



University Of Qom



Investigating the Cyclic and Post-Cyclic Behavior of Marl Soil Contaminated with Used Motor Oil

Alireza Dashti¹, Mahdi Khodaparast², Majid Yazdandoust³

1. Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: Ardr1377@gmail.com
2. Corresponding author, Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: Khodaparast@qom.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: M.Yazdandoust@qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 06 Jan 2025
Revised 16 Jul 2025
Accepted 17 Aug 2025
Published 18 Aug 2025

Keywords:
Marl Soil,
Cyclic and Post-cyclic
Behavior,
Simple Shear Test,
Burnt Oil,
Scanning Electron
Microscope (SEM).

ABSTRACT

Soil contamination has been on the rise with the increasing demand for oil and its derivatives, leading to both environmental hazards and potential impacts on the geotechnical behavior of soils. Leakage of pollutants such as used motor oil into roadbeds and subgrade layers is considered a major challenge. Fine-grained cohesive soils, such as marl, are particularly more sensitive to moisture and hydrocarbon pollutants compared to other soil types. Despite numerous studies on the monotonic behavior of marl soils, less attention has been given to their cyclic and post-cyclic behavior. This study has evaluated the effect of used motor oil contamination on the cyclic and post-cyclic behavior of marl soil using a simple shear device. Marl soil samples were mixed with 0, 4, 8, 12, and 16% by weight of used motor oil and subjected to testing. The results indicated that an increase in the percentage of used motor oil up to 16% led to a 27% reduction in shear strength. Moreover, this contaminant reduced soil cohesion and internal friction angle by up to 47 and 6% before cyclic loading, and by 29% and 14% after it, respectively. However, the shear strength and cohesion improved after cyclic loading. Under cyclic loading, an increase in the oil content resulted in higher damping ratios and lower shear modulus values. Additionally, increasing the vertical stress led to an increase in shear modulus and a decrease in damping ratio. An increase in strain amplitude after 20 cycles led to a maximum of 89% increase in damping ratio, observed in the samples containing 16% oil under a vertical stress of 150 kPa. SEM analysis of the contaminated samples revealed reduced porosity and increased sample cohesion after cyclic loading compared to pre-loading conditions.

Cite this article: Dashti A, Khodaparast M, Yazdandoust M. Investigating the Cyclic and Post-Cyclic Behavior of Marl Soil Contaminated with Used Motor Oil. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 47-65. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.11950.1589>



Introduction

Marl soil is a natural mixture of clay and calcium carbonate, and its mechanical behavior varies widely depending on the calcium carbonate content and the type of clay minerals present. While it exhibits high strength in dry conditions, its strength can decrease by up to 85% when saturated. Marl deposits are widespread in various parts of Iran, including the city of Qom. However, due to their high deformability, considerable settlement, and relatively low strength, construction on such soils poses significant geotechnical challenges. With the rapid expansion of industrial activities, soil contamination by petroleum-based pollutants, such as used motor oil, has emerged as a critical concern in geotechnical engineering. These contaminants can infiltrate subsurface layers through roadway leakage, affecting the soil's physical, chemical, and mechanical properties. Used motor oil, composed mainly of hydrocarbons and heavy metals, can significantly influence key strength parameters of soil, including cohesion and internal friction angle. Although numerous studies have addressed the monotonic behavior of marl soil, its cyclic and post-cyclic responses, especially under contamination, have been less thoroughly investigated. Given that Qom lies in a seismically active zone and experiences frequent traffic loads from heavy vehicles, understanding the dynamic behavior of contaminated marl soil is essential. In this study, the cyclic and post-cyclic behavior of marl soil contaminated with 0, 4, 8, 12, and 16 percent used motor oil was evaluated using a simple shear apparatus under monotonic and cyclic-monotonic loading conditions. Additionally, the consolidation behavior of both contaminated and uncontaminated soils was examined before and after cyclic loading.

Methodology

In this study, to examine the effect of used motor oil contamination on the cyclic and post-cyclic behavior of marl soil, samples were collected from the Qods Town area in Qom province. The soil was first oven-dried at 60°C for 48 hours to prevent alteration of its chemical

properties. It was then sieved through a No. 200 sieve, and 8% moisture content was added. Subsequently, used motor oil was added to the soil at weight percentages of 0, 4, 8, 12, and 16%. After one day of rest to allow moisture equilibration, the samples were prepared with a relative density of 85% and a unit weight of 1.5 g/cm³, and placed in the rings of the simple shear apparatus. The samples had a diameter of 7.24 cm and a height of 2 cm. Sample preparation involved placing the membrane on the pedestal, securing the rings, compacting the soil in two layers, and finally mounting the sample on the device.

Results and Discussion

Monotonic Behavior of Contaminated Marl Soil

Monotonic tests indicated that increasing the percentage of used motor oil led to a reduction in shear strength up to 27% at 16% contamination. Cohesion decreased by up to 47%, while the internal friction angle dropped by only 6%. This reduction can be attributed to the compression of the diffuse double layer, resulting from the lower dielectric constant of oil compared to water.

Cyclic Behavior of Contaminated Marl Soil

Under cyclic loading, increasing contamination resulted in increased damping ratio and decreased shear modulus. Furthermore, increasing the vertical stress led to an increase in shear modulus and a decrease in damping. Higher strain amplitudes significantly increased damping up to 89% in some samples. Increasing strain amplitude from 0.0012 to 0.052 caused the shear modulus to decrease by 75% and 85% in uncontaminated and 16% contaminated samples, respectively. Moreover, the difference in shear modulus between 0% and 16% contamination increased with greater strain amplitude, averaging around 18%. Also, the average damping difference was about 14%.

Post-Cyclic Behavior of Contaminated Marl Soil

Shear strength decreased in all samples after cyclic loading, but cohesion increased

compared to pre-cyclic values. Samples with 16% oil contamination exhibited the greatest strength reduction. The internal friction angle also decreased, though to a lesser extent than cohesion.

Effect of Cyclic Loading and Oil Contamination on Consolidation Parameters

Consolidation test results indicated that used motor oil increased the compression index by approximately 6%. Cyclic loading caused a decrease in the compression index for both contaminated and uncontaminated samples. The swelling index did not vary significantly, likely due to the presence of non-swelling minerals, such as calcite, in marl soil.

SEM Images and Interpretations

SEM images revealed decreased porosity and increased inter-particle compaction after cyclic loading. The resulting denser structure correlated with the post-cyclic increase in shear strength, indicating that cyclic loading enhances particle interlocking even in the presence of contaminants.

Conclusion

1. Increasing used motor oil content reduced the shear strength of samples under monotonic loading. The greatest reduction occurred in samples with 16% contamination, with strength reductions ranging from 15% to 27% depending on the applied vertical stress.

2. Shear modulus increased with vertical stress and decreased with contamination.

3. Damping ratio increased with contamination but decreased with increasing vertical stress and cycle number. With increasing strain amplitude, damping rose by up to 89% in samples with 16% contamination and 150 kPa vertical stress.

4. Shear modulus showed a direct relationship with vertical stress and an inverse relationship with contamination percentage. Increasing strain amplitude led to further reductions in shear modulus, and this effect diminished with higher contamination levels.

5. Due to mineralogical characteristics such as the presence of calcite and dolomite, marl soil exhibited more stable behavior compared to many pure clay soils, maintaining

relative resistance to the detrimental effects of contamination.

Funding Statement

No funding in this study was received.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** 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' Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, development, and preparation of this manuscript.

بررسی رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مارن آلوده شده به روغن سوخته

علیرضا دشتی^۱، مهدی خداپرست^۲، مجید یزدان‌دوست^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: Ardr1377@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: Khodaparast@qom.ac.ir

۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: M.Yazdandoust@qom.ac.ir

چکیده

آلودگی منابع خاک با افزایش نیاز روزافزون بشر به نفت و فرآورده‌های آن سیری صعودی داشته است. در این خصوص نشت آلاینده‌هایی نظیر روغن سوخته در بستر راه‌ها و نفوذ به لایه‌های زیرین راهسازی به عنوان یک چالش تلقی شده است. با توجه به اینکه بستر این راه‌ها تحت بارهای متناوب ترافیکی هستند، بررسی رفتار سیکلی و فراسیکلی این خاک‌ها حائز اهمیت می‌باشد. از طرف دیگر تأثیرپذیری خاک‌های ریزدانه چسبنده مانند خاک‌های مارن نسبت به افزایش رطوبت و آلاینده‌های هیدروکربنی در مقایسه با دیگر انواع خاک‌ها به مراتب بیشتر می‌باشد. علی‌رغم آن‌که مطالعات بسیاری برای بررسی رفتار مونوتونیک خاک مارن صورت گرفته اما به رفتار سیکلی و فراسیکلی آن کمتر پرداخته شده است. از این رو در این مطالعه، تأثیر آلاینده روغن سوخته بر رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مارن با دستگاه برش ساده مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌های خاک مارن با صفر، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی روغن سوخته ترکیب و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که افزایش روغن سوخته تا ۱۶ درصد موجب کاهش ۲۷ درصدی مقاومت برشی شد. همچنین این آلاینده حداکثر ۴۷ و ۶ درصد قبل از بارگذاری سیکلی و ۲۹ و ۱۴ درصد پس از آن چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک را کاهش دادند. همچنین این دو پارامتر پس از اعمال بارسیکلی بهبود یافتند. تحت بارگذاری‌های سیکلیک با افزایش درصد روغن سوخته نسبت میرایی افزایش و مدول برشی کاهش یافت. از طرفی افزایش سربار باعث افزایش مدول برشی و کاهش میرایی شد. افزایش دامنه کرنش پس از ۲۰ سیکل منجر به افزایش حداکثری ۸۹ درصدی میرایی گشت که در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد آلاینده تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال رقم خورد. نتایج آزمایش‌ها SEM که به منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌های آلوده‌شده صورت گرفت، کاهش تخلخل و افزایش پیوستگی نمونه را پس از بارگذاری سیکلی نسبت به پیش از آن نشان داد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

کلیدواژه‌ها:

خاک مارن،

رفتار سیکلی و فراسیکلی،

آزمایش برش ساده،

روغن سوخته،

میکروسکوپ الکترونی روبشی.

استناد: دشتی علیرضا، خداپرست مهدی، یزدان‌دوست مجید. بررسی رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مارن آلوده شده به روغن سوخته. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۴۷-۶۵. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.11950.1589>

۱- مقدمه

خاک مارن از مصالحی است که مقدار کربنات کلسیم آن بین ۳۵ تا ۶۵ درصد بوده و به همان نسبت مقدار رس در آنها متغیر است. همچنین خواص مارن وابسته به محتوای کربنات و نوع کانی‌های رسی موجود در آن می باشد. مارن در شرایط خشک و تر رفتار منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد به گونه ای که با وجود مقاومت بسیار بالای آن در حالت خشک، مقاومت آن در هنگام اشباع به میزان قابل توجهی (تا ۸۵ درصد) کاهش می‌یابد [۱]. هوازدهی فیزیکی و شیمیایی سنگهای کربناتی موجود (مانند سنگ آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ کربناته و دیگر انواع آن) باعث تشکیل خاک مارن می‌شود. در بیشتر موارد، این خاک‌ها به صورت تحکیم یافته و یا لایه‌های نسبتاً سیمانته شده یافت می‌شود [۲].

