



University Of Qom



## Effect of Sewage Pollution on Cyclic and Post-Cyclic Behavior of Qom Marl

Mohammad Javad Sadeghpour<sup>1</sup>, Majid Yazdandoust<sup>2</sup>, Mahdi Khodaparast<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: [Mjssalar@gmail.com](mailto:Mjssalar@gmail.com)
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: [M.Yazdandoust@qom.ac.ir](mailto:M.Yazdandoust@qom.ac.ir)
3. Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: [Khodaparast@qom.ac.ir](mailto:Khodaparast@qom.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 18 Jan 2025  
Revised 29 Jun 2025  
Accepted 01 Jul 2025  
Published 01 Jul 2025

**Keywords:**  
Marl Soil,  
Sewage,  
Pollution,  
Simple Shear Test,  
Cyclic and Post-cyclic  
Behavior.

### ABSTRACT

*Given the expansion of urban areas, the production of environmental pollutants, such as urban wastewater, has seen significant growth. The complex interaction between environmental pollutants and the geotechnical properties of soil emphasizes the importance of preventive interventions. Therefore, in this study, a series of tests were conducted to investigate the effect of urban wastewater pollution on the monotonic behavior of Qom marl soil, and to explore how the cyclic and post-cyclic behavior of the soil is affected when exposed to a detergent solution as a representative of urban wastewater compounds. Analysis of the results from the simple shear tests showed that the addition of the pollutant led to a reduction in maximum shear strength, cohesion, internal friction angle, and the secant shear modulus, as well as an increase in the soil's damping ratio. On the other hand, cyclic loading resulted in an increase in the maximum shear strength of the soil. Scanning electron microscope (SEM) images revealed that cyclic loading reduced the voids between the soil particles, leading to better particle interlocking. Furthermore, consolidation test results indicated a decrease in the compression index as a result of cyclic loading.*

**Cite this article:** Sadeghpour MJ, Yazdandoust M, Khodaparast M. Effect of Sewage Pollution on Cyclic and Post-Cyclic Behavior of Qom Marl. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 127-144. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12093.1594>



## Introduction

The location of Qom on marly sediments has caused this city to always suffer heavy losses from the problematic behavior of marls. Reduced shear strength, significant settlements due to moisture changes, leakage of domestic sewage, and weathering have been among these problematic behaviors of marls. On the other hand, the location of Qom in an area with high seismic risk has created another dimension of concern regarding the seismic behavior of this particular soil. This concern is even more vivid in the light of reports presented about the changes in the behavior of marl soil after experiencing seismic loads. Despite the concerns raised and the possibility of experiencing seismic loads by marl soil contaminated with domestic sewage, no studies have been conducted in this field so far and no comprehensive knowledge has been obtained on this issue. This confirms the need to investigate the seismic and meta-seismic behavior of marl soil contaminated with domestic sewage. For this purpose, in the present study, an attempt was made to evaluate the monotonic, cyclic and meta-cyclic behavior of the contaminated marl by conducting a series of simple monotonic and monotonic-cyclic shear tests on samples of marl contaminated with domestic sewage with different contamination ratios and under different loads. The changes in the consolidation and micro-structural behavior of this soil were also investigated using consolidation tests and scanning electron microscopy (SEM).

## Methodology

A two-dimensional simple shear apparatus and a resonant column device were employed to carry out the test program. The simple shear apparatus, which was located in the Soil Dynamic Center of University of Qom and was capable of testing cylindrical specimens with 70 mm in diameter and 21 mm in height, was employed to assess the behavior of the marl specimens under the monotonic and cyclic loading conditions.

Testing was conducted on the reconstituted marl specimens that were retrieved from a depth of 1 m in one test pit. The sewage used in

this study was obtained from a manhole located in Qods Town, Qom. The pH value of this sample was 7.35 and all the values of fecal coliform, total coliform and e-coli were more than 16 million mpn/100ml. Moreover, a mixture of dishwashing liquid and water was also used as a representative of urban wastewater to create wastewater with controlled compositions.

The samples were prepared in three different cases of adding water, sewage, and dishwashing liquid in three ratios of 8%, 14%, and 20%. Simple shear tests were conducted in three separate phases. In the first phase, the behavior of the specimens before experiencing cyclic loading was investigated by applying monotonic loading at a rate of 1 mm/min. In the second phase, after applying a cyclic load with a specific strain amplitude, the specimens were subjected to monotonic loading again to evaluate their post-cyclic behavior. In the third phase of the tests, a cyclic loading with a variable strain amplitude from 0.001% to 0.1% was used to determine the dynamic parameters of the samples.

## Results and discussion

The decrease in shear strength, shear modulus, and resistance parameters such as internal friction angle and cohesion under contaminated conditions, especially with dishwashing liquid solution, indicates the high vulnerability of the soil structure to active chemical compounds. This is consistent with previous studies that confirmed the negative effect of detergents and sewage sludge on the mechanical properties of cohesive soils.

On the other hand, the cyclic loading experience led to the strengthening of the soil structure and an increase in shear strength after loading, which was clearly visible in SEM studies. This phenomenon could be due to better particle locking and higher density. In fact, the interaction of cyclic loading and contamination creates two opposite trends in soil behavior: one leads to a decrease in strength and stiffness, and the other leads to an improvement in strength parameters.

Also, increasing the strain amplitude at some moisture contents (14 and 20%) led to an

increase in shear strength, while at lower moisture contents (8%), the opposite effect was observed. This indicates the importance of the role of moisture in activating or weakening the internal responses of the soil to applied strains. A direct relationship between loading conditions and the post-cyclic behavior of the soil has also been reported in previous studies.

On the other hand, increasing contamination, especially at higher concentrations of detergents, led to a significant increase in the damping ratio. This result indicates an increase in the energy dissipation capacity of the soil due to the increase in particle slippage when contamination increases.

## Conclusion

The pre-cyclic, cyclic and post-cyclic behaviors of the contaminated marl were evaluated using a series of strain-controlled cyclic simple shear tests followed by monotonic ones. The important results obtained are as follows:

- 1- The monotonic behavior of the samples showed that the contamination of marl with municipal wastewater and dishwashing liquid solution resulted in a 5 and 25 percent decrease in maximum shear strength.
- 2- It was observed that the contamination of marl soil with dishwashing liquid solution caused a 48 percent increase in damping ratio and a 9 percent decrease in shear modulus.
- 3- The results of the cyclic tests showed that an 8% increase in the maximum shear modulus, a decrease in the compression coefficient, and an increase in the internal friction angle and the secant modulus could be the consequences of the cyclic loading experience in the marl soil. This finding was consistent with the SEM images, which showed that cyclic loading reduced the pores between the soil particles and caused better locking and bonding of the particles.

## Funding Statement

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

## Declaration of Competing Interest

■ **Editorial role disclosure:** Mahdi Khodaparast is an Editorial Board Member for *Civil Infrastructure Researches* and was not involved in the editorial review or the decision to publish this article.

## Authors' Contributions

### **Mohammad Javad Sadeghpour:**

Investigation; Project administration; Funding acquisition; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

### **Majid Yazdandoust:**

Conceptualization; Methodology; Investigation; Validation; Writing- Original draft preparation; Writing- Original draft preparation; Supervision.

### **Mahdi Khodaparast:**

Conceptualization; Methodology; Supervision.

## تأثیر آلودگی ناشی از فاضلاب شهری بر رفتار سیکلیک و فراسیکلیک خاک مارن قم

محمد جواد صادق پور<sup>۱</sup>، مجید یزدان دوست<sup>۲</sup>، مهدی خداپرست<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: [Mjssalar@gmail.com](mailto:Mjssalar@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: [M.Yazdandoust@qom.ac.ir](mailto:M.Yazdandoust@qom.ac.ir)

۳. گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: [Khodaparast@qom.ac.ir](mailto:Khodaparast@qom.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

### کلیدواژه‌ها:

خاک مارن،

فاضلاب شهری،

آلودگی،

آزمایش برش ساده،

رفتار سیکلیک و فراسیکلیک.

### چکیده

امروزه با توجه به گسترش مناطق شهری، تولید آلاینده‌های زیست محیطی نظیر فاضلاب شهری رشد فزاینده‌ای داشته‌است. تعامل پیچیده بین آلاینده‌های زیست محیطی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک بر اهمیت مداخله پیشگیرانه تأکید می‌کند. بنابراین در این تحقیق تلاش شد تا با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش ساده و تحکیم، تأثیر آلودگی ناشی از فاضلاب شهری بر رفتار مونوتونیک، سیکلیک و فراسیکلیک خاک مارن قم مورد بررسی قرار گیرد. نتایج آزمایش‌های مونوتونیک نشان داد که آلودگی خاک مارن به فاضلاب شهری و محلول مایع ظرفشویی در بحرانی‌ترین حالت بترتیب منجر به کاهش ۵ و ۲۵ درصدی مقاومت برشی بیشینه می‌شود. این اختلاف به دلیل وجود فعال سازهای سطحی بیشتر در محلول مایع ظرفشویی نسبت به فاضلاب شهری بود که منجر به کاهش بیشتر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک شد. از سوی دیگر، رفتار سیکلیک خاک آلوده شده نشان داد که محلول مایع ظرفشویی با استهلاک انرژی در اثر لغزش آسان‌تر ذرات بر روی یکدیگر سبب افزایش ۴۸ درصدی نسبت میرایی و کاهش ۹ درصدی مدول برشی می‌شود. افزایش ۸ درصدی مقاومت برشی بیشینه پدیده دیگری بود که در رفتار فراسیکلیک نمونه‌ها مشاهده شد. تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد بارگذاری سیکلیک حفرات بین ذرات توده‌ای خاک را کاهش داده و باعث قفل‌بست بهتر ذرات در هم می‌شود. افزون بر این، نتایج آزمایش تحکیم نمایانگر کاهش ضریب فشردگی در اثر تجربه بار سیکلیک بود.

استناد: صادق پور محمدجواد، یزدان دوست مجید، خداپرست مهدی. تأثیر آلودگی ناشی از فاضلاب شهری بر رفتار سیکلیک و فراسیکلیک خاک مارن قم. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱۲۷-۱۴۴. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12093.1594>

## ۱- مقدمه

خاک‌های مسئله دار خاک‌هایی هستند که در پروژه‌های عمرانی مشکلات فنی و مهندسی بسیاری بوجود می‌آورند [۱]. در میان انواع خاک‌ها و سنگ‌های مسئله‌دار، مارن به عنوان نهشته‌ای دارای پتانسیل ایجاد مشکلات گوناگون، شهرت یافته است. رسوبات مارنی از جنبه‌های گوناگون به سازه آسیب وارد می‌کنند. تورم، واگرایی، شکستگی<sup>۱</sup> و حساسیت در مقابل آب و عوامل جوی از جمله این موارد است [۲]. خاک‌های مارنی، خاک‌های ریزدانه‌ای هستند که در معرض هوا دچار فرسایش شدید شده و همچنین در مجاورت آب دچار تورم می‌شوند [۳]. این خاک‌ها که عموماً به صورت خاک‌های رسوبی<sup>۲</sup> یافت می‌شوند، دارای ویژگی‌هایی هستند که ناشی از وجود درصد کربنات بالا در آن‌هاست. به بیان دیگر، مارن عموماً به عنوان ترکیبی از ۳۵٪ تا ۶۵٪ کربنات و به همان نسبت رس تعریف شده است [۴]. مارن‌ها در طبیعت به رنگ‌های مختلفی از جمله خاکستری، زرد و سبز و دیده می‌شوند [۵].

