

Research Article

## Investigating the geotechnical characteristics of improved marls with chitosan biopolymer

Mojtaba Jamshidi<sup>1</sup>, Mehdi Mokhberi<sup>2\*</sup>, Amirhosein Vakili<sup>3,4</sup>, Seyed Alireza Nasehi<sup>5</sup>

1- PhD candidate, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University

2- Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

3- Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, Karabük, 78050, Turkey

4- Department of Civil Engineering, Zand Shiraz Higher Education Institute, Shiraz, Iran

5- Department of Geology, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

**Keywords:** *Marl soil, Stabilization, Chitosan, Direct shear, Freeze-thaw cycle*

### 1-Introduction

Marl is a material that resembles soil or stone and contains approximately 35 to 65% calcareous materials, along with varying amounts of clay (Sol-Sánchez et al., 2016; Vakili et al., 2021). "marl" is sometimes used broadly to encompass all calcareous materials. Primarily composed of calcium carbonate, marl is influenced by several factors, including its mineral composition, the type of carbonate mineral present, its origin and formation process, grain size distribution, and degree of cementation. Furthermore, changes in density and moisture content impact the behavior of this particular type of soil. Few studies have been conducted on improving the quality of this type of soil, and the results suggest that this calcareous soil is highly sensitive to water. It is so sensitive that even slight changes in moisture levels can significantly impact its properties and performance.

One of the primary concerns and issues frequently discussed regarding soils is their behavior when exposed to water and humidity, which can lead to various effects such as swelling, dispersivity, or compaction (Sol-Sánchez et al., 2016). Frost-induced swelling and the subsequent increase in humidity after ice thawing are significant factors contributing to soil swelling and reduced resistance. This phenomenon holds particular importance in cold regions with high underground water tables (Tian et al., 2020; Shahsavani et al., 2021). In various regions of Iran, day and night frosts caused by temperature fluctuations cause soil swelling and a subsequent decrease in resistance. This phenomenon threatens civil structures such as irrigation canals, floors, and roads, as it can cause damage such as cracks and fractures.

Chitosan is a type of polysaccharide that is derived from the deacetylation process of chitin. It is primarily sourced from aquatic products such as shrimp shells, crab shells, and plants. These sources offer a relatively low production cost (Kumar, 2000; Hataf et al., 2018). Despite its wide range of applications in various industries, including water treatment, pharmaceuticals, agriculture, and energy storage, the full potential of this natural resource has not been fully realized. One of the significant advantages of chitosan is its availability, low cost, high biodegradability, and ease of chemical modification. Additionally, blending chitosan with other polymers can be employed to enhance the mechanical properties of the resulting composite (Wang et al., 2018; Shariatmadari et al., 2020).

Given the issues that have been brought up and the failure to prevent the construction of buildings on marl soil in numerous construction projects, it becomes more crucial to consider the impact of chitosan as a material derived from industrial waste on the soil during F-T cycles in severe conditions. For this purpose, the present study aimed to examine the impact of a specific additive on the mechanical properties of clay marl soil, which was achieved by conducting tests on unconfined compressive strength and direct shear

\* Corresponding author: mehdimokhberi@gmail.com

DOI: 10.22055/aag.2024.45810.2429

Received: 2024-01-10

Accepted: 2024-09-19

strength. Additionally, changes in stress-strain behavior, secant modulus, strain energy modulus, resilient modulus, cohesion, and the internal friction angle of the samples were evaluated under various F-T cycles after curing times of 7 and 28 days.

## 2. Material and methods

### 2.1. Materials

The marl soil utilized in this study was prepared and sourced from the northwest belt area of Shiraz, specifically Hosseini Al-Hashemi Boulevard. Once the soil sample was prepared and transported to the laboratory, an XRF test was conducted as the initial step to gain a deeper understanding of its properties and identify its constituent elements. The geotechnical properties of studied marl soil are listed in Table 1. In this research, chitosan was utilized to enhance the engineering properties of clay marl soil. The chitosan used in this study was prepared from shrimp shell waste, as previously studied (Hataf et al., 2018; Shariatmadari et al., 2020).

Table 1. Geotechnical properties of studied marl soil

Property	Value
Passing #200 sieve (%)	97.6
Liquid limit: %	38
Plastic limit: %	24
Plasticity index: %	14
Color	Brown
USCS classification	CL
Unconfined compressive strength (kN/m <sup>2</sup> )	180
Maximum dry density: g/cm <sup>3</sup>	1.79
Optimum water content: %	16.6
pH	7.85

### 2.2. Sample preparations and methodology

In this study, the aim was to examine the impact of adding chitosan to marl soil. Various combinations of chitosan were utilized, including 0%, 0.02%, 0.04%, 0.08%, and 0.16% by weight based on the marl soil. These specific values were chosen based on previous research findings. Subsequently, the samples were subjected to curing for either 7 or 28 days, followed by exposure to different freeze-thaw cycles, namely 0, 1, 4, and 8. All mixtures were compacted at maximum dry specific gravity and optimal soil moisture content. Before conducting the tests on the marl soil, a standard Proctor test was conducted to determine the optimum moisture content and maximum dry weight of the marl soil.

All samples were sealed in moisture-proof nylon to prevent moisture loss during curing. The samples were placed in a digital freezer at a temperature of -20°C for 12 hours, then at ambient temperature (+25°C) for an additional 12 hours to perform the freeze-thaw (F-T) cycle. Other studies have previously established this temperature protocol (Jilin et al., 2003; Ghazavi and Roustaei, 2010). Finally, the samples underwent unconfined compressive strength and direct shear tests. This study subjected unstabilized and chitosan-stabilized marl soil to unconfined compressive strength and direct shear tests, following ASTM D2166 and ASTM D3080, respectively.

