در تنش‌های ثابت ۴، ۸، و ۱۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، افزایش درصد آلاینده باعث کاهش ضریب تحکیم شده است. اما با افزایش درصد آلاینده، شیب نمودار کاهش یافته و بیشترین تغییرات با افزودن ۳٪ آلاینده به خاک در کاهش ضریب تحکیم مشاهده شده است. افزودن آلاینده به خاک، سبب کاهش ضریب تحکیم شده و رابطه‌ی معکوسی با افزایش آلاینده نشان داده است؛ که علت آن در اثر افزودن آلاینده به خاک را می‌توان به غیرقطبی‌بودن سیال گازوئیل و ویسکوزیته‌ی بالاتر گازوئیل نسبت به آب مرتبط دانست. در واقع گازوئیل با ایجاد یک شبکه‌ی به هم پیوسته با ویسکوزیته‌ی بالا، مانعی در برابر افزایش سرعت تحکیم محسوب می‌شود. این موضوع با نتایج حمیدی و همکاران (۲۰۱۳) و کارتیگیان[7] و همکاران (۲۰۲۰) نیز مطابقت داشته است. ایشان روند اخیر را با ویسکوزیته بالای گازوئیل مرتبط دانسته و از آن به‌عنوان مانع خروج سریع سیال از بین حفره‌های خاک یاد کرده‌اند.[۱۳ و ۳۲] اُتا[8] (۲۰۱۳)، کاهش نیروی جاذبه بین ذرات رسی را علت افزایش ضریب تحکیم، با افزایش آلاینده و اشغال منافذ در حضور سیال آلی را دلیلی بر کاهش ضریب تحکیم ضمن افزایش تنش سربار معرفی کرده‌اند.[۳۳] سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱)، نیز کاهش ضریب تحکیم در خاک مارن تبریز را با افزایش میزان آلاینده گزارش داده‌اند.[۳۴] در واقع، با اضافه‌کردن گازوئیل به خاک، ذرات آلاینده در بین دانه‌های جامد خاک به دام می‌افتند، و علاوه‌بر وجود پیوند (هر چند ضعیف) بین آلاینده و خاک، گرانروی بالاتر گازوئیل نسبت به آب، کاهش سرعت تحکیم را منجر می‌شود. به طورکلی، افزودن آلاینده، کاهش قابلیت هدایت هیدرولیکی را در پی دارد و سبب کاهش سرعت تحکیم و افزایش زمان نشست خاک آلوده می‌شود. در ادامه، در جدول ۵، به مقایسه‌ی بهتر نتایج پژوهش حاضر با برخی پژوهش‌های پیشین پرداخته شده است.

[6] Al-Sanad
[7] Karthigeyan
[8] Ota



شکل ۱۱. خاک مارن با ۳٪ وزنی آلاینده‌ی گازوئیل:
(الف) نمونه‌ی آنی، (ب) نمونه‌ی ۷ روزه با مقیاس ۵ میکرومتر.



شکل ۱۲. خاک مارن با ۳٪ وزنی آلاینده‌ی گازوئیل:
(الف) نمونه‌ی آنی، (ب) نمونه‌ی ۷ روزه با مقیاس۲۰ میکرومتر.

۳.۳. نتایج آنالیز عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی

جهت بررسی اثر آلاینده‌ی گازوئیل در خصوصیات ریزساختاری نمونه‌ها، دو نمونه با شناسه‌های $G_{۳}$-C. و $G_{۳}$-$C_{۷}$ انتخاب و عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی بر روی آن‌ها انجام شده است. در شکل‌های (۱۱- الف) و (۱۲- الف) به ترتیب عکس‌برداری با مقیاس ۵ و ۲۰ میکرومتر بر روی نمونه‌ی ۳٪ آلاینده‌ی آنی و در شکل‌های (۱۱- ب) و (۱۲- ب) به ترتیب با مقیاس ۵ و ۲۰ میکرومتر بر روی نمونه‌ی ۳٪ آلاینده‌ی ۷ روزه مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که حجم حفره‌ها در نمونه‌ی آنی به مراتب کمتر از نمونه‌ی ۷ روزه بوده است. این بدان معناست که انسجام ذرات و پیوستگی بین آن‌ها در نمونه‌ی آنی بیشتر بوداست؛ که این خود عامل اصلی بیشتربودن مقاومت نمونه‌ی آنی نسبت به نمونه‌های ۷ روزه به‌شمار می‌آید. با افزایش بزرگ‌نمایی در شکل ۱۲، بافت خاک در نمونه‌ی آنی به شکلِ توده‌ای[9] و انعقادیافته[10] نمایان می‌شود؛ در حالی که با سپری‌شدن ۷ روز، از میزان انعقادیافتگی اخیر کاسته می‌شود. این کاهش ناشی از تبخیر بخش اثرگذار گازوئیل در شکل‌گیری ساختار کلوئیدی خاک در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۷ روز است.