تغییر شرایط حاکم بر لایه‌های خاک یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسين به‌شمار می‌رود چرا که بعضاً می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت باربری و افزایش نشست‌ها شود [۶]. آلودگی خاک یکی از مهم ترین عوامل تغییر در شرایط حاکم بر لایه‌های خاک است [۷-۹]. یکی عوامل آلودگی خاک، نشست فاضلاب خانگی<sup>۳</sup> است که ضمن افزایش رطوبت خاک، می‌تواند سبب تخریب ساختار آن شود [۱۰]. در ادبیات فنی تخریب ساختار خاک آلوده شده به فاضلاب تا حدودی به اثرات صابون و مواد شوینده رایج در فاضلاب نسبت داده شده است [۱۱]. در مطالعه‌ای شارو و همکاران<sup>۴</sup> به تاثیر آلودگی مواد شوینده بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک پرداختند. خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید CL و CH بودند. در

این پژوهش، مواد شوینده در درصدهای مختلف (۰، ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی نسبت به خاک خشک) به خاک افزوده و با آن مخلوط شدند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد مواد شوینده، شاخص پلاستیسیته اندکی افزایش یافته اما حداکثر وزن مخصوص خشک و مقاومت برشی خاک‌های چسبنده کاهش یافته است [۱۲]. داس و همکاران<sup>۵</sup> به بررسی تاثیر آلاینده لجن فاضلاب شهری<sup>۶</sup> و پسماندهای جامد بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های چسبنده پرداختند. در این مطالعه لجن فاضلاب در درصدهای مختلف ۱۰ تا ۴۰ درصد به خاک طبیعی اضافه شد و تاثیر آن بر حدود اتربرگ بررسی شد. مشاهده شد با افزایش آلاینده حد روانی و حد پلاستیک افزایش یافته و مقاومت فشاری محصورنشده خاک آلوده روند کاهشی را نشان داد [۱۳].

نشست فاضلاب می‌تواند به واسطه اسیدی و یا بازی کردن محیط خاک رس منجر به افزایش مقدار نشست و تسريع زمان تحکیم شود. افزایش یا کاهش pH در خاک رس باعث افزایش حد روانی، دامنه خمیری و نفوذ پذیری و کاهش پارامترهای مقاومت برشی، زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک شده است [۱۴]. مومنی و همکاران اثر آلاینده‌های اسیدی و قلیایی بر خواص ژئوتکنیکی خاک رس با پلاستیسیته کم از نواحی شمال شرق اصفهان را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، نمونه‌های خاک با نفوذ مصنوعی محلول‌هایی با pH متفاوت (۳، ۵، ۶، ۷ و ۱۱) تحت شرایط بارش شبیه سازی شده در مدت‌های مختلف (۱، ۱۰ و ۲۰ سال) تهیه شدند. مطابق نتایج بدست آمده هرچه میزان اسیدی یا قلیایی بودن آلاینده بیشتر باشد، نفوذپذیری و حدود اتربرگ افزایش و مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل SEM نشان داد افزایش آلودگی منجر به تشکیل ساختار ضعیف و تخریب سریع تر خاک شده است [۱۵]. در مجموع نتایج

<sup>4</sup> Sharo et al<sup>5</sup> Das et al<sup>6</sup> Municipal sewage sludge<sup>1</sup> Slaking<sup>2</sup> Sedimentary soil<sup>3</sup> Domestic sewage

تحقیقات انجام شده پیرامون اثر فاضلاب، شیرابه زیاله و مواد اسیدی و قلیایی نشان داد که این آلاینده‌ها منجر به افزایش حدود اتربرگ و از طرفی کاهش مقاومت و زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها شده‌اند [۱۶].

مطالعه رفتار سیکلیک و به‌ویژه فراسیکلیک خاک‌ها، به دلیل تغییرات قابل توجه در ویژگی‌های مکانیکی پس از بارگذاری، از اهمیت بالایی در طراحی‌های ژئوتکنیکی برخوردار است. تاکور و همکاران<sup>۷</sup> در بررسی رس‌های خلیج مکزیک نشان دادند که افزایش دامنه کرنش سیکلیک می‌تواند منجر به تخریب ساختار خاک و کاهش مقاومت برشی پس از بارگذاری شود [۱۷]. همچنین بدر و همکاران<sup>۸</sup> با مطالعه مارن‌های الجزایر گزارش کردند که منحنی تخریب مدول برشی در این خاک‌ها با افزایش شاخص خمیری و تنش مؤثر میانگین به سمت راست منتقل می‌شود [۱۸]. ابراهیمی و همکاران با استفاده از افشانه نمونه‌های مارن قم را به سطوح رطوبتی ۰.۸٪، ۱.۴٪ و ۲.۰٪ رساندند. آنها در پژوهش خود دریافتند که مارن قم پس از بارگذاری سیکلیک بهبود مقاومت برشی نشان می‌دهد. آنها مشاهده کردند که افزایش مدول برشی فراسیکلیک تنها در نمونه‌های با رطوبت نزدیک به اشباع اتفاق افتاده است. این محققان به این نتیجه رسیدند که با افزایش رطوبت، وابستگی مدول برشی به سطح کرنش کاهش یافته و در مقابل، نسبت میرایی افزایش می‌یابد [۱۹]. حسن و همکاران با کمک دستگاه برش ساده نشان دادند نسبت میرایی با افزایش کرنش برشی افزایش ولی با افزایش سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد. علاوه بر این مدول برشی نرمال شده با افزایش کرنش برشی و تعداد چرخه بارگذاری کاهش یافت [۲۰]. همچنین بخشی از نتایج تحقیقات ایرانی و همکاران بر روی خاک رس حاکی از رابطه مستقیم افزایش نسبت میرایی با تعداد سیکل بارگذاری و رابطه معکوس این مولفه با مقدار میرایی بود

[۲۱]. لو و همکاران<sup>۹</sup> رفتار فراسیکلیک خاک ریزدانه را با انجام تست‌های استاتیکی و دینامیکی به کمک دستگاه سه محوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در یک تنش محصورشدگی<sup>۱۰</sup> ثابت مقاومت برشی فراسیکلیک از مقاومت برشی استاتیکی بیشتر است [۲۲]. این شواهد بر ضرورت ارزیابی رفتار فراسیکلیک خاک‌ها در هر منطقه با توجه به شرایط ژئوتکنیکی خاص آن تأکید دارند.

قرارگیری شهر قم بر روی رسوبات مارنی سبب شده‌است که همواره این شهر متحمل خسارات سنگینی از رفتار مشکل‌آفرین مارن‌ها شود. کاهش مقاومت برشی، نشست‌های قابل ملاحظه ناشی از تغییرات رطوبت، نشست فاضلاب خانگی و هوازگی<sup>۱۱</sup> از جمله این رفتار مشکل‌آفرین مارن‌ها بوده‌است [۲]. از سوی دیگر، واقع شدن شهر قم در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای زیاد سبب ایجاد بُعد دیگری از نگرانی در خصوص رفتار لرزه‌ای این خاک خاص شده‌است [۲۳]. این نگرانی در سایه گزارشات ارائه شده از تغییرات بوجود آمده در رفتار خاک مارن پس از تجربه بار لرزه‌ای پُر رنگتر نیز می‌شود [۱۹]. این در حالیست که علیرغم نگرانی‌های مطروحه و امکان تجربه بار لرزه‌ای توسط خاک مارن آلوده به فاضلاب خانگی، تا کنون مطالعاتی حول این زمینه شکل نگرفته و شناختی جامع پیرامون این موضوع حاصل نشده است. این امر لزوم بررسی رفتار لرزه‌ای و فرا لرزه‌ای خاک مارن آلوده به فاضلاب خانگی را مسجل می‌سازد. برای این منظور، در تحقیق حاضر تلاش شد با انجام یکسری آزمایش برش ساده مونوتونیک و مونوتونیک-سیکلیک بر روی نمونه‌هایی از مارن آلوده به فاضلاب خانگی با نسبت‌های مختلف آلودگی و تحت سربار متفاوت، به ارزیابی رفتار مونوتونیک، سیکلیک و فرا سیکلیک مارن آلوده پرداخته شود. تغییرات رفتار تحکیمی و ریزساختاری این خاک نیز با استفاده از آزمایش

<sup>10</sup> Confining pressure

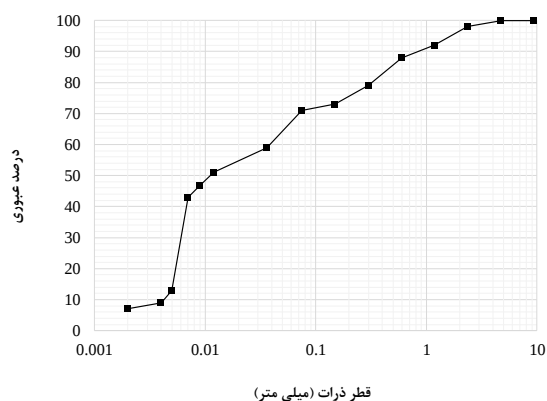
<sup>11</sup> Weathering

<sup>7</sup> Taukoor et al

<sup>8</sup> Bedr et al

<sup>9</sup> Lu et al

D4318، اندازه‌گیری چگالی مخصوص ذرات جامد طبق استاندارد ASTM-D854، تراکم بر اساس ASTM-D698 و تعیین دانسیته وفق استاندارد ASTM-D1556 انجام شده است [۲۴-۲۸].



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی خاک.

به منظور شناسایی بهتر ترکیبات تشکیل دهنده خاک مورد استفاده در این پژوهش، مواد تشکیل دهنده با استفاده از آزمایش XRD توسط مرکز ملی تحقیق و توسعه علوم مهندسی و مواد اندازه‌گیری شد. درصد مواد تشکیل دهنده این خاک در جدول ۲ و در شکل شماره ۴ نتیجه آنالیز کیفی صورت پذیرفته طبق استاندارد BS EN 13925-2 ارائه شده است [۲۹].

جدول ۱- خواص فیزیکی خاک مارن مورد استفاده.

| مقدار | مشخصه                    |
|-------|--------------------------|
| ۴۰/۱  | LL                       |
| ۲۱/۱  | PL                       |
| ۱۹    | PI                       |
| ۲/۵۸  | GS                       |
| ۱۴    | $\omega_{opt} (\%)$      |
| ۱/۷۸  | $\gamma_{dmax} (g/cm^3)$ |
| ۱/۶۱  | $\gamma (g/cm^3)$        |

جدول ۲- مواد تشکیل دهنده خاک مارن.

| درصد (%) | ماده تشکیل دهنده |
|----------|------------------|
| ۳۶/۳     | Calcite          |
| ۱۰/۸     | Quartz           |
| ۲۶       | Enstatite        |
| ۱۵/۳     | Kyanite          |
| ۱۱/۷     | Dolomite         |

تحکیم و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مصالح و روش‌ها

### ۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

#### ۲-۱-۱- خاک مارن

خاک مارن مصرفی در این تحقیق از منطقه‌ای واقع در شهرک قدس استان قم برداشت شده است. شکل ۱ و ۲ به ترتیب موقعیت مکانی و تصویر محل برداشت نمونه خاک مارن این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت مکانی نمونه برداشت شده (جنوب شهر قم).