## 3- Results and discussions

Figure 1 illustrates the results of the unconfined compressive strength tests conducted on 7-day samples containing varying percentages (0.02, 0.04, 0.08, and 0.16 percent) of chitosan after undergoing freeze-thaw cycles. It is evident from Figure 1 that the compressive strength of the samples increases as the percentage of chitosan increases. Specifically, for the 7-day samples containing 0.02, 0.04, 0.08, and 0.16 percent chitosan, the compressive strength values without undergoing freeze-thaw cycles were reported to be approximately 260, 345, 350, and 410 kPa, respectively. It is important to note that adding chitosan to marl soil triggers a reaction between chitosan particles and clay present in the soil, forming gels that

enhance the compressive strength of marl soil. The formation process of these gels progressively intensifies as the percentage of chitosan increases, thereby enhancing the strength of the samples.

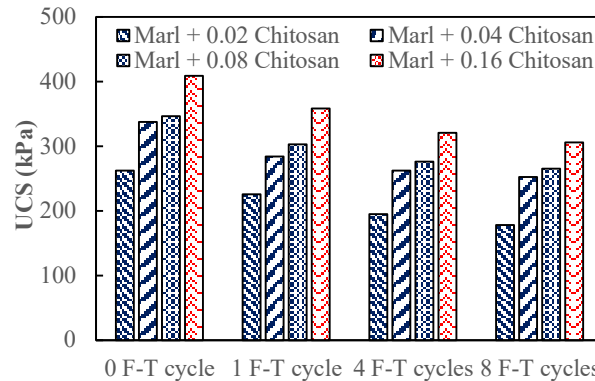


Fig. 1. UCS variations of chitosan stabilized marl clay after seven days under freeze-thaw cycles.

Figure 2 shows that the internal friction angle of unstabilized and chitosan-stabilized marl soil samples are almost the same in conditions without F-T cycles, indicating that adding chitosan does not significantly affect the frictional behavior of the soil matrix. However, adding chitosan improves the cohesion between soil particles, as the chitosan solution is a cohesive liquid that is uniformly distributed among the soil particles. This results in a small amount of chitosan having a significant impact on the cohesion of the soil matrix, leading to improved shear strength.

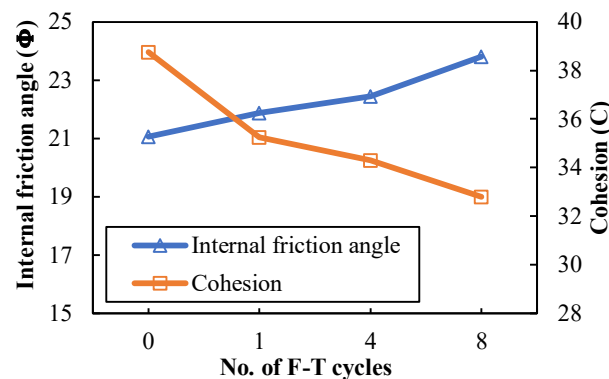


Fig. 2. Variation of internal friction angle and cohesion of chitosan stabilized marl clay after seven days under freeze-thaw cycles.

#### 4-Conclusion

In this research, varying quantities of the additive were mixed with marl soil and exposed to different freeze-thaw cycles following a curing period of 7 and 28 days. Subsequently, unfixed and chitosan-fixed samples underwent unconfined compressive strength and direct shear tests. Regardless of the chitosan percentage and curing time, adding chitosan to the soil increased the compressive strength and strain of the soil samples. The enhancement of mechanical properties was pronounced in the early stages with increased chitosan concentration. The inclusion of chitosan increased hardness and a significant increase in the energy required to reach the point of fracture for the sample, demonstrating the efficacy of chitosan in enhancing the mechanical characteristics of marl soil, particularly under harsh freeze-thaw conditions. The shear characteristics of the optimal composition (sample stabilized with 0.16% chitosan) were significantly higher after seven days of treatment compared to the initial marl soil results. This increase can be attributed to the reactions between the soil particles and chitosan. The gels surrounding the soil particles are absorbed during these reactions, causing them to agglomerate and join together.

#### 5-References

- Ghazavi, M., Roustae, M., 2010. The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 61(2-3), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Hataf, N., Ghadir, P., Ranjbar, N., 2018. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *Journal of Cleaner Production* 170, 1493-1500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>
- Jalali-Milani, S., Asghari-Kaljahi, E., Barzegari, G., Hajjalilue-Bonab, M., 2017. Consolidation deformation of Baghmisheh marls of Tabriz, Iran. *Geomechanics and Engineering* 12, 561-577, <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.4.561>
- Kumar, M.N.R., 2000. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers* 46(1), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9)
- Shahsavani, S., Vakili, A.H., Mokhberi, M., 2021. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. *Cold Regions Science and Technology* 182, 103216. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103216>
- Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., Javadi, A.A., 2020. Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization. In *E3S Web of conferences* 195, 06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019506007>
- Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C., Azañón, J., 2016. Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators. *Engineering Geology* 200, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.11.008>
- Tian, L., Yu, L., Liu, S., Zhang, B., 2020. Deformation research of silty clay under freeze-thaw cycles. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24, 435-442. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0987-0>
- Wang, J., Mignon, A., Trenson, G., Van Vlierberghe, S., Boon, N., De Belie, N., 2018. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. *Cement and Concrete Composites* 93, 309-322. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.007>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jamshidi, M., Mokhberi, M., Vakili, A, Nasehi, A., 2025. Investigating the geotechnical characteristics of improved marls with chitosan biopolymer. *Adv. Appl. Geol.* 14(4): 896-913.

