

# بهبود دوام و مدول الاستیسیته خاک‌های آلوده به نفت در چرخه‌های تر-خشک با استفاده از

## ثبیت با مواد سنتی

حدیث نصیری<sup>۱</sup>، نوید خیاط<sup>۲\*</sup>، احد نظریپور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- دانشیار، گروه زمین شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- [hadisnassiri@gmail.com](mailto:hadisnassiri@gmail.com)

۲- [Navid.Khayat@iau.ac.ir](mailto:Navid.Khayat@iau.ac.ir)

۳- [ahad.nazarpour@iau.ac.ir](mailto:ahad.nazarpour@iau.ac.ir)

### چکیده:

اگرچه مطالعات قبلی بطور گسترده رفتار مقاومتی خاک آلوده به نفت را مورد بررسی قرار داده‌است، اما هنوز درک دقیقی از دوام خاک آلوده به نفت در برابر چرخه‌های تر-خشک وجود ندارد. برای پر کردن این خلاء علمی، این تحقیق بر روی ویژگی‌های دوام خاک‌های آلوده به نفت متمرکز شده‌است. مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی تراکم، دوام و آنالیزهای ریزساختاری انجام شد. برای این منظور خاک در غلظتهای ۴، ۷ و ۱۰ درصد به نفت آلوده شد و سپس در درصدهای ۰، ۳، ۶ و ۹ بطور جداگانه با آهک و سیمان تثبیت شد. نتایج نشان دادند که با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش یافت. بیشترین دوامها مربوط به نمونه حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان و نمونه حاوی ۷٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک پس از گذراندن ۶ چرخه تر-خشک بوده- است. تصاویر میکروسکوپی نشان داد که استفاده از سیمان و آهک به عنوان عوامل تثبیت‌کننده منجر به ساختار متراکمتر خاک آلوده به نفت شده‌است.

### واژگان کلیدی:

چرخه‌های تر-خشک، تثبیت، دوام، خاک‌های آلوده، نشت نفت.

---

\* نوید خیاط، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول مقاله: [Navid.Khayat@iau.ac.ir](mailto:Navid.Khayat@iau.ac.ir)

# Enhancing the durability and elastic modulus of oil-contaminated soils in wet-dry cycles through stabilization with traditional materials

H. Nasiri <sup>۱</sup>, N. Khayat <sup>۲</sup>, A. Nazarpour <sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>- Ph.D Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

<sup>۲</sup>- Associate Prof., Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

<sup>۳</sup>- Associate Prof., Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

## 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 ۴, ۷ and ۱۰% and then stabilized with lime and cement in concentrations of ۰, ۳, ۶ and ۹% separately. Initial laboratory experiments, including Atterberg limits and compaction tests, were conducted. Subsequently, durability tests were performed to examine wet-dry cycles in ۱, ۳, and ۶ 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 sample containing ۴% oil and ۹% cement in the ۶th cycle, showing a ۴۲% increase in resistance compared to a similar sample with the same percentage of oil and cement in the ۳rd cycle. Additionally, the elasticity modulus of the oil-contaminated soil sample with ۴% oil and stabilized with ۶% lime was ۲ times that of the ۱st cycle in the ۳rd cycle and ۲,۸ times that of the ۳rd cycle in the ۶th 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.

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

## ۱ - مقدمه



شکل ۱. نمایی از نشت نفت

فرسایش خاک یک پدیده طبیعی است که توسط عواملی همچون باد و آب ایجاد می‌شود و باعث حذف لایه‌های بالایی خاک می‌گردد. این فرآیند ممکن است به طور تدریجی در طول زمان یا به صورت سریع رخ دهد [۱]. زیرساخت‌های حمل‌ونقل، به عنوان مثال جاده‌ها، به راحتی تحت تأثیر فرآیند فرسایش قرار می‌گیرند، که منجر به ایجاد شکاف‌های متعدد کوچک یا بزرگ در سطح آنها می‌شود. زیرساخت‌ها نه تنها تحت تأثیر عوامل طبیعی مانند فرآیند فرسایش قرار دارند، بلکه تداخل انسانی نیز در ساخت‌وساز آنها نقش دارد [۲]. علاوه بر این، شرایط و چرخه‌های مختلف مرتبط با موقعیت جغرافیایی آنها در مناطق اقلیمی متفاوت، به عنوان یک عامل مهم، تأثیر گذار است. این مکانیسم‌ها می‌توانند فرآیند تخریب زیرساخت‌ها را سرعت بخشند و چالش‌های حفاظتی را برای پژوهشگران ایجاد کنند. محققان در سراسر جهان نتایج تحقیقاتی در زمینه خصوصیات مکانیکی و ویژگی‌های فرسایشی مواد ژئوتکنیکی ارائه داده‌اند [۳].

از سوی دیگر، گسترش صنایع شیمیایی پس از ظهور دوره صنعتی، به افزایش چشمگیر آلاینده‌ها در محیط طبیعی و انسانی منجر شده‌است [۴]. در میان صنایع شیمیایی مختلف، صنعت پتروشیمی به رغم سرمایه‌گذاری و توجه زیاد به انرژی‌های جایگزین، همچنان یکی از اصلی‌ترین بازیگران در چشم‌انداز انرژی جهان باقی مانده‌است. امروزه، نفت همچنان یکی از نیازهای اساسی انرژی در جوامع مدرن می‌باشد. با وجود تمامی تدابیر ایمنی و احتیاطی در صنعت نفت، حوادث نشت نفت در فرایند تولید، حمل و نقل، پالایش و مصرف نفت یک اتفاق ناگزیر است [۵]. تعداد قابل توجهی از مناطق جهان تحت تأثیر آلودگی نفت قرار گرفته‌اند و نیاز به اجرای تدابیر ترمیمی و مدیریت مناسب دارند [۶]. اثرات وارد شده توسط نفت بر خاک‌ها و مشکلات جدی محیطی نشان‌دهنده مسائل پیچیده‌ای است که نیازمند درک بهتر آنها می‌باشد. به طور کلی، نشت نفت یک مسئله حیاتی در مناطق غنی از نفت در سراسر جهان محسوب می‌شود. شکل ۱، نمایی از اثرات نشت نفت در کانزاس، امریکا، بر روی زمین را نشان می‌دهد.

یک راه حل ممکن برای کاهش تأثیرات نامطلوب خاک‌های آلوده بر محیط زیست، استفاده مؤثر از این خاک‌ها به عنوان مصالح ساختمانی است [۷]. ادغام آنها در زیرساخت‌ها، به عنوان 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 [۸]. 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 به عنوان مصالح تحمیل می‌کنند [۹] بنابراین استفاده از خاک آلوده نفتی و تثبیت شده با مواد افزودنی، به دو دلیل می‌تواند مورد توجه باشد. اولاً، این روش می‌تواند هزینه و 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 مورد نیاز توسط فرآیندهایی مانند مخلوط کردن با مواد افزودنی، تثبیت نمود. ثانیاً، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت شده می‌تواند منجر به بازیابی و استفاده مجدد از ارزش خاک آلوده شود. با بهره‌گیری از فرآیندهای بهینه‌سازی، خاک می‌تواند به یک وضعیت مناسب برای استفاده مجدد در پروژه‌های ساختمانی یا عمرانی تبدیل شود [۱۰]. این دیدگاه به طور قابل توجهی هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و مزایای اقتصادی ایجاد می‌کند. از این منظر، استفاده از خاک آلوده به نفت و تثبیت شده به عنوان یک رویکرد پایدار فرصتی برای مدیریت و استفاده مؤثر از خاک آلوده به نفت در مکان‌های تحت تأثیر نشت نفت ارائه می‌دهد. همچنین، با توجه به طبیعت آب‌گریز نفت [۱۱].

استفاده از این ماده در ساخت جاده‌های درجه دوم می‌تواند به جلوگیری از نفوذ آب کمک کرده و فرآیند تخریب سایت خاکی را در چرخه‌های خشک و تر به تأخیر بیندازد.

تعداد زیادی از تحقیقات به مشخصات خاک‌های آلوده به نفت و کاربردهای آن در مهندسی متمرکز شده‌اند. تحقیق [۱۲] اثر آلودگی نفت بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک را بررسی می‌کند. نتایج نشان داده‌است که دامنه خمیری خاک در اثر آلودگی تقریباً دو سوم کاهش یافته است. نتایج تحقیق [۱۳] نشان داد مقدار مقاومت فشاری محصور نشده<sup>۱</sup> با افزایش درصد نفت تا ۵ درصد بهبود یافت و سپس با افزایش درصد نفت در همه نمونه‌ها کاهش پیدا کرد. در یک مطالعه انجام شده توسط [۱۱]، مشخص شد که زیست پالایی آلودگی خاک را حدود ۵۰ درصد کاهش داد. همچنین در مقایسه با خاک آلوده، زیست پالایی باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش نشست شد. مطالعه [۱۴] نشان داد که بر اساس آزمایش برش مستقیم، با افزایش آلودگی تا ۱۰ درصد نفت، چسبندگی خاک به ترتیب از ۱۴/۵ کیلوپاسکال به ۷/۳ کیلوپاسکال کاهش یافت که به دلیل کاهش شکل پذیری خاک بود. این نتایج نشان می‌دهند که تحقیقات انجام شده در زمینه ویژگی‌های خاک آلوده به نفت اهمیت بسیار بالایی دارند. این تحقیقات، پایه نظری قوی را برای مهندسی و اهداف رفع آلودگی فراهم می‌کنند و 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 نشت آلودگی‌های نفتی به زیرساخت‌ها اهمیت بسزایی دارد. به دنبال آلودگی‌های اطراف این تأسیسات ممکن است در زمان بهره‌برداری از چاه‌ها و تأسیسات نفتی، نیازمند خاک‌برداری و تعویض خاک باشد. این موضوع ممکن است باعث آسیب به محیط زیست شود و همچنین از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نباشد. بنابراین، انتخاب روش مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت برای استفاده مجدد از آنها، نیازمند بررسی بیشتری است.