رفتار مکانیکی مارن‌های متراکم بستگی به محتوای کربناتی و میزان تراکم آنها دارد [۳]. لاماس و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۱۴) اثر میزان کلسیم کربنات موجود در خاک مارن اسپانیا را بررسی نمودند و نتایج حاصله بیانگر آن است که افزایش میزان کلسیم کربنات منجر به کاهش حدود انبرگ، فعالیت، چسبندگی موثر و پتانسیل تورم و افزایش نفوذپذیری مارن می‌شود [۴ و ۵].

در بسیاری از شهرهای ایران از جمله شهر قم، خاک و سنگ‌مارن یافت می‌شود. یکی از مشکلات اصلی خاک‌های مارنی، تغییر شکل زیاد و نشست است که با وجود طراحی صحیح پی و سازه، به علت مقاومت پایین و تغییر شکل زیاد خاک‌های مارنی، تعداد زیادی از سازه‌های احداث شده بر روی این خاک‌ها دچار خرابی شده‌اند [۶]. اغلب مارنها به رنگ خاکستری روشن تا تیره و یا سبزرنگ می‌باشند [۷].

از نظر قدمت، خاک‌های مارن ایران به دو دسته مارن‌های دوره پالئوژن و مارن‌های دوره نئوژن تقسیم می‌شوند. از نظر منشا نیز این خاک‌ها را می‌توان در دو دسته مارن‌های خشکی و مارن‌های دریایی طبقه بندی

نمود [۸]. این خاک‌ها معمولاً در حالت خشک ظرفیت باربری و مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. با این حال این پارامترها می‌تواند تا حد زیادی در شرایط مرطوب تضعیف شود [۹]. خاک‌های مارن به دلیل حفظ آب زیاد و مقاومت برشی کم می‌توانند باعث ناپایداری شیب و نشست شوند [۱۰]. گسترش صنایع و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی منجر به افزایش چشمگیر آلاینده‌ها در محیط‌زیست شده است. ترکیبات نفتی به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی، نقش بسزایی در آلودگی آب‌ها و خاک‌ها ایفا می‌کنند [۱۱]. این آلاینده‌ها به اشکال گوناگون ممکن است در خاک نفوذ کنند. یکی از این موارد نشست آلاینده‌هایی نظیر روغن سوخته در بستر راه‌ها و لایه‌های زیرین راهسازی توسط وسایل نقلیه سنگین است. آلودگی خاک نه تنها خواص شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک را تغییر می‌دهد، بلکه بر خواص ژئوتکنیکی خاک نیز تأثیر می‌گذارد [۱۲]. در پژوهش حاضر تأثیر روغن موتور سوخته به عنوان یک آلاینده هیدروکربنی بر رفتار خاک مارن مورد توجه قرار گرفته است. روغن سوخته ترکیبی از ۹۰ درصد مواد هیدروکربنی و ۱۰ درصد فلزاتی مانند گوگرد، کبر و منیزیم است [۱۳]. تخمین زده می‌شود در حدود نیم الی یک درصد از پالایش نفت خام در جهان به تولید روغن موتورهای معدنی تعلق داشته باشد، به طور دقیق‌تر یعنی ۱۷ الی ۱۸ تن سالانه روغن اتومبیل در جهان مصرف می‌شود [۱۴]. اقبال و همکاران طی مطالعاتی با افزودن روغن سوخته به خاک CL نشان دادند که در آزمایش برش مستقیم با افزایش مقادیر آلاینده، چسبندگی کاهش و زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافته است [۱۵]. در پژوهشی دیگر رجائی و همکاران تأثیر روغن سوخته بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رس و ماسه‌ای را با دستگاه برش مستقیم مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج، در خاک‌های رسی با افزایش درصد آلاینده چسبندگی کاهش یافت. همچنین افزایش آلاینده تا ۴ درصد تأثیر زیادی بر زاویه اصطکاک داخلی نداشته اما از ۴ درصد به بعد باعث کاهش

این پارامتر شد [۱۶]. نظیر^۱ و همکاران در تحقیقات خود تأثیر این آلاینده را بر رس پیش تحکیم یافته مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که مقاومت تک محوری (UCS) خاک آلوده به روغن سوخته طی زمان عمل آوری ۶ ماه، ۳۸ درصد کمتر از خاک بدون آلاینده بوده است [۱۷]. همچنین در پژوهشی که اوگانیدیجو^۲ و همکاران بر روی خاک لاتریتی انجام دادند به طور مشابه مقادیر مقاومتی UCS و CBR در تمامی حالت‌ها با افزایش روغن سوخته کاهش یافت [۱۸].

با توجه به آن که استان قم در منطقه‌ای با احتمال لرزه خیزی زیاد قرار گرفته است، بررسی رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک‌های این منطقه با اهمیت تلقی می‌شود از طرفی بسترهای راه و لایه‌های زیرین راهسازی در معرض بارهای ترافیکی متناوب و سیکلی قرار می‌گیرند. در این رابطه در پژوهش‌های حسن و همکاران رفتار سیکلی یک خاک آبرفتی به وسیله دستگاه برش ساده مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نشان داد که افزایش تعداد سیکل باعث کاهش مقاومت برشی و میرایی شده است. همچنین در این آزمایش‌ها کرنش برشی با میرایی رابطه مستقیم و با مدول برشی رابطه عکس داشته است [۱۹]. در مطالعات باغبانی و همکاران بررسی اثر شکل ذرات خاک ماسه بر مدول برشی پس از اعمال بار سیکلی نشان داد که در آزمایش برش ساده سه پارامتر گردی، کرویت و منظم بودن پس از اعمال بار افزایش یافته است. با افزایش این پارامترها در تمامی نمونه‌ها، مدول برشی کاهش یافت. همچنین ایشان دریافتند که افزایش تعداد سیکل باعث کاهش مدول برشی شده است [۲۰]. امیری و همکاران به بررسی خواص مکانیکی ماسه تثبیت شده با سیمان و ژئولیت با استفاده از آزمایش برش ساده مونوتونیک پرداختند. مطابق نتایج این پژوهش افزایش درصد جایگزین پوزولان ژئولیت تا ۳۰ درصد به جای سیمان و زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مقاومت برشی خاک را تا حدود ۲۵ درصد نسبت به نمونه سیمانی

افزایش داد. همین روند افزایشی برای مدول برشی نیز مشاهده گردید [۲۱].

مرور پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد که آلاینده روغن سوخته می‌تواند باعث آلودگی و تغییر در رفتار ژئوتکنیکی خاک من جمله تغییر در پارامترهای مقاومتی نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی آن شود. این آلاینده هیدروکربنی می‌تواند به طرق مختلف مانند راهسازی توسط مراکز تعویض روغن، دفن در لندفیل‌های غیراستاندارد و نشت به هنگام کارکرد موتور اتومبیل‌ها به داخل خاک وارد شود. مطابق تحقیقات پیشین، رفتار خاک‌های رسی و خاک‌های مارنی بسیار متأثر از ترکیبات کانی آن‌ها می‌باشد و روغن سوخته می‌تواند باعث تغییر در این رفتار گردد. از طرف دیگر فقدان مطالعات کافی در خصوص رفتار دینامیکی این خاک‌ها به چشم می‌خورد. در این پژوهش به وسیله دستگاه برش ساده با دو الگوی بارگذاری مونوتونیک و سیکلیک-مونوتونیک به بررسی رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مارن با مقادیر صفر، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد آلاینده روغن سوخته پرداخته شد. همچنین رفتار تحکیمی خاک با آلاینده و بدون آن قبل و پس از بارگذاری سیکلیک مورد توجه قرار گرفت. به علاوه رفتار ریزساختاری خاک به کمک نتایج حاصل از عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد.

۲- موادها و روش‌ها

۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش از خاک مارن قم به عنوان خاک مرجع استفاده گردید. به منظور مطالعه ویژگی‌های این خاک، آزمایش‌ها شناسایی دانسیته در محل، تراکم استاندارد، حدود اتربرگ، دانه بندی، چگالی مخصوص، تحکیم و XRD بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش حدود

² Ogundijo

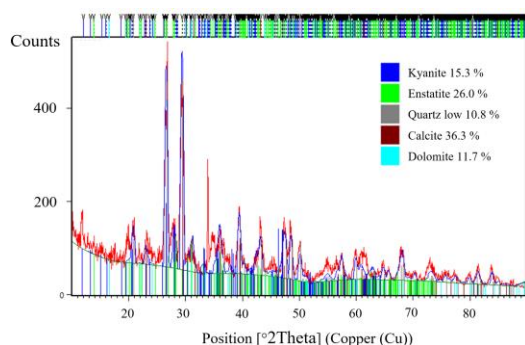
¹ Nazir

اتربرگ و دانه بندی مطابق استانداردهای ASTM- D4318 و D422 [۲۲ و ۲۳] انجام شد.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌ها شناسایی خاک مارن

۲۱/۱	ASTM-D4318 [۲۲]	حد خمیری (%)
۴۰/۱	ASTM-D4318 [۲۲]	حد روانی (%)
۱۹	ASTM-D4318 [۲۲]	نشانه خمیری (%)
۱/۶۱	ASTM-D1556 [۲۴]	دانسیته در محل (تن بر مترمکعب)
۱/۷۸	ASTM-D1557 [۲۵]	حداکثر وزن مخصوص (تن بر متر مکعب)
۱۴٪	ASTM-D1557 [۲۵]	رطوبت بهینه (%)
۲/۵۸	ASTM-D854 [۲۶]	چگالی مخصوص
CL		رده بندی خاک (طبقه‌بندی متحد)

مطالعات زمین‌شناسی پیشین [۳ و ۴] به‌عنوان ناحیه‌ای با گسترش نهشته‌های مارنی پالئوژن و نئوژن شناخته می‌شود.



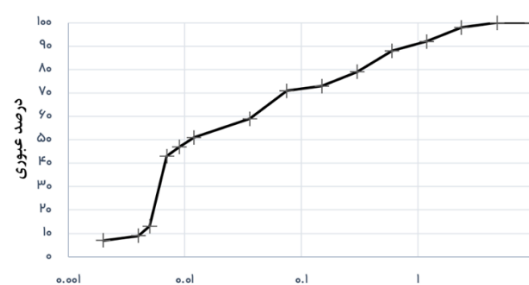
شکل ۲- شدت اشعه ایکس بازتابیده از یک نمونه به صورت تابعی از زاویه برای خاک مارن مورد مطالعه

جدول ۲- نتایج آزمایش XRD برای خاک مارن

درصد	نماد شیمیایی	نام کانی
۳۶/۳	Ca ₅ .62Mg ₀ .38(CO ₃) ₆	Calcite
۱۰/۸	SiO ₂	Quartz
۲۶	MgSiO ₃	Enstatite
۱۵/۳	Al ₂ SiO ₅	Kyanite
۱۱/۷	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomite

عبور و مرور وسایل نقلیه مختلف دارای نشت روغن از روی جاده‌های احداث شده بر بستر خاک‌های مارنی در این منطقه پتانسیل آلوده شدن خاک با روغن سوخته را افزایش می‌دهد. روغن سوخته مورد استفاده در این پژوهش از یک مرکز تعویض روغن معتبر تهیه شد. لازم به ذکر است

با توجه به منحنی دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۱ و حدود اتربرگ بدست آمده (نشانه خمیری ۱۹ و حد روانی ۴۰/۱ درصد)، مطابق طبقه‌بندی یونیفاید خاک مورد مطالعه در دسته CL قرار گرفت.