DOI: 10.22055/aag.2024.45810.2429

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19450.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19450.html)

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی مارن‌های بهسازی شده با بیوپلیمر کیتوسان

مجتبی جمشیدی

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران؛ واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان

مهدی مخبری\*

دانشیار، گروه مهندسی عمران؛ واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

امیر حسین وکیلی

استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، موسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز، ایران

سید علیرضا ناصحی

استادیار گروه زمین شناسی، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

\* mehdi.mokhberi@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

### چکیده

واژه مارن به سنگ یا خاک‌های رسی-آهکی اطلاق می‌شود که بنا بر خاصیت ژئوتکنیکی‌شان، در هنگام جذب رطوبت به شدت کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل دارند. مطالعه حاضر، به بررسی اثر بیوپلیمر کیتوسان (پوست میگو) بر روی تغییر خصوصیات خاک مارن پرداخته شده است. برای این منظور، مقادیر متفاوت کیتوسان با خاک ترکیب شده و نمونه‌های مختلف برای انجام آزمایش‌ها ساخته شدند و آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و برش مستقیم بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و تغییرات تنش-کرنش، مدول سکانت، مدول انرژي کرنشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تحت سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که مارن‌ها به تنهایی از مقاومت کمی برخوردار بود و پس از چرخه‌های انجماد و ذوب، بعد از ۸ سیکل میزان مقاومت آن به حدود نصف رسید. اما در نمونه‌های تثبیت شده با کیتوسان میزان مقاومت افزایش قابل توجهی می‌یابد به نحوی که در نمونه حاوی ۰/۱۶ کیتوسان به عنوان ترکیب بهینه، بعد از ۷ روز عمل آوری میزان مقاومت فشاری به حدود ۲/۵ برابر رسید. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که افزودن کیتوسان سبب می‌شود تا علاوه بر سختی بیشتر، میزان انرژي بسیار بیشتری برای رساندن نمونه به نقطه شکست لازم باشد. همچنین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای ترکیب بهینه بعد از ۷ روز عمل آوری برابر با ۳۸/۸ کیلوپاسکال و ۲۱° بدست آمد که به مراتب بیشتر از ۲۱ کیلوپاسکال و ۱۸° مربوط به مارن اولیه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهسازی، مارن، کیتوسان، مقاومت برشی، چرخه انجماد-ذوب.

### ۱- مقدمه

عملکرد آنها تحت شرایط محیطی و بارگذاری سخت محلی هنوز به درستی مورد بررسی قرار نگرفته اند. یکی از مشکلات اساسی پیش روی استفاده از مصالح آهکی، ایجاد فرورفتگی‌ها و نشست در جاده‌ها می‌باشد، علیرغم این که ساخت و ساز بر اساس استانداردهای داخلی و بین‌المللی انجام شده است. مشکلات مربوط به روسازی‌های ساخته شده با این مواد معمولاً با تشکیل ترک‌های کوچک شروع می‌شود که در جهات مختلف منتشر می‌شوند و پس از آن، به خصوص بعد از تغییر فصول سرد و گرم سال و انجام سیکل‌های انجماد و ذوب متوالی، ترک‌های موزائیکی را تشکیل می‌دهند. به دنبال آن، این ترک‌های

در دهه اخیر، کشورهای در حال توسعه نظیر ایران شاهد برنامه‌های سریع و گسترده‌ای در زمینه صنعتی سازی و ایجاد زیرساخت‌ها بوده اند. در جنوب ایران، این پروژه‌ها شامل ایجاد مناطق صنعتی جدید، توسعه تاسیسات پتروشیمی، ساخت راه‌های اصلی، بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها و گسترش شهرنشینی بوده است. تقریباً در تمام این پروژه‌ها، رسوبات آهکی که به طور محلی به نام مارن شناخته می‌شوند، در پی‌ها و در ساخت و سازهای پایه تمام راه‌های خدماتی و بزرگراه‌ها دیده شده است. این مواد در طبیعت ناهمگن هستند و خواص مهندسی و

سبب ایجاد تورم و کاهش مقاومت خاک‌ها شده که این امر باعث آسیب به سازه‌های عمرانی نظیر پوشش کانال‌های آبیاری، کف سازی‌ها و همچنین ایجاد ترک و خرابی در محور جاده‌ها می‌شوند. مطالعات اندکی تا کنون بر رو بهسازی این نوع خاک‌ها انجام شده است و نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که این خاک آهکی به شدت به آب حساس است.

کیتوسان یک پلی ساکارید به دست آمده از استیل زدایی کیتین است که عمدتاً از محصولات آبی، پوسته میگو، پوسته خرچنگ و گیاهان با هزینه تولید نسبتاً پایین استخراج می‌شود (Kumar, 2000; Hataf et al., 2018). علیرغم کاربردهای متعدد آن در تصفیه آب، داروسازی، کشاورزی، و ذخیره انرژی، این منبع طبیعی به طور کامل مورد استفاده قرار نگرفته است. از بزرگترین مزایای این پلیمر می‌توان در دسترس بودن، هزینه کم، زیست تخریب پذیری بالا و سهولت اصلاح شیمیایی را نام برد. اختلاط پلیمرها همچنین می‌تواند برای بهبود خواص مکانیکی ترکیب انجام شود (Wang et al., 2018; Shariatmadari et al., 2020). کیتوسان حاوی تعداد زیادی گروه فعال (مانند  $\text{NH}_2$  /  $\text{-OH}$ ) است که از طریق گروه‌های فعال، کلات‌های پایدار با فلزات سنگین تشکیل می‌دهند. پیش تر کیتوسان در اصلاح خاک آلوده استفاده شده و عملکرد خوبی از خود نشان داد. پژوهشگران از کیتوسان برای احیای خاک آلوده به کروم استفاده کردند و دریافتند که محتوای فرم مؤثر کروم در خاک به طور قابل توجهی کاهش یافته و پس از ۷ روز تثبیت می‌شود.

کاربرد بیوپلیمرها در مهندسی ژئوتکنیک و ژئومحیط زیست جدید است. مطالعات محدودی در مورد کاربرد بیوپلیمرها برای بهبود خصوصیات خاک وجود دارد. این مطالعات به طور کلی به نفوذپذیری، کنترل فرسایش و مقاومت برشی خاک مرتبط می‌باشند. مطالعات تجربی نشان داده اند که آزمایشات سه محوری CU انجام شده بر روی سیلت فشرده مخلوط با محلول ۱ درصد کیتوسان، بهبود مقاومت برشی تا ۳۰ درصد را در عرض یک هفته نشان می‌دهند.