شکل ۲- تصویر محل برداشت نمونه.

منحنی دانه‌بندی خاک مارن مورد استفاده، که در ردهٔ رس با پلاستیسیته پایین طبقه بندی می‌شود، در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است. همچنین جدول ۱ نشان دهنده خواص فیزیکی این خاک می‌باشد. لازم به ذکر است آزمایشات شامل دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM-D422، تعیین حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM-

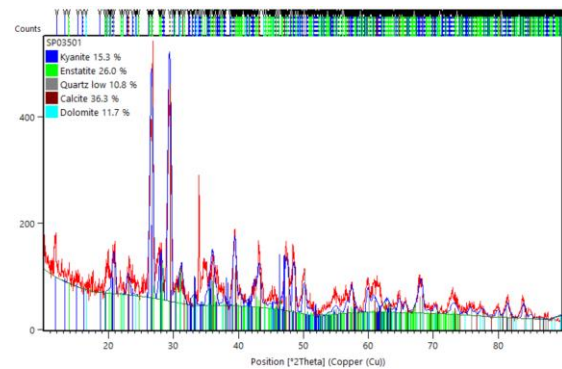
زیادی به دلیل اثرات صابون و مواد شوینده رایج در فاضلاب عنوان شده است [۱۱].

جدول ۳- مشخصات فاضلاب مصرفی در این پژوهش.

| عنوان | مقدار (Mg/Lit) |
|-------|----------------|
| Mg    | ۲۳/۸           |
| Na    | ۲۹۳            |
| K     | ۳/۲            |
| Fe    | ۰/۶۵           |
| Mn    | ۰/۷۷           |
| CU    | ۰/۳۱           |
| PO4   | ۲۲/۴           |
| NO2   | ۰/۶۱           |
| NO3   | ۸/۱            |
| CL-   | ۱۵۲۷           |
| SO4   | ۵۹۸            |
| NH3   | ۴۹/۳           |
| Caco3 | ۴۱/۵           |
| BOD   | ۲۷۵            |
| COD   | ۵۲۲            |
| TDS   | ۱۹۶۸           |
| TSS   | ۲۲۰            |
| VSS   | ۱۹۲            |

بنابراین از عامل شوینده به عنوان نماینده فاضلاب شهری جهت ساخت فاضلاب با ترکیبات کنترل شده استفاده شد. شایان ذکر است اینگونه شوینده‌ها استفاده گسترده‌ای در مصارف خانگی و شهری دارند که با توجه ارزیابی‌های آزمایشگاهی، درصدهای وزنی موثر استفاده شده در تحقیقات قبلی و به منظور دیده شدن اثر مایع ظرفشویی، این آلاینده به نسبت ۲۰ درصد مقدار محلول انتخاب شد [۳۰ و ۳۱].

مطابق با اطلاعات مندرج در کاتالوگ رسمی مایع ظرفشویی ترکیبات شیمیایی مهم این ماده شامل: آب، آلکیل بنزن سولفونیک اسید، سدیم لوریل اترسولفات، هیدروکسید سدیم، کامیدوپروپیل بتاین، اسانس مجاز آرایشی و بهداشتی، مخلوط ایزوتیازولینون و رنگ می‌باشد. شکل ۴-ب محلول آب و مایع ظرفشویی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- آنالیز XRD.

## ۲-۱-۲- فاضلاب شهری

فاضلاب شهری مصرفی در این پژوهش از منهل واقع در شهرک قدس شهر قم تهیه شده است. شکل ۴-الف فاضلاب شهری مصرفی را نشان می‌دهد. مقدار pH این نمونه ۷/۳۵ بوده و تمامی مقادیر فکال کلیفرم<sup>۱۲</sup>، توتال کلیفرم<sup>۱۳</sup> و ای کلی<sup>۱۴</sup> بیش از ۱۶ میلیون mpn/100ml می‌باشد. سایر مشخصات مربوط به تحلیل شیمیایی فاضلاب شهری مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-الف) فاضلاب شهری ، ب) محلول مایع ظرفشویی

## ۲-۱-۳- محلول مایع ظرفشویی و آب

در این پژوهش از آنجا که امکان تفکیک اجزای فاضلاب شهری وجود نداشت، همچنین در پژوهش‌های گذشته تخریب ساختار خاک آلوده شده به فاضلاب تا حدود

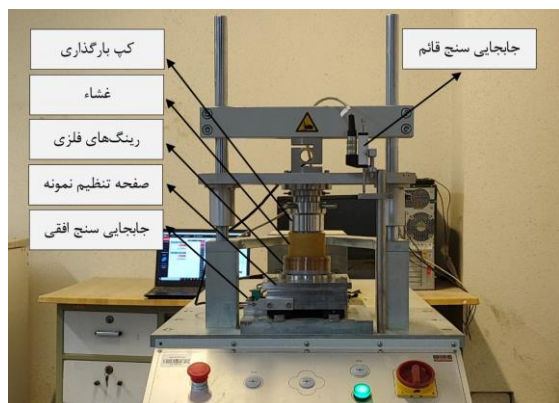
<sup>14</sup> E.coli

<sup>12</sup> Fecal Coliform

<sup>13</sup> Total Coliform

## ۲-۲- آزمایش‌ها

یکنواخت آلودگی در سراسر نمونه، امکان انجام آزمایش از طریق اخذ نمونه دست‌نخورده و تزریق آلودگی به آن وجود نداشت. آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایشات تحکیم نیز به همین نحو انجام شد.



شکل ۵- دستگاه برش ساده.



شکل ۶- مرطوب سازی نمونه‌ها با افشانه.

## ۲-۴- برنامه آزمایش‌ها

آزمایشات برش ساده در این تحقیق در سه فاز مجزا انجام شدند. در فاز اول، رفتار نمونه‌ها پیش از تجربه بار سیکلیک توسط اعمال بار مونوتونیک با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفته است. در فاز دوم، پس از اعمال یک بار سیکلیک با دامنه کرنش مشخص، نمونه‌ها مجدداً تحت بارگذاری مونوتونیک قرار گرفتند تا رفتار فرا سیکلیک آنها بررسی ارزیابی گردد. بارگذاری سیکلیک در این فاز به صورت سینوسی با ۲۰ سیکل، فرکانس ۱ هرتز و در سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال و ۲ دامنه کرنش برشی انجام شد.

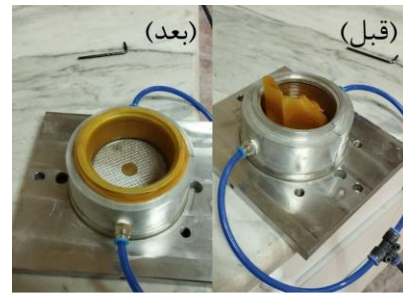
همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، آزمایش برش ساده در سه فاز مونوتونیک، سیکلیک و مونوتونیک-سیکلیک مطابق با استاندارد ASTM-D6528 استفاده شده است [۳۲] مورد استفاده قرار گرفت. تصویری از دستگاه برش ساده در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، از آزمایش تحکیم یک‌بعدی و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز جهت بررسی رفتار تحکیمی و ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها استفاده شد.

## ۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش برش ساده پس از انتقال به آزمایشگاه مکانیک خاک جهت خشک شدن به مدت ۴۸ ساعت داخل دستگاه خشک کن با دمای ۶۰ درجه قرار داده شد. علت انتخاب نکردن دمای بالاتر به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به بافت خاک بوده است. در مرحله بعد خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شد. سپس نمونه‌ها در سه حالت مختلف افزودن آب، فاضلاب شهری و محلول مایع ظرفشویی در سه نسبت ۸٪، ۱۴٪ و ۲۰٪ (کمتر، برابر و بیشتر از رطوبت بهینه) آماده گردید تا طیف مناسبی از تأثیر مقدار رطوبت ناشی از نشت افزودنی در محیط واقعی مورد بررسی قرارگیرد. لازم به ذکر است که جهت جلوگیری از کلوخه شدن خاک حین اضافه نمودن رطوبت، از افشانه استفاده شد (شکل ۶) و جهت توزیع یکنواخت رطوبت در کل حجم خاک، خاک مرطوب شده به مدت ۲۴ ساعت داخل کیسه‌های پلاستیکی نگهداری گردید.

در گام بعد، پس از قرار دادن غشاء دورن قالب بازسازی و سپس اعمال مکش (شکل ۷)، اقدام به بازسازی نمونه خاک به روش کوبش مرطوب در نسبت تراکم ۸۵٪ شد. در انتها، پس از قرار دادن نمونه زیر شفت قائم دستگاه و باز نمودن قالب و اعمال فشار قائم مد نظر، اقدام به اعمال بارگذاری افقی شد. لازم به ذکر است به دلیل حساسیت بالای خاک مارن به دست خوردگی و عدم امکان توزیع

کرنش برشی ترسیم گردید و سپس مقاومت برشی بیشینه به دست آمد. در گام بعد با توجه به نزدیکی نتایج روش حالت بحرانی، دایره مور و خط حالت بحرانی در تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک [۳۷]؛ در این تحقیق جهت تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از روش خط حالت بحرانی استفاده شده است.



شکل ۷- قالب نمونه قبل و بعد از ایجاد مکش.

جدول ۴- پارامترهای متغیر در آزمایش برش ساده تناوبی.

| متغیر                                              | مقدار / نوع                                         |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| درصد افزودنی به مارن (%)                           | ۲۰، ۱۴، ۸                                           |
| نوع افزودنی                                        | آب (W)<br>محلول مایع ظرفشویی (D)<br>فاضلاب شهری (S) |
| سربار (kPa)                                        | ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰                                       |
| کرنش برشی در آزمایش های سیکلیک با کرنش ثابت (St)   | ۰/۲۵٪ و ۳٪                                          |
| کرنش برشی در آزمایش های سیکلیک با کرنش متغیر (VSt) | ۰/۰۰۱٪ - ۰/۱٪                                       |

در ادامه مقادیر مدول برشی سکانتی از تقسیم ۵۰ درصد مقاومت برشی نمونه ها بر کرنش برشی متناظرشان محاسبه گردید. در قسمت بررسی رفتار سیکلیک خاک و پس از استخراج داده ها، نتایج حاصله در قالب حلقه های هیستریزس تنش برشی-کرنش برشی و مطابق با شکل ۸ ترسیم گردید. در نهایت تعیین مقادیر میرایی و مدول برشی بر اساس روابط مربوطه محاسبه شد. در ادامه این مقاله با ارائه مجموعه ای از نمودارها و جداول، به بررسی روند تاثیر پارامترهای مختلف بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک مارن پرداخته خواهد شد.