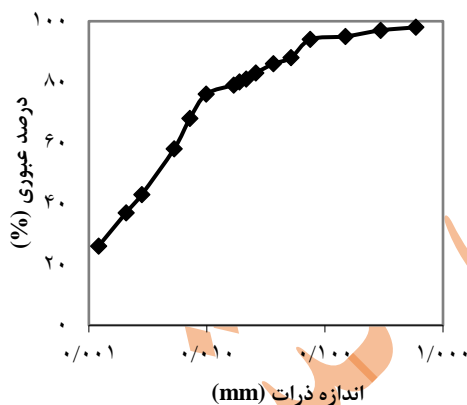
مرور ادبیات تحقیق در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون تعدادی پژوهش بر روی خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت آنها با استفاده از مواد مختلف صورت پذیرفته است، اما در پژوهش حاضر به بررسی خصوصیات دوام و ریزساختاری خاک‌های آلوده در اهواز

که مخازن و تأسیسات نفتی متعددی دارد، از طریق افزودن آهک و سیمان در درصد‌های مختلف به عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده پرداخته شده‌است. همچنین این تحقیق می‌تواند به بهبود مدیریت مسائل زیست‌محیطی و زیرساخت‌ها در این منطقه کمک کند و راهکارهای مؤثری برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت ارائه دهد.

## ۲- مواد

### ۲-۱- خاک

نمونه خاک رسی از اهواز، خوزستان، ایران تهیه شد. دامنه خمیری و حد روانی خاک به ترتیب ۲۷٪ و ۵۴٪ تعیین شد. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک جمع‌آوری شده در شکل ۲ ارائه شده‌است. خاک بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید خاک، به عنوان خاک رس دارای خمیری بالی (CH) طبقه بندی می‌شود. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی خاک را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد. ترکیبات غالب خاک Si و Al هستند.



شکل ۲. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه

مقدار	خصوصیات فیزیکی
۰	شن (%)
۶	ماسه (%)
۹۴	ریزدانه (%)
۵۴	حد روانی (%)
۲۸	حد خمیری (%)
۲۶	نشانه خمیری (%)
CH	طبقه بندی خاک (یونیفاید)

## ۲-۲- نفت

صورت گرفته در تثبیت با آهک نیز به کار رفته‌اند [۱۷-۱۹]. در شکل ۳ نمایش بصری آهک، سیمان، نفت و خاک را ارائه می‌دهد.

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی آهک و سیمان

ترکیبات شیمیایی		آهک	سیمان
		مقدار (%)	مقدار (%)
SiO <sub>2</sub>		۰,۹۵	۲۰,۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۰,۳۰	۵,۲۰
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۰,۲۴	۴,۶۵
CaO		۷۲,۰۴	۶۵,۵۰
MgO		۰,۶۴	۱,۸۰
Na <sub>2</sub> O		۰,۱۳	۰,۱۵
K <sub>2</sub> O		۰,۱۱	۰,۵۰
C <sub>2</sub> S		--	۵۹,۴۷
C <sub>3</sub> S		--	۱۴,۴۸
C <sub>4</sub> A		--	۶,۰۰
C <sub>3</sub> A <sub>f</sub>		--	۱۴,۰۰
SrO		۰,۳۱	--
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		۰,۰۴	--
L.O.I*		۲۵,۲۴	۱,۵۰

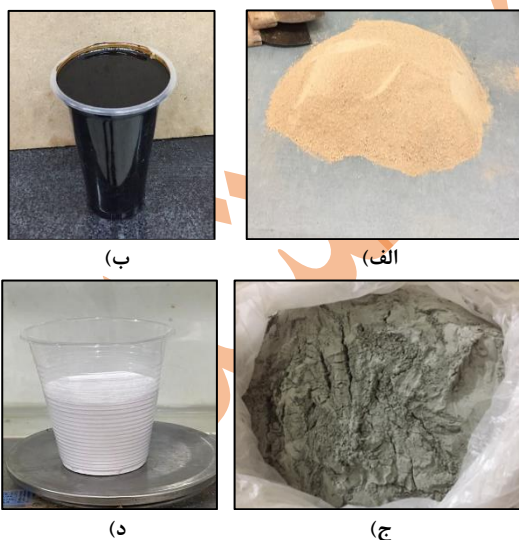
نفت مورد استفاده در این تحقیق، نفت خام نمک‌زدایی شده- است که از میدان نفت و گاز کارون ۱ در اهواز، ایران به دست آمده‌است. فرآیند نمک‌زدایی گازهای سمی و آب را از نفت حذف می‌کند. برای تعیین میزان نفت در این تحقیق، چند نمونه خاک از سایت‌های نفتی خوزستان جمع‌آوری و با استفاده از دستگاه استخراج سوکسله<sup>۲</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس غلظت‌های اندازه‌گیری شده، بیشترین میزان نفت ثبت شده در نمونه‌های خاک آلوده به نفت، ۱۰٪ بود. بنابراین، این درصد برای بررسی رفتار خاک آلوده و همچنین درصدهای کمتر شامل ۴ و ۷ درصد انتخاب شد. پس از به دست آوردن نفت خام و انتقال آن به آزمایشگاه، با استفاده از ترکیب دستی به عنوان یک تکنیک مصنوعی با خاک مخلوط گردید.

## ۲-۳- سیمان

به منظور تثبیت خاک مورد بررسی از سیمان پرتلند نوع II استفاده شده است که از کارخانه سیمان خوزستان واقع در خوزستان، ایران خریداری شد. درصدهای سیمان در تحقیق حاضر بر اساس مقالات اخیر در زمینه تثبیت خاک ۰,۳، ۶ و ۹ درصد در نظر گرفته شدند [۱۵ و ۱۶]. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی سیمان را نشان می‌دهد. SiO<sub>2</sub> و CaO مواد اصلی تشکیل‌دهنده سیمان هستند. قبل از استفاده از سیمان، آن را از الک شماره ۴۰ عبور داده شد.

## ۲-۴- آهک

آهک هیدراته با درجه خلوص بالای ۷۲٪ مطابق با الزامات تعیین شده توسط ASTM C۹۷۷ از شرکت خوزستان آهک در خوزستان ایران خریداری شد. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی آن را که توسط آنالیز فلورسانس اشعه ایکس<sup>۳</sup> تعیین شده‌است، نشان می‌دهد. طبق جدول ۲، همانطور که انتظار می‌رود، آهک در درجه اول از CaO تشکیل شده‌است. میزان آهک مورد استفاده در این تحقیق ۰٪، ۳٪، ۶٪ و ۹٪ بود که قبل از استفاده در مخلوط خاک از الک شماره ۴۰ عبور داده شد. درصدهای انتخابی آهک در سایر مطالعات



شکل ۳. نمایشی از مواد مورد استفاده در این تحقیق (الف) خاک (ب) نفت (ج) سیمان (د) آهک

### ۳- تهیه نمونه

#### ۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های خاک آلوده به نفت

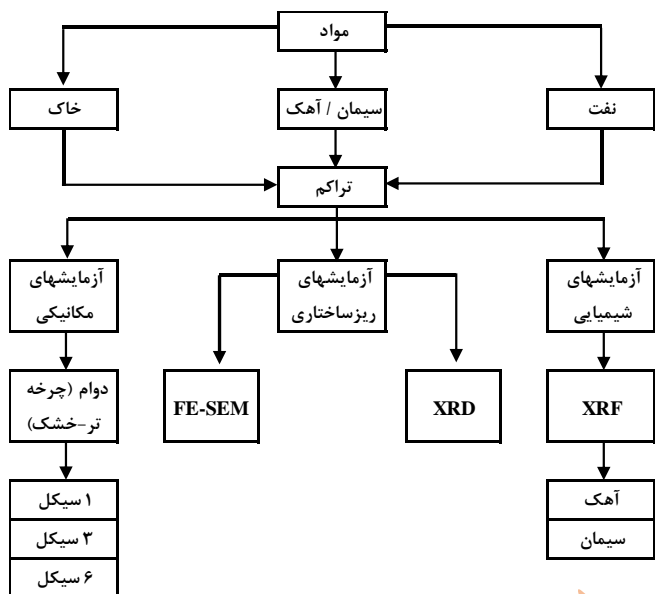
خاک در ابتدا تحت هوا خشک کردن قرار گرفت و سپس با استفاده از الک شماره ۸ (فیلتر ۲/۳۶ میلی متری) الک شد [۲۰ و ۲۱]. پس از آن، مخلوط نفت و خاک کاملاً مخلوط شده و به طور یکنواخت هم زده شد. سپس مخلوط حاصل در یک کیسه نایلونی به مدت یک هفته قرار داده شد. برای دستیابی به آلودگی مناسب خاک، معمولاً گزارش شده است که خاک باید به درصد مورد نیاز 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].

#### ۳-۲- افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده نفتی

ابتدا خاک آلوده به نفت با نسبت‌های مختلف آهک و یا سیمان بطور جداگانه مخلوط شد تا به خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهد. سپس آب مقطر (به اندازه درصد رطوبت بهینه بدست آمده از آزمایش تراکم) به آن اضافه شد تا جاییکه ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود. این مخلوط با دقت میکس شد تا زمانی که یک مخلوط یکنواخت به دست آمد. سپس مخلوط حاصل به کیسه‌های نایلونی منتقل شد و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد.