قطر ذرات (میلی متر)

شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه در این پژوهش

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است در آزمایش XRD شدت اشعه ایکس بازتابیده از یک نمونه به صورت تابعی از زاویه برای خاک مارن مورد مطالعه بدست آمد. همچنین عناصر تشکیل دهنده این خاک پس از آنالیز آزمایش XRD در جدول ۲ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج آزمایش XRD (شکل ۲ و جدول ۲) که نشان‌دهنده حضور قابل توجه کلسیت، دولومیت و کانی‌های رسی مانند کائولینیت و کانی‌های سیلیکاتی است، خاک مورد بررسی از نظر ترکیب کانی‌شناسی در گروه خاک‌های مارنی قرار می‌گیرد. همچنین این خاک از محدوده‌ای در جنوب استان قم برداشت شده که طبق

مقدار وزن مخصوص آن $1/13$ گرم بر سانتیمتر مکعب اندازه گیری شد. همچنین مشخصات مربوط به تحلیل شیمیایی روغن سوخته در جدول ۳ نشان داده شده است.

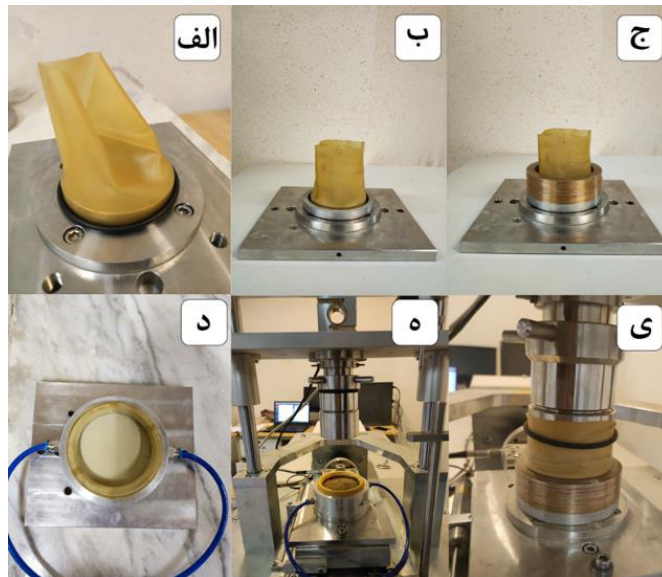
جدول ۳- آنالیز شیمیایی عناصر موجود در روغن سوخته

نام عنصر	علامت علمی	مقدار (PPM)
گوگرد	S	۴۸۴۹۰
نیتروژن	N	۵۳
فسفر	P	کمتر از ۶
وانادیم	V	کمتر از ۵
سرب	Pb	کمتر از ۱۰
مس	Cu	کمتر از ۰/۲
آلومینیوم	Al	کمتر از ۲/۵

۲-۲- آماده سازی نمونه ها

در این مطالعه خاک مارن برداشت شده از منطقه شهرک قدس استان قم، جهت خشک شدن به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نگهداری شد. علت عدم اعمال دماهای بالاتر جلوگیری از هرگونه تغییر در

خواص شیمیایی خاک بوده است. در گام بعد خاک خشک شده از الک ۲۰۰ عبور داده شد. سپس به وسیله اسپری ۸ درصد رطوبت به خاک اضافه گردید و پس از یک روز استراحت به منظور پخش یکنواخت رطوبت در سراسر نمونه، روغن سوخته با مقادیر صفر و ۴ و ۸ و ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی خاک خشک با نمونه خاک ترکیب شد. لازم به ذکر است که روغن سوخته در در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعد برای اطمینان از یکنواختی مخلوط، نمونه ها در نایلون نگهداری و ورز داده شدند. در آخر پس از ۲۴ ساعت استراحت مجدد مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله بعد تمامی نمونه ها با تراکم نسبی ۸۵ درصد و وزن واحد حجم ۱.۵ گرم بر سانتی متر مکعب، داخل رینگ های دستگاه برش ساده در دو لایه بازسازی شدند. لازم به ذکر است که قطر نمونه های ساخته شده ۷/۲۴ سانتی متر و ارتفاع آنها ۲ سانتی متر است. مراحل ساخت نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مراحل ساخت نمونه الف) قرارگیری غشا دور پایه نگهدارنده، ب) رینگ هم سطح سازی، ج) رینگ های محصورکنندگی نمونه، د) بستن قالب و وکیوم کردن فضای داخل قالب به منظور ساخت نمونه، ه) قراردادن پداستال زیر دستگاه و ی) قرار دادن درپوش بارگذاری بر روی نمونه و باز کردن قالب نمونه

انجام آزمایشات در حالت اشباع) غشا را به پداستال محکم کرد (شکل ۳ قسمت الف). در مرحله بعد پایه و رینگ های آزمایش روی پداستال قرار گرفتند (شکل ۳ قسمت ب و

در این گام جهت ساخت نمونه ها برای آزمایش برش ساده ابتدا غشا متناسب دور پداستال قرار گرفت و یک اورینگ برای جلوگیری از نشت هوا و نشت آب (در صورت

متر در نظر گرفته شد که ممکن است تحت تاثیر نفوذ آلاینده و بارگذاری متناوب (به طور مثال بارهای ترافیکی در بسترهای راهسازی و آلودگی ناشی از روغن ریزی وسایل نقلیه سنگین) قرار گیرند. لازم به ذکر است که بارگذاری قائم برای تمامی نمونه‌ها در چهار مرحله انجام شد تا اثر تنش به صورت یکنواخت توزیع شود و از پدیده آرچینگ جلوگیری شود. همچنین این اقدام به کاهش اثر نشست تحکیمی ناشی از سربار وارد شده به نمونه کمک می‌کند. مشخصات نمونه‌های ساخته شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

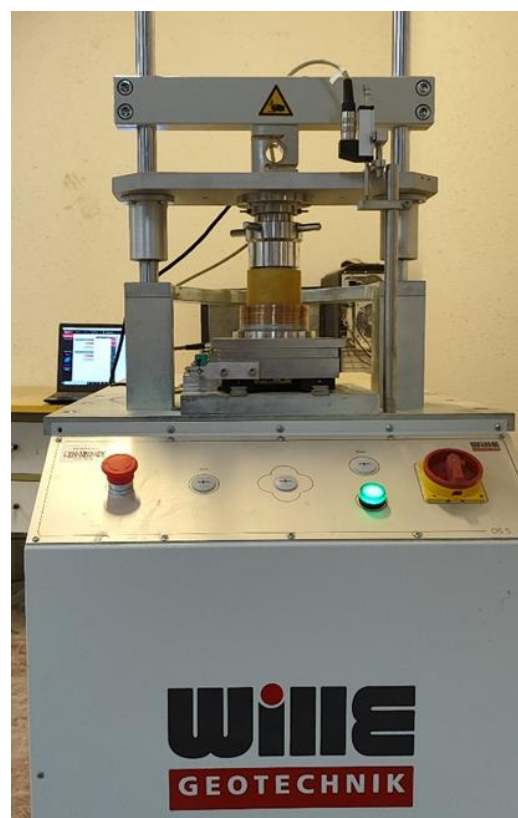
در این آزمایش‌ها برای مقایسه رفتار مونوتونیک با رفتار فراسیکلی، نمونه‌ها در گام اول تحت بارگذاری مونوتونیک و در گام بعد تحت بارگذاری سیکلیک-مونوتونیک قرار گرفتند.

در آزمایش‌های مونوتونیک صورت گرفته با توجه به ریزدانه بودن خاک مورد استفاده و لزوم ایجاد شرایط شبه استاتیکی سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق برای انجام آزمایش‌ها سیکلی فرکانس ۱ هرتز انتخاب شد. در پژوهشی که سهرابی بیدار و همکاران انجام دادند ایشان منحنی‌های بزرگنمایی به ازای ویژگی‌های دینامیکی متفاوت لایه‌های آبرفت و سنگ بستر در شهر قم را محاسبه و نتایج را با بزرگنمایی حاصل از داده‌های خرد لرزه مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که در همه مدل‌های سرعت، بزرگنمایی مشخصی در محدوده بسامدهای کمتر از ۱ هرتز به دست آمده است [۲۸]. به همین دلیل این فرکانس برای انجام آزمایش‌ها آتی انتخاب گردید. همچنین برای انتخاب تعداد سیکل در این پژوهش از روابط تجربی و نمودارهای ارائه شده توسط استافورد و همکاران کمک گرفته شد. با توجه به این نمودارها و اطلاعات بدست آمده از بزرگترین زلزله رخ داده در استان قم تعداد ۲۰ سیکل برای آزمایش‌ها تعیین گردید [۲۹]. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها سیکلی در شرایط کرنش ثابت انجام شدند.

ج). در گام بعد قالب ریمولد بسته شد و به وسیله وکیوم غشا به قالب محکم گردید. سپس خاک آماده شده داخل محفظه رینگ‌ها ریخته شد و به کمک کوبه در دولایه به تراکم ۸۵ درصد رسید (شکل ۳ قسمت د). در ادامه پد استال روی دستگاه قرار گرفت و پیچ‌های نگهدارنده سفت شدند (شکل ۳ قسمت ه). برای شروع آزمایش درپوش بارگذاری روی نمونه قرار گرفت و سپس قالب ریمولد باز شد (شکل ۳ قسمت ی).

۳-۲- انجام آزمایشات

در این پژوهش از دستگاه برش ساده ساخت شرکت Wille با استاندارد ASTM-D6528 [۲۷] برای اعمال بارهای مونوتونیک و سیکلیک استفاده شد که تصویر این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمایی از دستگاه برش ساده ساخت شرکت Wille

در تمامی آزمایش‌ها تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به عنوان سربار انتخاب شدند. این تنش‌ها معادل تنش سربار ستون خاک در اعماق حدودی ۳، ۶ و ۹

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های ساخته شده

محتوای آلاینده					تنش سربار (kPa)
٪16	٪12	٪8	٪4	٪0	
M16-Z50	M12-Z50	M8-Z50	M4-Z50	*M0-Z50	50
CM16-Z50	CM12-Z50	CM8-Z50	CM4-Z50	CM0-Z50	
C16-Z50	C12-Z50	C8-Z50	C4-Z50	C0-Z50	
M16-Z100	M12-Z100	M8-Z100	M4-Z100	M0-Z100	100
CM16-Z100	CM12-Z100	CM8-Z100	CM4-Z100	CM0-Z100	
C16-Z100	C12-Z100	C8-Z100	C4-Z100	C0-Z100	
M16-Z150	M12-Z150	M8-Z150	M4-Z150	M0-Z150	150
CM16-Z150	CM12-Z150	CM8-Z150	CM4-Z150	CM0-Z150	
C16-Z150	C12-Z150	C8-Z150	C4-Z150	C0-Z150	

*حرف M نشان‌دهنده الگوی بارگذاری مونوتونیک، CM نشان‌دهنده الگوی بارگذاری سیکلیک- مونوتونیک و Z بیانگر تنش سربار می‌باشد.