مقادیر میرایی و مدول برشی براساس شکل ۸ از طریق روابط ۱ و ۲ تعیین می گردد. این یک روش رایج است که در مطالعات آزمایشگاهی متعددی به کار رفته است [۴۱-۳۸].

$$(1) \quad \text{میرایی} = \frac{\text{مساحت حلقه هیستریزس}}{\pi \times \text{مثلت مساحت} \times 4}$$

$$(2) \quad \text{شیب خط } OA = \text{مدول برشی}$$

مقدار فرکانس و تعداد سیکل بارگذاری بترتیب بر اساس مطالعات انجام شده توسط سهرابی بیدار و جاسم پور بر روی پاسخ لرزه ای لایه های آبرفتی شهر قم و تلفیق سوابق لرزه ای شهر قم و روابط استافورد و همکاران<sup>۱۵</sup> انتخاب شدند [۳۳ و ۳۴]. همچنین، با در نظر گرفتن تنش های قائم انتخاب شده و شتاب ماکزیمم زلزله شهر قم و بر اساس روابط ارائه شده در تحقیقات سید و همکاران<sup>۱۶</sup> و لیو و همکاران<sup>۱۷</sup>، ۰/۲۵ درصد به عنوان یکی از دامنه های کرنش انتخاب شد [۳۵ و ۳۶]. ۳ درصد نیز که معادل با ۷۰ درصد کرنش الاستیک بیشینه در آزمایش های مونوتونیک بود، بعنوان دومین دامنه کرنش انتخاب شد. در فاز سوم آزمایشات، از یک بارگذاری سیکلیک با دامنه کرنش متغیر جهت تعیین پارامترهای دینامیکی نمونه ها استفاده شد. برای این منظور، ۱۶ بار سیکلیک متشکل از ۵ سیکل با فرکانس ۱ هرتز به طور متوالی در ۱۶ گام به نمونه ها اعمال شد بطوریکه در هر گام دامنه کرنش پلکانی افزایش می یافت. این افزایش دامنه، محدوده کرنش های ۰/۰۰۱٪ تا ۰/۱٪ را پوشش داد. جدول ۴ بطور مختصر پارامترهای متغیر استفاده شده در آزمایش با دستگاه برش ساده تناوبی (در قالب ۸۱ عدد آزمایش) را به همراه شناسه مربوطه ارائه می دهد.

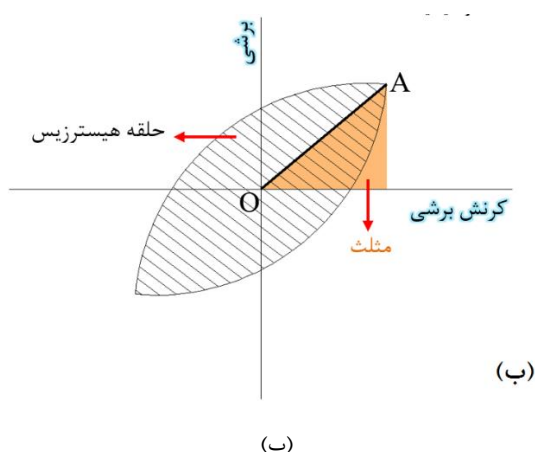
### ۳- نتایج

جهت تحلیل داده های خروجی در شرایط مونوتونیک، نتایج حاصله بر روی نمودارهای تنش برشی -

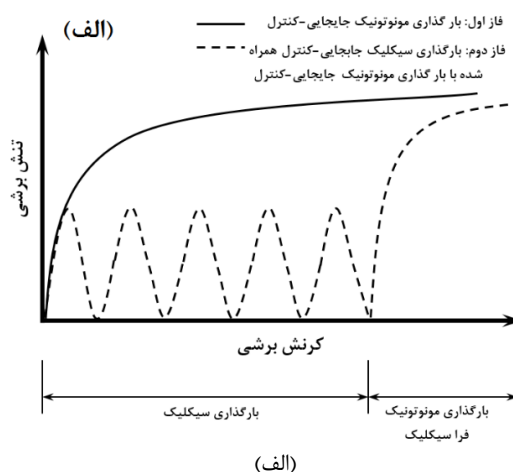
<sup>17</sup> Liao et al

<sup>15</sup> Stafford et al

<sup>16</sup> Seed et al



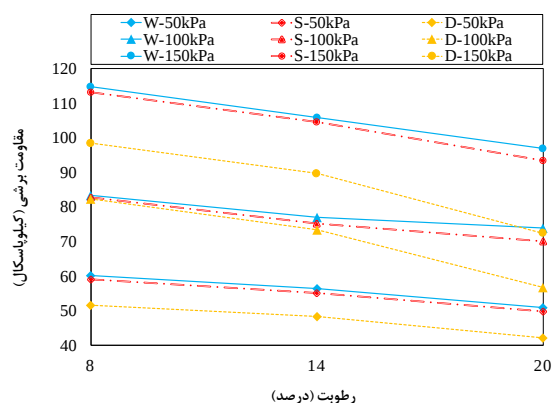
(ب)



(الف)

شکل ۸- نمای شماتیک از: (الف) فازهای بارگذاری، (ب) حلقه هیستریزیس.

همانطور که مشاهده می‌شود در اثر افزایش میزان افزودنی به خاک مارن، پارامترهای مقاومت برشی مقداری کاهش یافته‌است.



شکل ۹- نمودار مقاومت برشی بیشینه در برابر رطوبت.

کاهش مقدار چسبندگی نسبت به افزودنی آب بطور میانگین در نمونه فاضلاب و محلول مایع ظرفشویی به- ترتیب سه و پنج درصد و در خصوص زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب دو و بیست درصد بوده‌است. این رخداد می‌تواند ناشی از کم بودن ترکیبات مازاد بر آب در نمونه فاضلاب شهری باشد. همچنین مشاهده گردید در یک رطوبت یکسان افزودن محلول مایع ظرفشویی منجر به کاهش بیشتری در پارامتر زاویه اصطکاک داخلی شده‌است. بنظر می‌رسد این کاهش بیشتر در زاویه اصطکاک داخلی را بتوان به اثر روان‌سازی محلول مایع ظرفشویی نسبت داد. کاهش

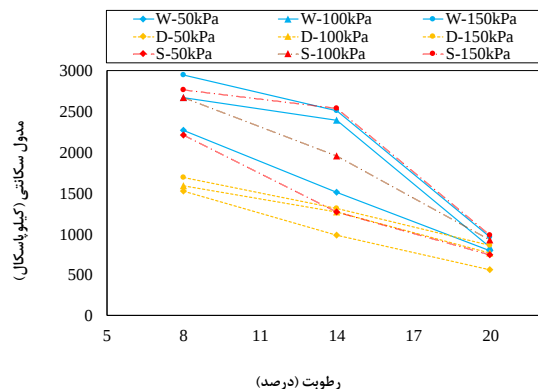
### ۳-۱- رفتار مونوتونیک خاک آلوده

در شکل ۹ اثر آلاینده‌های مختلف استفاده شده در رطوبت های ۱۴، ۸ و ۲۰ درصد قبل از تجربه بار سیکلیک نشان داده شده‌است. با بررسی روند شکل می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقادیر مواد افزودنی در خاک منجر به کاهش مقدار مقاومت برشی بیشینه شده‌است. این موضوع را می‌توان به افت پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزایش رطوبت نسبت داد. کاهش مقاومت مارن در اثر افزایش رطوبت و تغییر شکل زیادشان، در برخی منابع به حضور دو کانی پالی‌گورسکیت و سیپولیت<sup>۱۸</sup> در خاک نسبت داده شده‌است [۴۲]. همچنین مشاهده می‌شود در یک رطوبت ثابت نسبت به آب (بدون آلودگی)، با افزودن محلول مایع ظرفشویی به خاک مارن مقاومت برشی کاهش بیشتری پیدا کرده‌است. این کاهش نسبی مقاومت در بحرانی‌ترین حالت در اثر آلودگی با محلول مایع ظرفشویی فاضلاب شهری به ترتیب ۲۵ درصد و ۵ درصد مشاهده شد. از طرفی در تمامی نمونه‌ها با افزایش مقدار سربار، مقاومت برشی بیشینه افزایش یافته‌است. بنظر می‌رسد افزایش سربار منجر به کاهش حجم و تراکم بیشتر نمونه‌ها شده‌است.

در شکل ۱۰، روند تغییر پارامترهای مقاومت برشی در مقابل تغییر رطوبت به تصویر کشیده شده‌است.

<sup>18</sup> Polygorskite and Sepiolite

ظرفشویی نسبت به نمونه فاقد آلودگی (با افزودنی آب) بصورت میانگین ۳۳ درصد مشاهده گردید.



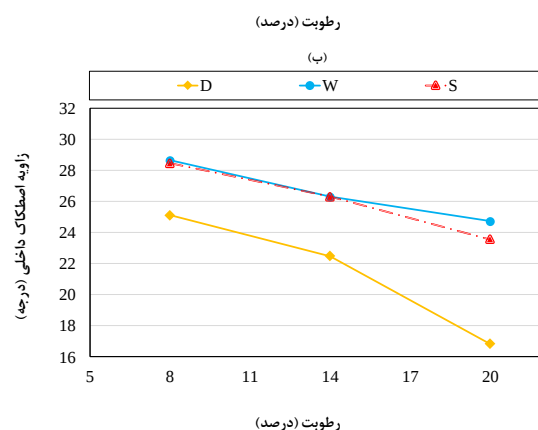
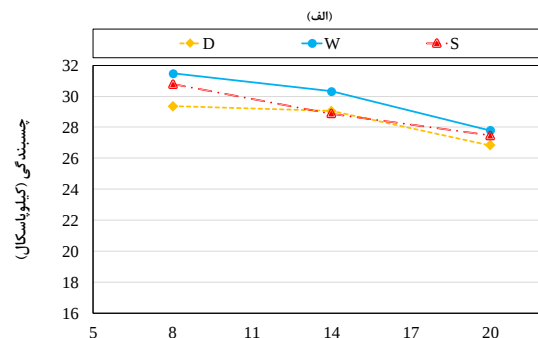
شکل ۱۱- روند تغییرات مدول سکانتی نسبت به رطوبت.

### ۳-۲- رفتار سیکلیک خاک آلوده

شکل ۱۲ تاثیر افزودنی آب و آلودگی ناشی از محلول مایع ظرفشویی بر روی مقدار نسبت میرایی خاک را در سربارهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمونه خاک آلوده شده با محلول مایع ظرفشویی میرایی بالاتری نسبت به خاک مرطوب شده با آب را نشان می‌دهد. مقدار افزایش میرایی در اثر آلودگی خاک به محلول مایع ظرفشویی نسبت به نمونه افزودنی آب (بدون آلودگی) بطور میانگین در کل نمونه‌ها ۴۸ درصد بدست آمده‌است. از طرفی نتایج نشان دهنده کاهش میرایی با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری بوده‌است. با اعمال سیکل‌های مکرر بارگذاری ذرات خاک به تدریج آرایش خود را تغییر می‌دهند و به موقعیت‌های پایدارتر منتقل می‌شوند. در نتیجه اصطکاک داخلی و میزان اتلاف انرژی در هر سیکل بارگذاری کاهش می‌یابد.

