



Original Article

Enhancing the Durability and Elastic Modulus of Oil-Contaminated Soils In Wet-Dry Cycles Through Stabilization with Traditional Materials

Hadis Nasiri¹, Navid Khayat^{*1} and Ahad Nazarpour²

¹ Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

* corresponding author:(navid.khayat@iau.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 17 January 2024

Revised: 15 March 2024

Accepted: 21 April 2024

Keywords:

Wet-dry cycles,
stabilization,
durability,
oil-contaminated soils,
oil spill.

Abstract

Considering that the infrastructures in different regions experience different weather cycles that can lead to the creation of minor surface cracks to be noticeable, it is necessary to understand the durability behavior of soils. Although previous studies have extensively investigated the strength behavior of oil-contaminated soil, there is still no accurate understanding of the durability of oil-contaminated soil against wet-dry cycles. To fill these gaps, this research is focused on the durability characteristics of oil-contaminated soils. For this purpose, a series of laboratory tests were conducted to evaluate compaction, durability and microstructural analyses. In that regard, the soil was contaminated with oil in concentrations of 4, 7 and 10% and then stabilized with lime and cement in concentrations of 0, 3, 6 and 9% separately. Initial laboratory experiments, including Atterberg limits and compaction tests, were conducted. Subsequently, durability tests were performed to examine wet-dry cycles in 1, 3, and 6 cycles on oil-contaminated soil samples, as well as those stabilized with cement and lime. The results demonstrated that the highest durability was observed in the samples containing 4% oil and 9% cement in the 6th cycle, showing a 42% increase in resistance compared to a similar sample with the same percentage of oil and cement in the 3rd cycle. Additionally, the elasticity modulus of the oil-contaminated soil sample with 4% oil and stabilized with 6% lime was 2 times that of the 1st cycle in the 3rd cycle and 2.8 times that of the 3rd cycle in the 6th cycle. Microscopic analysis using electron field emission microscopy unveiled that the incorporation of cement and lime as stabilizing agents resulted in a denser and more compact structure of oil-contaminated soil. This comprehensive research endeavor seeks not only to advance the management practices of contaminated soils but also to uphold the conservation of natural resources while offering an alternative solution for the construction of secondary access roads.

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 that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors contribution statement

Hadis Nasiri: Investigation, Methodology, Writing-Original draft, Experimentation, Data curation.

Navid Khayat: Supervision, Conceptualization, Methodology, Technical support, Reviewing, Final Editing.

Ahad Nazarpour: Reviewing.

To Cite this article:

Nasiri, H, Khayat, N. and Nazarpour, A. 2025. Enhancing the Durability and Elastic Modulus of Oil-Contaminated Soils in Wet-Dry Cycles Through Stabilization with Traditional Materials, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.25-38.
<https://doi.org/10.24200/J30.2024.63902.3295>



بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی

حدیث نصیری^۱، نوید خیاط^{۱*} و احد نظریور^۲^۱ گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.^۲ گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول (navid.khayat@iau.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
اگرچه مطالعات پیشین به‌طور گسترده، رفتار مقاومتی خاک آلوده به نفت را بررسی کرده‌اند، اما هنوز درک دقیقی از دوام خاک آلوده به نفت در برابر چرخه‌های تر- خشک وجود ندارد. برای پر کردن خلأ علمی مذکور، پژوهش حاضر بر روی ویژگی‌های دوام خاک‌های آلوده به نفت متمرکز شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی تراکم، دوام، و آنالیزهای ریزساختاری انجام شده است. برای این منظور، خاک در غلظت‌های ۴، ۷، و ۱۰ درصد به نفت آلوده شد. سپس در درصد‌های ۰، ۳، ۶، و ۹ به‌طور جداگانه با آهک و سیمان تثبیت شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش یافته است. بیشترین دوام‌ها مربوط به نمونه‌ی حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان، و نمونه‌ی حاوی ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک پس از گذراندن ۶ چرخه‌ی تر- خشک بوده است. تصاویر میکروسکوپی نشان داده است که استفاده از سیمان و آهک به‌عنوان عوامل تثبیت‌کننده منجر به ساختار متراکم‌تر خاک آلوده به نفت شده است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷ تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲
	واژگان کلیدی: چرخه‌های تر- خشک، تثبیت، دوام، خاک‌های آلوده، نشت نفت.

۱. مقدمه

حوادث نشت نفت در فرایند تولید، حمل و نقل، پالایش، و مصرف نفت یک اتفاق ناگزیر است.^[۱] تعداد قابل توجهی از مناطق جهان تحت تأثیر آلودگی نفت قرار گرفته‌اند و نیاز به اجرای تدابیر ترمیمی و مدیریت مناسب دارند.^[۲] آثار واردشده توسط نفت در خاک‌ها و مشکلات جدی محیطی، نشان‌دهنده‌ی مسائل پیچیده‌ای است که نیازمند درک بهتر آن‌هاست. به‌طور کلی، نشت نفت یک مسئله‌ی حیاتی در مناطق غنی از نفت در سراسر جهان محسوب می‌شود. در شکل ۱، نمایی از آثار نشت نفت در کانزاس، آمریکا، بر روی زمین مشاهده می‌شود.

یک راه‌حل ممکن برای کاهش آثار نامطلوب خاک‌های آلوده در محیط زیست، استفاده‌ی مؤثر از خاک‌های آلوده به‌عنوان مصالح ساختمانی است.^[۳] ادغام آن‌ها در زیرساخت‌ها، به‌عنوان مثال در جاده‌های روستایی یا جاده‌های دسترسی، که در نزدیکی سایت‌های نفت واقع شده‌اند، مزایای محیطی و اقتصادی قابل توجهی، از جمله کاهش هزینه‌های پروژه مرتبط با دسترسی به مواد دارد.^[۴] شرکت‌های حمل خاک، هزینه‌های قابل توجهی برای دفع حجم زیادی از خاک‌ها با ویژگی‌های ژئوتکنیکی ناخوشایند از محل‌های ساخت و نیز هزینه‌های معنی‌داری برای حمل خاک مناسب از فواصل بلند به‌عنوان مصالح تحمیل می‌کنند.^[۵] بنابراین، به استفاده از خاک آلوده‌ی نفتی و تثبیت‌شده با مواد افزودنی، به دو دلیل می‌توان توجه کرد. اولاً، روش اخیر می‌تواند هزینه و

فرسایش خاک، یک پدیده‌ی طبیعی است، که توسط عواملی همچون باد و آب ایجاد و باعث حذف لایه‌های بالایی خاک می‌شود. این فرآیند ممکن است به‌طور تدریجی در طول زمان یا به‌صورت سریع رخ دهد.^[۶] زیرساخت‌های حمل-ونقل، به‌عنوان مثال جاده‌ها، به‌راحتی تحت تأثیر فرآیند فرسایش قرار می‌گیرند، که منجر به ایجاد شکاف‌های متعدد کوچک یا بزرگ در سطح آن‌ها می‌شود. زیرساخت‌ها نه فقط تحت تأثیر عوامل طبیعی، مانند فرآیند فرسایش قرار دارند، بلکه تداخل انسانی نیز در ساخت‌وساز آن‌ها نقش دارد.^[۷] علاوه بر این، شرایط و چرخه‌های مختلف مرتبط با موقعیت جغرافیایی آن‌ها در مناطق اقلیمی متفاوت، به‌عنوان یک عامل مهم، تأثیرگذار است. این مکانیسم‌ها می‌توانند فرآیند تخریب زیرساخت‌ها را سرعت بخشند و چالش‌های حفاظتی را برای پژوهشگران ایجاد کنند. پژوهشگران در سراسر جهان نتایج پژوهشی در زمینه‌ی خصوصیات مکانیکی و ویژگی‌های فرسایشی مواد ژئوتکنیکی ارائه داده‌اند.^[۸]

از سوی دیگر، گسترش صنایع شیمیایی پس از ظهور دوره‌ی صنعتی، به افزایش چشمگیر آلاینده‌ها در محیط طبیعی و انسانی منجر شده است.^[۹] در میان صنایع شیمیایی مختلف، صنعت پتروشیمی به‌رغم سرمایه‌گذاری و توجه زیاد به انرژی‌های جایگزین، همچنان یکی از اصلی‌ترین بازیگران در چشم‌انداز انرژی جهان باقی مانده است. امروزه، نفت همچنان یکی از نیازهای اساسی انرژی در جوامع مدرن است. با وجود تمامی تدابیر ایمنی و احتیاطی در صنعت نفت،

استناد به این مقاله:

نصیری، حدیث، خیاط، نوید، و نظریور، احد، ۱۴۰۴. بهبود دوام و مدول کشسانی خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر- خشک با استفاده از تثبیت با مواد سنتی. مهندسی عمران شریف،

<https://doi.org/10.24200/J30.2024.63902.3295>، صص. ۲۵-۳۸، (۱)۴۱

بسازی دارد. به دنبال آلودگی‌های اطراف تأسیسات پالایشگاه‌ها ممکن است در زمان بهره‌برداری از چاه‌ها و تأسیسات نفتی، نیاز به خاک‌برداری و تعویض خاک باشد. این موضوع ممکن است باعث آسیب به محیط‌زیست شود و همچنین از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نباشد. بنابراین، انتخاب روش مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت برای استفاده‌ی مجدد از آن‌ها، نیازمند بررسی بیشتری است.

مرور ادبیات پژوهش در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تعدادی پژوهش بر روی خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت آن‌ها با استفاده از مواد مختلف صورت پذیرفته است، اما در پژوهش حاضر به بررسی خصوصیات دوام و ریزساختاری خاک‌های آلوده در اهواز، که مخازن و تأسیسات نفتی متعددی دارد، از طریق افزودن آهک و سیمان در درصد‌های مختلف به عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده پرداخته شده است. همچنین پژوهش حاضر می‌تواند به بهبود مدیریت مسائل زیست‌محیطی و زیرساخت‌ها در منطقه‌ی اهواز کمک کند و راهکارهای مؤثری برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت ارائه دهد.