از بارگذاری سیکلیک و پس از بارگذاری سیکلیک با دامنه کرنش‌های ۰/۲۵ و ۲/۷۲ درصد است.



شکل ۵- دستگاه تحکیم اتوماتیک (ساخت شرکت MTM)

بر این اساس به طور کلی منحنی تنش کرنش نمونه‌های حاوی آلاینده پایین‌تر از نمونه بدون آلاینده قرار گرفتند. از طرفی محدوده کرنش الاستیک مستقل از مقدار درصد آلاینده مشاهده شد. لازم به ذکر است که اختلاف مقاومت برشی نمونه‌های بدون آلاینده و حاوی آلاینده پس از بارگذاری سیکلیک نسبت به قبل از بارگذاری افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند ناشی از اثر مخرب آلاینده چسبندگی کلاسترهای رسی و چفت و بست بهتر ذرات

یکی از دلایل این انتخاب امکان بررسی تاثیر دامنه کرنش بر رفتار سیکلی و فراسیکلی خاک مارن می‌باشد. جهت بررسی این رفتار دامنه کرنش‌های ۰/۲۵ و ۲/۷۲ درصد انتخاب شدند. کرنش ۲/۷۲ درصد معادل ۷۰ درصد بیشینه کرنش الاستیک در آزمایش‌های مونوتونیک می‌باشد و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد به نحوی محاسبه شد تا با توجه به رابطه سید و ادریس میزان شتاب ماکزیمم زلزله‌ی به وجود آمده با این میزان کرنش، معادل با شتاب ماکزیمم زلزله شهر قم باشد.

برای انجام آزمایش تحکیم از قالب نمونه با قطر ۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰ میلیمتر که جهت نمونه برداری از نمونه‌های فراسیکلی دستگاه برش ساده مناسب بودند، استفاده شد. مطابق شکل ۵ به منظور تعیین اثر بارگذاری سیکلی و آلاینده روغن سوخته بر روی خاک مارن، ۴ نمونه به کمک دستگاه تحکیم اتوماتیک مورد ارزیابی قرار گرفتند. به طور مشخص نمونه‌های حاوی آلاینده و بدون آن قبل و پس از بارگذاری، آماده و آزمایش تحکیم بر روی آن‌ها انجام شد.

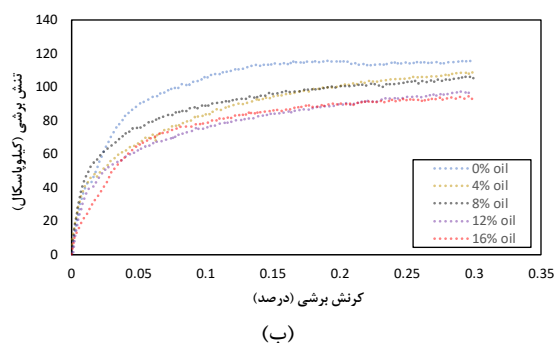
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه منحنی تنش و کرنش

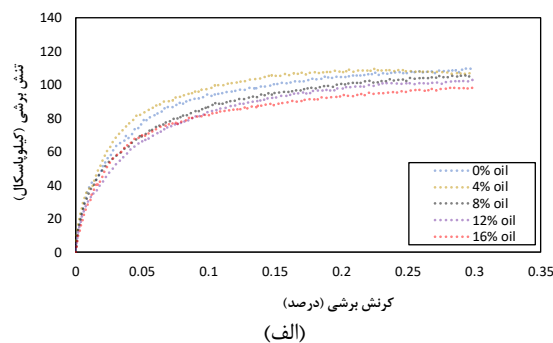
شکل ۶، نشان دهنده منحنی تنش- کرنش نمونه‌های خاک با درصد آلاینده صفر، ۸ و ۱۶ درصد قبل

ناشی از بارگذاری سیکلیک که در خاک سالم رخ می‌دهد، در خاک آلوده خیلی کمتر صورت می‌گیرد.

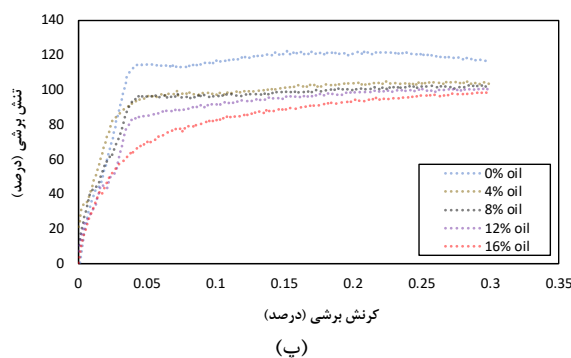
مرتبط باشد. به بیان دیگر روغن در حفرات و بین ذرات رس نفوذ کرده و مانع از تماس مستقیم ذرات می‌شود. بنابراین بازچینش مؤثر ذرات محدود است و تراکم ثانویه



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۶- منحنی تنش کرنش در سربار ۱۵۰ کیلو پاسکال (الف) پیش از بارگذاری سیکلیک، (ب) پس از بارگذاری سیکلیک با دامنه کرنش ۲۵/۰ درصد و (پ) پس از بارگذاری سیکلیک با دامنه کرنش ۲/۲۲ درصد

همین دلیل نیروی جاذبه آن‌ها نسبت به سطح ذرات خاک یک پیوند ضعیف است و به صورت کلی این پیوند فقط به خارج از سطح خاک محدود می‌شود [۳۰]. به عبارت دیگر پیوند تشکیل شده توسط مواد هیدروکربنی، پیوندی کوالانسی است که نسبت به آب با پیوند دوقطبی بسیار ضعیف‌تر است. علاوه بر دلایل ذکر شده رتناورا^۴ و همکاران نیز عنوان کردند که افزایش ویسکوزیته و همچنین وجود فاز مخلوط نشدنی در ساختار خاک می‌تواند مقاومت برشی آن را کاهش دهد [۳۱].

از سوی دیگر با افزایش سربار مطابق شکل ۷- ب، مقاومت برشی افزایش پیدا کرد. به بیان دیگر با تغییر سربار از ۵۰ به ۱۵۰ کیلو پاسکال مقاومت برشی در نمونه‌های بدون آلاینده، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد آلاینده به ترتیب ۱۱۳، ۱۱۸، ۱۲۹، ۱۳۴ و ۱۰۵ درصد افزایش یافته است. این

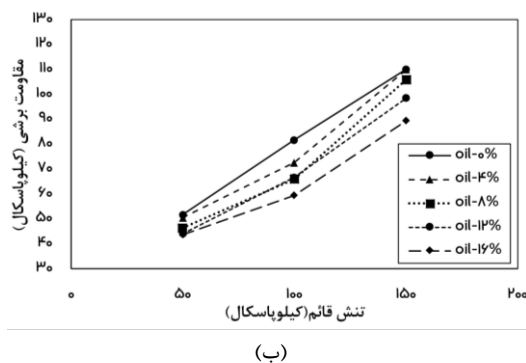
۳-۲- رفتار مونوتونیک خاک مارن آلوده به روغن سوخته

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مونوتونیک با تمرکز بر دو متغیر درصد آلاینده و سربار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۷- الف، تغییرات مقاومت برشی بر حسب درصد روغن سوخته را در سربارهای مختلف نشان می‌دهد. طبق نتایج، افزایش روغن سوخته تا ۴ درصد اثر زیادی بر روی پارامتر مقاومت برشی نداشته اما از ۴ درصد به بعد به طور کلی، افزایش درصد آلاینده موجب کاهش مقاومت برشی بین ۲۰ تا ۴۷ درصد شد. نتایج مشابه در تحقیقات یونگ^۳ و همکاران با آلاینده نفت خام نیز مشاهده شده است. مطابق استدلال‌های محققین مذکور، جذب نفت خام خواص سطحی ذرات خاک رس را به شرایط آب‌گریز تغییر می‌دهد. همچنین ترکیبات غیر قطبی (هیدروکربنی) دارای ممان دوقطبی کمتری هستند؛ به

⁴ Ratnaweera

³ Yong

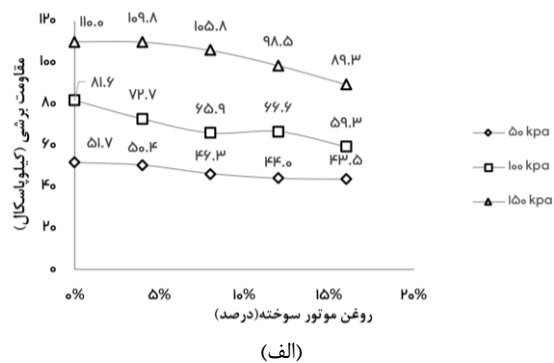
نشست آنی صعودی شده و نمونه خاک کاهش حجم بیشتری را تجربه کرده و متراکم تر می شود.



شکل ۷- تغییرات مقاومت برشی برحسب (الف) درصد روغن سوخته در سربارهای مختلف و (ب) سربار برای درصدهای مختلف آلاینده

درصد نفت خام به ۱۲ درصد، کاهش ۳۶/۵ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی مشاهده کردند. این کاهش به وجود اثر روانکاری روغن بر روی سطح ذرات نسبت داده شد [۳۷]. کاهش کمتر زاویه اصطکاک داخلی در خاک مارن نسبت به پژوهش مذکور می تواند ناشی از باشد که روغن سوخته نسبت به نفت خام خواص روانکاری خود را تا حد زیادی پس از مصرف از دست می دهد، بنابراین این کاهش نامحسوس منطقی به نظر می رسد. لازم به ذکر است که خاک مارن در مقایسه با خاک رس به دلیل وجود کربنات ها و ساختار گسسته تر، در برابر آب ناپایدار ولی در برابر آلاینده های هیدروکربنی نظیر نفت و روغن سوخته پایدارتر رفتار می کند. این ساختار پایدارتر باعث کاهش وارفتگی و واکنش پذیری آن به دلیل عدم جذب آب در حضور آلاینده های هیدروکربنی می شود [۳۸]. بطور کلی نتایج نشان داد که افزایش درصد آلاینده تحت بارگذاری مونوتونیک باعث کاهش ۲۵ تا ۴۴ درصدی مدول برشی سکانتی در سربارهای متفاوت شده است. کاهش مدول برشی سکانتی در اثر افزایش آلودگی را می توان به تضعیف پیوندهای بین ذره ای، کاهش اصطکاک داخلی، و محدود شدن فرآیند تراکم مؤثر به واسطه نفوذ روغن سوخته نسبت داد.