#### ۴- برنامه آزمایشگاهی

فلوچارت تحقیق در شکل ۴ نشان داده است. جهت تهیه نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر، از مخلوط‌های تهیه شده در بخش ۳.۲ استفاده گردید. با استفاده از قالب تراکم استاندارد با قطر ۴ اینچ، مخلوط خاک و نفت و تثبیت کننده در سه لایه به درون قالب تراکم ریخته شد. هر لایه با استفاده از ۲۵ ضربه چکش، متراکم شد. آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM D۶۷۲ انجام گردید. پس از انجام آزمایش تراکم، اقدام به نمونه‌گیری با استفاده از مغزه‌گیر شد. با استفاده از این روش، در هر بار آزمایش تراکم ۳ نمونه با قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر تهیه گردید. قالب تراکم استاندارد و مغزه‌گیر در شکل ۵ نشان داده شده است. از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر (شکل ۴ج)، جهت انجام آزمایشات دوام استفاده گردید.



شکل ۴. فلوچارت تحقیق



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. نمایی از نحوه تراکم و مغزه‌گیری (الف) قالب تراکم استاندارد (ب) مغزه‌گیر (ج) نمونه خاک با ابعاد ۳۸×۷۶ میلی‌متر

#### ۴-۱- آزمایش تراکم پروکتور استاندارد

آزمایش تراکم در قالبی به حجم ۹۴۴ سانتیمتر مکعب و توسط وزنه ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۳۰ سانتیمتری رها می‌گردد، انجام شد. در این آزمایش، سه لایه خاک، هر کدام با ۲۵ ضربه، مطابق با



استاندارد ASTM D698 متراکم گردید. مطابق با این استاندارد درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک بدست آمد.

#### ۴-۲- آزمایش دوام

به منظور انجام آزمایش دوام مطابق با استاندارد ASTM D559، نمونه‌های تهیه شده، به مدت پنج ساعت درون آب قرار گرفتند و متعاقباً به مدت ۴۰ ساعت در آون نگهداری شدند. این روش برای ۱، ۳ و ۶ سیکل تکرار شد. طبق مقالات منتشر شده در زمینه دوام، تعداد چرخه‌های تر و خشک ممکن 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، به منظور اطمینان بیشتر، در این تحقیق تعداد ۶ چرخه تر-خشک در نظر گرفته شده است. پس از طی چرخه‌های تر-خشک آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. پس از گذراندن سیکل ۱ برای انجام آزمایش از دستگاه مقاومت فشاری تک محوری با ظرفیت ۷۰۰ کیلوگرم و دارای ساعت اندیکاتور جابجایی سنج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده گردید. پس از گذراندن سیکل‌های ۳ و ۶، بدلیل بالا بودن اعداد قرائت شده بیش از ظرفیت دستگاه تک محوری خاک برای انجام آزمایش از دستگاه جک بتن شکن با ظرفیت ۴ تن استفاده شد. لازم به ذکر است هر نمونه آزمایشی با سه بار تکرار انجام پذیرفت و بر روی نتایج بدست آمده میانگین‌گیری انجام شد.

#### ۴-۳- آزمایش‌های ریزساختاری

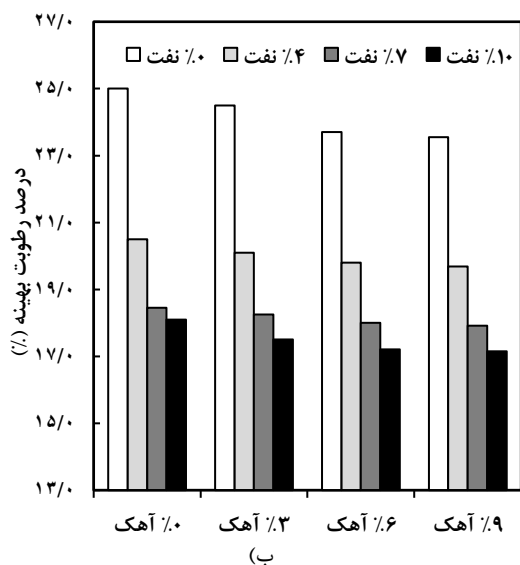
آنالیز طیف سنجی پراش اشعه ایکس<sup>۴</sup>، برای تجزیه و تحلیل فازهای موجود در خاک استفاده شد. آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۵</sup> به منظور تجزیه و تحلیل ریزساختار خاک انجام شد. نمونه‌ها پس از پوشاندن با طلا، اسکن شدند و تعدادی تصویر دیجیتال با بزرگنمایی‌های مختلف ثبت شد. به منظور درک بهتر فرآیندهای ریزساختار آهک و سیمان در خاک آلوده به نفت، آنالیز FESEM بر روی نمونه‌های منتخب انجام شد.

#### ۵- نتایج و بحث

#### ۵-۱- نتایج آزمایشات تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با آهک

شکل ۶ نتایج آزمایش‌های تراکم را به صورت حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه در مقابل درصد‌های مختلف آهک برای نمونه‌های غیرآلوده و آلوده به نفت نشان می‌دهد. به طور کلی، برای نمونه‌های خاک آلوده به نفت، مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد نفت کاهش یافت. وجود نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود [۱۱]. با افزایش درصد نفت به ۱۰ درصد، مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک خاک به ۱۳/۸ کیلونیوتن بر متر مکعب در مقایسه با مقدار ۱۴/۵ کیلونیوتن بر متر مکعب برای خاک غیرآلوده کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش تقریباً ۴/۸ درصدی می‌باشد. نفت در مقایسه با آب ویسکوزیته بالاتری از خود نشان می‌دهد که منجر به تلفات انرژی در طول فرآیند تراکم می‌شود [۲۵]. از طرفی نفت دانسیته کمتری نسبت به آب دارد. بنابراین، هنگامی که نفت به جای آب، بخشی از فضای منافذ را اشغال می‌کند، دانسیته را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، در نتیجه مقادیر حداکثر 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 توده خاک را مرطوب می‌کند. بنابراین، آب نمی‌تواند به طور موثر در تراکم تاثیر بگذارد [۲۶].

علاوه بر این، مشاهده شده است که افزودن آهک به خاک آلوده و تثبیت شده به نفت منجر به کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک غیر آلوده می‌شود. به عنوان مثال، حداکثر وزن مخصوص خشک در نمونه حاوی ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت آهک به دست آمد که در مقایسه با نمونه مشابه آلوده به نفت بدون آهک، افزایش ۲/۵٪ را نشان داد. به طور مشابه، نمونه‌های با ۱۰ درصد آلودگی نفت و تثبیت آهک ۶ درصد و ۹



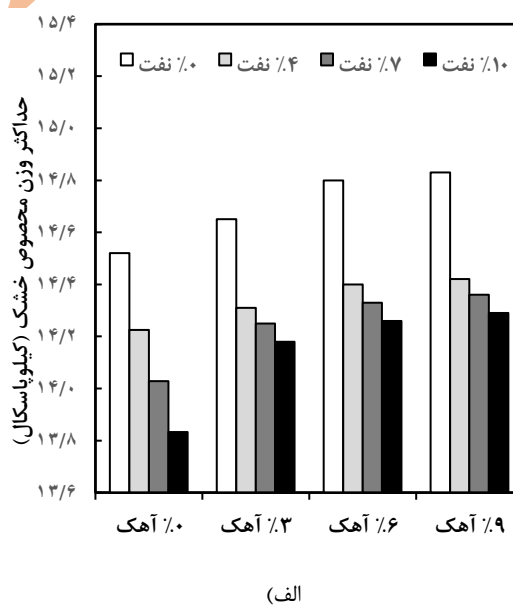
شکل ۶. نتایج آزمایشات تراکم با درصد‌های مختلف آلودگی نفتی و تثبیت شده با درصد‌های مختلف آهک