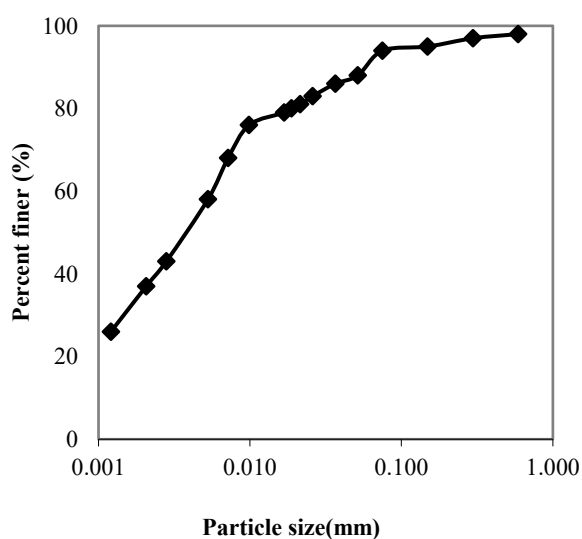
۲. مواد

۱.۲. خاک

نمونه‌ی خاک رسی از اهواز، خوزستان، ایران تهیه شده است. دامنه‌ی خمیری و حد روانی خاک به ترتیب ۲۷ و ۵۴ درصد تعیین شده است. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک جمع‌آوری شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. خاک براساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید خاک، به عنوان خاک رس با خمیری بالا (CH) طبقه‌بندی می‌شود. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیب‌های غالب خاک، Si و Al هستند.

۲.۲. نفت

نفت استفاده‌شده در پژوهش حاضر، نفت خام نمک‌زدایی شده است، که از میدان نفت و گاز کارون ۱ در اهواز، ایران به دست آمده است. فرآیند نمک‌زدایی، گازهای سمی و آب را از نفت حذف می‌کند. برای تعیین میزان نفت در پژوهش حاضر، چند نمونه خاک از سایت‌های نفتی خوزستان جمع‌آوری و با استفاده از



شکل ۲. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک.

زمان مرتبط با حمل و دفع خاک آلوده را به شدت کاهش دهد. به جای انتقال خاک آلوده به محل دفع، می‌توان آن را در محل موردنیاز توسط فرآیندهایی مانند مخلوط کردن با مواد افزودنی تثبیت کرد. ثانیاً، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده می‌تواند منجر به بازیابی و استفاده‌ی مجدد از ارزش خاک

آلوده شود. با بهره‌گیری از فرآیندهای بهینه‌سازی، خاک می‌تواند به یک وضعیت مناسب برای استفاده‌ی مجدد در پروژه‌های ساختمانی یا عمرانی تبدیل شود.^[۱۰] این دیدگاه به‌طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و مزایای اقتصادی ایجاد می‌کند. از این منظر، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده به عنوان یک رویکرد پایدار، فرصتی برای مدیریت و استفاده‌ی مؤثر از خاک آلوده به نفت در مکان‌های تحت تأثیر نشست نفت ارائه می‌دهد. همچنین، با توجه به طبیعت آب‌گریز نفت،^[۱۱] استفاده از ماده‌ی مذکور در ساخت جاده‌های درجه دوم می‌تواند به جلوگیری از نفوذ آب کمک کند و فرآیند تخریب سایت خاکی را در چرخه‌های خشک و تر به تأخیر بیندازد.

تعداد زیادی از مطالعات به مشخصات خاک‌های آلوده به نفت و کاربردهای آن در مهندسی متمرکز شده‌اند. کاراباش^۱ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۱۲] اثر آلودگی نفت در ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک را بررسی کردند و دریافتند که دامنه‌ی خمیری خاک در اثر آلودگی تقریباً دو سوم کاهش یافته است. نتایج پژوهش خوشند^۲ و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱۳] نشان داده است که مقدار مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)^۳ با افزایش نفت تا ۵٪ بهبود یافته و سپس با افزایش درصد نفت، در همه‌ی نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. در مطالعه‌ی سلیم‌نژاد و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۱] مشخص شد که زیست‌پالایی، آلودگی خاک را حدود ۵۰٪ کاهش داده است. همچنین در مقایسه با خاک آلوده، زیست‌پالایی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش نشست شده است. مطالعه‌ی نوکنده و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱۴] نشان داده است که براساس آزمایش برش مستقیم، با افزایش آلودگی تا ۱۰٪ نفت، چسبندگی خاک به ترتیب از ۱۴/۵ کیلوپاسکال به ۷/۳ کیلوپاسکال کاهش یافته است، که به دلیل کاهش شکل‌پذیری خاک بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی ویژگی‌های خاک آلوده به نفت اهمیت بسیار بالایی دارند. مطالعات اخیر، پایه‌ی نظری قوی را برای مهندسی و اهداف رفع آلودگی و نیز امکان بهینه‌سازی استفاده از خاک‌های آلوده به نفت را فراهم می‌آورند.

با توجه به تولید روزافزون نفت و همچنین وجود پالایشگاه‌های نفتی متعدد در اهواز، مسئله‌ی جلوگیری از نشست آلودگی‌های نفتی به زیرساخت‌ها، اهمیت



شکل ۱. نمای از نشست نفت در کانزاس.

³ Unconfined Compressive Strength

¹ Karabash

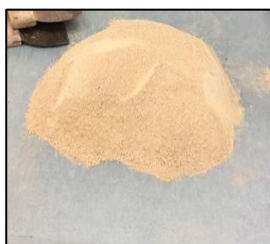
² Khoshand

جدول ۲. ترکیب‌های شیمیایی آهک و سیمان.

ترکیب‌های شیمیایی	آهک		سیمان
	مقدار (%)	مقدار (%)	
SiO ₂	0.95	20.7	
Al ₂ O ₃	0.30	5.20	
Fe ₂ O ₃	0.24	4.65	
CaO	72.04	65.50	
MgO	0.64	1.80	
Na ₂ O	0.13	0.15	
K ₂ O	0.11	0.50	
C ₃ S	--	59.47	
C ₂ S	--	14.48	
C ₃ A	--	6.00	
C ₄ AF	--	14.00	
SrO	0.31	--	
P ₂ O ₅	0.04	--	
Loss of ignition	25.24	1.50	



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳. نمایی از مواد استفاده‌شده در پژوهش حاضر:

(الف) خاک، (ب) نفت، (ج) سیمان، (د) آهک.

دستگاه استخراج سوکسله^۱ تجزیه و تحلیل شده‌اند. براساس غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده، بیشترین میزان نفت ثبت‌شده در نمونه‌های خاک آلوده به نفت، ۱۰٪ بوده است. بنابراین، درصد اخیر برای بررسی رفتار خاک آلوده و همچنین درصدهای کمتر شامل ۴ و ۷ درصد انتخاب شده‌اند. پس از به‌دست‌آوردن نفت خام و انتقال آن به آزمایشگاه، با استفاده از ترکیب دستی به‌عنوان یک روش مصنوعی با خاک مخلوط شد.

۳.۲. سیمان

به‌منظور تثبیت خاک بررسی‌شده از سیمان پرتلند نوع II استفاده شده است، که از کارخانه‌ی سیمان خوزستان واقع در خوزستان، ایران خریداری شده است. درصدهای سیمان در پژوهش حاضر براساس نوشتارهای اخیر در زمینه‌ی تثبیت خاک ۳، ۶، ۹ و ۱۵٪ در نظر گرفته شده‌اند.^[۱۵ و ۱۶] در جدول ۲، ترکیب‌های شیمیایی سیمان ارائه شده است. CaO و SiO₂ مواد اصلی تشکیل‌دهنده‌ی سیمان هستند. قبل از استفاده از سیمان، سیمان از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شده است.

۴.۲. آهک

آهک هیدراته با درجه‌ی خلوص بالای ۷۲٪ مطابق با الزام‌های تعیین‌شده توسط ASTM C۹۷۷ از شرکت خوزستان آهک در خوزستان ایران خریداری شده است. در جدول ۲، ترکیب‌های شیمیایی آهک که توسط آنالیز فلورسانس اشعه‌ی ایکس (XRF)^۲ تعیین شده است، ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، آهک در درجه‌ی اول از CaO تشکیل شده است. میزان آهک استفاده‌شده در پژوهش حاضر، ۳، ۶، ۹ و ۱۵ درصد بوده است، که قبل از استفاده در مخلوط خاک از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شد. درصدهای انتخابی آهک در سایر مطالعات صورت‌گرفته در تثبیت با آهک نیز به‌کار رفته‌اند.^[۱۷-۱۹] در شکل ۳، نمایش بصری آهک، سیمان، نفت، و خاک مشاهده می‌شود.

۳. تهیه‌ی نمونه

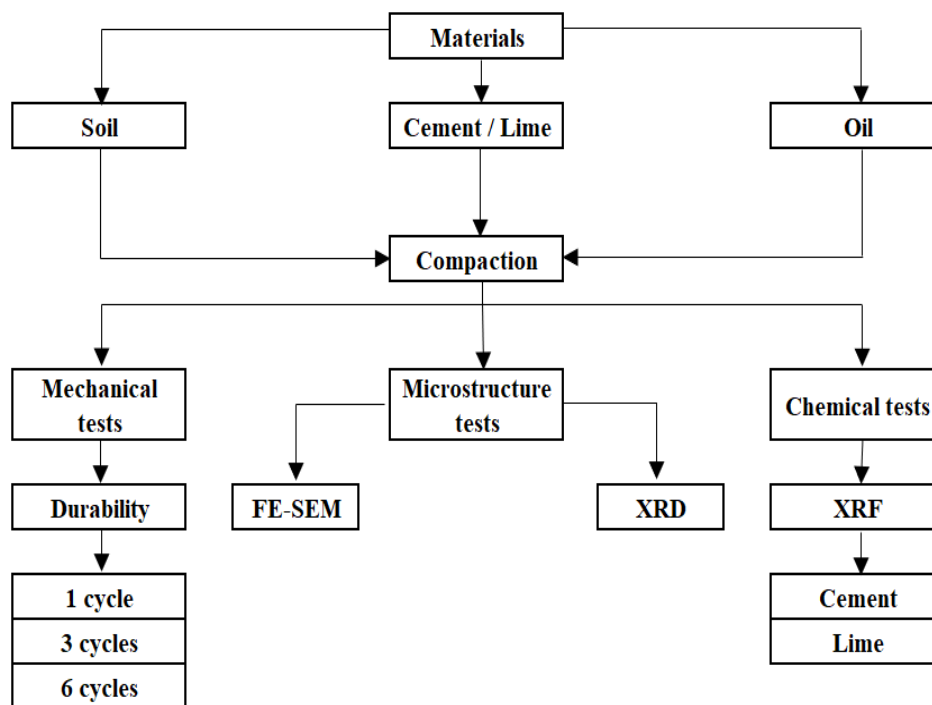
۱.۳. آماده‌سازی نمونه‌های خاک آلوده به نفت

خاک در ابتدا تحت خشک‌کردن با هوا قرار گرفت و سپس با استفاده از الک شماره‌ی ۸ (فیلتر ۳/۶ میلی‌متری) الک شد.^[۲۰ و ۲۱] پس از آن، مخلوط نفت و خاک کاملاً ترکیب و به‌طور یکنواخت هم‌زده شدند. سپس مخلوط حاصل در

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مطالعه‌شده.