بر اساس مطالعات Wan و همکاران (۲۰۰۴) ماسه با پوشش کیتوسان دارای کاربرد عملی در فیلترها برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده است و می‌تواند با کاهش هدایت هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای، اثر مسدود کننده مناسبی ایجاد کند. علاوه بر این، کیتوسان قادر است یون‌های فلزی را متصل کرده و

کوچک عریض شده و لایه آسفالت به بلوک‌های کوچک متلاشی می‌شود. نهایتاً جابجایی بلوک‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد و سپس فرورفتگی‌ها ایجاد می‌شوند که سبب از هم پاشیدگی کامل لایه آسفالتی و مسیر راه‌ها می‌شود و در بسیاری از موارد جاده صعب العبور می‌گردد. این حالت‌های معمول تخریب حتی در جاده‌های کم‌ترافیک و تازه ساخته شده نیز مشاهده می‌شود، زمانی که مارن به عنوان ماده اصلی در مناطقی که سطح آب نزدیک به سطح زمین است، استفاده می‌شود. همچنین مشاهده فروپاشی کامل برخی از جاده‌ها چند هفته پس از ساخت نیز در این وضعیت غیرعادی نیست.

مارن به عنوان یک خاک یا ماده سنگ مانند که حاوی حدود ۳۵ تا ۶۵ درصد مواد آهکی و همچنین درصد متغیری از مقادیر رس است تعریف می‌شود. گاهی اصطلاح مارن اغلب برای نشان دادن همه انواع مواد آهکی موجود استفاده می‌شود. بر اساس مطالعات Vakili و همکاران (۱۰۱۹ و ۲۰۲۱)، Sánchez و همکاران (۲۰۱۶) و Ouhadi و Yong (۲۰۰۳)، مارن که عمدتاً دارای طبیعت آهکی است، تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر ترکیبات معدنی، نوع کانی کربناته موجود، منشأ و فرآیند تشکیل، توزیع اندازه دانه و درجه سیمان شدن است. علاوه بر این Seco و همکاران (۲۰۱) و Vakili و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقات خود اشاره کرده اند که تغییر در تراکم و میزان رطوبت بر رفتار این نوع خاک تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، مارن به طور کلی از نظر ویژگی‌های مهندسی و تعاریف، تنوع گسترده‌ای را شامل می‌شود.

یکی از اصلی ترین موارد و مشکلاتی که همیشه در خصوص خاک‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد، رفتار آنها در حضور آب و رطوبت بوده که سبب تورم، واگرایی و یا رمبندگی آنها می‌شود (Aiban et al., 1998; Jalali-Milani et al., 2017). یکی از عواملی که منجر به تورم و کاهش مقاومت خاک‌ها می‌شود، تورم ناشی از یخبندان و افزایش رطوبت پس از ذوب-یخ می‌باشد که در نواحی سردسیر با سطح سفره آب زیرزمینی بالا بسیار دارای اهمیت می‌باشد (Yarbaşı et al., 2007; Tian et al., 2020 Shamsavani et al., 2021). رفتار تورمی خاک ناشی از یخبندان سبب افزایش حجم کل خاک شده و ذوب شدن یخ نیز افزایش تخلخل، درصد رطوبت و نهایتاً کاهش مقاومت خاک را به دنبال می‌آورد. یخبندان‌های شبانه روزی که بر اثر تغییرات دما در نواحی مختلف ایران رخ می‌دهند،

مارن‌های رسی با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت برش مستقیم پرداخته شد و تغییرات تنش- کرنش، مدول سکانت، مدول انرژي کرنشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها تحت سیکل‌های مختلف انجماد-ذوب بعد زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مارن

مارن‌های استفاده شده در این تحقیق از بخش کمربندی شمال غرب شیراز (بلوار حسینی الهاشمی) تهیه و مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). بعد از تهیه نمونه خاک و انتقال آن به آزمایشگاه، برای درک بهتر مشخصات آن، ابتدا آزمایش XRF بر روی آن انجام پذیرفت تا محتویات آن مشخص شود که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. سپس آزمایش‌های مختلفی شامل آزمایش‌های دانه بندی (ASTM D422)، حدود اتربرگ (ASTM D4318)، هیدرومتری (ASTM D421, 422)، تراکم (ASTM D698)، مقاومت فشاری تک محوری (ASTM D2166) و pH بر روی نمونه خاک آماده شده انجام شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

قابلیت شستشو را محدود کند، حتی در حضور K, Cl و NO<sub>3</sub>، که غالب در خاک هستند. نتایج تحقیقات Kamari و همکاران (۲۰۱۱) و Lertsutthiwong و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که کیتوسان به دلیل خاصیت کاتیونی خود برای افزایش کیفیت آب، مالتی پلکس‌هایی با میکروارگانیزم‌ها ایجاد می‌کند. آزمایش قطره‌ای آب که توسط Aguilar و همکاران (۲۰۱۶) انجام شد نشان داد که کاربردهای پوششی با محلول‌های کیتوسان با غلظت کم برای محافظت در برابر فرسایش قطره‌ای آب کافی است. در نتیجه، کیتوسان پتانسیل زیادی برای کاربردهای ژئو زیست محیطی ارائه می‌دهد. با این حال، تاثیر ترکیب کیتوسان بر رفتار فیزیکی، مکانیکی و ریزساختاری خاک به طور جامع ارزیابی نشده است.

با توجه به مشکلات مطرح شده و عدم اجتناب از احداث سازه‌ها بر روی این خاک‌ها در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، اهمیت توجه به تاثیر کیتوسان به عنوان یک ماده که منشا اولیه آن از مواد دور ریز در صنعت می‌باشد بر روی خاک مسئله دار مارن در شرایط سخت نظیر انجماد-ذوب را زیاد می‌کند که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. به همین منظور در این مطالعه به بررسی اثر این ماده افزودنی بر مشخصات مکانیکی



شکل ۱- محل اخذ نمونه خاک مارن مورد مطالعه بر روی نقشه ماهواره

Fig. 1. Location of the sampling used in the research

جدول ۱- آنالیز شیمیایی خاک مارن مورد مطالعه

Table 1. Chemical analysis of studied marl soil

Compositions	Value (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.3
SiO <sub>2</sub>	34.7
CaO	18.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8
Na <sub>2</sub> O	0.22
TiO <sub>2</sub>	0.43
K <sub>2</sub> O	1.23
MgO	7.3
SO <sub>3</sub>	0.11
LOI	23.25