افزایش مقاومت با افزایش سربار را می توان به متراکم تر شدن خاک نسبت داد. به طور دقیق تر با افزایش سربار روند



لازم به ذکر است که چسبندگی خاک با افزایش درصد روغن سوخته از صفر تا ۸ و ۱۶ درصد به ترتیب ۴۲ و ۴۷ درصد مطابق با جدول ۵ کاهش پیدا کرد. مشابه این روند در پژوهش هوید^۵ و همکاران مشاهده شد. ایشان دریافتند که چسبندگی زهکشی نشده نمونه آلوده حاوی ۱۵ درصد روغن موتور در مقایسه با نمونه مرجع حدود ۶۲/۵ درصد کاهش یافت [۳۲]. همچنین در پژوهشی دیگر رجایی و همکاران دریافتند که با افزایش روغن سوخته، چسبندگی در خاک رس کاهش محسوس را تجربه می کند [۱۶]. در خصوص تشریح علل این پدیده می توان گفت که آب لایه دوگانه مسئول رفتار پلاستیک خاک های رسی است و به صورت الکتریکی جذب سطح ذرات رس می شود [۳۳]. تغییرات در ثابت دی الکتریک سیال منفذی می تواند بر ضخامت لایه دوگانه تأثیر بگذارد [۳۴]. از آنجایی که ثابت دی الکتریک نفت خام (یعنی ۲-۲/۲) کمتر از آب (یعنی ۸۰) است، افزودن روغن به خاک ضخامت لایه دوگانه را کاهش می دهد [۳۵] که این منجر به کاهش چسبندگی خاک می شود [۳۶]. این روند برای زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز مشاهده شد اما تغییرات این پارامتر نامحسوس و حداکثر حدود ۶ درصد بود. این کاهش در پژوهش سلیم نژاد و همکاران بر روی خاک رس با پلاستیسیته بالا آلوده به نفت نیز دیده شد. ایشان با افزایش

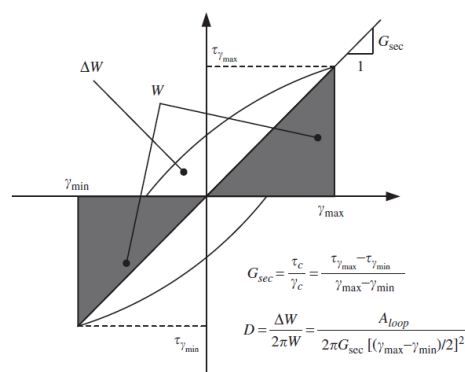
⁵ Hewayde

جدول ۵- پارامترهای مقاومت برشی برای تمامی درصد‌های آلاینده تحت بارگذاری مونوتونیک و پیش از بارگذاری سیکلیک

ردیف	آلاینده (%)	چسبندگی بر حسب کیلوپاسکال - (درصد کاهش نسبت به نمونه بدون آلودگی)	زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه - (درصد کاهش نسبت به نمونه بدون آلودگی)
۱	صفر	۲۲/۷ - (صفر)	۳۰/۳ - (صفر)
۲	۴	۱۸/۲ - (۲۰٪)	۳۰/۷ - (۱/۴٪)
۳	۸	۱۳/۱۲ - (۴۲٪)	۳۰/۸ - (۱/۷٪)
۴	۱۲	۱۵/۲۴ - (۳۳٪)	۲۸/۶ - (۵/۶٪)
۵	۱۶	۱۲ - (۴۷٪)	۲۸/۹ - (۴/۶٪)

[۳۹]. شماتیک انجام محاسبات از روی حلقه‌های هیستریزس در شکل ۹ نشان داده شده است.

$$\text{میرایی} = \frac{\text{مساحت لوپ هیستریزس}}{(2 \times \pi \times \text{مساحت مثلثها})} \quad (1)$$

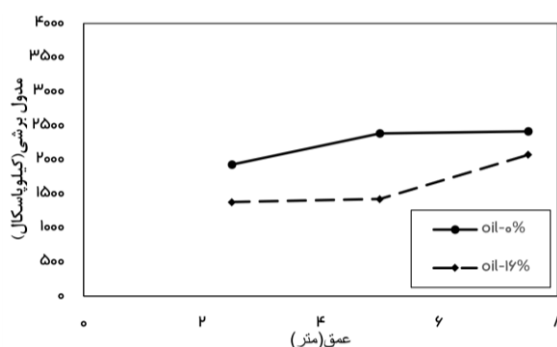


شکل ۹- محاسبه نسبت میرایی از روی نمودار هیستریزس

[۳۲]

در شکل ۱۰، اثر سربارهای ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال برای درصد‌های صفر و ۱۶ درصد و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد نشان داده شده است. طبق نتایج، به طور کلی افزایش سربار، فارغ از وجود آلاینده در خاک مارن، منجر به کاهش میرایی در نمونه‌ها شد. به بیان دقیق‌تر با افزایش سربار از ۵۰ به ۱۵۰ کیلوپاسکال در نمونه‌های بدون آلاینده و حاوی ۱۶ درصد آلاینده، میرایی به ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در تمامی سربارها با افزایش سیکل‌های بارگذاری، میرایی کاهش یافت. این نتیجه توسط آسانگو و همکاران نیز به دست آمده است [۴۰]. علت هردو این موارد را می‌توان به ترتیب به اثر تحکیم‌گونه سربار و بارگذاری افقی در کاهش

همچنین لازم به ذکر است که مدول برشی سکانتی با افزایش عمق خاک (معادل سربار) از ۲/۵ تا ۷/۵ متر (۵۰ تا ۱۵۰ کیلوپاسکال) در خاک بدون آلاینده و حاوی ۱۶ درصد آلاینده به ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد افزایش یافت. بنابراین مدول برشی با افزایش مقادیر سربار، رابطه مستقیم و با درصد آلاینده رابطه معکوس دارد. این نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. علت این افزایش مدول برشی را می‌توان به کاهش حجم و متراکم‌تر شدن نمونه‌ها بر اثر افزایش سربار نسبت داد.



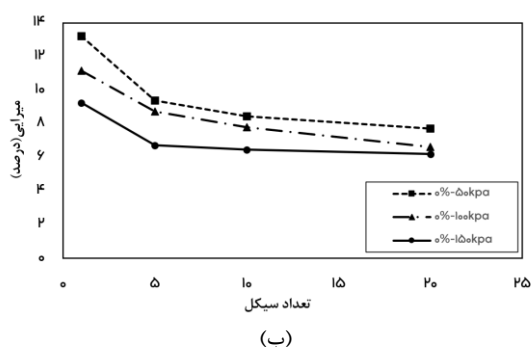
شکل ۸- تغییرات مدول برشی بر حسب تغییرات عمق نمونه‌ها برای نمونه بدون آلودگی و ۱۶ درصد آلاینده

۳-۳- رفتار سیکلیک خاک مارن آلوده به روغن سوخته

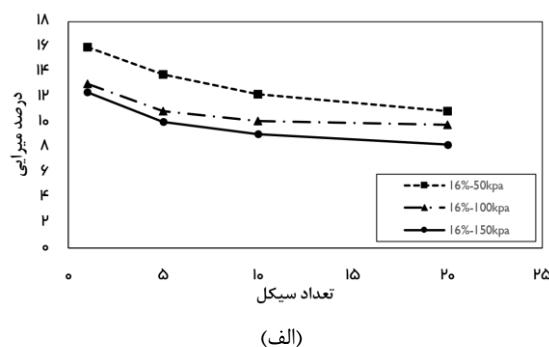
۳-۳-۱- میرایی

در این بخش به بررسی نحوه تغییرات نسبت میرایی تحت تاثیر درصد آلاینده و فشار سربار پرداخته می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که در این پژوهش از رابطه ارائه شده توسط فردین و همکاران برای انجام محاسبات میرایی از روی حلقه‌های هیستریزس استفاده شد (رابطه (۱))

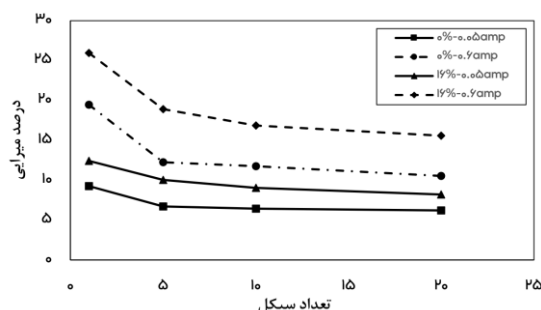
نمود. به طور کلی هرچه نسبت تخلخل افزایش پیدا کند، میرایی خاک نیز افزایش پیدا می‌کند. در این رابطه می‌توان گفت که حضور فضای خالی در میان ذرات خاک باعث اتلاف انرژی از روش‌های مختلف مانند حرکت آب یا هوا و تغییر در آرایش ذرات می‌گردد. همچنین با افزایش دامنه کرنش نسبت تخلخل افزایش یافته و به دنبال آن میرایی افزایش می‌یابد. نتایج مشابه در تحقیقات فرناندا^۶ و همکاران نیز مشاهده شده است [۴۱].



خلل و فرج نمونه‌ها و افزایش قفل و بست نسبت داد. همچنین آن را با توجه به اثر روغن کاری بین ذرات خاک به حضور آلاینده نیز مرتبط دانست. همچنین نسبت میرایی با افزایش دامنه کرنش از ۰/۲۵ درصد تا ۲/۷۲ درصد برای نمونه‌هایی با درصد آلاینده‌های مشابه افزایش یافت. این اثر دامنه کرنش برشی بر تغییرات نسبت میرایی در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد. از پارامترهای تاثیرگذار بر روی میرایی و مدول برشی می‌توان به تاثیر نسبت تخلخل اشاره



شکل ۱۰- تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل برای سربارهای متفاوت در نمونه (الف) با ۱۶ درصد آلاینده و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد و (ب) بدون آلاینده و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد



شکل ۱۱- تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل برای دامنه‌های کرنش برشی متفاوت در نمونه‌های صفر و ۱۶ آلاینده و تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال

برای درصدهای مختلف روغن سوخته در سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد.

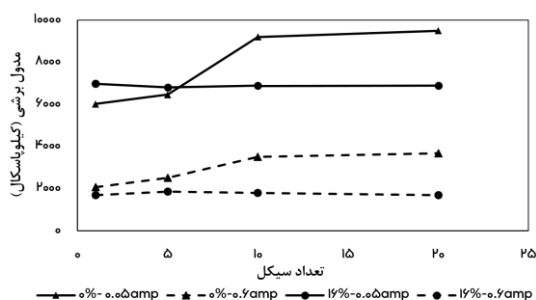
همچنین در شکل ۱۳ منحنی تغییرات نسبت میرایی نسبت به تغییرات کرنش برشی نشان داده شده است. مطابق نتایج بدست آمده با افزایش دامنه کرنش، نسبت میرایی افزایش می‌یابد. این افزایش را می‌توان به تضعیف

از طرف دیگر، افزایش دامنه کرنش منجر به افزایش نسبت میرایی شد. به عبارت بهتر افزایش دامنه کرنش پس از ۲۰ سیکل منجر به افزایش ۶۸ تا ۸۹ درصدی میرایی گشت که بیشترین اثر در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد آلاینده و تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال به دست آمد. نتایج نشان داد که افزایش آلاینده باعث افزایش نسبت میرایی شده است. تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل

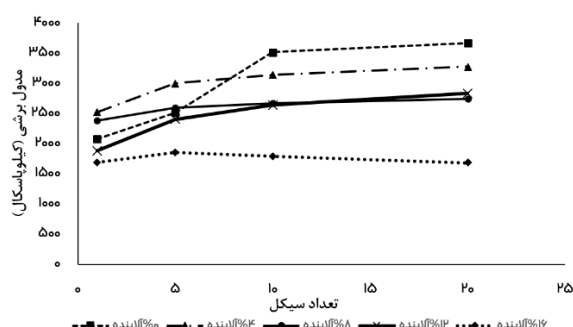
⁶ Fernanda

با درصد روغن سوخته مشابه مدول برشی کاهش یافت. این موضوع در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که برای میرایی نیز اشاره شد، علت این کاهش را می‌توان به افزایش نسبت تخلخل ذرات خاک در اثر افزایش دامنه کرنش برشی نسبت داد. بنابراین دامنه کرنش بر خلاف نسبت میرایی با مدول برشی رابطه معکوس را نشان داد.