شکل ۱۳ نشان دهنده نسبت میرایی نمونه‌های خاک آلوده شده با ۸، ۱۴ و ۲۰ درصد محلول مایع ظرفشویی تحت کرنش ۳ درصد و سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. تجزیه و تحلیل نتایج در این نمونه‌ها نشان داد افزایش درصد نشت محلول مایع ظرفشویی بر ساختار خاک تاثیر گذاشته و لغزش آسان‌تر ذرات بر روی یکدیگر منجر به

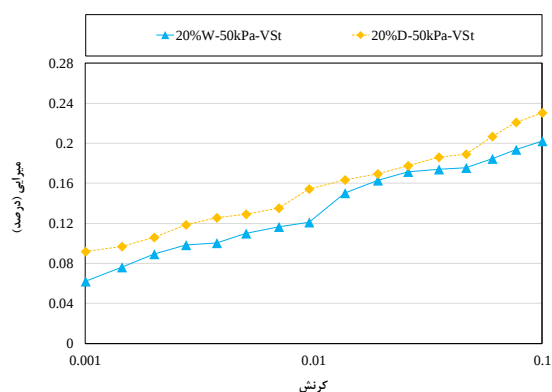
چسبندگی بیشتر در خاک‌های آلوده شده به مایع ظرفشویی احتمالاً در اثر وجود سورفکتانت‌ها<sup>۱۹</sup> در مواد شوینده هستند. آنها باعث کاهش کشش سطحی آب می‌شوند. از طرفی کشش سطحی یکی از عوامل چسبندگی در خاک محسوب می‌گردد. بنابراین، چسبندگی خاک با کاهش مواجه می‌شود.



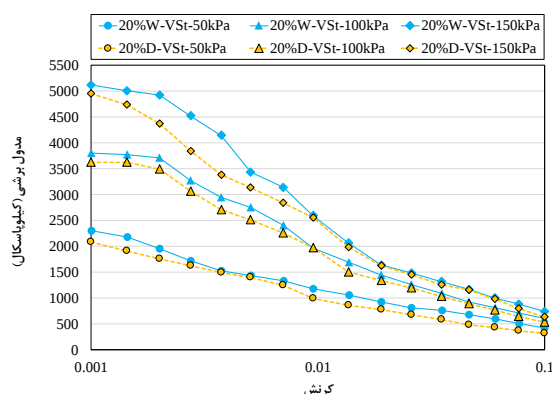
شکل ۱۰- روند تغییر پارامترهای مقاومت برشی در برابر تغییر رطوبت (الف) چسبندگی (ب) زاویه اصطکاک داخلی.

شکل ۱۱ روند تغییرات مدول برشی سکانتی خاک نسبت به درصد رطوبت را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود مشابه با پارامترهای مقاومت برشی، مقدار مدول سکانتی با افزایش رطوبت کاهش یافته است. افزون بر این به استناد شکل‌های فوق می‌توان گفت افزودن مایع ظرفشویی تاثیر مخرب‌تری بر ساختار خاک گذاشته و باعث کاهش بیشتر مقادیر مدول برشی شده‌است. این کاهش بیشتر مدول سکانتی نمونه آلوده شده با محلول مایع

افزایش دامنه کرنش برشی سیکل‌ها بود. این کاهش احتمالاً به این دلیل است که در کرنش‌های زیاد، خاک دچار تغییر شکل‌های غیرقابل بازگشت می‌شود که منجر به کاهش سختی و مقاومت خاک می‌گردد.



شکل ۱۴- نمودار نسبت میرایی بر اساس مقدار کرنش نمونه- های آلوده شده با ۲۰ درصد محلول مایع ظرفشویی و مرطوب شده با ۲۰ درصد آب تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال.

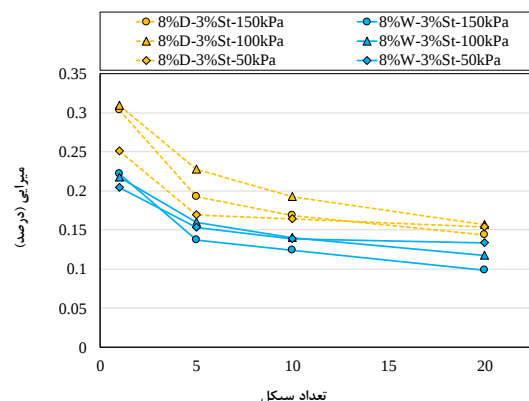


شکل ۱۵- نمودار مدول برشی در برابر مقدار کرنش برشی.

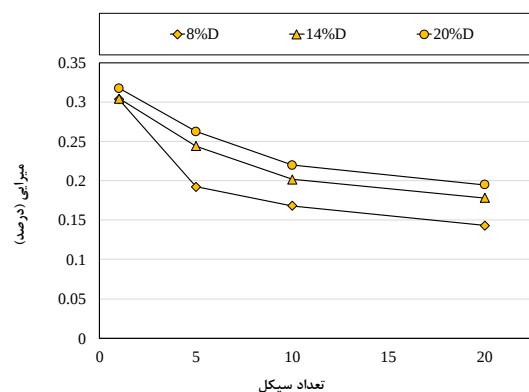
در شکل ۱۶ دیده می‌شود افزایش مقدار محلول مایع ظرفشویی در خاک منجر به افزایش شکل پذیری و کاهش مدول برشی خاک شده‌است. بطور متوسط افزایش میزان آلودگی محلول مایع ظرفشویی از ۸ به ۲۰ درصد منجر به افزایش ۳۱ درصد مقدار میرایی محاسبه شده‌است.

شکل ۱۷ نشان دهنده مقادیر مدول برشی نمونه‌های آلوده شده با درصد رطوبت یکسان از محلول مایع ظرفشویی تحت کرنش ۳ درصد در برابر تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل بارگذاری مقادیر مدول برشی روند صعودی پیدا کرده‌است. همچنین بطور کلی نتایج نشانگر افزایش

استهلاک انرژی و افزایش مقادیر نسبت میرایی گردیده- است. بطور متوسط افزایش میزان آلودگی محلول مایع ظرفشویی از ۸ به ۲۰ درصد در کل نمونه‌ها منجر به افزایش ۳۰ درصدی مقدار میرایی گردید.



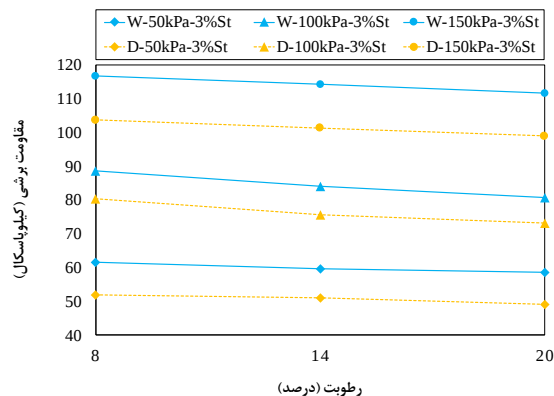
شکل ۱۲- نمودار نسبت میرایی در برابر تعداد سیکل در سربارهای مختلف



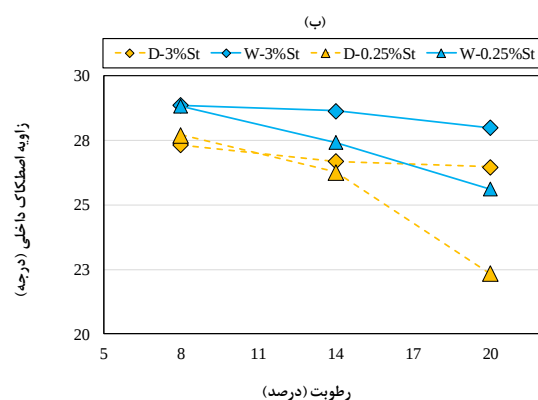
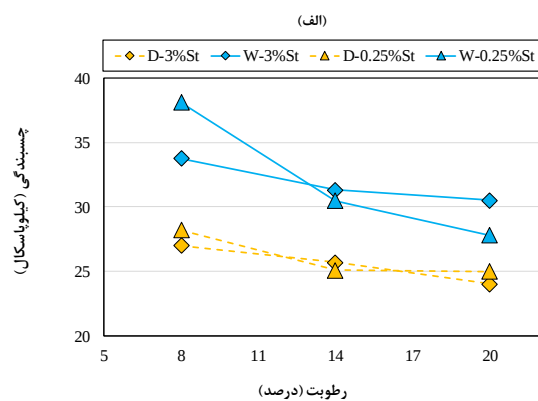
شکل ۱۳- نمودار نسبت میرایی در مقابل تعداد سیکل در کرنش ۳ درصد و تحت سربار ۱۵۰ کیلوپاسکال

در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه کرنش برشی، سختی کاهش پیدا کرده و نسبت میرایی افزایش یافته‌است. شکل ۱۵ نشان دهنده مقادیر مدول برشی نمونه‌ها در دامنه کرنش‌های متفاوت می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود آلودگی خاک با محلول مایع ظرفشویی با تغییر در ساختار منتج به کاهش مقادیر مدول برشی شده‌است. بطور متوسط کاهش مدول برشی در اثر آلودگی خاک به محلول مایع ظرفشویی نسبت به نمونه افزودنی آب (بدون آلودگی) نه درصد بدست آمده‌است. همچنین نتایج نشان دهنده کاهش مقادیر مدول برشی با

که تجربه بار سیکلیک می تواند در مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک موثر باشد.



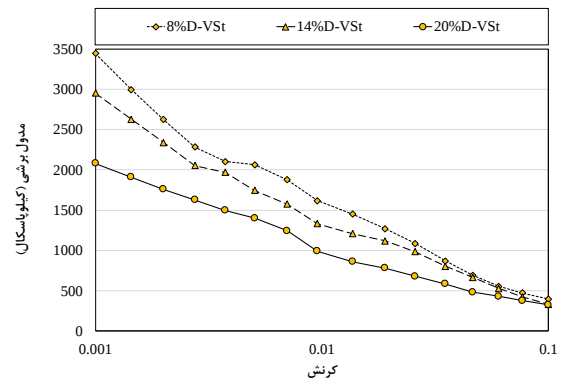
شکل ۱۸- روند تغییرات مقاومت برشی بیشینه در برابر افزودنی پس از تجربه بار سیکلیک با کرنش برشی ۳ درصد.



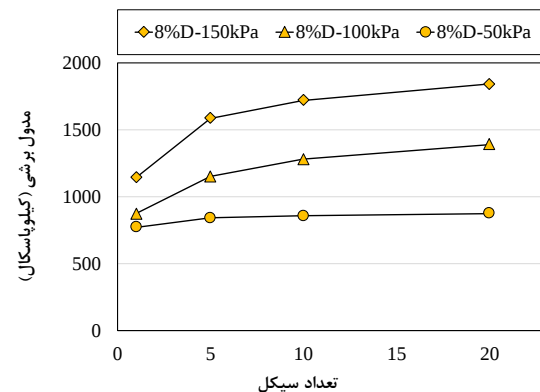
شکل ۱۹- روند تغییرات پارامترهای مقاومت برشی در برابر رطوبت پس از تجربه بار سیکلیک (الف) چسبندگی (ب) زاویه اصطکاک داخلی زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است؛ اولین تغییر مشهود، افزایش مقاومت برشی بیشینه نمونه ها پس از تحمل بار سیکلیک در تمامی نمونه ها می باشد. مشابه این

مدول برشی خاک با افزایش مقدار سربار می باشد. این تغییرات را می توان به متراکم شدن و رسیدن خاک به موقعیت های پایدارتر نسبت داد.