جدول ۲- مشخصات ژئوتکنیکی مارن مورد مطالعه

Table 2. Geotechnical properties of studied marl soil

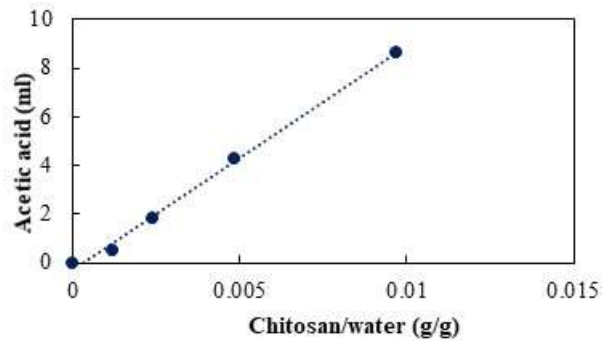
Property	Value
Passing #200 sieve (%)	97.6
Liquid limit: %	38
Plastic limit: %	24
Plasticity index: %	14
Colour	Brown
USCS classification	CL
Unconfined compressive strength (kN/m <sup>2</sup> )	180
Maximum dry density: g/cm <sup>3</sup>	1.79
Optimum water content: %	16.6
pH	7.85

## ۲-۲- کیتوسان

در این پژوهش از کیتوسان به منظور بهبود رفتار مهندسی مارن‌های رسی استفاده شده است. کیتوسان مورد استفاده در این مطالعه از ضایعات پوسته میگو مطابق با مطالعات گذشته تهیه شد (Hataf et al. 2018; Wang et al., 2018; Shariatmadari et al., 2020). برای این امر ابتدا، پوست میگو به میزان کافی تهیه، شسته و سپس خشک شد. سپس، پودر پوسته میگو در ۷٪ اسید کلریدریک در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت کانی زدایی شد. سپس، پوسته میگو با استفاده از فیلترهای پارچه ای از محلول جدا شدند و با کمک آب مقطر کاملاً شسته شد تا به pH خنثی برسند. در این مرحله میزان کاهش وزن پوست میگوها نسبت به وزن اولیه در حدود ۶۰ درصد بدست آمد. سپس آنها را با محلول ۱۰٪ NaOH به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

مخلوط کرده تا به طور کامل پروتئین زدایی شوند، که طی آن در حدود ۲۵ درصد دیگر از وزن کل پوسته میگو حذف گردید. کیتین در اتانول ۹۶ درصد آبدایی شد و نهایتاً در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد. کیتین سنتز شده با ۵۰ درصد وزنی سدیم در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت استیل زدایی شد تا ماده نهایی به نام کیتوسان تهیه شود. این ماده در نهایت پس از فیلتر کردن و شستشو شدن با آب مقطر با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و سپس خشک شدن در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت به دست آمد. لازم به ذکر است که محصول نهایی با فرمول شیمیایی C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>4</sub> به صورت پودر سفید رنگ با اندازه ذرات عبوری از الک ۲۰۰ (۰٫۰۷۵ میلیمتر) بدست آمد. درصد رطوبت کیتوسان در دما و رطوبت محیط آزمایشگاه کمتر از ۳٪ گزارش شد.





شکل ۲- آماده سازی مقادیر مختلف کیتوسان با اسید استیک

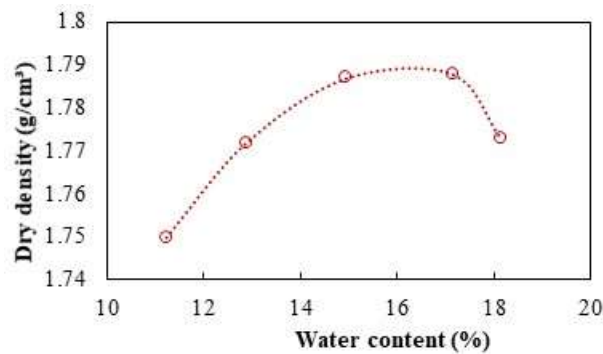
Fig. 2. Preparation of various chitosan contents with acetic acid

متفاوت مخلوط کرده و در قالب تراکم متراکم شدند. در این مطالعه بر روی مارن تثبیت نشده و تثبیت شده با کیتوسان، مطابق استاندارد ASTM D2166 آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام پذیرفت. برای این کار ابتدا ترکیبات ساخته شده از خاک، کیتوسان و آب کاملاً یکنواخت شدند و سپس به صورت استاتیکی در قالب‌های استوانه‌ای فولادی با ارتفاع و قطر ۷۰ و ۳۵ میلی‌متر متراکم شدند تا حداکثر چگالی خشک نمونه‌ها به دست آید. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، آنها همانطور که پیشتر توضیح داده شد عمل آوری شدند و سپس در معرض سیکل‌های انجماد-ذوب متوالی قرار گرفتند. نهایتاً آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های تثبیت شده با نرخ کرنش ثابت ۱٫۲ میلی متر در دقیقه انجام شد. به منظور تعیین پارامترهای برشی خاک آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. برای این منظور، نمونه‌ها ابتدا ترکیبات مارن و کیتوسان در حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه مارن حاصل از آزمایش تراکم آماده شدند، سپس در یک قالب مربعی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر ریخته شده تا در یک لایه به ضخامت ۲۰ میلی‌متر به صورت دینامیکی متراکم شوند. نمونه متراکم شده توسط پیستون از درون قالب بیرون آورده شد و با نایلون عایق رطوبت به خوبی پوشانده شده تا مراحل عمل آوری و نهایتاً انجماد-ذوب بر روی آنها انجام پذیرند. نهایتاً آزمایش برش مستقیم بعد از پایان سیکل‌های انجماد-ذوب بر روی همه نمونه‌ها انجام گرفت. برای هر ترکیب از کیتوسان مطابق استاندارد ASTM D3080 سه نمونه ساخته شد تا با قرار دادن بارهای قائم متفاوت شامل ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال بر روی آنها، نمودار تنش برشی-تنش قائم را رسم کرد. در نهایت با توجه به نمودارهای رسم شده، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به هر نمونه محاسبه شد.