لازم به ذکر است که به طور کلی مدول برشی با افزایش مقادیر روغن سوخته کاهش یافت. این روند در پژوهش حسینی و همکاران نیز دیده شد. ایشان روند نزولی در مدول الاستیسیته خاک رس با پلاستیسیته کم را تحت اثر آلودگی ناشی از نفت خام مشاهده کردند [۴۳]. این نتیجه را می‌توان به تضعیف ساختار خاک تحت اثر روغن سوخته نسبت داد. در شکل ۱۵ تغییرات مدول برشی با تغییر درصد آلاینده برای سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال و دامنه کرنش ۲/۷۲ درصد قابل مشاهده می‌باشد.

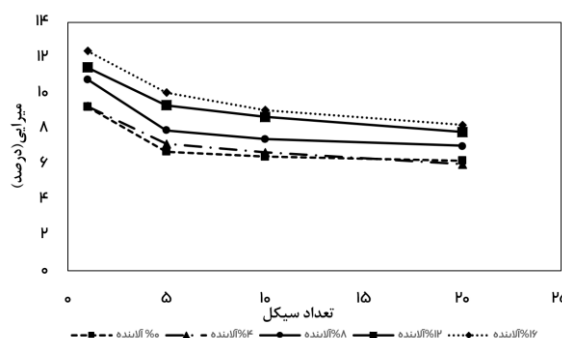


شکل ۱۴- تغییرات مدول برشی برحسب تعداد سیکل برای دامنه کرنش‌های مختلف در نمونه‌های صفر و ۱۶ درصد آلاینده

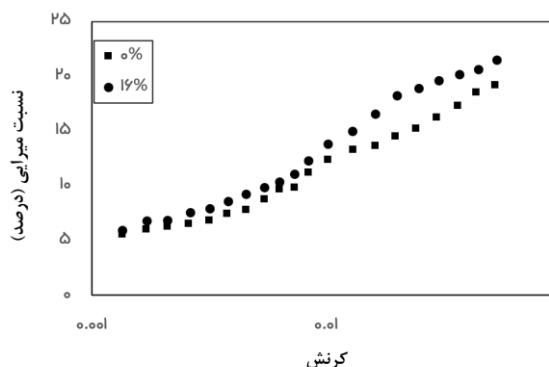


شکل ۱۵- تغییرات مدول برشی برحسب تعداد سیکل برای سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال و دامنه کرنش ۲/۷۲ درصد در نمونه‌های با درصد آلاینده متفاوت

ساختار و پیوندهای خاک در اثر افزایش کرنش نسبت داد. لازم به ذکر است که این اختلاف به صورت متوسط ۱۴ درصد محاسبه شد.



شکل ۱۶- تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل برای درصد روغن سوخته‌های مختلف در سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال و دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد



شکل ۱۷- تغییرات میرایی برحسب کرنش برشی در نمونه‌های صفر و ۱۶ درصد آلاینده برای سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

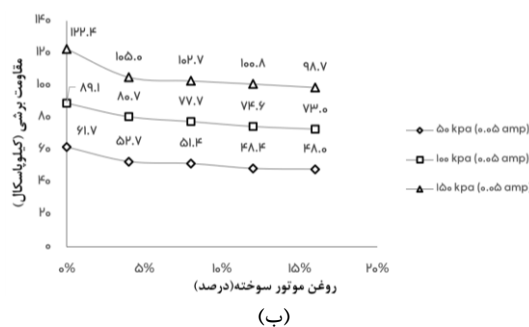
۳-۳-۲- مدول برشی

در این بخش نیز تاثیرات درصد آلاینده و فشار سربار بر پارامتر مدول برشی سکانتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق نتایج بدست آمده مدول برشی با بیشتر شدن مقادیر سربار افزایش یافت. این نتیجه با توجه به متراکم شدن نمونه در اثر بارگذاری سربار محتمل به نظر می‌رسید. همچنین نتایج مشابه در تحقیقات یان و همکاران نیز مشاهده گردیده است. ایشان علت این افزایش را تماس بیشتر ذرات خاک بر اثر افزایش عمق و در نتیجه آن اتلاف انرژی کمتر در خاک ذکر کردند [۴۲]. همچنین با افزایش دامنه کرنش از ۰/۲۵ درصد تا ۲/۷۲ درصد برای نمونه‌هایی

آسیب رسیدن به پیوند و ساختار خاک می‌گردد که در نتیجه آن سختی خاک کاهش یافته است. از طرفی دیگر با افزایش دامنه کرنش برشی اختلاف مدول برشی در دو نمونه صفر و ۱۶ درصد آلاینده افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که این اختلاف به صورت متوسط ۱۸ درصد برآورد شد.

۳-۴- رفتار فراسیکلیک خاک مارن آلوده به روغن- سوخته

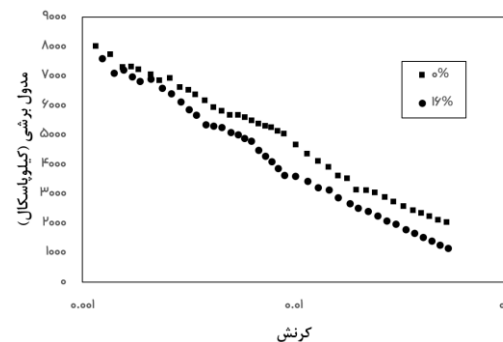
همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد برای بررسی اثر دامنه کرنش بر روی پارامترهای مقاومتی خاک، دامنه کرنش‌های ۲/۷۲ و ۰/۲۵ درصد بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. نمودارهای مقاومت برشی برحسب درصد روغن سوخته در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقاومت برشی با افزایش درصد روغن سوخته روند کاهشی به خود گرفته است. شایان ذکر است که کمترین میزان مقاومت برشی روغن سوخته مربوط به نمونه‌های با ۱۶ درصد آلاینده بوده است. همچنین درصد کاهش مقاومت برشی ناشی از ۱۶ درصد آلاینده نسبت به نمونه بدون آن، حداکثر ۲۲ درصد مشاهده شد.



شکل ۱۷- تغییرات مقاومت برشی برحسب درصد آلاینده پس از بارگذاری سیکلیک برای سربارهای مختلف با کرنش (الف) ۰/۲۵ و (ب) ۲/۷۲ درصد

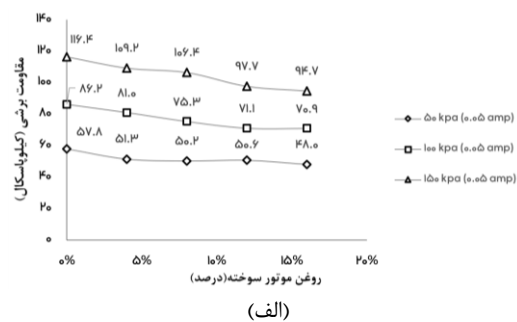
این نمودار مقاومت برشی با افزایش تنش سربار اعمالی افزایش یافت.

در شکل ۱۶، منحنی تغییرات مدول برشی نسبت به تغییرات کرنش برشی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه کرنش از محدوده ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۵۲، مدول برشی در نمونه‌های بدون آلاینده و حاوی ۱۶ درصد آلاینده به ترتیب ۷۵ و ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. به طور دقیق‌تر مدول برشی نمونه بدون آلاینده از ۸۰۲۲ به ۲۰۳۰ و نمونه حاوی ۱۶ درصد آلاینده از ۷۶۰۲ به ۱۱۵۲ کیلوپاسکال می‌رسد.



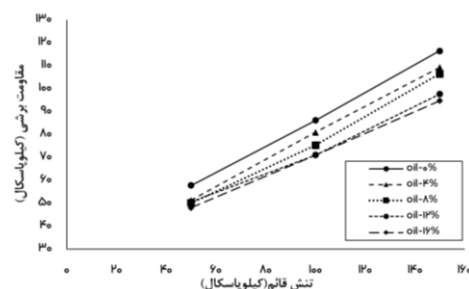
شکل ۱۶- تغییرات مدول برشی برحسب تغییرات کرنش برشی در نمونه‌های صفر و ۱۶ درصد آلاینده برای سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

با افزایش دامنه کرنش برشی تغییر شکل‌های بزرگتری در ساختار خاک ایجاد می‌شود و این موجب



لازم به ذکر است که تغییرات دامنه کرنش، تاثیر محسوسی بر روی مقاومت برشی نگذاشت. همچنین در شکل ۱۸ تغییرات مقاومت برشی با تغییر سربار برای دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد نشان داده شده است. به طور کلی مطابق

۱۶ درصد آلاینده، کاهش ۲۸ درصدی را نسبت به نمونه بدون آلاینده تجربه کرد. همچنین زاویه اصطکاک داخلی نمونه حاوی ۱۶ درصد آلاینده نسبت به نمونه بدون آلاینده ۱۴ درصد کاهش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در بازه صفر تا ۸ درصد آلاینده بیشتر از ۸ تا ۱۶ درصد برآورد شد. به عبارت دیگر برای ۸ تا ۱۶ درصد آلاینده، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی کاهش نامحسوس حدود یک درصد را نشان داد. طبق نتایج بدست آمده پارامتر چسبندگی پس از اعمال بار سیکلیک نسبت به پیش از آن افزایش محسوسی را تجربه کرد. این تغییرات در خصوص پارامتر زاویه اصطکاک داخلی نامحسوس بود.