## ۵ - ۲ - نتایج آزمایشات تراکم خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با سیمان

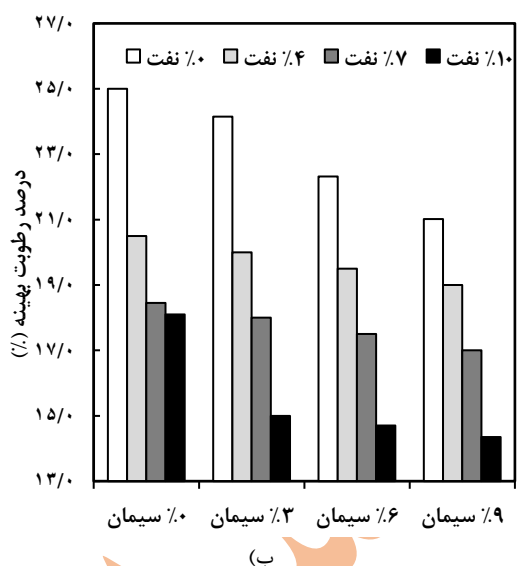
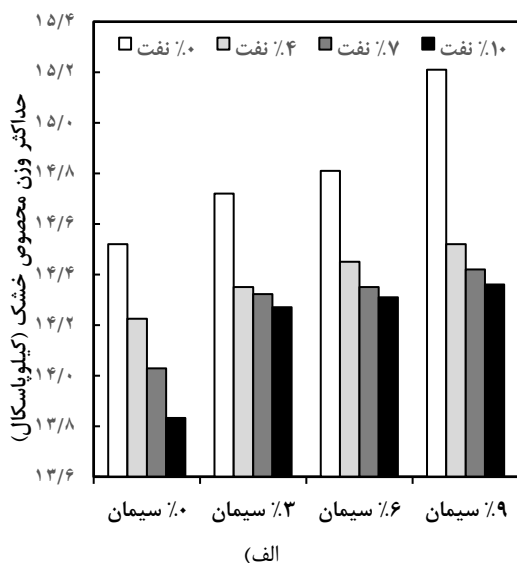
شکل ۷ نتایج آزمایش‌های تراکم خاکهای غیرآلوده و آلوده به نفت را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر وزن واحد خشک خاک غیرآلوده ۱۴/۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب بوده، اما وقتی ۴ درصد نفت به خاک اضافه می‌شود، این مقدار به ۱۴/۲ کیلونیوتن بر متر مکعب کاهش می‌یابد (کاهش ۲/۱ درصد). به طور مشابه، رطوبت بهینه از ۲۵٪ به ۲۰/۵٪ (کاهش ۱۸٪) کاهش یافت. هنگامی که درصد نفت از ۴٪ به ۷٪ افزایش یافت، حداکثر وزن واحد خشک تقریباً ۱/۳٪ بدون تغییرات قابل توجه کاهش یافت، در حالی که رطوبت بهینه به ۱۰٪ کاهش یافت. با این حال، با افزایش بیشتر در درصد نفت از ۷٪ به ۱۰٪، حداکثر وزن واحد خشک به ۱۳/۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب کاهش یافت، و رطوبت بهینه ۱/۹٪ کاهش پیدا کرد. 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 تنیده بین ذرات جلوگیری می‌کند که در نتیجه باعث افزایش لغزش با افزایش مقدار نفت و ویسکوزیته می‌شود و در نهایت تراکم پذیری خاک آلوده را کاهش می‌دهد. مشاهدات مشابهی توسط [۲۹ و ۳۰] انجام شد. همچنین کاهش

درصد به ترتیب افزایش ۳/۱ و ۳/۳ درصدی را نشان دادند. 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 این تغییرات، اثر روانکاری نفت بر 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٪ بدست آمد که نشان‌دهنده کاهش ۳/۳٪ در مقایسه با نمونه مشابه آلوده به نفت بدون آهک است. به همین ترتیب، نمونه‌های با ۱۰ درصد آلودگی نفت و تثبیت شده با ۶ و ۹ درصد آهک به ترتیب کاهش ۴/۹ و ۵/۳ درصدی را تجربه کردند. 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 بهینه لازم برای فعل و انفعالات شیمیایی بهینه بین آهک و آب کاهش یافت. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان درصد رطوبت بهینه تفاوت معنی‌داری را در نمونه‌های خاک آلوده به درصد آهک ۶ و ۹ درصد نشان نمی‌دهند.







شکل ۷. نتایج آزمایشات تراکم با درصدهای مختلف آلودگی نفتی و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان

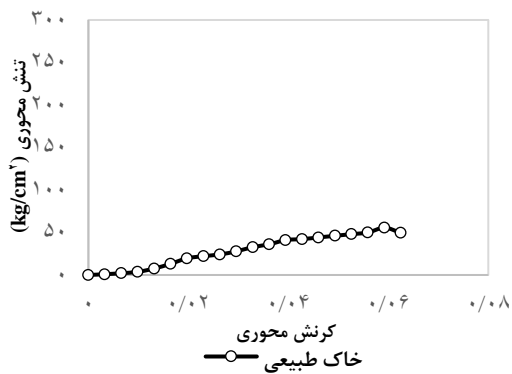
### ۵ - ۳ - نتایج آزمایشات دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با آهک

در شکل ۸، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه تر-خشک ارائه شده است. بر اساس این شکل، می‌توان اظهار داشت که تمام نمونه‌های خاک آلوده به نفت، تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با آهک و

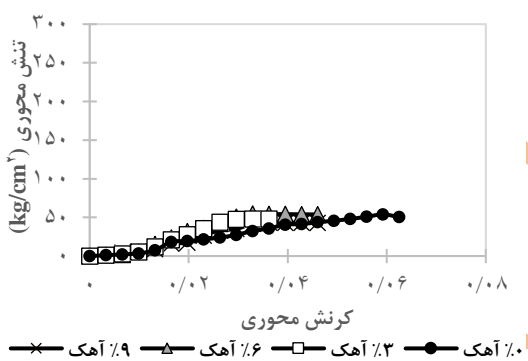
حداکثر وزن واحد خشک به دلیل افزایش درصد نفت ممکن است به اثر وزن مخصوص نفت بر روی خاک نسبت داده شود [۳۱].

علاوه بر این، مشاهده شده است که افزودن سیمان به خاک آلوده و تثبیت شده با نفت، حداکثر وزن واحد خشک و درصد رطوبت بهینه را در مقایسه با خاک غیرآلوده کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که حداکثر وزن واحد خشک با افزایش درصد سیمان افزایش یافت، در حالی که درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان در مقایسه با خاک آلوده کاهش پیدا کرد. کمترین مقدار حداکثر وزن واحد خشک در نمونه با ۱۰ درصد نفت و ۳ درصد تثبیت سیمان به دست آمد که نسبت به نمونه مشابه آلوده به نفت بدون سیمان، ۳/۲ درصد افزایش نشان داد. نمونه‌های با ۱۰ درصد آلودگی نفت و تثبیت سیمان ۶ درصد و ۹ درصد به ترتیب افزایش ۳/۵ و ۳/۸ درصدی را نشان دادند. حداکثر وزن واحد خشک خاک اساساً تحت تأثیر دو عامل است: (الف) توزیع اندازه 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 نیز افزایش می‌دهد [۳۲].

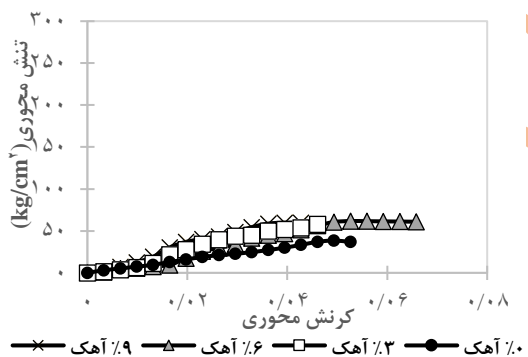
علاوه بر این، درصد رطوبت بهینه برای تثبیت خاک با سیمان اضافه شده با افزایش درصد سیمان کاهش یافت. برای نمونه با ۱۰٪ نفت و ۳٪ تثبیت سیمان، درصد رطوبت بهینه ۱۵٪ بود که نشان‌دهنده کاهش ۱۷/۱٪ در مقایسه با نمونه مشابه آلوده به نفت بدون سیمان بود. نمونه‌هایی با ۱۰ درصد آلودگی نفت و تثبیت شده با ۶ درصد و ۹ درصد سیمان به ترتیب افزایش ۱۸/۸ درصد و ۲۰/۷ درصد را تجربه کردند. این امر ناشی از این 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].



(الف)

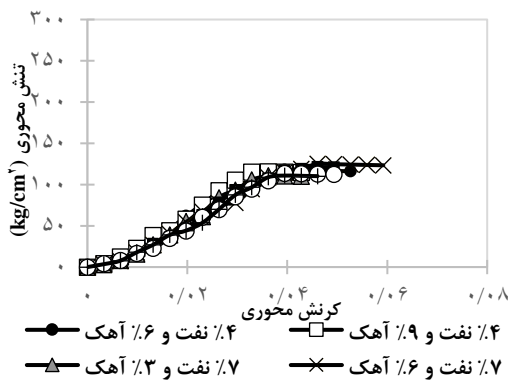


(ب)

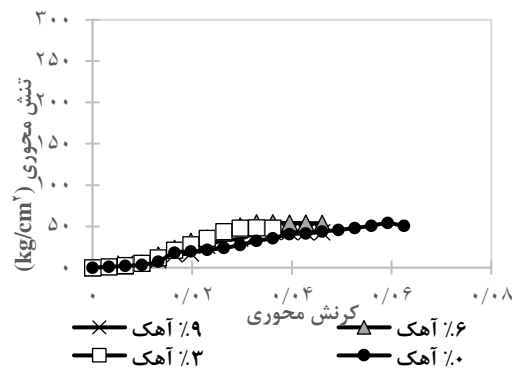


(ج)