شکل ۱۶- نمودار مدول برشی در برابر کرنش برشی برای نمونه های آلوده شده با درصدهای مختلف آلاینده محلول مایع ظرفشویی تحت سربار ۵۰ کیلوپاسکال.

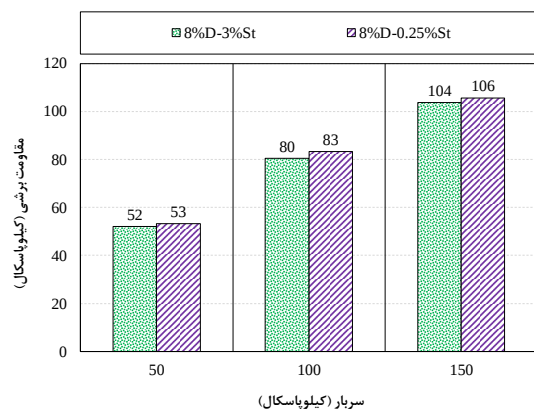


شکل ۱۷- نمودار مدول برشی بر اساس تعداد سیکل تحت سربارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال.

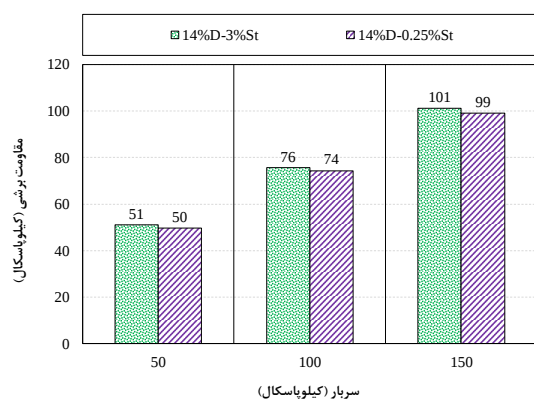
### ۳-۳- رفتار فراسیکلیک خاک آلوده

در بررسی رفتار فراسیکلیک نمونه ها مشاهده شد که در تمامی حالات، روند تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی در حالت فراسیکلیک مشابه با رفتار مونوتونیک آنها پیش از تجربه بار سیکلیک بوده است. بعنوان نمونه، شکل ۱۸ الی ۲۰ به ترتیب نشان دهنده کاهش مقاومت برشی بیشینه، پارامترهای مقاومت برشی و مدول سکانتی در اثر افزودن آلاینده محلول مایع ظرفشویی در حالت فراسیکلیک می باشد. از طرفی تجزیه و تحلیل داده در این بخش نشان داد

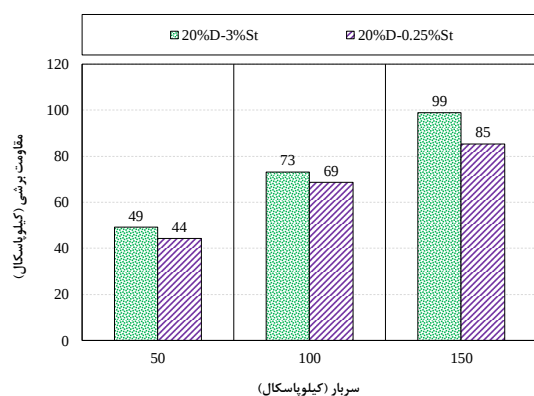
دامنه کرنش از ۰/۲۵ به ۳ درصد منجر به افزایش هفت درصدی در مقاومت برشی بیشینه شده‌است. در حالیکه در رطوبت ۸ درصد رابطه معکوس مقدار مقاومت برشی با افزایش دامنه کرنش مشاهده‌شد.



شکل ۲۲- مقایسه مقاومت برشی نمونه با ۸ درصد آلودگی در برابر تغییرات دامنه کرنش تجربه شده.

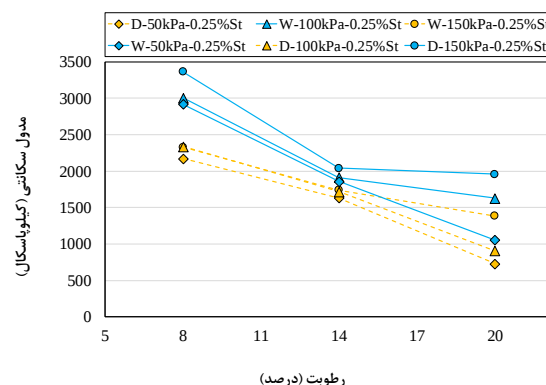


شکل ۲۳- مقایسه مقاومت برشی نمونه با ۱۴ درصد آلودگی در برابر تغییرات دامنه کرنش تجربه شده.

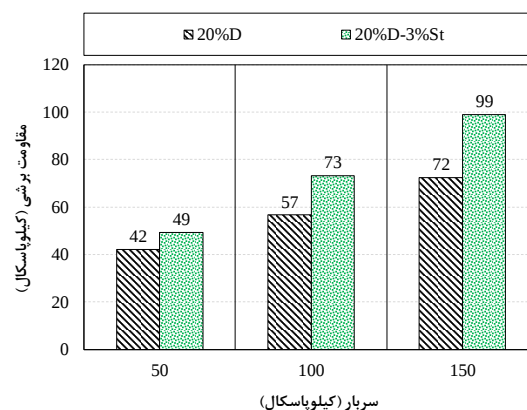


شکل ۲۴- مقایسه مقاومت برشی نمونه با ۲۰ درصد آلودگی در برابر تغییرات دامنه کرنش تجربه شده.

نتیجه را صالح و همکاران و راکش و همکاران<sup>۲۰</sup> و لو و همکاران<sup>۲۱</sup> نیز گزارش کرده‌اند [۴۳، ۴۴ و ۲۲]. بطور متوسط در کل نمونه‌ها پس از تحمل کرنش‌های برشی تعریف شده هشت درصد افزایش در مقاومت برشی بیشینه رخ داده‌است.



شکل ۲۰- روند تغییرات مدول سکانتی در برابر افزودنی پس از تجربه بار سیکلیک با کرنش برشی ۰/۲۵ درصد.



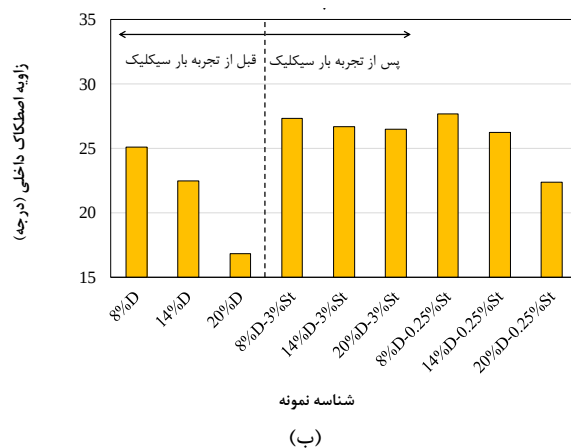
شکل ۲۱- مقاومت برشی نمونه آلوده شده با ۲۰ درصد محلول مایع ظرفشویی پیش و پس از تجربه بار سیکلیک.

شکل‌های ۲۲ الی ۲۴ تغییرات مقاومت برشی نمونه-های آلوده شده با محلول مایع ظرفشویی را نسبت به تغییرات دامنه کرنش تجربه شده نشان می‌دهند. از بررسی این اشکال در خصوص تغییر در مقاومت برشی در برابر تغییر دامنه کرنش می‌توان اینگونه عنوان کرد که در نمونه-های با آلودگی ۱۴ و ۲۰ درصد با افزایش دامنه کرنش تجربه شده، مقدار مقاومت افزایش بیشتری پیدا کرده‌است. بطور کلی در نمونه‌ها با ۱۴ و ۲۰ درصد افزودنی، افزایش

<sup>21</sup> Lu et al

<sup>20</sup> Rakesh et al

همانطور که مشاهده می شود، در شرایطی رطوبتی یکسان مقادیر زاویه اصطکاک داخلی پس از تجربه بار سیکلیک به طور میانگین در تمامی نمونه ها ۱۵ درصد افزایش یافته است. این موضوع در خصوص پارامتر چسبندگی در نمونه های با افزودنی آب با افزایش هفت درصدی همراه بوده است. در نمونه های آلوده شده با محلول مایع ظرفشویی بنظر می رسد بار سیکلیک باعث چفت و بست بهتر ذرات شده اما از طرفی منجر به ترکیب و اثر بخشی بیشتر سورفکتانت های موجود در مایع ظرفشویی نیز شده است. بنابر این زاویه اصطکاک داخلی به شکلی فزاینده بسیج گردیده و چسبندگی خاک روند کاهشی را تجربه نموده است. این مقدار کاهش چسبندگی نمونه های آلوده شده بطور متوسط نه درصد می باشد.



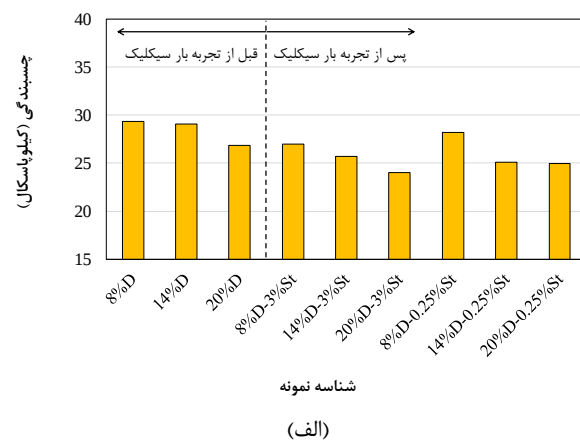
شکل ۲۵- مقایسه تاثیر افزودنی محلول مایع ظرفشویی بر (الف) پارامتر چسبندگی (ب) زاویه اصطکاک داخلی.