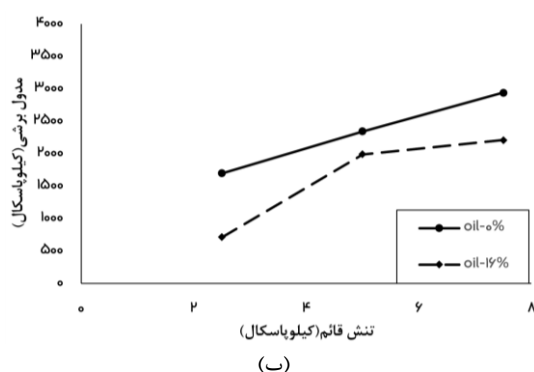
شکل ۱۸- تغییرات مقاومت برشی با تغییر سربار برای دامنه کرنش ۰/۲۵ درصد

پارامترهای مقاومت برشی پس از اعمال بار سیکلیک در جدول شماره ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد چسبندگی خاک با افزایش میزان روغن سوخته کاهش محسوسی یافته است. به طوری که نمونه با

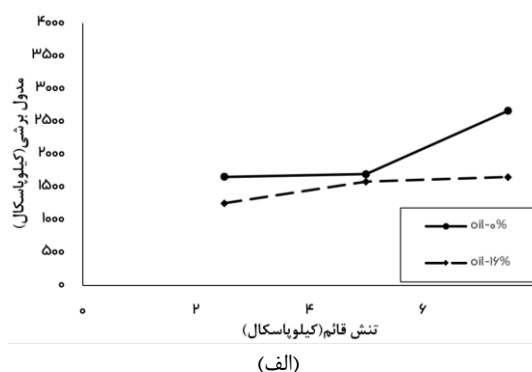
جدول ۶- پارامترهای مقاومت برشی برای تمامی درصدهای آلاینده پس از بارگذاری سیکلیک

ردیف	آلاینده (%)	چسبندگی بر حسب کیلوپاسکال - (درصد کاهش نسبت به نمونه بدون آلودگی)	زاویه اصطکاک داخلی بر حسب درجه - (درصد کاهش نسبت به نمونه بدون آلودگی)
۱	صفر	۳۱/۲۶ (صفر٪)	۳۱/۲۶ (صفر٪)
۲	۴	۲۷/۱۱ (۱۳٪)	۲۷/۶۲ (۱۲٪)
۳	۸	۲۵/۹۷ (۱۷٪)	۲۷/۱۶ (۱۳٪)
۴	۱۲	۲۲/۱۱ (۲۹٪)	۲۷/۶۷ (۱۱٪)
۵	۱۶	۲۲/۴۶ (۲۸٪)	۲۶/۹۰ (۱۴٪)

نمونه‌های بدون آلاینده بدست آمد. این کاهش مدول برشی تحت اثر افزودن آلاینده حداکثر تا ۵۷ درصد بوده و دلیل آن می‌تواند به دلیل تخریب اتصالات و باندهای موجود بررسی باشد.



شکل ۱۹، نشان دهنده تاثیر افزایش عمق و به تبع آن افزایش سربار بر مدول برشی نمونه‌های با آلاینده و بدون آلاینده است. بر پایه این نمودار با افزایش عمق نمونه‌ها، مدول برشی نیز متاثر از آن افزایش یافت. به طور کلی در نمونه‌های دارای آلاینده مدول برشی کمتری نسبت به

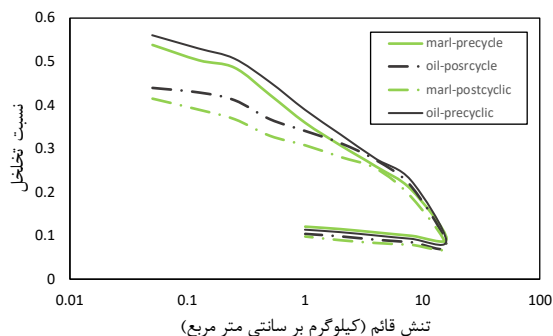


شکل ۱۹- تغییرات مدول برشی با افزایش عمق و درصد آلاینده برای دامنه کرنش (الف) ۰/۲۵ و (ب) ۲/۷۲ درصد

بر پارامترهای تحکیمی

۳-۵- تاثیر بارگذاری سیکلیک و آلودگی روغن سوخته

درصد آلاینده برابر با ۲۳ و ۳۰ درصد بود. ضریب تورم نسبت به ضریب فشردگی تغییرات بسیار کمتری را تجربه کرد.



شکل ۲۰- نمودار تحکیم نمونه‌های حاوی آلاینده و بدون آن تحت قبل و بعد از بارگذاری سیکلیک

جدول ۷- مقادیر ضریب تورم و ضریب فشردگی برای نمونه‌های حاوی و فاقد آلاینده

عنوان نمونه	ضریب فشردگی (Cc)	ضریب تورم (Cu)
بدون آلاینده - پیش از بارگذاری سیکلیک	۰/۱۷۹۷	۰/۰۲۳۲
حاوی آلاینده - پیش از بارگذاری سیکلیک	۰/۱۹۰۵	۰/۰۲۳۱
بدون آلاینده - پس از بارگذاری سیکلیک	۰/۱۳۸۱	۰/۰۲۱۲
حاوی آلاینده - پس از بارگذاری سیکلیک	۰/۱۴۶۲	۰/۰۲۱۲

در این تحقیق آزمایش SEM (تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی) به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج و مطابقت آن‌ها با خصوصیات ریزساختاری خاک مارن آلوده به روغن سوخته بر روی نمونه‌ها انجام شد. تصاویر این آزمایش‌ها پیش از بارگذاری سیکلیک و پس از آن با مقیاس بزرگنمایی ۵ میکرومتر در شکل ۲۱- الف و با مقیاس بزرگنمایی ۱۰ میکرومتر در شکل ۲۱- ب نشان داده شده است. مقایسه تصاویر قبل و بعد از اعمال باریسکلی در مقیاس‌های بزرگنمایی ۵ و ۱۰ میکرومتر نشان داد، ذرات خاک بر اثر اعمال باریسکلی به یکدیگر نزدیک‌تر شده‌اند و چفت و بست ذرات باعث متراکم‌تر شدن خاک نسبت به پیش از بارگذاری سیکلی شده است که در نتیجه آن کاهش تخلخل و به دنبال آن افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها حاصل شد.

نمودارهای آزمایش تحکیم در شکل ۲۰ و ضرایب تورم و فشردگی نمونه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. در این خصوص، ضریب فشردگی در نمونه‌های حاوی ۱۶ درصد روغن سوخته تقریباً ۶ درصد بیشتر از نمونه‌های بدون آلاینده به دست آمد. علت این موضوع را می‌توان به کاهش اصطکاک بین ذرات به دلیل افزایش لغزش آنها و اثر روان‌کنندگی روغن سوخته نسبت داد. در نتیجه این اتفاق تراکم پذیری خاک مارن تسهیل می‌شود. مشابه این نتیجه در پژوهش سلیم نژاد و همکاران در خصوص نفت خام نیز دیده شد [۳۷]. از طرف دیگر، بارگذاری سیکلیک باعث کاهش ضریب فشردگی در نمونه‌های دارای آلاینده و بدون آلاینده شد. این کاهش به ترتیب برای نمونه صفر و ۱۶

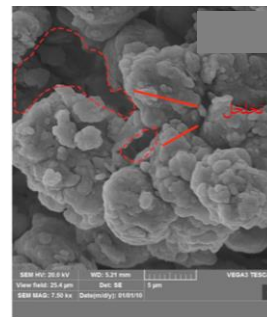
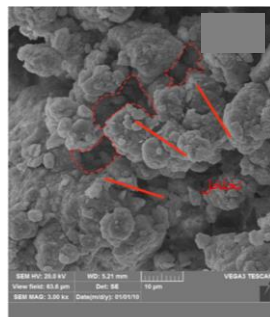
به طور دقیق‌تر وجود آلاینده تأثیری بر روی نتایج نداشت. همچنین بارگذاری سیکلیک موجب کاهش ۸ درصدی این ضریب شد. مطابق تحقیقات جیا و همکاران دلیل اصلی متورم شدن برخی از خاک‌ها با جذب آب، وجود انواع خاصی از کانی‌های رسی مانند اسمکتیت، مونتموریلونیت، نونترونیت، ورمیکولیت، ایلیت و کلریت است [۴۴]. همچنین مطابق تحقیقات کمپ و همکاران وجود مواد معدنی غیرمتورم مانند کوارتز و کربنات‌ها نیز می‌تواند اثرات تورم این خاک‌ها را کاهش دهد [۴۵]. با توجه به نتایج آزمایش XRD، ۳۶ درصد خاک مارن مورد استفاده در این پژوهش از کلسیت تشکیل شده است. بنابراین این تغییرات نامحسوس در ضریب تورم خاک محتمل به نظر می‌رسید.

۳-۶- تصاویر و تفسیر آزمایش SEM

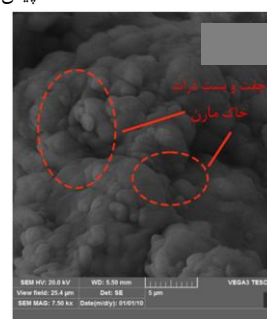
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر آلاینده روغن سوخته بر رفتار خاک مارن قبل از بارگذاری سیکلی، حین و پس

از آن پرداخته شد. به بیان دیگر پارامترهای مقاومتی نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول برشی نمونه‌های حاوی آلاینده و بدون آلاینده مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین اثر سربارهای مختلف بر این نمونه‌ها بررسی شد.



پیش از بارگذاری سیکلی



پس از بارگذاری سیکلی

(ب)

(الف)

شکل ۲۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی (الف) ۵ و (ب) ۱۰ میکرون

ناشی از جایگزینی روغن سوخته با ثابت دی‌الکتریک پایین‌تر نسبت به آب منفذی مربوط می‌شود. از طرفی وجود پوشش روغنی روی ذرات باعث کاهش تماس مؤثر بین آن‌ها می‌شود. همچنین مقایسه نتایج پیش از بارگذاری سیکلی و پس از آن، نشان داد بارسیکلی مقاومت برشی نمونه‌ها را افزایش داده است.

ب- پارامتر چسبندگی نمونه‌ها با افزایش درصد روغن سوخته تا ۴۷ درصد نسبت به نمونه فاقد آلاینده کاهش یافت. این کاهش برای زاویه اصطکاک داخلی نیز مشاهده شد، اما اثر آن نامحسوس (حداکثر ۶ درصد) بود. مشابه همین روند برای چسبندگی پس از بارگذاری فراسیکلی نیز مشاهده شد. پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک به ترتیب ۲۹ و ۱۴ درصد کاهش پیدا کردند. لازم به

همچنین در حین بارگذاری سیکلی با دامنه کرنش-های متفاوت نیز پارامترهای مدول برشی و میرایی مورد به منظور ارزیابی رفتار سیکلی مورد سنجش قرار گرفتند. از سوی دیگر پارامترهای تحکیمی در نمونه‌های حاوی آلاینده و بدون آن قبل و بعد از بارگذاری سیکلی مورد توجه قرار گرفت. در ادامه به نتایج به دست آمده در این پژوهش پرداخته می‌شود:

الف- افزایش درصد روغن سوخته در بارگذاری مونوتونیک (پیش از اعمال بارسیکلی) باعث کاهش مقاومت برشی نمونه‌ها گشت. بیشترین کاهش مقاومت در نمونه‌های با ۱۶ درصد آلاینده مشاهده شد که بسته به سربارهای متفاوت از ۱۵ تا ۲۷ درصد مقاومت برشی خاک را کاهش دادند. دلیل کاهش مقاومت برشی، به تضعیف چسبندگی بین ذرات خاک در اثر کاهش ضخامت لایه دوگانه آب

نسبت به نمونه بدون آلاینده شده است. همچنین بارگذاری سیکلیک منجر به کاهش ضریب فشردگی در نتایج تحکیم خاک شد. به طور دقیق تر این ضریب برای نمونه فاقد آلاینده ۲۳ درصد و برای نمونه ۱۶ درصد آلاینده، ۳۰ درصد کاهش را نشان داد. این اثرات درخصوص ضریب تورم ناچیز ارزیابی شد.