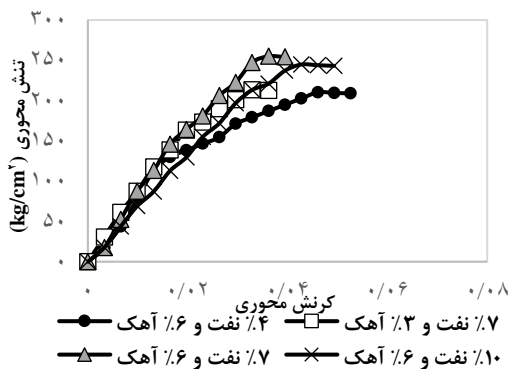
همچنین نمونه خاک طبیعی (شکل ۸ الف)، مقاومت تک محوری را در برابر یک چرخه مرطوب-خشک نشان داده‌اند. در نمونه‌های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۸ ب)، بیشترین مقاومت تک محوری در نمونه‌های حاوی ۶٪ آهک مشاهده شد. مقایسه نتایج نمونه‌های آلوده با درصد متغیر نفت نشان می‌دهد که با افزایش درصد نفت از ۷ به ۱۰، دوام نمونه‌ها کاهش می‌یابد. چنین رفتاری را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که واکنش ماده افزودنی با خاک در حضور درصد‌های بیشتر نفت آهسته‌تر شد و بر رشد مقاومت تأثیر کمتری گذاشت [۳۴]. مقاومت نمونه‌های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۸ ج) و حاوی ۳، ۶ و ۹٪ آهک پس از ۱ چرخه تر-خشک به ترتیب ۵/۷، ۶/۱ و ۵/۹ مگاپاسکال می‌باشد. روند مشابه در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۸ د)، مشاهده شد، به طوری که مقاومت نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت به ترتیب ۲/۲، ۲/۵ و ۲/۳ برابر بیشتر از نمونه‌های حاوی درصد مشابه نفت، اما بدون آهک بود. در شکل ۹، نتایج آزمایش‌های دوام بر روی نمونه‌های خاک آلوده به نفت پس از طی ۳ چرخه تر-خشک ارائه شده‌اند. در چرخه ۳، کلیه نمونه‌های بدون آهک پس از طی ۳ چرخه تر-خشک در آب متلاشی گردیدند. هنگامی که ۳٪ آهک به نمونه‌های آلوده به نفت اضافه شد، تنها نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت در برابر چرخه‌های تر-خشک از دوام نشان دادند و نمونه‌های آلوده به ۴ و ۱۰٪ نفت در آب متلاشی گردیدند. هنگامی که درصد آهک به ۶٪ افزایش یافت، نمونه‌های آلوده با درصد‌های ۴، ۷ و ۱۰٪ نفت نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه در سیکل ۱، بترتیب مقاومت‌های ۲/۲، ۲/۰ و ۲/۰ برابری نشان دادند. همچنین نمونه‌های آلوده به ۴، ۷ و ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ آهک در چرخه ۳، در مقایسه با چرخه ۱، به ترتیب ۱۱۰/۷٪، ۱۰۲/۳٪ و ۱۶۶/۷٪ نسبت به نمونه با درصد نفت مشابه اما تثبیت نشده، افزایش داشتند.



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



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



شکل ۱۰. منحنی های تنش-کرنش نمونه های خاک آلوده به درصد های مختلف نفت و تثبیت شده با درصد های مختلف آهک طی ۶ چرخه تر-خشک

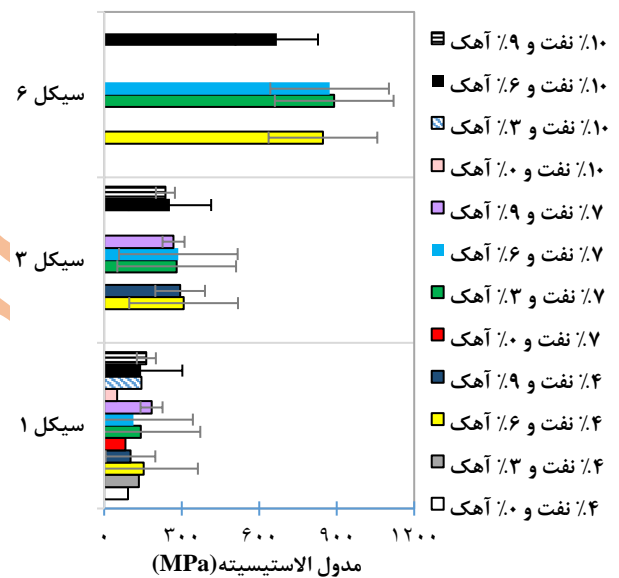
#### ۵ - ۴ - مدول الاستیسیته خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با آهک

در شکل ۱۱، میزان مدول الاستیسیته نمونه های خاک آلوده به درصد های مختلف و تثبیت شده با آهک ارائه شده است. میزان مدول الاستیسیته ارائه شده، مدول سکانت در ۵۰٪ مقاومت نهایی می باشد.

از مقایسه مدول الاستیسیته در چرخه های مختلف میتوان بیان داشت که مدول الاستیسیته نمونه های مختلف با افزایش سیکلهای تر-خشک افزایش می یابد. به عنوان مثال، مدول الاستیسیته نمونه خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک در چرخه ۳، ۲/۰ برابر چرخه ۱ و در چرخه ۶، ۲/۸ برابر چرخه ۳ می باشد. مدول الاستیسیته نمونه های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ سیمان در چرخه ۳، ۲/۵ برابر چرخه ۱ و در چرخه ۶، ۳/۰ برابر چرخه ۳

در شکل ۱۰، نتایج آزمایش های دوام بر روی نمونه های خاک آلوده به نفت پس از ۶ چرخه تر-خشک ارائه شده اند. در چرخه ۶، اکثر نمونه ها در آب متلاشی شدند. در بین نمونه های آلوده به ۴٪ و ۱۰٪ نفت، نمونه های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب ۲۸۵/۱٪ و ۳۴۰/۶٪ نسبت به همان نمونه در چرخه ۳ افزایش مقاومت داشتند. در بین نمونه های آلوده به ۷٪ نفت، نمونه های حاوی ۶٪ آهک به ترتیب مقاومت ۲۵/۰ مگاپاسکال را نشان داد که نسبت به نمونه با درصد مشابه نفت و حاوی ۳٪ آهک ۱۹/۶٪ افزایش یافته است. از مقایسه نتایج آزمایشات میتوان بیان داشت که با افزایش درصد نفت مقاومت نمونه ها پس از گذراندن چرخه های تر-خشک کاهش می یابد و ۶٪ آهک، درصد بهینه آهک برای چرخه های ۱، ۳ و ۶ می باشد. لی و همکاران [۳۵] نتایج تحقیقات خود را بر روی خاک های آلوده به نفت در چین بیان داشتند 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.

می‌باشد. مدول الاستیسیته نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک در چرخه‌های ۱، ۳ و ۶ بترتیب مقادیر ۱۴۲/۹، ۲۵۴/۵ و ۶۶۷/۹ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. در خصوص افزایش میزان پارامترهای مهندسی با استفاده از آهک در خاک، تجربه نشان داده که خاک رس با آهک ترکیبی تولید می‌کند که خواص آنها مانند خواص سیمانی است. اصول ترکیبات شیمیایی بر اساس 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].



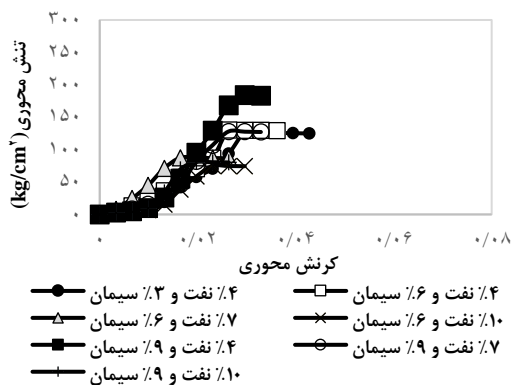
شکل ۱۱. مدول الاستیسیته نمونه های خاک آلوده به درصد های مختلف نفت و تثبیت شده با درصد های مختلف آهک پس از طی چرخه های تر-خشک

## ۵ - ۵ - نتایج آزمایشات دوام خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با سیمان

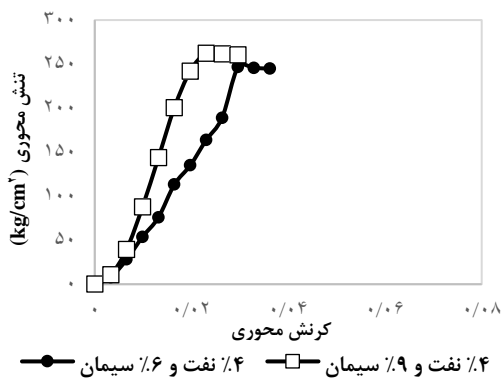
شکل ۱۲ نتایج آزمایش های دوام را بر روی نمونه های خاک آلوده به نفت پس از طی یک چرخه تر-خشک نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۲، می‌توان بیان کرد که تمام نمونه های آلوده به نفت، تثبیت نشده و تثبیت شده با سیمان، در برابر یک چرخه تر-خشک مقاومت نشان دادند. به طور کلی با مقایسه نتایج نمونه های آلوده با

درصد های مختلف نفت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد نفت، مقاومت نمونه ها کاهش می‌یابد.

در سیکل ۱، در میان نمونه های حاوی ۴٪ نفت (شکل ۱۲ الف)، بیشترین دوام مربوط به نمونه های حاوی ۹٪ سیمان مشاهده می‌شود. در نمونه های حاوی ۷٪ نفت (شکل ۱۲ ب)، مقاومت تک-محوری نمونه ها با افزایش درصد سیمان افزایش یافت. نمونه های حاوی سیمان ۳، ۶ و ۹ درصد سیمان به ترتیب دارای مقاومت ۷/۵، ۷/۹ و ۱۰/۲ مگاپاسکال بودند که در مقایسه با نمونه های آلوده به نفت بدون سیمان و پس از یک چرخه تر-خشک، به ترتیب ۲/۰، ۲/۱ و ۲/۷ برابر بیشتر بود. همین روند در نمونه های حاوی ۱۰٪ نفت (شکل ۱۲ ج)، مشاهده شد که افزایش درصد سیمان منجر به افزایش مقاومت تک محوری نسبت به نمونه های بدون سیمان شد. در چرخه ۳ (شکل ۱۳)، کلیه نمونه های آلوده به نفت بدون سیمان از بین رفتند. نمونه های آلوده به ۴، ۷ و ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان به ترتیب دارای مقاومت ۱۸/۰، ۱۲/۶ و ۷/۹ مگاپاسکال بودند که نسبت به نمونه های مشابه از لحاظ میزان درصد نفت و سیمان، اما در سیکل ۱، ۹/۴۱٪، ۳/۲۳٪ و ۸/۱۵٪ افزایش مقاومت داشته‌اند. در چرخه ۶ (شکل ۱۴) همه نمونه های حاوی ۷٪ و ۱۰٪ نفت در آب متلاشی شدند. علاوه بر این، نمونه های حاوی ۴٪ نفت، تثبیت نشده با سیمان و تثبیت شده با ۳٪ سیمان، در آب متلاشی گردیدند. با این حال، زمانی که درصد سیمان به ۶ و ۹ افزایش یافت، نمونه ها از خود دوام نشان دادند. مقاومت تک محوری نمونه ها به ترتیب ۲۴/۲ و ۲۵/۷ مگاپاسکال بود. شایان ذکر است بیشترین دوام مشاهده شده مربوط به نمونه حاوی ۴٪ نفت و ۹٪ سیمان بوده که در مقایسه با نمونه مشابه همین درصد نفت و سیمان در سیکل ۳، ۴۲/۶٪ افزایش مقاومت داشته است. ربه و همکاران [۳۷] بیان داشتند که سیمان دارای برخی خواص پوزولانی است که می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری خاک شود. همچنین در مطالعه دیگری توسط اولواتویی و همکاران [۳۸] بر روی خاک های آلوده بیان شد که تشکیل محصولات سیمانی در خاک با استفاده از سیمان میتواند به توسعه مقاومت خاک کمک می‌کند.