مقدار	خصوصیات فیزیکی
0	شن (٪)
6	ماسه (٪)
94	ریزدانه (٪)
54	حد روانی (٪)
28	حد خمیری (٪)
26	نشانه‌ی خمیری (٪)
CH	طبقه‌بندی خاک (یونیفاید)

¹ Soxhlet extractor² X-ray Fluorescence



شکل ۴. فلوچارت پژوهش.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵. نمایی از نحوه‌ی تراکم و مغزه‌گیری:

(الف) قالب تراکم استاندارد، (ب) مغزه‌گیر، (ج) نمونه‌ی خاک با ابعاد

۳۸×۷۶ میلی‌متر.

آزمایش مذکور، سه لایه‌ی خاک، هر کدام با ۲۵ ضربه، مطابق با استاندارد ASTM D۶۹۸ متراکم شده‌اند؛ که مطابق با آن، درصد رطوبت بهینه و بیشینه‌ی چگالی خشک خاک به‌دست آمد.

۲.۴. آزمایش دوام

به‌منظور انجام آزمایش دوام مطابق با استاندارد ASTM D۵۵۹، نمونه‌های تهیه‌شده، به مدت ۵ ساعت درون آب قرار گرفتند و متعاقباً به مدت ۴۰ ساعت در آن نگهداری شدند. روش اخیر برای ۱، ۳، و ۶ سیکل تکرار شد. طبق نوشتارهای منتشرشده در زمینه‌ی دوام، تعداد چرخه‌های تر و خشک ممکن

یک کیسه‌ی نایلونی به مدت یک هفته قرار داده شد. برای دستیابی به آلودگی مناسب خاک، معمولاً گزارش شده است که خاک باید به درصد موردنیاز از آلاینده آلوده شود و سپس به مدت یک هفته در هوا خشک شود، تا از جذب کامل آلاینده توسط خاک اطمینان حاصل شود. [۲۲ و ۲۳]

۲.۳. افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده‌ی نفتی

ابتدا خاک آلوده به نفت با نسبت‌های مختلف آهک و یا سیمان به‌طور جداگانه مخلوط شد تا به‌خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهد. سپس آب مقطر (به اندازه‌ی درصد رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم) به آن اضافه شد، تا جایی که ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود. این مخلوط با دقت میکس شد تا زمانی که یک مخلوط یکنواخت به‌دست آمد. سپس مخلوط حاصل به کیسه‌های نایلونی منتقل و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد.

۴. برنامه‌ی آزمایشگاهی

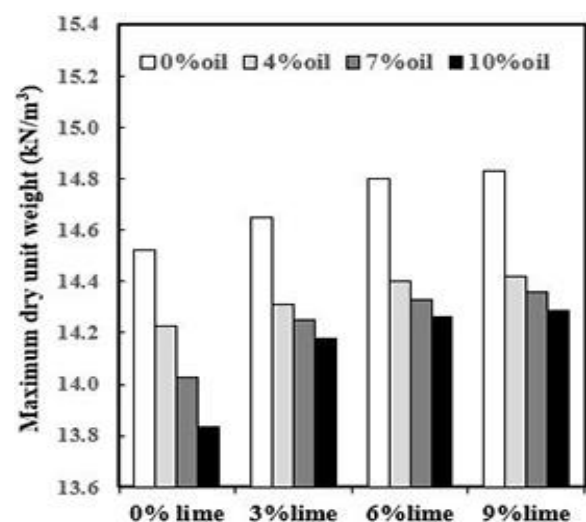
فلوچارت پژوهش در شکل ۴ مشاهده می‌شود. جهت تهیه‌ی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر، از مخلوط‌های تهیه‌شده در بخش ۳.۲ استفاده شده است. با استفاده از قالب تراکم استاندارد با قطر ۴ اینچ، مخلوط خاک و نفت و تثبیت‌کننده در سه لایه به درون قالب تراکم ریخته شد. هر لایه با استفاده از ۲۵ ضربه‌ی چکش متراکم شد. آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM D۶۷۲ انجام شد. پس از انجام آزمایش تراکم، اقدام به نمونه‌گیری با استفاده از مغزه‌گیر شد؛ که با استفاده از آن، در هر بار آزمایش تراکم، ۳ نمونه با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر تهیه شدند. قالب تراکم استاندارد و مغزه‌گیر در شکل ۵ مشاهده می‌شود. از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر (شکل ۴-ج)، جهت انجام آزمایش‌های دوام استفاده شده است.

۱.۴. آزمایش تراکم پروکتور استاندارد

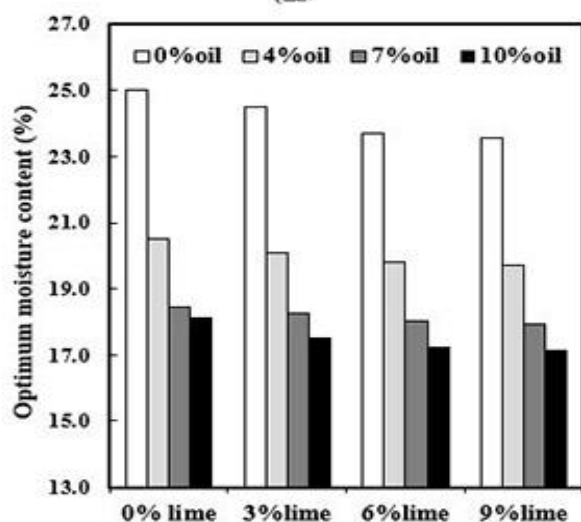
آزمایش تراکم در قالبی به حجم ۹۴۴ سانتی‌مترمکعب و توسط وزنه‌ی ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها می‌شود، انجام شده است. در

خشک در نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت آهک به‌دست آمد، که در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون آهک، افزایش ۲/۵٪ را نشان داده است. به‌طور مشابه، نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت آهک ۶ و ۹ درصد به ترتیب افزایش ۳/۱ و ۳/۳ درصدی را نشان داده‌اند. این پدیده را می‌توان به وزن مخصوص بالاتر آهک نسبت داد، که منجر به افزایش وزن مخصوص خاک با افزایش درصد آهک می‌شود.^[۲۷] یکی دیگر از عوامل مهم در ایجاد تغییرات ذکرشده، اثر روانکاری نفت در ذرات رس است.^[۲۸]

با افزایش درصد آهک، رطوبت بهینه برای تثبیت خاک با آهک افزوده کاهش یافت. در مورد نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت آهک، درصد رطوبت بهینه، ۱۷/۵٪ به‌دست آمد، که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۳/۳٪ در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون آهک است. به همین ترتیب، نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد آهک به ترتیب کاهش ۴/۹ و ۵/۳ درصدی را تجربه



(الف)



(ب)

شکل ۶. نتایج آزمایش‌های تراکم با درصد‌های مختلف آلودگی نفتی و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف آهک.
الف) وزن مخصوص حداکثر، ب) رطوبت بهینه

است به نوع جاده و نوع خاک وابسته باشد، اما معمولاً ۱ تا ۴ چرخه برای خاک‌های سیلتی یا خاک‌های رس مناسب تلقی می‌شود.^[۲۴] با این حال، به‌منظور اطمینان بیشتر، در پژوهش حاضر، تعداد ۶ چرخه‌ی تر-خشک در نظر گرفته شده است. پس از طی چرخه‌های تر-خشک، آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. پس از گذراندن سیکل ۱ برای انجام آزمایش از دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری با ظرفیت ۷۰۰ کیلوگرم و با ساعت اندیکاتور جابجایی‌سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است. پس از گذراندن سیکل‌های ۳ و ۶، به‌دلیل بالا بودن اعداد قرائت‌شده بیش از ظرفیت دستگاه تک‌محوری خاک برای انجام آزمایش از دستگاه جک بتن‌شکن با ظرفیت ۴ تن استفاده شد. این تذکر لازم است که پس از ۳ بار تکرار هر نمونه‌ی آزمایشی، بر روی نتایج به‌دست‌آمده میانگین‌گیری انجام شد.

۳.۴. آزمایش‌های ریزساختاری

آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)^۱، برای تجزیه و تحلیل فازهای موجود در خاک استفاده شده است. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)^۲ به‌منظور تجزیه و تحلیل ریزساختار خاک انجام شد. نمونه‌ها پس از پوشاندن با طلا، اسکن شدند و تعدادی تصویر دیجیتال با بزرگ‌نمایی‌های مختلف ثبت شد. به‌منظور درک بهتر فرآیندهای ریزساختار آهک و سیمان در خاک آلوده به نفت، آنالیز FESEM بر روی نمونه‌های منتخب انجام شده است.