### ۳-۲- روش نمونه سازی و انجام تست‌ها

در این پژوهش برای بررسی تاثیر ماده افزودنی کیتوسان بر روی مارن ترکیبات متفاوتی از این ماده شامل ۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۶ درصد وزنی مارن مورد استفاده قرار گرفتند. این مقادیر بر اساس مطالعات پیشین که بر روی کیتوسان انجام شده بود انتخاب شد (Hataf et al. 2018; Shariatmadari et al. 2020). سپس نمونه‌ها برای مدت زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روز نگهداری شدند و سپس ۴ سیکل انجماد-ذوب متفاوت شامل ۰، ۱، ۴ و ۸ سیکل بر روی آنها انجام پذیرفت. تمام ترکیبات در حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک متراکم شدند. از این رو قبل از شروع آزمایشات برای مارن‌ها آزمایش پراکتور استاندارد انجام گرفت تا مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک مارن‌ها بدست آید (شکل ۳).

تمامی نمونه‌ها به منظور جلوگیری از دست دادن رطوبتشان در طول زمان عمل آوری درون نایلون عایق رطوبت قرار گرفتند. همچنین برای انجام فرآیند انجماد-ذوب، نمونه‌ها بعد از اتمام زمان عمل آوری از پیش تعیین شده، در فریزر دیجیتال با دمای ۲۰- سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت قرار داده و بعد از آن نمونه را در دمای ۲۵+ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) به مدت ۱۲ ساعت به منظور طی شدن پروسه ذوب-یخ قرار داده شدند. لازم به ذکر است که این دماها در مطالعات گذشته توسط دیگر محققین استفاده شده است (Qi et al., 2003; Ghazavi and Roustaei, 2010). در نهایت آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و برش مستقیم بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. آزمایش تراکم استاندارد خاک طبق استاندارد ASTM D698 از روش B استفاده شد. به این صورت که میزان کافی خاک عبور کرده از الک شماره ۲۰۰ را با درصدهای رطوبت‌های



شکل ۳- منحنی تراکم مارن مورد مطالعه

Fig. 3. Compaction curve for studied marl soil

### ۳- نتایج و تحلیل‌ها

#### ۳-۱- اثر کیتوسان بر مقاومت فشاری محدود نشده مارن تحت سیکل‌های انجماد-ذوب

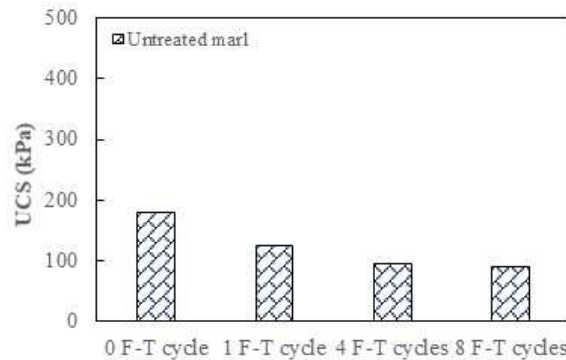
در این قسمت به بررسی تاثیر ماده افزودنی کیتوسان بر مقاومت فشاری مارن بعد از سیکل‌های انجماد-ذوب برای عمل آوری-های مختلف پرداخته می‌شود. شکل ۴ منحنی تنش-کرنش برای مارن رسی بعد از سیکل‌های انجماد-ذوب را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری بعد از سیکل اول اتفاق افتاده است به طوری که مقاومت از حدود ۱۷۸ کیلوپاسکال به حدود ۱۲۲ کیلوپاسکال می‌رسد. با افزایش سیکل‌های انجماد-ذوب مقاومت نمونه خاک مارن در عدم حضور کیتوسان کاهش می‌یابد به نحوی که بعد از ۸ سیکل انجماد-ذوب نمونه ترک خورده مقاومتی در حدود ۹۰ کیلوپاسکال از خود نشان داد. تشکیل بلورهای یخ در هنگام انجماد و آب شدن آن‌ها در زمان ذوب سبب ایجاد تخلخل شده و شروع ترک و شکست در ساختار خاک را به دنبال دارد (Hataf et al. 2018). با افزایش سیکل‌های انجماد-ذوب، ترک‌ها درون نمونه انتشار یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده برای تاثیر سیکل‌های انجماد-ذوب متوالی بر روی خاک مارن مورد مطالعه با مقادیر بدست آمده از مطالعه Vakili و همکاران (۲۰۲۲).

شکل ۵ نتایج مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌های ۷ روزه حاوی ۰/۰۲ ، ۰/۰۴ ، ۰/۰۸ ، ۰/۱۶ درصد کیتوسان را بعد از اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش کیتوسان افزوده می‌شود به طوری که برای نمونه‌های ۷ روزه حاوی ،

۰/۰۲ ، ۰/۰۴ ، ۰/۰۸ ، ۰/۱۶ درصد کیتوسان مقاومت نمونه‌ها بدون سیکل به حدود ۲۶۰، ۳۴۵، ۳۵۰ و ۴۱۰ کیلوپاسکال گزارش شد. نتایج هم خوانی کاملی با یافته‌های بدست آمده توسط شریعتمداری و همکاران در سال ۲۰۲۰ دارد که در آن میزان مقاومت فشاری محدود نشده خاک مورد مطالعه با افزایش میزان کیتوسان، همچنان افزایش یافت (Shariatmadari et al., 2020). لازم به ذکر است که افزودن کیتوسان به مارن سبب انجام واکنش بین ذرات کیتوسان با خاک رس شده که به تشکیل ژلهایی می‌انجامد که سبب افزایش مقاومت فشاری مارن می‌شود (Wang et al., 2018; Shariatmadari et al., 2020). روند تشکیل این ژل‌ها با افزایش درصد کیتوسان به مرور بیشتر می‌شود که انسجام بیشتر نمونه‌ها را به همراه می‌آورد. لذا سیکل‌های انجماد-ذوب تاثیر کمتری بر روی نمونه‌های تثبیت شده در مقایسه با مارن تثبیت نشده داشتند. مقاومت نمونه‌های تثبیت شده بعد از اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب کاسته می‌شود. هرچند که بیشترین کاهش مقاومت در سیکل اول اتفاق افتاده است که دلیل آن بهم ریختگی زیاد در طول این فرآیند است (Wang et al., 2007). به طور کلی با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب، میزان مقاومت فشاری محدود نشده به یک میزان ثابت میل می‌کند. شکل ۶ نتایج تنش-کرنش برای نمونه‌های ۲۸ روزه حاوی ۰/۰۲ ، ۰/۰۴ ، ۰/۰۸ ، ۰/۱۶ درصد کیتوسان بعد از ۸ سیکل انجماد-ذوب را نشان می‌دهند. روند تغییرات بعد از ۲۸ روز عمل آوری همانند ۷ روز گزارش شد به گونه‌ای که با افزایش میزان کیتوسان رفته رفته میزان مقاومت افزایش پیدا کرد. اما اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب از میزان مقاومت نمونه‌ها کاست. همانطور که گفته شد میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش

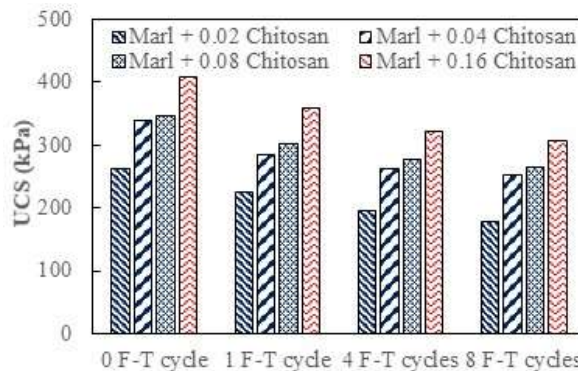
مارن تثبیت شده با کیتوسان برای همه درصدها بعد از ۲۸ روز عمل آوری و ۸ سیکل همواره بیشتر از مقاومت مارن قبل و بعد از ۸ سیکل انجماد-ذوب بدست آمد. این امر نشان دهنده تاثیر مثبت ماده افزودنی کیتوسان به عنوان یک ماده دوستدار محیط زیست بر روی خصوصیات مکانیکی مارن می باشد.

کیتوسان افزوده می شود به طوری که برای نمونه های ۲۸ روزه حاوی، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۸، ۰/۱۶ درصد کیتوسان مقاومت نمونه ها بدون سیکل به حدود ۲۵۲، ۲۸۰، ۳۱۰ و ۳۴۲ کیلوپاسکال رسید. این میزان مقاومت برای نمونه ها بعد از ۸ سیکل به ترتیب در حدود ۱۷۰، ۲۰۵، ۲۲۰ و ۲۴۰ کیلوپاسکال بدست آمد. نکته قابل توجه این است که مقاومت فشاری نمونه



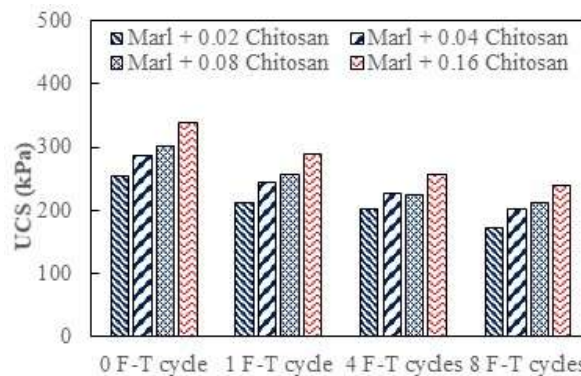
شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری مارن رسی بعد از سیکل های انجماد-ذوب

Fig. 4. UCS variations of marl clay after freeze-thaw cycles



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری مارن رسی تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۷ روز عمل آوری تحت سیکل های انجماد-ذوب

Fig. 5. UCS variations of chitosan stabilized marl clay after 7 days under freeze-thaw cycles



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری مارن رسی تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۲۸ روز عمل آوری تحت سیکل های انجماد-ذوب

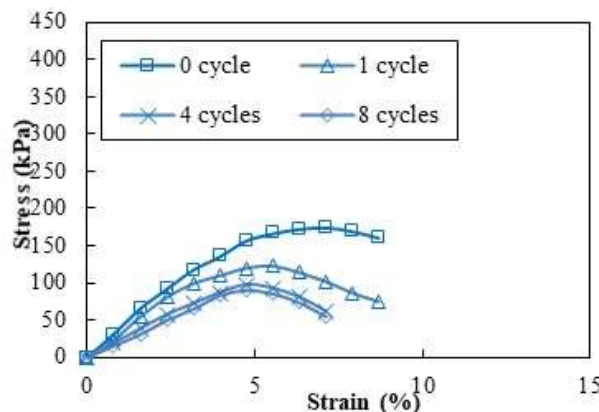
Fig. 6. UCS variations of chitosan stabilized marl clay after 28 days under freeze-thaw cycles