شکل ۱۳. منحنی های تنش- کرنش نمونه های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان طی ۳ چرخه تر- خشک

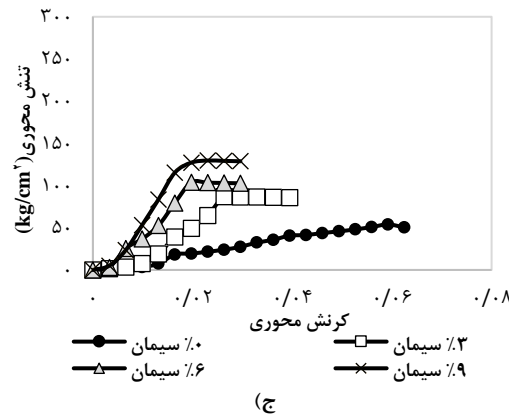
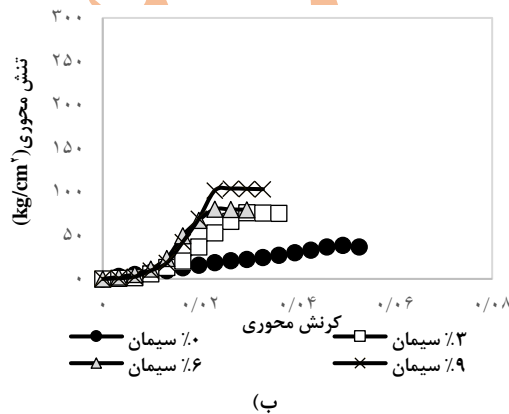
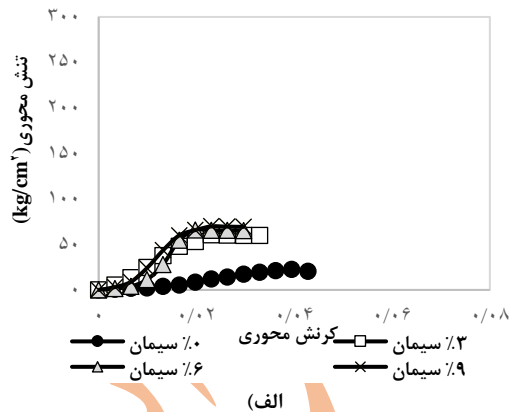


شکل ۱۴. منحنی های تنش- کرنش نمونه های خاک آلوده به درصدهای مختلف نفت و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان طی ۶ چرخه تر- خشک

### ۵ - ۶ - مدول الاستیسیته خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با سیمان

مدول الاستیسیته، نشان دهنده سختی متوسط خاک است. این پارامتر به عنوان نسبت تنش انحرافی به کرنش محوری مربوطه در یک نقطه خاص در منحنی تنش-کرنش تعریف می شود [۳۸ و ۳۹]. مدول الاستیسیته را می توان برای سطح خاصی از کرنش یا تنش تعیین کرد. در این مطالعه، مدول الاستیسیته برای هر نمونه در نقطه مربوط به نیمی از UCS نمونه محاسبه شد [۹].

مقادیر مدول الاستیسیته برای نمونه های خاک آلوده به درصدهای مختلف و تثبیت شده با آهک در شکل ۱۵ ارائه شده اند. به طور کلی، مشاهده می شود مدول الاستیسیته با افزایش تعداد چرخه های تر- خشک افزایش می یابد.

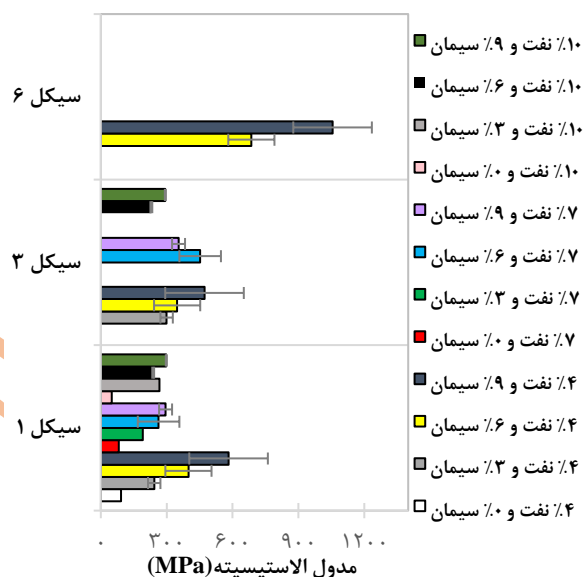


شکل ۱۲. منحنی های تنش-کرنش نمونه های خاک آلوده به نفت و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان طی یک چرخه تر- خشک (الف) ۴٪ نفت ب) ۷٪ نفت ج) ۱۰٪ نفت

است. حجم و اندازه ی فضاهای خالی نواحی انتقال، مقاومت آن را مشخص می کنند. با توجه به نوع افزودنی استفاده شده در تثبیت خاک، مقاومت نواحی انتقال، ممکن است از توده ی خاک پایه بیشتر شود.

در شکل ۱۶ الف، تصویر FESEM خاک آلوده به نفت ۱۰٪ و تثبیت نشده، ساختار ناپیوسته‌ای را نشان می‌دهد. همچنین در این تصویر، حفره‌های برجسته درون مجموعه در ریز پارچه خاک تثبیت نشده به دلیل عدم وجود محصولات هیدراتاسیون مشاهده می‌شود. شکل ۱۶ ب، تصویر نمونه خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان را نشان می‌دهد که در این تصویر تعداد کمتری از فضاهای خالی مشاهده می‌شود و به طور کلی می‌توان بیان داشت که ساختار ناپیوسته (شکل ۱۶ الف)، به ساختار فولکوله سوق پیدا کرده است. ملاحظاتی و همکاران [۴۰] بیان داشتند 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. این ژل از پیدایش مقدار بیشتر هیدروکلسیم در نواحی انتقال جلوگیری و افزایش مقاومت را حاصل می‌کند. نتایج مطالعه دیگری توسط هی و همکاران [۴۱] بیان داشت، سیمان ممکن است با هوا و آب واکنش نشان دهد تا کریستال های فیبری ایجاد کند، که همپوشانی آنها ساختار شبکه ای را ایجاد می‌کند که ارتباط متقابل بین ذرات را به طور موثر بهبود می‌بخشد. شکل ۱۶ ج، نمونه خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه تثبیت نشده، ساختاری فولکوله را نشان می‌دهد. سلطانی نژاد و همکاران [۴۲] نشان دادند که واکنش پوزولانی خاک با آهک موجب تشکیل ترکیبات سمنتاسیون شده که این مواد چسباننده ذرات خاک را به هم متصل نموده و سبب کاهش خلل و فرج خاک خواهند شد و حفرات موجود در خاک کمتر مشاهده می‌شوند.

مدول الاستیسیته نمونه خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان در چرخه ۶، ۲/۲ برابر مقدار در چرخه ۳ می‌باشد. همچنین، مدول الاستیسیته نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان در چرخه ۳، ۱/۲ برابر مقدار در چرخه ۱ می‌باشد. بیشترین مقادیر مدول الاستیسیته در نمونه‌های خاک آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت شده با ۶ و ۹٪ سیمان بودند که بترتیب مقادیر ۶۸۵/۶ و ۱۰۵۵/۵ مگاپاسکال داشتند. این مقادیر نسبت به نمونه‌های مشابه در سیکل ۳، ۹۷/۳٪ و ۱۲۳/۵٪ افزایش یافته‌اند.