۵. نتایج و بحث

۱.۵. نتایج آزمایش‌های تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

در شکل ۶، نتایج آزمایش‌های تراکم به‌صورت بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه در مقابل درصد‌های مختلف آهک برای نمونه‌های غیرآلوده و آلوده به نفت مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، برای نمونه‌های خاک آلوده به نفت، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد نفت کاهش یافته است. وجود نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال‌شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود.^[۱۱] با افزایش درصد نفت به ۱۰٪، مقدار بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک به ۱۳/۸ کیلو نیوتن بر مترمکعب در مقایسه با مقدار ۱۴/۵ کیلو نیوتن بر مترمکعب برای خاک غیرآلوده کاهش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش تقریباً ۴/۸ درصدی است. نفت در مقایسه با آب، ویسکوزیته‌ی بالاتری از خود نشان می‌دهد، که منجر به اتلاف انرژی در طول فرآیند تراکم می‌شود.^[۲۵] از طرفی دیگر، نفت چگالی کمتری نسبت به آب دارد. بنابراین، هنگامی که نفت به جای آب، بخشی از فضای منافذ را اشغال می‌کند، چگالی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد؛ در نتیجه مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک را در نمونه‌های آلوده به نفت کاهش می‌دهد. ضمناً باید توجه داشت که در صورت وجود نفت، آب به تمام ذرات خاک دسترسی ندارد و فقط سطح خارجی توده‌ی خاک را مرطوب می‌کند. بنابراین، آب نمی‌تواند به‌طور مؤثر در تراکم تأثیر بگذارد.^[۲۶]

علاوه بر این، مشاهده شده است که افزودن آهک به خاک آلوده و تثبیت‌شده به نفت منجر به کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک غیرآلوده می‌شود. به‌عنوان مثال، بیشینه‌ی وزن مخصوص

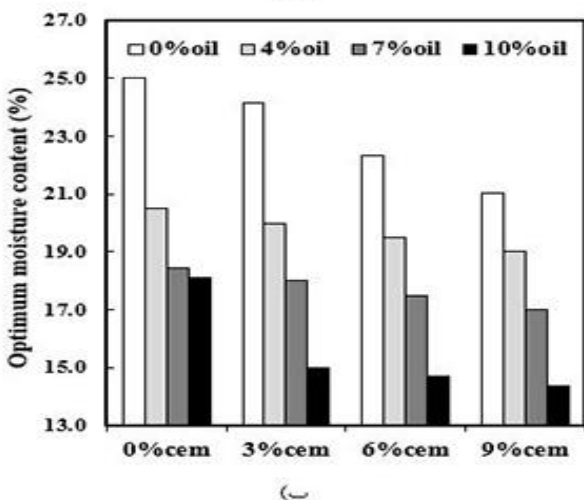
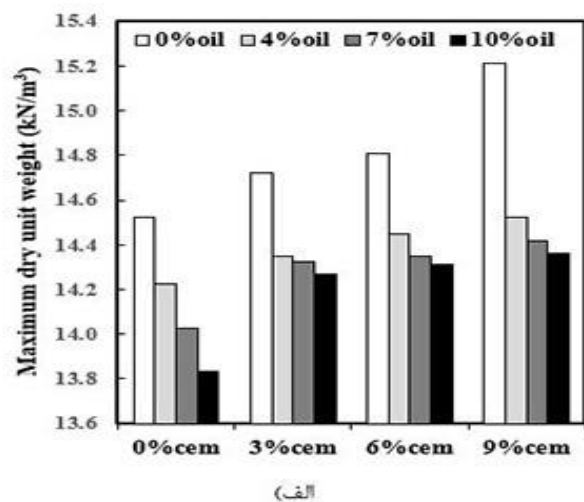
¹ X-Ray Diffraction

² Field Emission Scanning Electron Microscopy

۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد سیمان به ترتیب افزایش ۱۸/۸ و ۲۰/۷ درصد را تجربه کرده‌اند. این امر ناشی از آن است که سیمان رطوبت را از خاک جذب می‌کند و با درصد رطوبت در تعامل است و فرآیند تثبیت را آغاز می‌کند. در نتیجه با افزایش درصد سیمان، رطوبت بهینه کاهش می‌یابد.^[۳۳]

۳.۵. نتایج آزمایش‌های دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

در شکل ۸، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه‌ی تر-خشک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان اظهار داشت که تمامی نمونه‌های خاک آلوده به نفت، تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و همچنین نمونه‌ی خاک طبیعی (شکل ۸ - الف)، مقاومت تک‌محوری را در برابر یک چرخه‌ی مرطوب-خشک نشان داده‌اند. در نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۸-ب)، بیشترین مقاومت تک‌محوری در نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک مشاهده شده است. مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های آلوده با درصد متغیر نفت نشان می‌دهد که با افزایش درصد نفت از ۷ به ۱۰، دوام نمونه‌ها کاهش یافته است. چنین رفتاری را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که واکنش ماده‌ی افزودنی با خاک در حضور درصدهای بیشتر نفت آهسته‌تر شده و در رشد مقاومت، تأثیر کمتری گذاشته است.^[۳۴] مقاومت نمونه‌های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۸-ج) و حاوی ۳، ۶، و ۹ درصد آهک پس از ۱ چرخه‌ی تر-خشک به



شکل ۷. نتایج آزمایش‌های تراکم با درصدهای مختلف آلودگی نفتی و تثبیت‌شده با درصدهای مختلف سیمان.
(الف) وزن مخصوص حداکثر، (ب) رطوبت بهینه

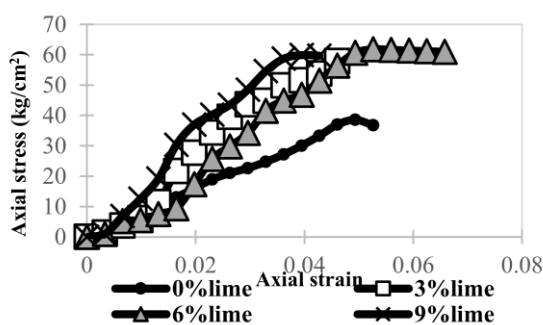
کرده‌اند. افزودن آهک به مخلوط خاک باعث شروع فعل و انفعالات شیمیایی بین آهک و آب می‌شود، که منجر به تثبیت و مقاومت مخلوط می‌شود. با افزایش درصد آهک، درصد رطوبت بهینه‌ی لازم برای فعل و انفعالات شیمیایی بهینه بین آهک و آب کاهش یافته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه، تفاوت معنی‌داری را در نمونه‌های خاک آلوده به آهک ۶ و ۹ درصد نشان نمی‌دهند.

۲.۵. نتایج آزمایش‌های تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

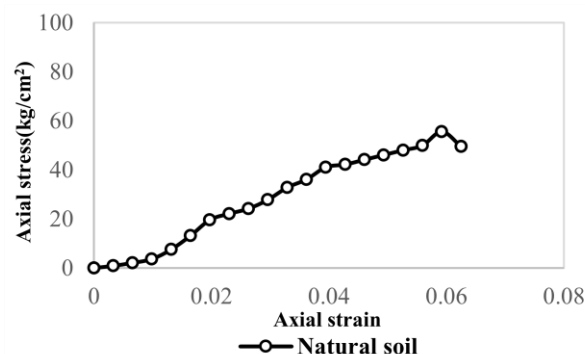
در شکل ۷، نتایج آزمایش‌های تراکم خاک‌های غیرآلوده و آلوده به نفت مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی وزن واحد خشک خاک غیرآلوده، ۱۴/۵ کیلونیوتن بر مترمکعب بوده است، اما وقتی ۴٪ نفت به خاک اضافه شده است، این مقدار به ۱۴/۲ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش یافته است (کاهش ۲/۱٪). به طور مشابه، رطوبت بهینه از ۲۵٪ به ۲۰/۵٪ (کاهش ۱۸٪) کاهش یافته است. هنگامی که درصد نفت از ۴٪ به ۷٪ افزایش یافته است، بیشینه‌ی وزن واحد خشک تقریباً ۱/۳٪ بدون تغییرات قابل توجه کاهش یافته است، در حالی که رطوبت بهینه به ۱۰٪ کاهش یافته است. با این حال، با افزایش بیشتر در درصد نفت از ۷٪ به ۱۰٪، بیشینه‌ی وزن واحد خشک به ۱۳/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب کاهش و رطوبت بهینه ۱/۹٪ کاهش یافته است. این روند را می‌توان به تشکیل یک پوشش نفتی ضخیم در اطراف ذرات خاک نسبت داد، که به عنوان یک بالشتک عمل می‌کند و از تماس در هم تنیده‌ی بین ذرات جلوگیری می‌کند، که در نتیجه باعث افزایش لغزش با افزایش مقدار نفت و ویسکوزیته می‌شود و در نهایت، تراکم‌پذیری خاک آلوده را کاهش می‌دهد. مشاهدات مشابهی در برخی پژوهش‌ها،^[۳۰، ۳۹] انجام شده است. همچنین کاهش بیشینه‌ی وزن واحد خشک به دلیل افزایش درصد نفت ممکن است به اثر وزن مخصوص نفت در خاک نسبت داده شود.^[۳۱]

علاوه بر این، مشاهده شده است که افزودن سیمان به خاک آلوده و تثبیت‌شده با نفت، بیشینه‌ی وزن واحد خشک و درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک غیرآلوده کاهش یافته است. نتایج نشان داده است که بیشینه‌ی وزن واحد خشک با افزایش درصد سیمان افزایش یافته است، در حالی که درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان در مقایسه با خاک آلوده کاهش پیدا کرده است. کمترین مقدار بیشینه‌ی وزن واحد خشک در نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت سیمان به دست آمده است، که نسبت به نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون سیمان، ۳/۲٪ افزایش نشان داده است. نمونه‌های با ۱۰٪ آلودگی نفت و تثبیت سیمان ۶ و ۹ درصد به ترتیب افزایش ۳/۵ و ۳/۸ درصدی را نشان داده‌اند. بیشینه‌ی وزن واحد خشک خاک، اساساً تحت تأثیر دو عامل است: (الف) توزیع اندازه‌ی ذرات، و (ب) وزن مخصوص خاک.^[۳۲] بنابراین، این امر به دلیل وزن مخصوص بیشتر سیمان است، که با افزایش درصد سیمان منجر به افزایش وزن مخصوص خاک می‌شود. این افزایش وزن مخصوص نیز مقاومت و پایداری خاک را افزایش می‌دهد.^[۳۲]