### ۳-۴- تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی

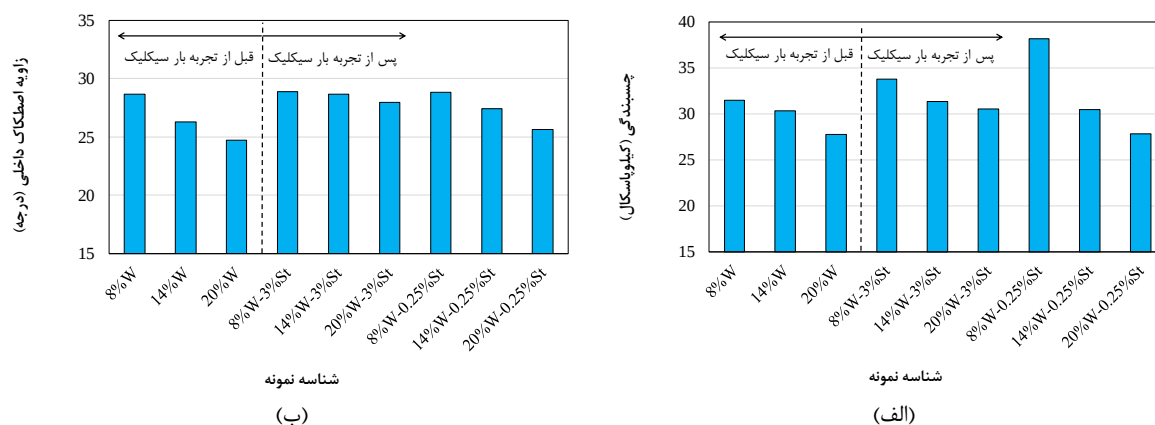
به منظور بررسی اثر بارگذاری سیکلیک بر خصوصیات ریز ساختاری نمونه های آلوده شده با محلول مایع ظرفشویی، تصویربرداری SEM انجام شد. تصاویر مربوط به قبل و بعد از تجربه بار سیکلیک نمونه آلوده شده در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

در نمونه های با ۸ درصد افزودنی، افزایش کرنش از ۰/۲۵ به ۳ درصد، کاهش چهار درصدی در مقاومت برشی بیشینه را سبب شده است. در خصوص رفتار متفاوت نمونه ها در رطوبت ۸ درصد شاید بتوان گفت تغییر در ساختار خاک منجر به کاهش مقاومت برشی شده است. از طرفی خاک در رطوبت ۸ درصد حالت نیمه جامد داشته و نمونه از شکل پذیری کمتری برخوردار است. بنابراین در دامنه کمتر تغییر مخرب کمتری در ساختار خاک رخ می دهد. این در حالی است که در رطوبت های بالاتر به دلیل تغییر حجم بیشتر خاک، شرایط تحکیم و تراکم سازی بهتر نمونه با افزایش دامنه کرنش فراهم می گردد. بنابراین گمان می رود که غلبه این اثر مثبت در مقادیر مقاومت برشی اتفاق افتاده باشد.

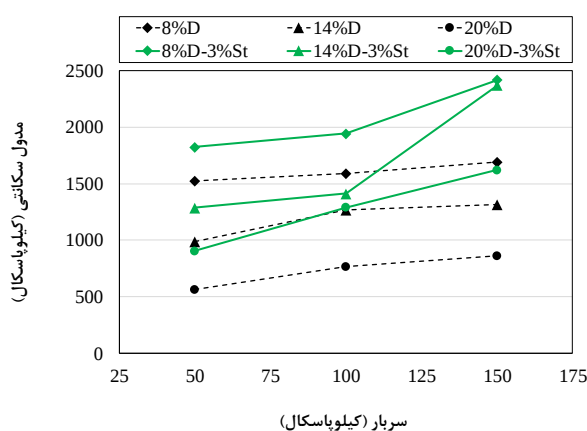
در شکل های ۲۵ و ۲۶ می توان اثر تجربه بار سیکلیک بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه ها را مشاهده نمود.



شکل ۲۷ نشان دهنده اثر تجربه بارهای سیکلیک بر روی مدول سکانتی نمونه های آلوده شده با درصدهای مختلف محلول مایع ظرفشویی می باشد. همانطور که انتظار می رفت با توجه به ارتباط پارامترهای مقاومتی با یکدیگر، در نمونه های آلوده شده به محلول مایع ظرفشویی با افزایش مقاومت برشی بیشینه در اثر تجربه بار سیکلیک، افزایش در مقادیر مدول سکانتی نیز رخ داده است.

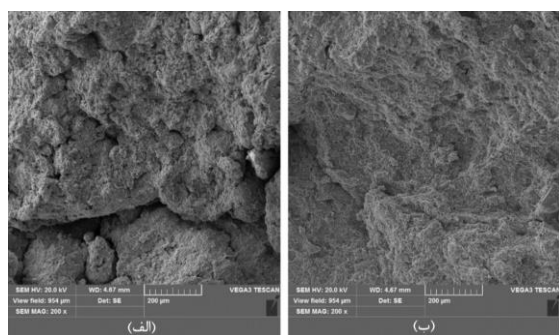


شکل ۲۶- مقایسه تاثیر افزودنی آب بر الف) پارامتر چسبندگی ب) زاویه اصطکاک داخلی.



شکل ۲۷- مقایسه مقدار مدول سکانتی نمونه آلوده شده با درصدهای مختلف محلول مایع ظرفشویی قبل و بعد از تجربه بار سیکلیک با کرنش ۳ درصد.

شده است. همچنین جدول ۵ مقدار ضریب فشردگی و تورم در هر نمونه را نشان می دهد.



شکل ۲۸- تصاویر SEM خاک آلوده شده با ۲۰ درصد محلول مایع ظرفشویی با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر الف) قبل از تجربه بار سیکلیک ب) بعد از تجربه بار سیکلیک.

همانطور که در شکل ۲۸ مشاهده می شود بارگذاری سیکلیک حفرات بین ذرات توده ای خاک را که ممکن است بخشی از آن به دلیل آلودگی خاک مارن با محلول مایع ظرفشویی ایجاد شده باشد را کاهش داده و باعث متراکم شدن نمونه و قفل و بست بهتر ذرات در هم پس از ریزتر شدن آن ها شده است. از این رو احتمالاً با افزایش اندرکنش بین ذرات زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش یافته است.

### ۳-۵- رفتار تحکیمی

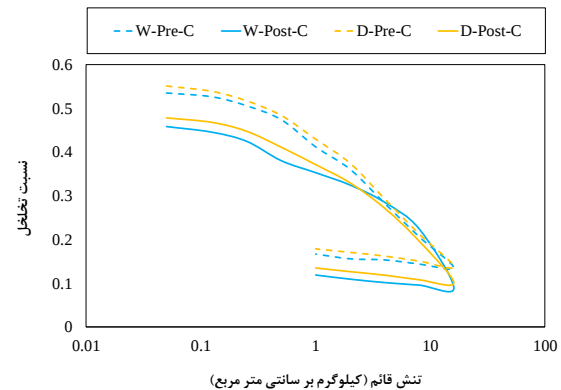
در شکل ۲۹ نتایج نسبت تخلخل در برابر تنش قائم آزمایش تحکیم نمونه های با بیشترین مقدار رطوبت (۲۰ درصد) قبل از تجربه بارگذاری سیکلیک (Pre-Cyclic) و بعد از بارگذاری سیکلیک (Post-Cyclic) به تصویر کشیده

رفتار ژئوتکنیکی خاک مارن قم فراهم آورد. به طور کلی، کاهش در مقاومت برشی، مدول سکانتی و پارامترهای مقاومتی مانند زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در شرایط آلودگی، به ویژه با محلول مایع ظرفشویی، نشانگر آسیب پذیری بالای ساختار این خاک در برابر ترکیبات شیمیایی فعال است. این موضوع با یافته های شارو و همکاران [۱۲] و همچنین داس و همکاران [۱۳] هم راستاست، که اثر منفی مواد شوینده و لجن فاضلاب را بر خواص مکانیکی خاک های چسبنده تأیید کردند.

از طرفی، تجربه بارگذاری سیکلیک منجر به تقویت ساختار خاک و افزایش مقاومت برشی پس از بارگذاری گردید، که این مسئله به وضوح در بررسی های SEM قابل مشاهده بود. این پدیده می تواند ناشی از قفل و بست بهتر ذرات و تراکم بیشتر باشد، که با نتایج ابراهیمی و همکاران [۱۹] و لو و همکاران [۲۲] هم خوانی دارد. در واقع، اثر متقابل بارگذاری سیکلیک و آلودگی، دو روند متضاد در رفتار خاک ایجاد می کند: یکی منجر به کاهش مقاومت و سختی و دیگری به بهبود پارامترهای مقاومتی منجر می شود.

همچنین، افزایش دامنه کرنش در برخی رطوبت ها (۱۴ و ۲۰ درصد) منجر به افزایش مقاومت برشی گردید، در حالی که در رطوبت های پایین تر (۸ درصد)، اثر معکوس مشاهده شد. این امر نشان دهنده اهمیت نقش رطوبت در فعال سازی یا تضعیف واکنش های داخلی خاک در برابر کرنش های اعمال شده است. در مطالعات حسن و همکاران [۲۰] و ایرانی و همکاران [۲۱] نیز رابطه مستقیم بین شرایط بارگذاری و رفتار فراسیکلیک خاک گزارش شده است.

در خصوص نسبت میرایی، افزایش آلودگی به ویژه در غلظت های بالاتر شوینده ها، منجر به افزایش چشم گیر این پارامتر شد. این نتیجه بیانگر افزایش قابلیت استهلاک انرژی خاک به واسطه روان سازی سطحی و لغزش بیشتر ذرات است که در تحقیق حاضر به خوبی اثبات گردید و با



شکل ۲۹- نمودار تحکیم نمونه ها پیش و پس از بارگذاری سیکلیک.

جدول ۵- ضرایب فشردگی و تورم نمونه ها.

| ضریب تورم<br>CU | ضریب فشردگی<br>CC | شناسه نمونه |
|-----------------|-------------------|-------------|
| ۰/۰۲۵۳          | ۰/۱۶۱۶            | W-Pre-C     |
| ۰/۰۲۵۵          | ۰/۱۴۸۹            | W-Post-C    |
| ۰/۰۲۷۷          | ۰/۱۶۶۶            | D-Pre-C     |
| ۰/۰۲۷۶          | ۰/۱۵۲۲            | D-Post-C    |

همانطور که مشاهده می شود در نمونه آلوده شده به محلول مایع ظرفشویی احتمالاً به دلیل لزجت بالاتر نسبت به آب، ذرات خاک رس روی هم لغزیده اند و در مقایسه با خاک غیر آلوده اندکی (به طور متوسط ۲/۷ درصد) شاخص فشردگی بیشتری حاصل شده است. همچنین افزایش حدود ۹ درصدی در مقدار شاخص تورم هنگام آلودگی با محلول مایع ظرفشویی می تواند به علت واکنش کانی های رسی با ماده افزوده شده و تغییر در ساختار خاک باشد.

از طرفی در خصوص هر دو ماده افزودنی پس از تجربه بار سیکلیک تغییر خاصی در ضریب تورم مشاهده نشد اما با توجه به کاهش تخلخل به علت نشست هنگام انجام آزمایش بار سیکلیک، میزان نشانه فشردگی در نمونه های آب و محلول مایع ظرفشویی به ترتیب هشت و نه درصد کاهش یافت.

#### ۴- بحث

نتایج به دست آمده از این پژوهش، بینش های نوینی نسبت به تأثیر آلاینده های شهری به ویژه مواد شوینده بر

یافته‌های بدر و همکاران [۱۸] در مورد مارن‌های الجزایر هم‌راستا است.

از منظر کاربردی، این نتایج هشدار مهمی برای طراحان ژئوتکنیک در مناطق شهری مشابه قم فراهم می‌آورد که آلودگی زیست‌محیطی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش پایداری سازه‌های زیرسطحی و افزایش نرخ نشست یا تغییر شکل داشته باشد. بنابراین، در طراحی فونداسیون‌ها و دیگر عناصر زیرسطحی در چنین خاک‌هایی، باید اثرات پتانسیل آلودگی شیمیایی و لرزه‌ای توأمان در نظر گرفته شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

۱- رفتار مونوتونیک نمونه‌ها نشان داد که آلودگی خاک مارن به فاضلاب شهری و محلول مایع ظرفشویی به کاهش ۵ و ۲۵ درصدی مقاومت برشی بیشینه می‌شود. این اختلاف به دلیل وجود فعال سازه‌های سطحی بیشتر در محلول مایع ظرفشویی نسبت به فاضلاب شهری بود که منجر به کاهش بیشتر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک شد.