[9] Aggregated
[10] Flocculated

جدول ۵. خلاصه‌ی پژوهش‌های پیشین در مورد آلودگی هیدروکربنی خاک.

Ref.	Trend of parameter changes due to increasing pollution percentage						Pollutant	Soil Type
	Strength Compression	Cohesion	Friction Angle	Compression Index	Permeability coefficient	Electrical conductivity		
2	----	↗ 1% ↘	↘ 2% →	----	↘ 1% ↗	----	Light crude oil	SW
5	↗ 3% ↘	↗ 3% ↘	↘ 1% ↗	----	----	----	Diesel	SC
11	↗ 3%	↗	↘	----	----	----	Oil Gas	SP، CL و ML
12	↗ 3% ↘	↗	↘	----	----	----	Diesel	ML
28	↘	----	----	----	----	----	Oil Gas	Kaolin clay
29	↘	----	----	----	----	↘	Diesel	CH
30	↘	----	----	----	----	----	White diesel and diesel	SC
31	----	----	↘	↗	----	----	Light and heavy crude oil	SP
32	↗	↗	----	----	----	----	Diesel	CH و SP
36	----	----	↘	----	----	----	Gasoline and diesel	Coarse grain
37	↗ 12%	↗	↘	----	----	----	Diesel	Kaolinite
38	↗	----	----	----	----	----	Engine oil	SP
39	↗ 12%	↗	↘	↗	----	----	Diesel	Kaolin clay

با کاهش انعقادیافتگی بافت خاک، پیوستگی بین ذرات کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش مقاومت فشاری خاک شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از آزمایش‌های فشاری محصورنشده و تحکیم به بررسی تأثیر نسبت وزنی گازوئیل و زمان اثرگذاری آن در پارامترهای مکانیکی و فیزیکی خاک مارن قم پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه شده است، تا یک سری یافته‌های کمّی و کیفی حاصل شود، که در ادامه به برجسته‌ترین آن‌ها اشاره شده است.

۱) افزودن گازوئیل به خاک مارن تا ۳٪ باعث افزایش ۶۸ درصدی مقاومت فشاری شد، اما در ادامه، روند مذکور برای نمونه‌های آنی کاهش یافت. به عبارت دیگر، درصد پایین گازوئیل در نمونه‌های آنی باعث افزایش چسبندگی می‌شود ، ولی برای درصدهای بالاتر آلاینده، اثر تسهیل حرکتی گازوئیل غالب می باشد.

۲) اثر گذشت زمان به‌صورت کاهشی در مقاومت فشاری تک‌محوری نمایان شده و به‌علت سطح مخصوص بالای خاک مارن، بیشترین تأثیرپذیری خاک از آلاینده در روزهای ابتدایی صورت پذیرفت. همچنین برای نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت فشاری تک‌محوری رابطه‌ی معکوس با محتوای آلاینده نشان داد.

۳) با مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری به‌دست‌آمده و مدول سکانتی نمونه‌ها، رابطه‌ی ۱ با ضریب همبستگی ۰/۷۳ به‌دست آمد که با توجه به رابطه‌ی مذکور، مدول سکانتی حدود ۳۰٪ بیشتر از مقاومت فشاری تک‌محوری بود.

۴) مطابق نتایج آزمایش تحکیم، شاخص فشردگی و تورم نمونه‌ها با افزایش میزان آلاینده، روند صعودی نشان داد و تضعیف پارامترهای تحکیم را به همراه داشت.