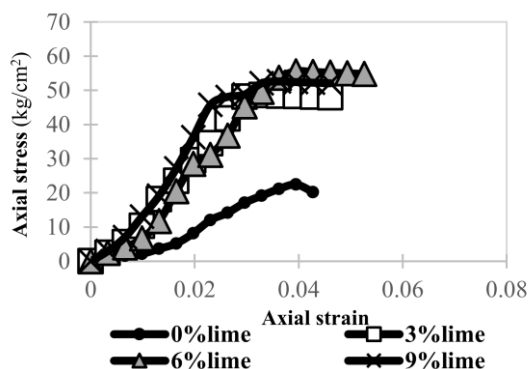
علاوه بر این، درصد رطوبت بهینه برای تثبیت خاک با سیمان اضافه‌شده با افزایش درصد سیمان کاهش یافته است. برای نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت سیمان، درصد رطوبت بهینه، ۱۵٪ بوده است، که نشان‌دهنده‌ی کاهش ۱۷/۱٪ در مقایسه با نمونه‌ی مشابه آلوده به نفت بدون سیمان بوده است. نمونه‌هایی با



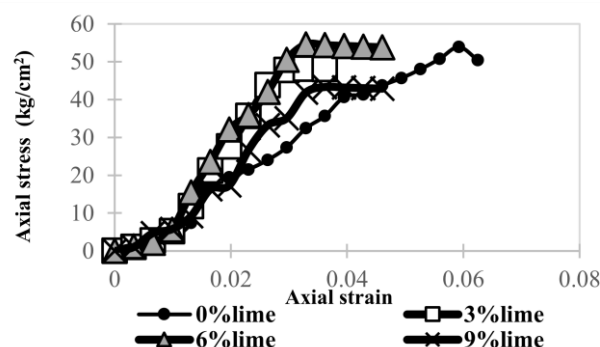
(ج)



(الف)

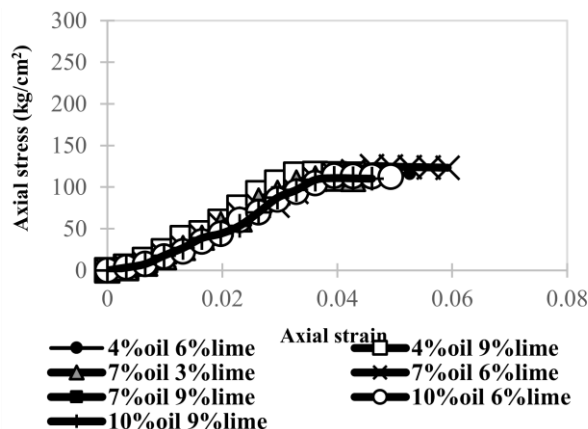


(د)



(ب)

شکل ۸. منحنی های تنش- کرنش نمونه های خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک طی یک چرخه ی تر- خشک: (الف) نمونه ی خاک طبیعی بدون آلودگی، (ب) ۴٪ نفت، (ج) ۷٪ نفت، (د) ۱۰٪ نفت.



شکل ۹. منحنی های تنش- کرنش نمونه های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک طی ۳ چرخه ی تر- خشک.

نمونه های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب مقاومت ۲۵/۰ مگاپاسکال را نشان داده اند، که نسبت به نمونه با درصد مشابه نفت و حاوی ۳٪ آهک، ۱۹/۶٪ افزایش یافته است. از مقایسه ی نتایج آزمایش ها می توان ادعا داشت که با افزایش درصد نفت، مقاومت نمونه ها پس از گذراندن چرخه های تر- خشک کاهش یافته و ۶٪ آهک، درصد بهینه ی آهک برای چرخه های ۱، ۳، و ۶ بوده است. لی و همکاران (۲۰۲۱)، [۳۵] نتایج مطالعات خود را بر روی خاک های آلوده به نفت در چین بیان داشته اند، که افزایش مقاومت با آهک می تواند به این دلیل باشد که واکنش آهک با خاک آلوده به نفت باعث ایجاد ژل کلسیم آلومینات سیلیکات هیدراته (C-A-S-H) می شود و ساختار خاک آلوده به نفت را تغییر می دهد.

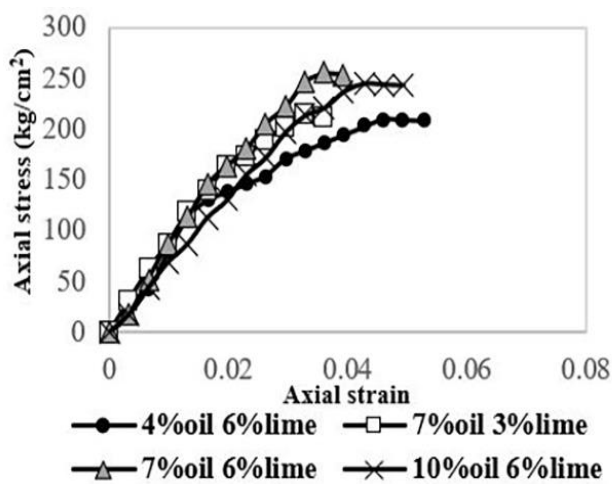
ترتیب ۵/۷، ۶/۱، و ۵/۹ مگاپاسکال بوده است. روند مشابه در نمونه های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۸-د) مشاهده شد، به طوری که مقاومت نمونه های آلوده به ۱۰٪ نفت به ترتیب ۲/۲، ۲/۵، و ۲/۳ برابر بیشتر از نمونه های حاوی درصد مشابه نفت، اما بدون آهک بوده است.

در شکل ۹، نتایج آزمایش های دوام بر روی نمونه های خاک آلوده به نفت پس از طی ۳ چرخه ی تر- خشک مشاهده می شوند. در چرخه ی ۳، کلیه ی نمونه های بدون آهک پس از طی ۳ چرخه ی تر- خشک در آب متلاشی شده اند. هنگامی که ۳٪ آهک به نمونه های آلوده به نفت اضافه شده است، فقط نمونه های آلوده به ۷٪ نفت در برابر چرخه های تر- خشک از خود دوام نشان داده و نمونه های آلوده به ۴ و ۱۰ درصد نفت در آب متلاشی شده اند. هنگامی که درصد آهک به ۶٪ افزایش یافته است، نمونه های آلوده با درصدهای ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه در سیکل ۱، به ترتیب مقاومت های ۲/۲، ۲/۰ و ۲/۱۰ برابر نشان داده اند. همچنین نمونه های آلوده به ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت و تثبیت شده با ۹٪ آهک در چرخه ی ۳، در مقایسه با چرخه ی ۱، به ترتیب ۱۶۶/۷، ۱۰۲/۳، و ۱۱۰/۷ درصد نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه اما تثبیت نشده، افزایش داشته اند.

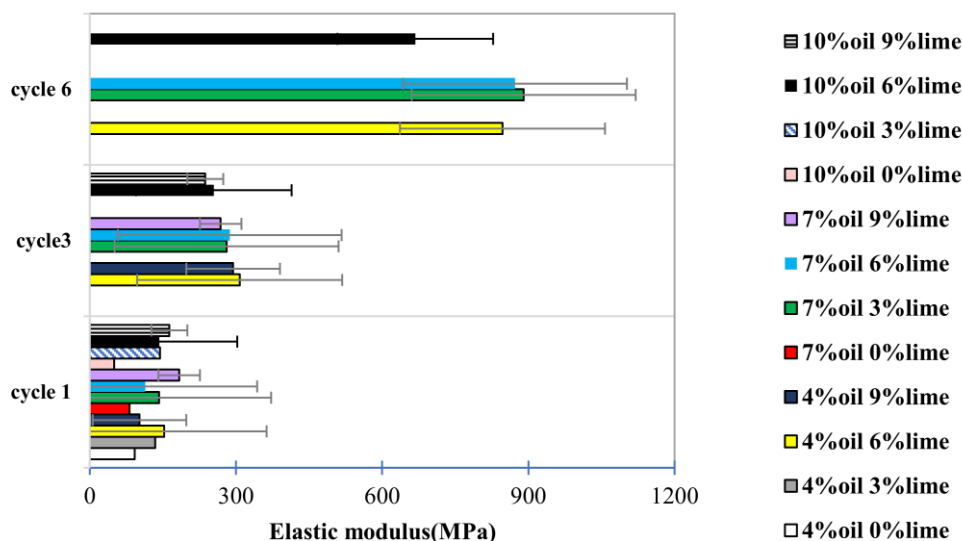
در شکل ۱۰، نتایج آزمایش های دوام بر روی نمونه های خاک آلوده به نفت پس از ۶ چرخه ی تر- خشک مشاهده می شوند. در چرخه ی ۶، بیشتر نمونه ها در آب متلاشی شده اند. در بین نمونه های آلوده به ۴ و ۱۰ درصد نفت، نمونه های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب ۲۸۵/۱ و ۳۴۰/۶ درصد نسبت به همان نمونه در چرخه ی ۳ افزایش مقاومت داشته اند. در بین نمونه های آلوده به ۷٪ نفت،

نتایج نمونه‌های آلوده با درصد‌های مختلف نفت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد نفت، مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

در سیکل ۱، در میان نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۱۲- الف)، بیشترین دوام مربوط به نمونه‌های حاوی ۹٪ سیمان مشاهده می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۱۲- ب)، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان افزایش یافته است. نمونه‌های حاوی سیمان ۳، ۶، و ۹ درصد سیمان به ترتیب مقاومت ۷/۵، ۷/۹، و ۱۰/۲ مگاپاسکال داشته‌اند، که در مقایسه با نمونه‌های آلوده به نفت بدون سیمان و پس از یک چرخه تر- خشک، به ترتیب ۲/۰، ۲/۱، و ۲/۷ برابر بیشتر بوده است. همین روند در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۱۲- ج) مشاهده شده است، که افزایش درصد سیمان منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری نسبت به نمونه‌های بدون سیمان شده است.