شکل ۱۵. مدول الاستیسیته نمونه های خاک آلوده به درصد های مختلف نفت و تثبیت شده با درصد های مختلف سیمان پس از طی چرخه های تر-خشک

## ۵ - ۷ - آنالیز ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)

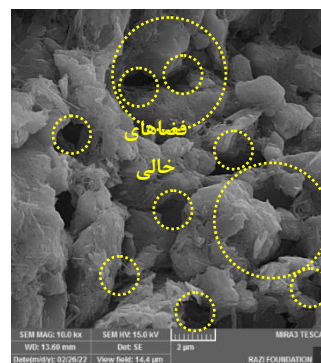
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی خاک رسی تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با سیمان و آهک در شکل ۱۶ ارائه شده‌اند. میکروگراف های FE-SEM با وضوح بالا (با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر) برای مقایسه بهتر برای همه نمونه‌ها ارائه شده‌است. بررسی رفتار ریزساختاری خاک از آن جهت نقش مهمی در درک رفتار خاک دارد که مقاومت برشی خاک از تماس ذرات آن انتقال پیدا می‌کند. در حقیقت، ضعیف ترین ناحیه در عوامل محدود کننده ی مقاومت خاک، ناحیه ی انتقال (فضاهای خالی بین ذرات)



این کانی‌ها ژل C-A-S-H، به عنوان یک فاز کانی شناسی جدید، در خاک تثبیت شده با آهک شناسایی شد (شکل ۱۷ ب) این نتایج با گزارش‌های قبلی مطابقت دارد و نشان می‌دهد که محصولات هیدراتاسیون در حال توسعه و شکل‌گیری بوده‌اند [۴۳].

در نتیجه هیدراتاسیون آهک در خاک رسی، یون‌های آزاد  $\text{OH}^-$  و  $\text{Ca}^{2+}$  آزاد 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  $\text{Ca}^{2+}$  ترکیب می‌شوند و هیدرات‌های آلومینیوم سیلیکات کلسیم (C-A-S-H) را تشکیل می‌دهند. افزایش گزارش شده در مقاومت رس عمدتاً به حضور ژل C-A-S-H نسبت داده می‌شود که ماتریس خاک را متصل می‌کند و ساختار فولکوله ایجاد می‌نماید [۴۴]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که آهک دارای خواص پوزولانی است و فرآیند هیدراتاسیون را تسریع می‌بخشد.

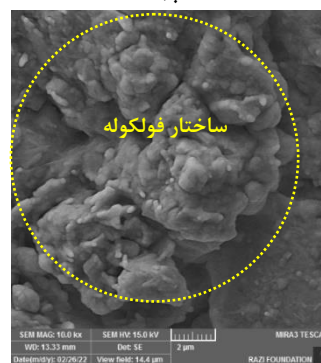
در خاک تثبیت شده با سیمان، فاز جدید C-S-H نیز شناسایی گردید (شکل ۱۷ ج). ناصحی و همکاران [۴۵] بیان داشتند، اضافه نمودن سیمان به خاک آلوده موجب شروع واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته می‌شود، که به دنبال آن افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌های آلوده به نفت و تثبیت شده با سیمان رخ داده است. علاوه بر این، با مقایسه نتایج بین نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده شدت پیک کمتری در کلسیت مشاهده شد. این امر نشان دهنده انحلال تعدادی از فازهای معدنی و به طور بالقوه ایجاد ژل‌های سیمانی است [۴۶].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت نشده ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک

## ۵ - ۸ - آنالیز طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج طیف سنجی پراش پرتو ایکس برای خاک آلوده تثبیت نشده و تثبیت‌شده با مواد افزودنی در شکل ۱۷ ارائه شده است. ترکیبات کانی شناسی خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده تقریباً یکسان است و کائولینیت، کوارتز، کلسیت، ایلیت، سیلیکات کلسیم و مونت موریلونایت کانی‌های اصلی را تشکیل می‌دهند. اما علاوه بر

• استفاده از آهک به عنوان ماده تثبیت کننده در خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند بهبود قابل توجهی در دوام و مقاومت این نوع خاک‌ها در برابر چرخه‌های تر-خشک ایجاد کند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد آهک در نمونه‌های آلوده به نفت، منجر به افزایش مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته می‌شود، و در نتیجه، افزایش پایداری و استحکام خاک را ایجاد می‌کند. این پدیده به واکنش آهک با خاک بر می‌گردد که خواص مکانیکی بهبود یافته‌ای ارائه می‌دهد.

• با توجه به نتایج آزمایشات، افزودن سیمان به خاک‌های آلوده به نفت، بهبود قابل توجهی در دوام و مقاومت آن‌ها در برابر چرخه‌های تر-خشک ایجاد می‌کند. این بهبودات 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 الاستیسیته آن‌ها افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که سیمان می‌تواند به عنوان یک ماده تثبیت کننده موثر برای بهبود خواص مکانیکی و پایداری خاک‌های آلوده به نفت مورد استفاده قرار گیرد.

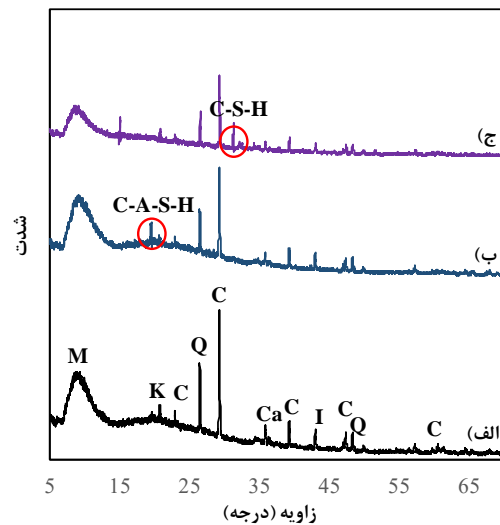
• با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی، مشاهده می‌شود که افزودن سیمان و آهک به خاک‌های آلوده به نفت باعث ایجاد ساختاری فولکوله و جامدتر در خاک می‌شود. این تغییرات ناشی از تشکیل محصولات هیدراتاسیون و پوزولانی سیمان و آهک با ذرات خاک است که منجر به ایجاد ارتباط متقابل بین ذرات و افزایش مقاومت آنها می‌شود.

### قدردانی

آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک خاک پیشرفته دانشگاه آزاد اسلامی اهواز، ایران انجام شد.

### پانوشتها

۱. unconfined compressive strength (UCS)
۲. Soxhlet extractor
۳. X-ray Fluorescence (XRF)
۴. X-ray diffraction (XRD)
۵. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)



شکل ۱۷. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها الف) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت نشده ب) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۶٪ آهک ج) خاک آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با ۹٪ سیمان [C: کلسیت؛ Q: کوآرتز؛ I: اپلیت؛ M: مونت موریلونیت؛ Ca: سیلیکات کلسیم؛ K: کائولینیت، C-S-H: هیدرات سیلیکات کلسیم؛ C-A-S-H: هیدرات آلومینیوم سیلیکات کلسیم]

### ۶- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، بررسی دوام و ریزساختار خاک‌های آلوده به نفت و تثبیت شده با استفاده از سیمان و آهک می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشات، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سیمان و آهک به خاک آلوده به نفت، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت تک‌محوری و مدول الاستیسیته دارد. نتایج کلیدی زیر را می‌توان از نتایج بدست آورد:

• با افزایش درصد نفت در خاک آلوده، مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. نفت باعث کاهش جذب آب و اتلاف انرژی اعمال شده و در نتیجه تراکم خاک کمتر می‌شود. افزودن آهک و سیمان به خاک آلوده به نفت نیز باعث کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه می‌شود، زیرا این مواد افزودنی باعث شروع فعل و انفعالات شیمیایی می‌شوند که به تثبیت و استحکام مخلوط کمک می‌کند.