۲- نتایج نشان داد که تأثیرپذیری رفتار خاک مارن از تغییرات سربار و درصد آلودگی قبل و پس از تجربه بار سیکلیک از یک روند یکسان تبعیت می‌کند.

۳- افزایش دامنه کرنش برشی در رطوبت‌های ۱۴ و ۲۰ درصد منجر به افزایش مقاومت برشی بیشینه گردید در حالیکه در رطوبت ۸ درصد به دلایل شکل‌پذیری کمتر خاک، افزایش دامنه کرنش برشی منجر به کاهش مقاومت برشی بیشینه شد.

۴- مشاهده شد که آلودگی خاک مارن به محلول مایع ظرفشویی باعث افزایش ۴۸ درصدی نسبت میرایی و کاهش ۹ درصدی مدول برشی می‌شود.

۵- نتایج آزمایشات فراسیکلیک نشان داد که افزایش ۸ درصدی مدول برشی بیشینه، کاهش ضریب فشردگی و همچنین افزایش مقدار زاویه اصطکاک داخلی و مدول سکانتی می‌تواند از پیامدهای تجربه بار سیکلیک در خاک مارن باشد. این یافته با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سازگار بود که نشان می‌داد بارگذاری سیکلیک حفرات بین ذرات توده‌ای خاک را کاهش و باعث قفل و بست بهتر ذرات در هم می‌شود. ۶- بر خلاف مارن فاقد آلودگی، تجربه بارگذاری سیکلیک در مارن‌های آلوده به محلول مایع ظرفشویی منجر به کاهش چسبندگی شد که اثرگذاری بیشتر سورفکتانت‌های موجود در مایع ظرفشویی می‌تواند عامل این پدیده باشد.

۷- نتایج آزمایش‌های تحکیم نشان داد که آلودگی خاک مارن به محلول مایع ظرفشویی منجر به افزایش ضرایب تورم و فشردگی می‌شود.

## References

- [1] Giyasi V, Vali Rastin Sh. Study of Problematic Soils and Proposing New Stabilization Solutions. The 4th National Conference on Geotechnical Engineering of Iran, Tehran. 2019. [In Persian]
- [2] Firouzeh Y, Majidi A, Lashkari Pour Gh, Ghafari M, Haji Pour Alamdari G. Investigation of the Corrosive Potential of Marl Soils around Qom City. The 2nd National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Qom. 2015. [In Persian]
- [3] Khodaparast M, Akhvat M. A Review of the Effect of Additives on Marl Soils. The 3rd National Conference on Modern Research in Engineering and Applied Sciences, Boroujerd. 2021. [In Persian]
- [4] Pettijohn FJ. Sedimentary Rocks. 3rd ed. Harper and Row; 1975. p. 628.
- [5] Alizadeh A, Buzari S, Sattarzadeh Y, Pourkermani M. Engineering geology and geotechnical characterization of Tabriz Metro Line 2, Iran. Springer Nature; 2021. doi: 10.1007/s42452-021-04535-2.

- [6] Athanasopoulos G, Grizi A, Zekkos D, Founta P, Zisimatou E. Municipal solid waste as a reinforced soil: Investigation using synthetic waste. ASCE-Geoinstitute Geocongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation; 2008. p. 168-75. **doi: 10.1061/40970(309)21**
- [7] Khademalrasoul, A., & Ghorbani, H. (2024). Consolidation Behavior of the Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil Treated with Polypropylene. *Civil Infrastructure Researches*, 10(1), 15-31. **doi: 10.22091/CER.2023.9636.1492**
- [8] Ansar Shourijeh, A., Raeesi Estabragh, A., & Amini, M. (2023). Effect of Magnesium Oxide and Lime on the Improvement a Clay Soil Contaminated with MTBE. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 29-45. **doi: 10.22091/CER.2022.8328.1409**
- [9] Taherian, A., Yazdi, M., Danaei, I., & Zad, A. (2023). Effect of Surfactant on Cleaning of Diesel Contaminated Clay Soil Using Electrokinetic Process and Determining the Uniaxial Resistance of Clay after Cleaning. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 105-119. **doi: 10.22091/CER.2022.8264.1403**
- [10] Rodrigues RA, de Lello JA. Influence of domestic sewage leakage on the collapse of tropical soils. *Bull Eng Geol Environ*. 2007; 66:215–23. **doi: 10.1007/s10064-006-0065-y**
- [11] Agnelli N. Comportamento de um solo colapsível inundado com líquidos de diferentes composicoes químicas. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos; 1997. p. 205. **doi: 10.11606/T.18.2018.tde-06042018-160823**
- [12] Sharo AA, Baraa'H D. Optimizing the impact of detergents contamination on the geotechnical properties of soils. *Procedia Manufacturing*. 2020; 44:615-22. **doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.248**
- [13] Das P, Patel O, Bhuyan J, Mishra M. Effect of Leaching of Pollutants from Municipal Sewage Sludge and Solid Waste on the Geotechnical Properties of Cohesive Soils. *J Xi'an Univ Archit Technol*. 2020; XII(V):2433-45.
- [14] Ahmadi MM, Hassanlouzadeh M, Khatami SMH. Investigation of the Effect of Leachate pH Changes on the Physical and Mechanical Properties of Kaolinite Clay in the Presence of Bentonite. *J Exp Res Civil Eng*. 2015;2(1):25-33. [In Persian]
- [15] Momeni M, Bayat M, Ajalloeian R. Laboratory investigation on the effects of pH-induced changes on geotechnical characteristics of clay soil. *Geomechanics Geoengineering*. 2022;17(1):188-96. **doi: 10.1080/17486025.2020.1716084**
- [16] Sadeghpour MJ, Khodaparast M, Yazdandoust M. A review on previous studies about geotechnical properties changes of soils influenced by landfill leachate and urban wastewater. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development, Environment and Islamic Art Horizons in the Statement of the Second Step of the Revolution*; 2023; Tabriz, Iran. Available from: **https://civil-ica.com/doc/1960463**
- [17] Taukoor V, Rutherford CJ, Olson SM. Post-cyclic behavior of a Gulf of Mexico clay. In: *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*; 2018 Jun 10-13; Austin, TX. Reston (VA): ASCE; 2018. p. 345–56. **doi:10.1061/9780784481486.03**.
- [18] Bedr S, Mezouar N, Verrucci L, Lanzo G. Investigation on shear modulus and damping ratio of Algiers marls under cyclic and dynamic loading conditions. *Bull Eng Geol Environ*. 2019; 78:2473–93. **doi:10.1007/s10064-018-1310-x**
- [19] Ebrahimi MJ, Yazdandoust M, Khodaparast M. Cyclic and post-cyclic behavior of Qom marl, Iran. *Soil Dyn Earthq Eng [Internet]*. 2025 [cited 2025 Apr 24]; 192:109209. **doi: 10.1016/j.soildyn.2025.109209**
- [20] Hasan AB, Ismail NY, Chuo Y, Lee LJ. Cyclic simple shear behavior of a tropical alluvial soil. *Phys Chem Earth*. 2023; 129:103305. **doi: 10.1016/j.pce.2022.103305**
- [21] Irani R, YazdanDoust M, Shahvardi MR. Effect of Leachate on Dynamic Parameters of Clay Soils. *Sharif J Civil Eng*. 2023;39(4):65-74. **doi: 10.24200/j30.2023.61511.3182**
- [22] Lu Y, Chen J, Huang J, Feng L, Yu S, Li J, et al. Post-Cyclic Mechanical Behaviors of Undisturbed Soft Clay with Different Degrees of Reconsolidation. *Appl Sci*. 2021; 11:7612. **doi: 10.3390/app11167612**
- [23] Standard 2800. Building Design Code for Earthquake Resistance. 4th ed. 2014. p. 160.
- [24] ASTM D422-63. (2007). "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils". ASTM International West Conshohocken PA.
- [25] ASTM-D4318. (2018). "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". ASTM International West Conshohocken, PA

- [26] ASTM D854-14. (2010). "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer."
- [27] ASTM-D698. (2021). "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort".
- [28] ASTM D1556-07. (2007). "Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method". ASTM International West Conshohocken, PA.
- [29] BS EN13925-2. (2003). "Non-destructive testing. X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials Procedures".
- [30] Jafari A. Investigation of the Effect of Domestic Sewage on the Properties of Marl Soil in Qom City. MSc Thesis in Geotechnical Engineering, Qom University; 2022.
- [31] Moeini E. Study of Shear Behavior of Soil under Enzyme-Based Detergents. MSc Thesis in Soil and Foundation Engineering, Shahrood University of Technology; 2022.
- [32] ASTM D6528-24. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Fine-Grained Soils. 2024. **doi: 10.1520/D6528-24**
- [33] Sohrabi Bidar A, Jasempour L. Study of the Effect of Deep Alluvial Deposits on One-Dimensional Seismic Response in Qom City. J Earth Space Phys. 2013;39(3):15-31. **doi: 10.22059/jesphys.2013.35596**
- [34] Stafford PJ, Bommer JJ. Empirical equations for the prediction of the equivalent number of cycles of earthquake ground motion. Soil Dyn Earthquake Eng. 2009; 29:1425–36. **doi: 10.1016/j.soildyn.2009.05.001**
- [35] Seed HB, Idriss IM. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. Report No. EERC 70-10, December 1970. p. 41.
- [36] Liao S, Whitman R. Overburden Correction Factors for SPT in Sand. Eng Geol. 1986;112(3):373-87. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373)**
- [37] Atkinson JH, Lau WHW, Powell JJ. Measurement of soil strength in simple shear tests. Can Geotech J. 1991;28(2):39-48. **doi: 10.1016/0148-9062(92)91110-q**
- [38] Park D, Kishida T. Shear modulus reduction and damping ratio curves for earth core materials of dams. Can Geotech J. 2019;56(1):14–22. **doi:10.1139/cgj-2017-0529**
- [39] Gao HM, Li X, Wang ZH, Stuedlein AW, Wang Y. Dynamic shear modulus and damping of expanded polystyrene composite soils at low strains. Geosynth Int. 2019;26(4):436–50. **doi:10.1680/jgein.19.00029**
- [40] Upreti K, Leong EC. Effect of mean grain size on shear modulus degradation and damping ratio curves of sands. Géotechnique. 2021;71(3):205–15. **doi:10.1680/jgeot.18.P.169**
- [41] Lee CJ, Sheu SF. The stiffness degradation and damping ratio evolution of Taipei Silty Clay under cyclic straining. Soil Dyn Earthq Eng. 2007;27(8):730–40. **doi: 10.1016/j.soildyn.2006.12.008**
- [42] Ouhadi VR. The Role of Marl Component and Ettringite on the Stability of Stabilized Marl. PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada; 1997.
- [43] Saleh SY, Yunus M. Effect of Confining Pressure and Loading Frequency on Dynamic Characteristics of Batu Pahat Marine Clay. Nat Conf Wind Earthquake Eng. 2021;684. **doi: 10.1088/1755-1315/682/1/012022**
- [44] Rakesh JP, Nazeem KM, Robinson RG. Post-Cyclic Behaviour of Clayey Soil. Indian Geotech J. 2013; 44:39-48. **doi: 10.1007/s40098-013-0042-x**