شکل ۱۰. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف آهک طی ۶ چرخه تر- خشک.



شکل ۱۱. مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف آهک پس از طی چرخه‌های تر- خشک.

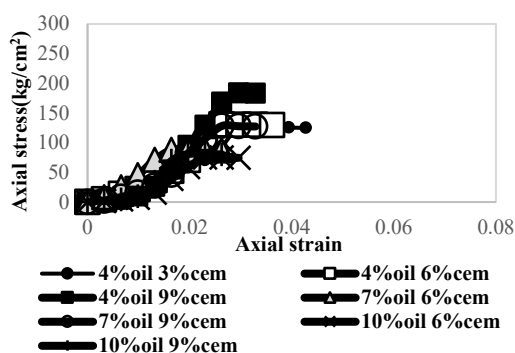
۴.۵. مدول کشسانی خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با آهک

در شکل ۱۱، میزان مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف و تثبیت‌شده با آهک مشاهده می‌شود. میزان مدول کشسانی ارائه‌شده، مدول سکانت در ۵۰٪ مقاومت نهایی است.

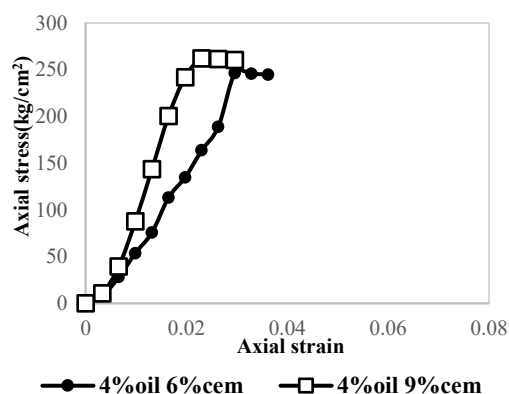
از مقایسه مدول کشسانی در چرخه‌های مختلف می‌توان بیان داشت که مدول کشسانی نمونه‌های مختلف با افزایش سیکل‌های تر- خشک افزایش یافته است. به عنوان مثال، مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک در چرخه‌ی ۳، ۲/۰ برابر چرخه‌ی ۱ و در چرخه‌ی ۶، ۲/۸ برابر چرخه‌ی ۳ بوده است. مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ سیمان در چرخه‌ی ۳، ۲/۵ برابر چرخه‌ی ۱ و در چرخه‌ی ۶، ۳ برابر چرخه‌ی ۳ بوده است. مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک در چرخه‌های ۱، ۳، و ۶ به ترتیب مقادیر ۱۴۲/۹، ۲۵۴/۵، و ۶۶۷/۹ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. درخصوص افزایش میزان پارامترهای مهندسی با استفاده از آهک در خاک، تجربه نشان داده است که خاک رس با آهک ترکیبی تولید می‌کند که خواص آن‌ها مانند خواص سیمانی است. اصول ترکیب‌های شیمیایی براساس ترکیب رس و آهک در مجاورت آب اتفاق می‌افتد؛ به این ترتیب که یون مثبت تغییر می‌کند و ذرات خاک به صورت توده‌ای به هم پیوسته در می‌آید و پس از آن واکنش پوزولانی یا سیماناسیون صورت می‌پذیرد یا کربناسیون رخ می‌دهد.^[۳۶]

۵.۵. نتایج آزمایش‌های دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

در شکل ۱۲، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه تر-خشک مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن می‌توان بیان کرد که تمام نمونه‌های آلوده به نفت، تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با سیمان، در برابر یک چرخه تر- خشک مقاومت نشان داده‌اند. به‌طور کلی با مقایسه‌ی



شکل ۱۳. منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف سیمان طی ۳ چرخه‌ی تر - خشک.



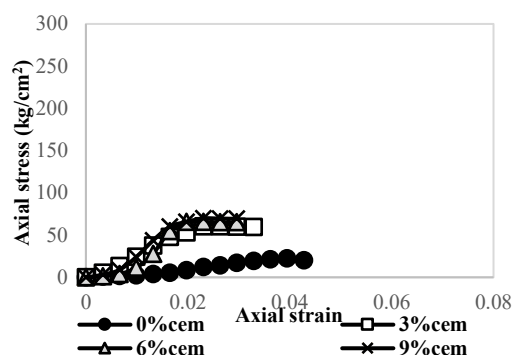
شکل ۱۴. منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف سیمان طی ۶ چرخه‌ی تر - خشک.

مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به ترتیب ۲۴/۲ و ۲۵/۷ مگاپاسکال بوده است. شایان ذکر است بیشترین دوام مشاهده‌شده مربوط به نمونه‌ی حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان بوده است، که در مقایسه با نمونه‌ی مشابه همین درصد نفت و سیمان در سیکل ۳، ۴۲/۶٪ افزایش مقاومت داشته است. ربه^۱ و همکاران (۲۰۲۳)،^[۳۷] بیان کرده‌اند که سیمان برخی خواص پوزولانی دارد، که می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری خاک شود. همچنین اولواتویی^۲ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۳۸] با مطالعه بر روی خاک‌های آلوده بیان کرده‌اند که تشکیل محصولات سیمانی در خاک با استفاده از سیمان می‌تواند به توسعه‌ی مقاومت خاک کمک کند.

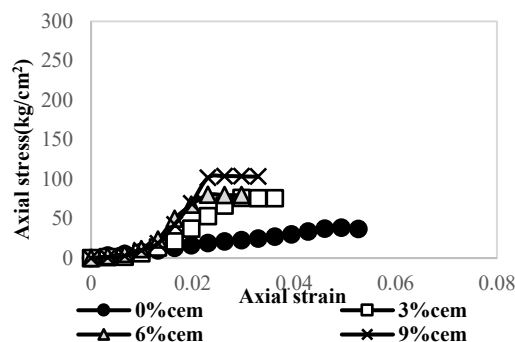
۶.۵. مدول کشسانی خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان

مدول کشسانی، نشان‌دهنده‌ی سختی متوسط خاک است؛ که به‌عنوان نسبت تنش انحرافی به کرنش محوری مرتبط در یک نقطه‌ی خاص در منحنی تنش - کرنش تعریف می‌شود.^[۳۸ و ۳۹] مدول کشسانی را می‌توان برای سطح خاصی از کرنش یا تنش تعیین کرد. در مطالعه‌ی حاضر، مدول کشسانی برای هر نمونه در نقطه‌ی مربوط به نیمی از UCS نمونه محاسبه شده است.^[۹]

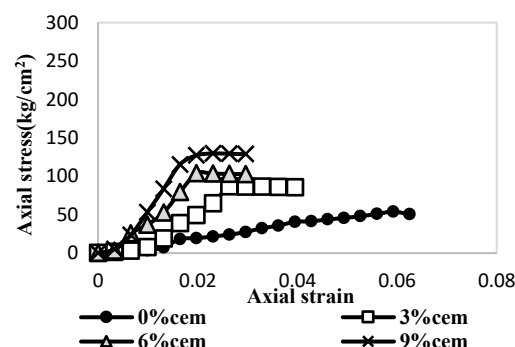
مقادیر مدول کشسانی برای نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف و تثبیت‌شده با آهک در شکل ۱۵ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، مدول کشسانی با افزایش تعداد چرخه‌های تر - خشک افزایش یافته است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲. منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های خاک آلوده به نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف سیمان طی یک چرخه‌ی تر - خشک: (الف) ۴٪ نفت، (ب) ۷٪ نفت، (ج) ۱۰٪ نفت.

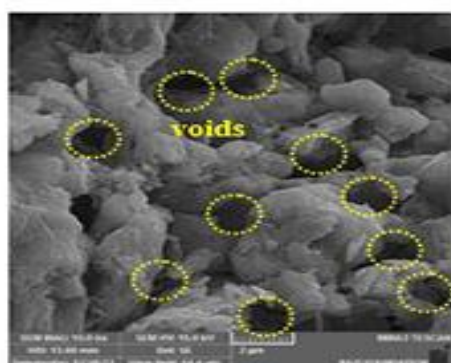
در چرخه‌ی ۳ (شکل ۱۳)، کلیه‌ی نمونه‌های آلوده به نفت بدون سیمان از بین رفته‌اند. نمونه‌های آلوده به ۴، ۷، و ۱۰ درصد نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان به ترتیب مقاومت ۱۸/۰، ۱۲/۶، و ۷/۹ مگاپاسکال داشته‌اند، که نسبت به نمونه‌های مشابه از لحاظ میزان درصد نفت و سیمان، اما در سیکل ۱، ۴۱/۹، ۲۳/۳، و ۱۵/۸ درصد افزایش مقاومت داشته‌اند.

در چرخه‌ی ۶ (شکل ۱۴)، همه‌ی نمونه‌های حاوی ۷ و ۱۰ درصد نفت در آب متلاشی شده‌اند. علاوه بر این، نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت، تثبیت‌نشده با سیمان و تثبیت‌شده با ۳٪ سیمان، در آب متلاشی شده‌اند. با این حال، زمانی که درصد سیمان به ۶ و ۹ درصد افزایش یافته است، نمونه‌ها از خود دوام نشان داده‌اند.