س- رفتار خاک مارن به دلیل ویژگی های کانی شناسی نظیر وجود مقادیر کلسیت و دولومیت برخلاف بسیاری از خاک های رسی خالص شامل برخی از تفاوت ها شد و رفتار پایدارتری نشان داد. کاهش زاویه اصطکاک داخلی در اثر آلودگی محدود ارزیابی شد و پس از بارگذاری سیکلی، افزایش چسبندگی و کاهش تخلخل در نمونه ها مشاهده شد. این نتایج را می توان تا حدودی به ساختار نیمه سخت و نسبتاً زاویه دار ذرات کربناته مرتبط دانست که باعث کاهش تخریب به دلیل واکنش پذیری کمتر مارن با روغن سوخته شد. همچنین کاهش اندک لغزش های بین ذره ای ناشی از تغییر اندک زاویه اصطکاک داخلی، نقش مهمی در حفظ و بهبود مقاومت خاک تحت شرایط بارگذاری متناوب ایفا کرد.

ذکر است که چسبندگی نمونه ها نسبت به پیش از بارگذاری سیکلی برای درصد آلاینده های مشابه افزایش یافت.

ج- مدول برشی در بارگذاری های مونوتونیک و فراسیکلی با افزایش مقادیر سربار رابطه مستقیم و با افزایش درصد آلاینده رابطه معکوس داشت.

د- در آزمایش های انجام شده نسبت میرایی با افزایش درصد آلاینده افزایش یافت و با افزایش سربار و تعداد سیکل روندی کاهشی را نشان داد. همچنین افزایش دامنه کرنش منجر به افزایش نسبت میرایی شد. به بیان دقیق تر افزایش دامنه کرنش پس از ۲۰ سیکل منجر به افزایش ۶۸ تا ۸۹ درصدی میرایی گشت که بیشترین اثر در نمونه های حاوی ۱۶ درصد آلاینده و تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال به دست آمد.

ر- مدول برشی با افزایش سربار، رابطه مستقیم و با افزایش درصد آلاینده رابطه معکوس داشت. همچنین افزایش دامنه کرنش منجر به کاهش مدول برشی شد. همچنین این اثر با افزایش درصد روغن سوخته تضعیف گردید.

ز- آزمایش های تحکیم بر روی نمونه های پیش از بارگذاری سیکلی نشان داد که ۱۶ درصد روغن سوخته باعث افزایش ۶ درصدی ضریب فشردگی

References

- [1] Papi M, Dehghani M, Amiri M. Investigation of the effect of heat on compressive strength and slaking of marl in southern Iran. In: 3rd National Conference on Geotechnical Engineering of Iran; 2018; Tehran, Iran. [In Persian]
- [2] Aiban SA. Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia. *Engineering Geology*. 1995; 39(3-4): 203-215. doi: 10.1016/0013-7952(95)00010-D
- [3] Paaza NEA, Lamas F, Irigaray C, Chacón J. Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeastern Granada Basin, Spain. *Engineering Geology*. 1998; 50(1-2): 165-175. doi: 10.1016/S0013-7952(98)00008-8
- [4] Lamas F, Irigaray C, Chacón J. Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores. *Engineering Geology*. 2002; 66(3-4): 283-294. doi: 10.1016/S0013-7952(02)00048-0
- [5] Lamas F, Lamas-López F, Bravo R. Influence of carbonate content of marls used in dams: Geotechnical and statistical characterization. *Engineering Geology*. 2014; 177: 32-39. doi: 10.1016/j.enggeo.2014.05.007
- [6] Hooshmand A, Aminfar MH, Asghari E, Ahmadi H. Mechanical and physical characterization of Tabriz Marls, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2012; 30(1): 219-232. doi: 10.1007/s10706-011-9464-3
- [7] Sowers G, Sowers G. *Introductory soil mechanics and foundations*. 4th ed. New York: McMillan Publishing; 1979.

- [8] Peyrowan HR, Ghayoumian J, Jafari Ardakani A, and Kazemi R. Classification and determination of erodibility indices of marls of Tehran province. Soil Conservation and Watershed Research Institute. 2014; pp. 125. [In Persian]
- [9] Arifuzzaman Md, Najjar M, Mahmud MN, Saiful Islam ABM, Khan M, Ali MM. Enhancing the properties of marl soils for effective construction in Saudi Arabian region. Engineering Journal. 2017; 21(4): 111-126. **doi: 10.4186/ej.2017.21.4.111**
- [10] Kirboga S, Oner M. Removal of Cu (II) From Aqueous Solution with Precipitated Calcium Carbonate. Paper presented at the CORROSION 2016, Vancouver, British Columbia, Canada, March 2016.
- [11] Kermani M, Ebadi T. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils. Soil and Sediment Contamination: An International Journal. 2012; 21(5): 655-671. **doi: 10.1080/15320383.2012.672486**
- [12] Puri VK. Geotechnical Aspects of Oil-Contaminated Sands. Journal of Soil Contamination. 2000; 9(4): 359-374. **doi: 10.1080/10588330091134301**
- [13] Carey FA, Giuliano RM. Organic Chemistry. McGraw-Hill Education, New York, NY, USA. 2017.
- [14] Hashemi Nejad H, Moradi Khanqahi M. Refinement of soil contaminated with used motor oil using microwave thermal energy and manganese dioxide as a wave absorber. Proceedings of the First Conference on New Findings in Environment and Agricultural Ecosystems. 2014. [In Persian]
- [15] Fookes PG, Higginbottom IE. The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes. Geotechnique. 1975; 25(2): 406-411. **doi: 10.1680/geot.1975.25.2.406**
- [16] Rajayi F, Lashkari Pour G, Nikudel MR. Laboratory study on the effect of used motor oil on geotechnical properties of soil. Ferdowsi University of Mashhad. 2012. [In Persian]
- [17] Nazir AK. Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. Alexandria Engineering Journal. 2011; 50(4): 331-335. **doi: 10.1016/j.aej.2011.05.002**
- [18] Ojuri O, Ogundijo O. Modeling Used Engine Oil Impact on the Compaction and Strength Characteristics of a lateritic Soil. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2012; 17: 3491-3501.
- [19] Alsidiqi H, Nisa binti I, Yieng YC, Lin JL. Cyclic simple shear behavior of a tropical alluvial soil. Physics and Chemistry of the Earth. 2023; 129: 103305. **doi: 10.1016/j.pce.2022.103305**
- [20] Baghbani A, Costa S, Lu Y. Effects of particle shape on shear modulus of sand using dynamic simple shear testing. Arabian Journal of Geosciences. 2023; 16: 422. **doi: 10.1007/s12517-023-11524-9**
- [21] Amiri I, Haddad A, Jafarian Y. Investigation of mechanical properties of sand stabilized with cement and zeolite using monotonic simple shear tests. Journal of Civil and Environmental Engineering. 2022; 52(2): 15-25. **doi: 10.22034/jcee.2020.39108.1931** [In Persian]
- [22] ASTM. ASTM D4318, standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. ASTM International West Conshohocken, PA. 2005.
- [23] ASTM D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International West Conshohocken^ ePA PA. 2007.
- [24] ASTM D1556-07. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method. ASTM International West Conshohocken, PA. 2007.
- [25] ASTM D1557. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort. 2012.
- [26] ASTM D854-14. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. 2010.
- [27] ASTM D6528-07. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine Grain Soils. 2016.
- [28] Sohrabi Bidar A, Jasempour L. Investigation of the effect of deep alluvium on one-dimensional seismic response in Qom city. Earth and Space Physics Journal. 2013; 39(3): 15-31. **doi: 10.22059/jesphys.2013.35596** [In Persian]
- [29] Peter J, Stafford, Julian J, Bommer. Empirical equations for the prediction of the equivalent number of cycles of earthquake ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009; 29: 1425-1436. **doi: 10.1016/j.soildyn.2009.05.001**
- [30] Yong RN, Rao SM. Mechanistic evaluation of mitigation of petroleum hydrocarbon contamination by soil medium. Canadian Geotechnical Journal. 1991; 28(1): 84-91. **doi: 10.1139/t91-009**
- [31] Ratnaweera P, Meegoda JN. Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils. Geotechnical Testing Journal. 2006; 29 (2): 133-140. **doi: 10.1520/GTJ12686**
- [32] Hewayde E, Abbas M, Kubba Z. Influence of engine oil on geotechnical properties of cohesive soil. International Journal of Engineering Research and Technology. 2019; 12(1): 33-41.
- [33] Das BM, Sobhan K. Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. 2013.
- [34] J.K. Mitchell, K. Soga. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons. 2005.
- [35] M.B. McBride. Environmental Chemistry of Soils, Oxford University Press. 1994.
- [36] Safeshian H, Rajabi AM, Ghasemzadeh H. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. Engineering Geology. 2018; 241: 55-63. **doi: 10.1016/j.enggeo.2018.04.020**

- [37] Salimnezhad A, Soltani-Jigheh H, Abolhasani Soorki A. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13(3): 653-670. **doi: 10.1016/j.jrmge.2020.11.011**
- [38] Amiri M, Kalantari B, Basereh F. Microstructural examination of effects of organic crude oil pollutant on the geotechnical properties and geo-environmental of marl soil of Mishan Formation. *Civil and Environmental Engineering Journal*. 2024; 54(114): 1-12. **doi: 10.22034/ceej.2023.55305.2224** [In Persian]
- [39] Jafarzadeh F, Sadeghi H. Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation, *Soil. Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012; 32(1): 26-41. **doi: 10.1016/j.soildyn.2011.08.003**
- [40] Ashango AA, Patra NR. Static and cyclic properties of clay subgrade stabilised with rice husk ash and Portland slag cement. *International Journal of Pavement Engineering*. 2014; 15(10): 906-916. **doi: 10.1080/10298436.2014.893323**
- [41] Fernanda GF, Ferronatto D, De Castro J. Correlation between Voids Ratio and Characteristic Responses to Ultrasonic Pulses Through Sandy Soils. *Journal of Materials Science Research*. 2020; 9(3): 13. **doi: 10.5539/jmsr.v9n3p13**
- [42] Yan Z, Kai Z, Yanjv P. Dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of undisturbed marine soils in the Bohai Sea, China. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2022; 21: 297-312. **doi: 10.1007/s11803-022-2093-4**
- [43] Hosseini SMR, Naeini, SA, Hassanlourad, M. Pre- and post-cyclic behaviour of an unsaturated clayey soil contaminated with crude oil. *Sadhana*. 2018; 43: 204. **doi: 10.1007/s12046-018-0971-2**
- [44] Jia YG, Wu Q, Shang H, Yang ZN, Shan HX. The influence of oil contamination on the geotechnical properties of coastal sediments in the Yellow River Delta, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2011; 70(3): 517-525. **doi: 10.1007/s10064-011-0349-8**
- [45] Kemp SJ, Merriman RJ, Bouch JE. Clay mineral reaction progress—the maturity and burial history of the Lias Group of England and Wales. *Clay Minerals*. 2005; 40(1): 43-61. **doi: 10.1180/0009855054010154**