۵) با افزودن گازوئیل به خاک مارن، ضریب تحکیم به‌طورکلی کاهش یافت. است؛ به عبارت دیگر، ویسکوزیته‌ی بالای گازوئیل نسبت به آب، باعث ایجاد ساختار انعقادیافته و کاهش هدایت هیدرولیکی شد، که افت سرعت تحکیم و افزایش زمان نشست را در پی داشت.

۶) در تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ی آنی با بیشترین مقاومت، ساختار به‌صورت توده‌ای و منعقد مشاهده شد. اما برای نمونه‌ی ۷ روزه و در همان میزان آلاینده، تعداد حفره‌ها و حجم آن‌ها افزایش داشت که سبب کاهش مقاومت خاک مارن شد.

References- منابع

1. Gao, H., Wu, M., Liu, H., Xu, Y. and Liu, Z., 2022. Effect of petroleum hydrocarbon pollution levels on the soil microecosystem and ecological function. *Environmental Pollution*, *293*, pp.118511. doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118511.

2. Abousnina, R.M., Manalo, A., Shiau, J. and Lokuge, W., 2015. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *24(8)*, pp.833-845. doi.org/10.1080/15320383.2015.1058338.

3. Mallah, M.A., Changxing, L., Mallah, M.A., Noreen, S., Liu, Y., Saeed, M., Xi, H., Ahmed, B., Feng, F., Mirjat, A.A. and Wang, W., 2022. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overeview. *Chemosphere*, *296*, pp.133948. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948.

4. Sarmadi, M.S., Zohrevand, P. and Rezaee, M., 2019. Effect of kerosene contamination on the physical and mechanical properties of sandy soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, *4*, pp.1-9. doi.org/10.1007/s41062-019-0196-1.

5. Mustafa, Y.M., Al-Amoudi, O.S.B., Ahmad, S. and Maslehuddin, M., 2018. Geotechnical properties of plastic marl contaminated with diesel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *43*, pp.5573-5583. doi.org/10.1007/s13369-018-3224-0.

6. Kererat, C., 2019. Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil. *Engineering Geology*, *257*, pp.105138. doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.015.

7. Hernández-Mendoza, C.E., García Ramírez, P. and Chávez Alegría, O., 2021. Geotechnical evaluation of diesel contaminated clayey soil. *Applied Sciences*, *11(14)*, pp.6451. doi.org/10.3390/app11146451.

8. Elsaigh, W.A.H. and Oluremi, J.R., 2022. Assessment of geotechnical properties of oil contaminated subgrade soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *31(5)*, pp.586-610. doi.org/10.1080/15320383.2021.1985079.

9. Al-Aghbari, M., Dutta, R. and Mohamedzeini, Y., 2011. Effect of diesel and gasoline on the properties of sands—a comparative study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *5(1)*, pp.61-68. doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.61-68.

10. Shahidi, M., Asemi, F. and Farrokhi, F., 2022. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of clayey sand. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, *52(106)*, pp.217-226. [In persian]. doi.org/10.22034/JCEE.2020.11226.

11. 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*, pp.333-345. doi.org/10.1007/s10706-015-9948-7.

12. Yazdi, A. and Sharifi Teshnizi, E., 2021. Effects of contamination with gasoline on engineering properties of fine-grained silty soils with an emphasis on the duration of exposure. *SN Applied Sciences*, *3(7)*, pp.704. doi.org/10.1007/s42452-021-04637-x.

13. Hamidi, A. and Jedari, S., 2013. Investigating the consolidation behavior of contaminated clay. *Sharif Civil Engineering*, *29(2)*, pp.29-35 [In persian].

14. Ghasemzadeh, H. and Tabaiyan, M., 2017. The effect of diesel fuel pollution on the efficiency of soil stabilization method. *Geotechnical and Geological Engineering*, *35*, pp.475-484. doi.org/10.1007/s10706-016-0121-8.

15. Ahmadi, M., Ebadi, T. and Maknoon, R., 2021. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures. *Engineering geology*, *283*, pp.106021. doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106021.

16. Aghajani, S., 2016. Crude oil spill effect on geotechnical properties of the tabriz refinery's soil. Master thesis, Tabriz University, Faculty of Civil Engineering. [In persian].

17. Sadeqiani, M. and Jiriaei Sharahi, M., 2004. Laboratory investigation of crude oil-contamination effects on parameters of resistance, settlement, and sand compressibility. *The First National Civil Engineering Congress*. [In persian].