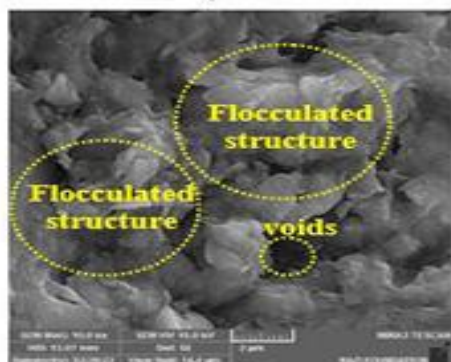
² Oluwatuyi

¹ Rabab'ah

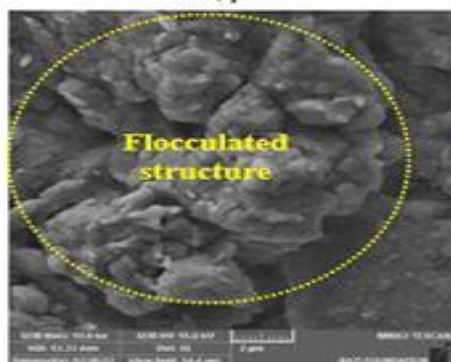
ناپیوسته (شکل ۱۶- الف)، به ساختار فولکوله سوق پیدا کرده است. ملاعباسی و همکاران (۲۰۲۲)^[۴۱] بیان کرده‌اند که کریستاله شدن محصولات جدید در نواحی انتقال ممکن است از واکنش بین سیمان و ذرات خاک باشد، که تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را منجر می‌شود. ژل مذکور از پیدایش مقدار بیشتر هیدروکسید در نواحی انتقال جلوگیری می‌کند و مقاومت را افزایش می‌دهد. نتایج مطالعه‌ی هی^۱ و همکاران (۲۰۲۳)^[۴۱] نشان می‌دهد که سیمان ممکن است با هوا و آب واکنش نشان دهد تا کریستال‌های فیبری ایجاد کند، که هم‌پوشانی آن‌ها ساختار شبکه‌ای را ایجاد می‌کند و ارتباط متقابل بین ذرات را به‌طور مؤثری بهبود می‌بخشد. شکل ۱۶- ج، نمونه‌ی خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک را نشان می‌دهد، که در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت‌نشده، ساختاری فولکوله را نشان می‌دهد. سلطانی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۸)^[۴۲] نشان داده‌اند که واکنش پوزولانی خاک با آهک موجب تشکیل



(الف)



(ب)



(ج)

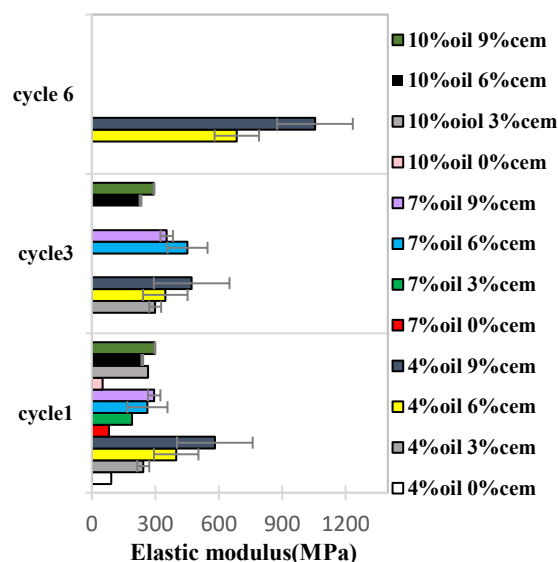
شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها: (الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌نشده، (ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان، (ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک.

مدول کشسانی نمونه‌ی خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان در چرخه‌ی ۶، ۲/۲ برابر مقدار در چرخه‌ی ۳ است. همچنین، مدول کشسانی نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان در چرخه‌ی ۳، ۱/۲ برابر مقدار در چرخه‌ی ۱ بوده است. بیشترین مقادیر مدول کشسانی در نمونه‌های خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶ و ۹ درصد سیمان بوده‌اند، که به‌ترتیب مقادیر ۶۸۵/۶ و ۱۰۵۵/۵ مگاپاسکال داشته‌اند. این مقادیر نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳، ۹۷/۳ و ۱۲۳/۵ درصد افزایش یافته‌اند.

۷.۵. آنالیز ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی خاک رسی تثبیت‌نشده و خاک تثبیت‌شده با سیمان و آهک در شکل ۱۶ مشاهده می‌شوند. میکروگراف-های FESEM با وضوح بالا (با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر) برای مقایسه‌ی بهتر برای همه‌ی نمونه‌ها ارائه شده‌اند. بررسی رفتار ریزساختاری خاک از آن جهت نقش مهمی در درک رفتار خاک دارد که مقاومت برشی خاک از تماس ذرات آن انتقال پیدا می‌کند. در حقیقت، ضعیف‌ترین ناحیه در عوامل محدودکننده‌ی مقاومت خاک، ناحیه‌ی انتقال (فضاهای خالی بین ذرات) است. حجم و اندازه‌ی فضاهای خالی نواحی انتقال، مقاومت آن را مشخص می‌کنند. با توجه به نوع افزودنی استفاده‌شده در تثبیت خاک، مقاومت نواحی انتقال ممکن است از توده‌ی خاک پایه بیشتر شود.

در شکل ۱۶- الف، تصویر FESEM خاک آلوده به نفت ۱۰٪ و تثبیت‌نشده، ساختار ناپیوسته‌ای را نشان می‌دهد؛ که در آن، حفره‌های برجسته‌ی درون مجموعه در ریزپارچه‌ی خاک تثبیت‌نشده به دلیل عدم وجود محصولات هیدراتاسیون مشاهده می‌شوند. شکل ۱۶- ب، تصویر نمونه‌ی خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان را نشان می‌دهد؛ که در آن، تعداد کمتری از فضاهای خالی مشاهده می‌شود و به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که ساختار



شکل ۱۵. مدول کشسانی نمونه‌های خاک آلوده به درصد‌های مختلف نفت و تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف سیمان پس از طی چرخه‌های تر- خشک.

¹ He

سیمان به خاک آلوده، موجب شروع واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته شده است، که به دنبال آن افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آلوده به نفت و تثبیت‌شده با سیمان رخ داده است. علاوه بر این، با مقایسه‌ی نتایج بین نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده، شدت پیک کمتری در کلسیت مشاهده شده است. این امر نشان‌دهنده‌ی انحلال تعدادی از فازهای معدنی و به‌طور بالقوه ایجاد ژل‌های سیمانی است.^[۴۶]

۶. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی دوام و ریزساختار خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت‌شده با استفاده از سیمان و آهک بوده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده به نفت، تأثیر قابل توجهی در مقاومت تک‌محوری و مدول کشسانی دارد. این نتایج کلیدی از نتایج پژوهش حاضر به‌دست آمده است:

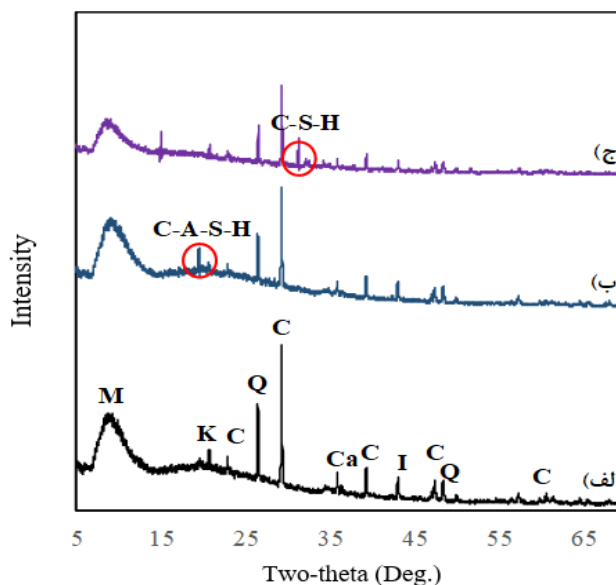
- با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال‌شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود. افزودن آهک و سیمان به خاک آلوده به نفت نیز باعث کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه می‌شود، زیرا مواد افزودنی ذکر شده باعث شروع فعل و انفعال‌های شیمیایی می‌شوند که به تثبیت و استحکام مخلوط کمک می‌کند.
- استفاده از آهک به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده در خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند بهبود قابل توجهی در دوام و مقاومت خاک‌های آلوده به نفت در برابر چرخه‌های تر-خشک ایجاد کند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد آهک در نمونه‌های آلوده به نفت، منجر به افزایش مقاومت تک‌محوری و مدول کشسانی می‌شود؛ و در نتیجه، افزایش پایداری و استحکام خاک را ایجاد می‌کند. این پدیده به واکنش آهک با خاک بر می‌گردد، که خواص مکانیکی بهبودیافته‌ی ارائه می‌دهد.

- با توجه به نتایج آزمایش‌ها، افزودن سیمان به خاک‌های آلوده به نفت، بهبود قابل توجهی در دوام و مقاومت آن‌ها در برابر چرخه‌های تر-خشک ایجاد می‌کند؛ که ناشی از تغییراتی است که سیمان در خواص مکانیکی و میکروساختاری خاک‌ها ایجاد می‌کند. با افزایش درصد سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها بهبود یافته و مقادیر مدول کشسانی آن‌ها نیز افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهند که سیمان می‌تواند به‌عنوان یک ماده‌ی تثبیت‌کننده مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی و پایداری خاک‌های آلوده به نفت استفاده شود.

- با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشاهده می‌شود که افزودن سیمان و آهک به خاک‌های آلوده به نفت باعث ایجاد ساختاری فولکوله و جامدتر در خاک می‌شود. این تغییرات ناشی از تشکیل محصول‌های هیدراتاسیون و پوزولانی سیمان و آهک با ذرات خاک است، که منجر به ایجاد ارتباط متقابل بین ذرات و افزایش مقاومت آن‌ها می‌شود.

تقدیر و تشکر

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی اهواز- ایران انجام شده است.



شکل ۱۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها: (الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌نشده، (ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۶٪ آهک، (ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت‌شده با ۹٪ سیمان.

C: کلسیت؛ Q: کوارتز؛ I: ایلیت؛ M: مونت موریلونیت؛ Ca: سیلیکات کلسیم؛ K: کانولینیت، C-S-H: هیدرات سیلیکات کلسیم؛ C-A-S-H: هیدرات آلومینیوم سیلیکات کلسیم.]