- Engineering*, 13(3), pp.653-670.  
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
۱۲. Karabash, Z., Al-Obaydi, M.A., Awad, M.A. and Al-Khashab, M.N., ۲۰۲۳. Geotechnical Properties of Clay Soil Contaminated with Different Types of Oil. *Geotechnical and Geological Engineering*, ۴۱(۴), pp.۲۶۷۷-۲۶۸۹. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-۰۲۴۲۰-w>
  ۱۳. Khoshand, A., Alishirinpourfarkhad, A., Solhianari, M. and Tabiatnejad, B., ۲۰۲۲. Characterization and mechanism analysis of stabilized/solidified oil-contaminated soils. *Arabian Journal of Geosciences*, ۱۵(۱۵), p.۱۳۵۳. <https://doi.org/10.1007/s124517-022-۱۰۶۱۳-۵>
  ۱۴. Nokande, S., Khodabandeh, M.A., Besharatinezhad, A., Nagy, G. and Török, Á., ۲۰۲۲. Effect of Oil Contamination on the Behavior of Collapsible Soil. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, ۶۶(۳), pp.۷۷۵-۷۸۴. <https://doi.org/10.3311/PPci.۱۹۶۳۶>
  ۱۵. Amir, H. and Abdoos, S., ۲۰۲۰. Application of Lime and Portland Cement for Improvement of Clay Contaminated with Anthracene and Glycerol. *Civil Infrastructure Researches*, ۵(۲), pp.۱۱۱-۱۲۲.
  ۱۶. Hajimohammadi, M. and Amir, H., ۲۰۲۱. Investigating the Effects of Portland Cement and Lime on Improving Glycerol-Contaminated Clay. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, ۵۱(۱۲), pp.۳۰۴۵-۳۰۵۷.
  ۱۷. Alrubaye, A.J., Hasan, M. and Fattah, M.Y., ۲۰۱۶. Engineering properties of clayey soil stabilized with lime. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, ۱۱(۴), pp.۲۴۳۴-۲۴۴۱.
  ۱۸. Sorsa, A. and Agon, E., ۲۰۲۲. Lime stabilization of expansive clay soil of Jimma town, Ethiopia. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, ۵۵(۲), pp.۲۱۱-۲۲۲.
  ۱۹. Zaini, M.S.I. and Hasan, M., ۲۰۲۳. Effect of Optimum Utilization of Silica Fume and Lime On the Stabilization of Problematic Soils. *International Journal of Integrated Engineering*, ۱۵(۱), pp.۳۵۲-۳۶۶.
  ۲۰. Renjith, R., Robert, D.J., Gunasekara, C., Setunge, S. and O'Donnell, B., ۲۰۲۰. Optimization of enzyme-based soil stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۳۲(۵), p.۰۴۰۲۰۰۹۱.
  ۲۱. Kennedy, C. and Theophilus, A.A., ۲۰۲۳. Highway Pavement Stabilization of Soil with *Costus bracteatus* Rowlee and Cement. *South Asian Res J Eng Tech*, ۵(۲), pp.۶-۱۴.
  ۲۲. Ahmad, S., Al-Amoudi, O.S.B., Mustafa, Y.M., Maslehuddin, M. and Al-Malack, M.H., ۲۰۲۰. Stabilization and solidification of oil-contaminated sandy soil using portland cement and supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۳۲(۸), p.۰۴۰۲۰۲۲۰.
  ۲۳. Amadi, A. A., and A. O. Eberemu. ۲۰۱۲. "Performance of cement kiln dust in stabilizing lateritic soil contaminated with organic chemicals." *Adv. Mater. Res.* ۳۶۷: ۴۱-۴۷.
  ۱. Chen, C. and Zhang, L., ۲۰۲۳. Hydro-mechanical behaviour of soil experiencing seepage erosion under cyclic hydraulic gradient. *Géotechnique*, ۷۳(۲), pp.۱۱۵-۱۲۷. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.340>
  ۲. Mahmood, Y., Afrin, T., Huang, Y. and Yodo, N., ۲۰۲۳. Sustainable Development for Oil and Gas Infrastructure from Risk, Reliability, and Resilience Perspectives. *Sustainability*, ۱۵(۶), p.۴۹۵۳. <https://doi.org/10.3390/su15064953>
  ۳. Chen, L., Li, K., Song, G., Zhang, D. and Liu, C., ۲۰۲۱. Effect of freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties and damage characteristics of sandstone. *Scientific Reports*, 11(1), p.۱۲۳۱۵. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91842-8>
  ۴. Joukar, A.R., Hajiani Boushehrian, A. ۲۰۲۰. Studying the behavior of strip foundation rested on the kerosene oil and gasoil contaminated sand slopes, *Shairf Journal of Civil Engineering*, ۳۶(۲,۲), pp. ۱۵۱-۱۵۸ [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j30.2019.52129.2456>
  ۵. Little, D.I., Sheppard, S.R. and Hulme, D., ۲۰۲۱. A perspective on oil spills: What we should have learned about global warming. *Ocean & Coastal Management*, ۲۰۲, p.۱۰۵۵۰۹. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105509>
  ۶. Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S.K. and Khatri, M., ۲۰۲۰. Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, ۱۴, p.۱۰۰۳۰۵. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100305>
  ۷. Dermatas, D. and Meng, X., ۲۰۰۳. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering geology*, 70(۳-۴), pp.۳۷۷-۳۹۴. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)0105-4](https://doi.org/10.1016/S0013-۷۹۵۲(۰۳)۰۱۰۵-۴)
  ۸. Nasr, A.M., ۲۰۱۴. Utilisation of oil-contaminated sand stabilised with cement kiln dust in the construction of rural roads. *International Journal of Pavement Engineering*, ۱۵(۱۰), pp.۸۸۹-۹۰۵. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893221>
  ۹. Khayat, N. and Nasiri, H., ۲۰۲۳. Study of Strength Characteristics and Micro-structure Analysis of Soil Stabilized with Wastewater and Polymer. *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp.۱-۱۲. <https://doi.org/10.1007/s42967-023-00296-w>
  ۱۰. Nasiri, H., Khayat, N. and Mirzababaei, M. ۲۰۲۱. Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product. *Transportation Geotechnics*, 28, p.۱۰۰۵۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.trgeot.2021.100531>
  ۱۱. Salimnezhad, A., Soltani-Jigheh, H. and Soorki, A.A., ۲۰۲۱. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*

۳۷. Rabab'ah, S.R., Sharo, A.A., Alqudah, M.M., Ashteyat, A.M. and Saleh, H.O., ۲۰۲۳. Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, ۱۹, p.e.۲۵۰۸.
۳۸. Oluwatuyi, O.E., Ojuri, O.O. and Khoshghalb, A., ۲۰۲۰. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۱۲(۱), pp. ۱۶۰-۱۶۷.
۳۹. Wang, Y., Guo, P., Li, X., Lin, H., Liu, Y. and Yuan, H., ۲۰۱۹. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests. *Applied Sciences*, ۹(۵), p.۹۰۰.
۴۰. MolaAbasi, H., Ahmadi Chenarboni, H., Lajevardi, S., Shirkavand, A. (۲۰۲۲). The effect of cement and zeolite on undrained shear strength of the expansive clay, *Sharif Journal of Civil Engineering*, ۳۸,۲(۳,۲), pp. ۱۱-۲۰. doi: ۱۰.۲۴۲۰۰/j۳۰,۲۰۲۲,۵۹۵۳۶,۳۰۵۹ [In Persian]
۴۱. He, X., Yang, J., Niu, M., Zhang, G. and Li, G., ۲۰۲۳. Study on expansion effect and hydration characteristics of ultra-high strength cement-based grouting materials based on humidity compensation. *Case Studies in Construction Materials*, ۱۸, p.e.۱۹۴۱.
۴۲. Soltaninejad, S., Hamidi, S., Marandi, S. M. (۲۰۱۸). 'The Influence of Different Curing Conditions on Durability of Lime-Stabilized Clay Soils (Micro- and Macro- Structure Study)', *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, ۴(۳), pp. ۸۳-۹۸. doi: ۱۰.۲۲۰۷۵/jtie.۲۰۱۸,۱۲۸۱۵,۱۲۴۹
۴۳. Puertas F, et al. A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements. *Journal of the European Ceramic Society*. ۲۰۱۱ Oct ۱۵;۳۱(۱۲):۲۰۴۳-۵۶.
۴۴. Stefanini, L., Ansari, D., Walkley, B. and Provis, J.L., ۲۰۲۴. Characterisation of calcined waste clays from kaolinite extraction in alkali-activated GGBFS blends. *Materials Today Communications*, ۳۸, p.۱۰۷۷۷۷. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.۲۰۲۳.۱۰۷۷۷۷>
۴۵. Nasehi, S.A., Uromeihy, A., Nikudel, M.R. and Morsali, A., ۲۰۱۶. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, ۳۴, pp.۳۳۳-۳۴۵.
۴۶. Cristelo N, et al. Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*. ۲۰۱۱ May;۱۶۴(۲):۷۳-۸۲.
۲۴. Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N. and Chinkulkijniwat, A., ۲۰۱۴. Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ۲۶(۳), pp.۶۳۳-۶۴۲. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5523,.....۸۵۳](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5523,.....۸۵۳)
۲۵. Puri VK. Geotechnical aspects of oil-contaminated sands. *Soil and Sediment Contamination*. ۲۰۰۰ Jul ۱;۹(۴):۳۵۹-۷۴.
۲۶. Soltani-Jigheh H, et al. Effect of oil-degrading bacteria on geotechnical properties of crude oil-contaminated sand. *Environmental & Engineering Geoscience*. ۲۰۱۸ Aug ۲۴;۲۴(۳):۳۳۳-۴۱.
۲۷. Anggraini V, et al. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*. ۲۰۱۵ Jan ۱;۵۹:۳۷۲-۸۱.
۲۸. Haghsheno H, and Arabani M. Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. ۲۰۲۲ May;۲۹(۲۲):۳۲۶۷۰-۷۰۱.
۲۹. Shah, S.J., Shroff, A.V., Patel, J.V., Tiwari K.C. and Ramakrishnan, D., ۲۰۰۳. Stabilization of fuel oil contamination soil-a case study. *Geotech. Geol. Eng.*, ۲۱: ۴۱۵-۴۲۷. DOI: ۱۰.۱۰۲۳/B:GEGE.....۶۰۵۲,۶۱۸۳,۱a.
۳۰. Oluremi, J.R. and Osulale, O.M., ۲۰۱۴. Oil contaminated soil as potential applicable material in civil engineering construction. *Journal of Environment and Earth Science*, ۴(۱۰), pp.۸۷-۹۹.
۳۱. Abdulhamid, S.N., Hasan, A.M. and Aziz, S.Q., ۲۰۲۱. Solidification/stabilization of contaminated soil in a south station of the Khurmala oil field in Kurdistan region, Iraq. *Applied Sciences*, ۱۱(۱۶), p.۷۴۷۴.
۳۲. Mohamed, A.A.M.S., Yuan, J., Al-Ajamee, M., Dong, Y., Ren, Y. and Hakuzweyezu, T., ۲۰۲۳. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. *Case Studies in Construction Materials*, ۱۸, p.e.۱۸۹۴.
۳۳. Shooshpasha, I. and Shirvani, R.A., ۲۰۱۵. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. *Geomech Eng*, ۸(۱), pp.۱۷-۳۱.
۳۴. Akinwumi, I. I., C. Booth, D. Diwa, and P. Mills. ۲۰۱۶. "Cement stabilization of crude-oil-contaminated soil." *Proc. CE Geotech. Eng.* ۱۶۹ (۴):۳۳۶-۳۴۵.
۳۵. Li, M., Yu, H., Zheng, D., Klemeš, J.J. and Wang, J., ۲۰۲۱. 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*, ۳۱۲, p.۱۲۷۶۱۹.
۳۶. Behroozi, F., Ahadian, J. ۲۰۱۴. Effect of Adding Lime to the Consolidation Properties of Clay – Gypsum Soils, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, ۳۷(۲), pp. ۶۱-۷۰. [In Persian]