18. Rajabi, A. M., Khodaparast, M., & Shukri, M., 2017. Studying the effect of oil and gas contamination on the shear behavior of coarse-grained soils. *Iranian*

Engineering Geological Association Journal, *9(3 & 4)*, pp.85-96. [In persian].

19. ASTM D422-63, 2007. Standard test method for particle-size analysis of soils. *Annual book of ASTM standards*, *4*. doi.org/10.1520/D0422-63R07.

20. ASTM D2216-10, 2010. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. *In Am. Soc. Test. Mater*. doi.org/10.1520/D2216-10.

21. ASTM D4318, 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. *ASTM International West Conshohocken*. doi.org/10.1520/D4318-17E01.

22. ASTM D1556-07, 2007. Standard test method for density and unit weight of soil in place by the sand-cone method. *ASTM International West Conshohocken*, PA. doi.org/10.1520/D1556-07.

23. ASTM D1557, 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56000 ft-lbf/ft^3 (2700 kn-m/m^3). *ASTM international*. doi.org/10.1520/D1557-12R21.

24. ASTM D854-14, 2010. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. *D854, 717*. doi.org/10.1520/D0854-23.

25. ASTM D2166-06, 2000. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. *ASTM International West Conshohocken*, PA, USA. doi.org/10.1520/D2166-06.

26. ASTM D2435-04, 2011. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. *ASTM International*. doi.org/10.1520/D2435-04.

27. Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M., 2007. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering geology*, *89(3-4)*, pp.220-229. doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.009.

28. Liu, Z.B., Liu, S.Y. and Cai, Y., 2015. Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil. *Journal of Central South University*, *22(12)*, pp.4837-4843. doi.org/10.1007/s11771-015-3035-3.

29. Amiri, M., Kalantari, B. and Basereh, F., 2022. Microstructural evaluation of the effect of diesel organic pollutant on geotechnical and geo-environmental properties of marl soil in southern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *15(13)*, pp.1212. doi.org/10.1007/s12517-022-10472-0.

30. Fazeli, G., Lotfollahi, S., Bakhtiari, P. and Farrokhi, F., 2021. Bearing capacity and geotechnical properties of sandy soil substrate contaminated with oil derivatives (diesel fuel and kerosene). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *54(4)*, pp. qjegh2020-134. doi.org/10.1144/qjegh2020-134.

31. Al-Sanad, H.A., Eid, W.K. and Ismael, N.F., 1995. Geotechnical properties of oil-contaminated kuwaiti sand. *Journal of geotechnical engineering*, *121(5)*, pp.407-412. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:5(407).

32. Karthigeyan, S. and Ramachandran, A., 2020. Physical and engineering properties of oil contaminated clay soil. I*nternational Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT), *9(5)*, pp.763-666. doi.org/10.17577/IJERTV9IS050590.

33. Ota, J.O., 2013. The effect of light crude oil contamination on the geotechnical properties of kaolinite clay soil. PhD thesis, Anglia Ruskin University.

34. Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H. and Soorki, A.A., 2021. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *13(3)*, pp.653-670. doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011.

35. AbdelSalam, S.S. and Hasan, A.M., 2023. Controlled diesel-mixed soils for roadway embankments: laboratory and ultrasonic characterization. *Arabian Journal of Geosciences*, *16(5)*, pp.313. doi.org/10.1007/s12517-023-11397-y.

36. Brzeziński, B. and Olchawa, A., 2023. Effects of contamination with gasoline and diesel oil on shear strength of coarse grained soil. *Rocznik Ochrona Środowiska*, *25*, pp.222-227. doi.org/10.54740/ros.2023.022.

37. Ghadrdan, M., Sabour, M.R., Ghasemzadeh, H. and Khosravi, E., 2014. Effects of gasoil contamination on geotechnical properties of kaolinite soils. *Environmental Sciences*, *11(4)*, pp.9-20.

38. George, S., Aswathy, E., Sabu, B., Krishnaprabha, N.P. and George, M., 2015. Study on geotechnical properties of diesel oil contaminated soil. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, *2(2)*, pp.113-117. doi.org/10.13140/RG.2.2.17938.58564.

39. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R. and Yazdani, H., 2013. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, *166*, pp.11-16. doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.004.