ترکیب‌های سمنتاسیون شده است، که مواد چسباننده‌ی مذکور، ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و سبب کاهش خلل و فرج خاک خواهند شد و حفره‌های موجود در خاک کمتر مشاهده می‌شوند

۸.۵. آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) برای خاک آلوده‌ی تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با مواد افزودنی در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. ترکیب‌های کانی-شناسی خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده تقریباً یکسان است و کانولینیت، کوارتز، کلسیت، ایلیت، سیلیکات کلسیم، و مونت موریلونایت، کانی‌های اصلی را تشکیل می‌دهند. اما علاوه بر کانی‌های مذکور، ژل C-A-S-H، به‌عنوان یک فاز کانی‌شناسی جدید، در خاک تثبیت‌شده با آهک شناسایی شده است (شکل ۱۷-ب). این نتایج با گزارش‌های قبلی^[۴۴] مطابقت دارد و نشان می‌دهد که محصولات هیدراتاسیون در حال توسعه و شکل‌گیری بوده‌اند.

در نتیجه، هیدراتاسیون آهک در خاک رسی، یون‌های آزاد Ca^{2+} و OH^- می‌شوند و یک محیط قلیایی در خاک ایجاد می‌کنند، که منجر به حل شدن آلومینا و سیلیس مواد افزودنی و خاک رسی می‌شود. آلومینا و سیلیس محلول با یون‌های Ca^{2+} ترکیب می‌شوند و هیدرات‌های آلومینیوم سیلیکات کلسیم (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهند. افزایش گزارش‌شده در مقاومت رس عمدتاً به حضور ژل C-A-S-H نسبت داده می‌شود، که ماتریس خاک را متصل و ساختار فولکوله ایجاد می‌کند.^[۴۴] بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آهک خواص پوزولانی دارد و فرآیند هیدراتاسیون را تسریع می‌بخشد.

در خاک تثبیت‌شده با سیمان، فاز جدید C-S-H نیز شناسایی شده است (شکل ۱۷-ج). ناصحی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۴۵] بیان کرده‌اند که اضافه‌کردن

منابع - References

- Chen, C. and Zhang, L., 2023. Hydro-mechanical behaviour of soil experiencing seepage erosion under cyclic hydraulic gradient. *Géotechnique*, 73(2), pp.115-127. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.340>
- Mahmood, Y., Afrin, T., Huang, Y. and Yodo, N., 2023. Sustainable development for oil and gas infrastructure from risk, reliability, and resilience perspectives. *Sustainability*, 15(6), p.4953. <https://doi.org/10.3390/su15064953>
- Chen, L., Li, K., Song, G., Zhang, D. and Liu, C., 2021. Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone. *Scientific Reports*, 11(1), p.12315. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91842-8>
- Joukar, A.R., Hajiani Boushehrian, A. 2020. Studying the behavior of strip foundation rested on the kerosene oil and gasoil contaminated sand slopes, *Shairf Journal of Civil Engineering*, 36(2.2), pp. 151-158 [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j30.2019.52129.2456>
- Little, D.I., Sheppard, S.R. and Hulme, D., 2021. A perspective on oil spills: what we should have learned about global warming. *Ocean & Coastal Management*, 202, p.105509. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105509>
- Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S.K. and Khatri, M., 2020. Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, 14, p.100305. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100305>
- Dermatas, D. and Meng, X., 2003. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering geology*, 70(3-4), pp.377-394. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00105-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00105-4)
- Nasr, A.M., 2014. Utilisation of oil-contaminated sand stabilised with cement kiln dust in the construction of rural roads. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10), pp.889-905. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893321>
- Khayat, N. and Nasiri, H., 2023. Study of Strength Characteristics and micro-structure analysis of soil stabilized with wastewater and polymer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp.1-12. <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00296-w>
- Nasiri, H., Khayat, N. and Mirzababaei, M. 2021. Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product. *Transportation Geotechnics*, 28, p.100531. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100531>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
- Karabash, Z., Al-Obaydi, M.A., Awad, M.A. and Al-Khashab, M.N., 2023. Geotechnical properties of clay soil contaminated with different types of oil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(4), pp.2677-2689. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02420-w>
- Khoshand, A., Alishirinpourfarkhad, A., Solhianari, M. and Tabiatnejad, B., 2022. Characterization and mechanism analysis of stabilized/solidified oil-contaminated soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15), p.1353. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10613-5>
- Nokande, S., Khodabandeh, M.A., Besharatinezhad, A., Nagy, G. and Török, Á., 2022. Effect of oil contamination on the behavior of collapsible soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(3), pp.775-784. <https://doi.org/10.3311/PPci.19636>
- Amir, H. and Abdoos, S., 2020. Application of lime and portland cement for improvement of clay contaminated with anthracene and glycerol. *Civil Infrastructure Researches*, 5(2), pp.111-122.
- Hajimohammadi, M. and Amir, H., 2021. Investigating the effects of portland cement and lime on improving glycerol-contaminated clay. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), pp.3045-3057.
- Alrubaye, A.J., Hasan, M. and Fattah, M.Y., 2016. Engineering properties of clayey soil stabilized with lime. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), pp.2434-2441.
- Sorsa, A. and Agon, E., 2022. Lime stabilization of expansive clay soil of Jimma town, Ethiopia. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 55(2), pp.211-222.
- Zaini, M.S.I. and Hasan, M., 2023. Effect of optimum utilization of silica fume and lime on the stabilization of problematic soils. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(1), pp.352-366.
- Renjith, R., Robert, D.J., Gunasekara, C., Setunge, S. and O'Donnell, B., 2020. Optimization of enzyme-based soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), p.04020091.
- Kennedy, C. and Theophilus, A.A., 2023. Highway pavement stabilization of soil with costus bracteatus rowlee and cement. *South Asian Res J Eng Tech*, 5(2), pp.6-14.
- Ahmad, S., Al-Amoudi, O.S.B., Mustafa, Y.M., Maslehuddin, M. and Al-Malack, M.H., 2020. Stabilization and solidification of oil-contaminated sandy soil using portland cement and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), p.04020220.
- Amadi, A. A., and A. O. Eberemu. 2012. Performance of cement kiln dust in stabilizing lateritic soil contaminated with organic chemicals. *Adv. Mater. Res.* 367: 41-47.
- Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N. and Chinkulkijniwat, A., 2014. Influence of wet-dry

- cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), pp.633-643.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.19435533.0000853](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0000853)
25. Puri VK. 2000. Geotechnical aspects of oil-contaminated sands. *Soil and Sediment Contamination*. 9(4):359-74.
 26. Soltani-Jigheh, H., Molamahmood, H.V., Ebadi, T. and Soorki, A.A., 2018. Effect of oil-degrading bacteria on geotechnical properties of crude oil-contaminated sand. *Environmental & Engineering Geoscience*, 24(3), pp.333-341.
 27. Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B.B. and Nahazanan, H., 2015. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*, 59, pp.372-381.
 28. Haghsheno H, and Arabani M., 2022. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 29(22):32670-701.
 29. Shah, S.J., Shroff, A.V., Patel, J.V., Tiwari K.C. and Ramakrishnan, D., 2003. Stabilization of fuel oil contamination soil-a case study. *Geotech. Geol. Eng.*, 21: 415-427.
 DOI:10.1023/B:GEGE.0000006052.61830.1a
 30. Oluremi, J.R. and Osuolale, O.M., 2014. Oil contaminated soil as potential applicable material in civil engineering construction. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(10), pp.87-99.
 31. Abdulhamid, S.N., Hasan, A.M. and Aziz, S.Q., 2021. Solidification/stabilization of contaminated soil in a south station of the Khurmala oil field in Kurdistan region, Iraq. *Applied Sciences*, 11(16), p.7474.
 32. Mohamed, A.A.M.S., Yuan, J., Al-Ajamee, M., Dong, Y., Ren, Y. and Hakuzweyezu, T., 2023. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e01894.
 33. Shooshpasha, I. and Shirvani, R.A., 2015. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. *Geomech Eng*, 8(1), pp.17-31.
 34. Akinwumi, I. I., C. Booth, D. Diwa, and P. Mills. 2016. Cement stabilization of crude-oil-contaminated soil. *Proc. CE Geotech. Eng.* 169 (4):336-345.
 35. Li, M., Yu, H., Zheng, D., Klemeš, J.J. and Wang, J., 2021. Effects of salt and solidification treatment on the oil-contaminated soil: a case study in the coastal region of Tianjin, China. *Journal of Cleaner Production*, 312, p.127619.
 36. Behrooz, F., Ahadian, J. 2014. Effect of adding lime to the consolidation properties of clay – gypsum soils, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 37(2), pp. 61-70. [In Persian]
 37. Rabab'ah, S.R., Sharo, A.A., Alqudah, M.M., Ashteyat, A.M. and Saleh, H.O., 2023. Effect of using oil shale ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 19, p.e02508.
 38. Oluwatuyi, O.E., Ojuri, O.O. and Khoshghalb, A., 2020. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(1), pp.160-167.
 39. Wang, Y., Guo, P., Li, X., Lin, H., Liu, Y. and Yuan, H., 2019. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests. *Applied Sciences*, 9(5), p.900.
 40. MolaAbasi, H., Ahmadi Chenarboni, H., Lajevardi, S., Shirkavand, A. 2022. The effect of cement and zeolite on undrained shear strength of the expansive clay, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 38.2(3.2), pp. 11-20.
 doi:10.24200/j30.2022.59536.3059 [In Persian]
 41. He, X., Yang, J., Niu, M., Zhang, G. and Li, G., 2023. Study on expansion effect and hydration characteristics of ultra-high strength cement-based grouting materials based on humidity compensation. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e01941.
 42. Soltaninejad, S., Hamidi, S., Marandi, S. M. 2018. The influence of different curing conditions on durability of lime-stabilized clay soils (micro- and macro- structure study), *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 4(3), pp. 83-98.
 doi: 10.22075/jtie.2018.12815.1249
 43. Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J.S., Rico, A. and Rodríguez, J., 2011. A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(12), pp.2043-2056.
 44. Stefanini, L., Ansari, D., Walkley, B. and Provis, J.L., 2024. Characterisation of calcined waste clays from kaolinite extraction in alkali-activated GGBFS blends. *Materials Today Communications*, 38, p.107777.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107777>
 45. 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.
 46. Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A., 2011. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(2), pp.73-82.