### ۲-۳- اثر کیتوسان بر تنش- کرنش مارن تحت سیکل- های انجماد-ذوب

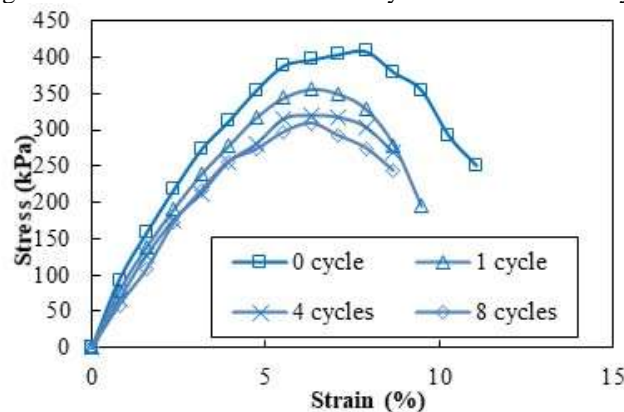
شکل های ۷، ۸ و ۹ به ترتیب نتایج تنش-کرنش برای نمونه های مارن رسی تثبیت نشده و تثبیت شده با ۰/۱۶ درصد کیتوسان بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری تحت سیکل های مختلف انجماد-ذوب نشان می دهند. همانطور که در شکل ها مشاهده می شود میزان تنش و کرنش نمونه ها با افزودن ۰/۱۶ درصد کیتوسان به عنوان یک ماده دوستدار محیط زیست افزایش می یابد. به طوری که میزان کرنش در نقطه پیک مقاومت برای خاک تثبیت نشده بعد از اعمال سیکل های انجماد-ذوب به کمتر از ۵ درصد می رسد، در حالی که این مقدار برای نمونه های حاوی کیتوسان همچنان بیشتر از ۶ درصد گزارش شد. اضافه کردن ماده افزودنی کیتوسان به مارن منجر به انجام واکنش هایی بین ذرات کیتوسان با خاک رس شده که به تشکیل ژل هایی می انجامید که افزایش تنش و کرنش مارن را به دنبال می آورد. روند

تشکیل این ژل ها با افزایش درصد کیتوسان به مرور بیشتر می شود که استحکام بیشتر نمونه ها را به همراه دارد (Wang et al. 2018). از این رو، اعمال سیکل های انجماد-ذوب تاثیر کمتری بر روی نمونه های تثبیت شده در مقایسه با مارن تثبیت نشده داشتند.

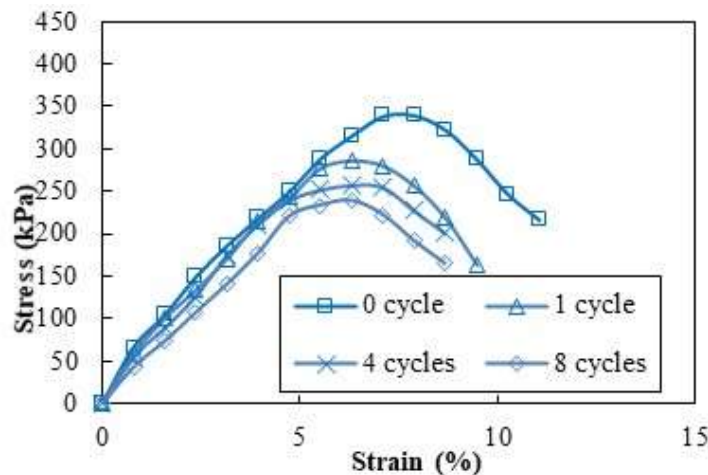
بر اساس نتایج بدست آمده از تست های آزمایشگاهی مشخص شد که از میزان کرنش نمونه های تثبیت شده بعد از اعمال سیکل های انجماد-ذوب کاسته می شود. هرچند که در تمامی نمونه ها بیشترین کاهش تنش و کرنش قابل تحمل توسط نمونه در سیکل اول اتفاق افتاده است که دلیل آن ایجاد ترک های اصلی زیاد در طول این فرآیند است. با اعمال یک فرایند انجماد به نمونه، ساختار نمونه تغییر کرده و آب درون بافتی آن منجمد و افزایش حجم می دهد و بعد از اعمال فرایند ذوب شدن این لانه های یخی ذوب شده و حفره ها درون نمونه باقی می ماند که این تغییرات با افزایش کیتوسان کاهش می یابد هرچند همچنان با اعمال اولین سیکل بیشترین تغییرات در نمونه رخ می دهد.



شکل ۷- منحنی های تنش-کرنش مارن رسی تحت چرخه های انجماد-ذوب  
Fig. 7. Stress-strain curves of marl clay under freeze-thaw cycles



شکل ۸- منحنی های تنش-کرنش مارن رسی تثبیت شده با ۰/۱۶٪ کیتوسان بعد از ۷ روز عمل آوری تحت چرخه های انجماد-ذوب  
Fig. 8. Stress-strain curves of chitosan stabilized marl clay after 7 days under freeze-thaw cycles



شکل ۹- منحنی‌های تنش-کرنش مارن رسی تثبیت شده با ۰/۱۶٪ کیتوسان بعد از ۲۸ روز عمل آوری تحت چرخه‌های انجماد-ذوب  
Fig. 9. Stress-strain curves of chitosan stabilized marl clay after 28 days under freeze-thaw cycles

آوری برابر با ۲/۲۱ کیلوژول بر متر مکعب و ۹۲/۱۶ مگاپاسکال، و بعد از ۲۸ روز عمل آوری برابر با ۱/۶۴ کیلوژول بر متر مکعب و ۵۸/۹۴ مگاپاسکال گزارش شدند. این مقادیر بعد از اعمال ۸ سیکل انجماد ذوب بعد از ۷ روز عمل آوری برابر با ۱/۲۱ کیلوژول بر متر

مکعب و ۷۱/۷۸ مگاپاسکال و بعد از ۲۸ روز عمل آوری برابر با ۰/۸۷ کیلوژول بر متر مکعب و ۴۲/۲۷ مگاپاسکال بدست آمدند. با توجه به نتایج بدست آمده از پارامترهای E50 و Eu برای نمونه‌های مختلف مشخص شد که افزودن کیتوسان سبب می‌شود تا علاوه بر سختی بیشتر، به میزان انرژی بسیار بیشتری برای رساندن نمونه به نقطه شکست لازم باشد. این امر حاکی کارآمد بودن کیتوسان در بهبود خصوصیات مکانیکی مارن بخصوص در شرایط سخت انجماد-ذوب می‌باشد. باید توجه داشت، با وجود اینکه بعد از زمان عمل آوری ۲۸ روز از میزان مقادیر مدول سکانت و مدول کرنش برشی در مقایسه با زمان عمل آوری ۷ روز کاسته شده است اما همچنان مقادیر آنها از مارن تثبیت نشده بیشتر است.

#### ۳-۴- اثر کیتوسان بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مارن تحت سیکل‌های انجماد-ذوب

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ به ترتیب نتایج مربوط به زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای نمونه‌های ساخته شده از مارن تثبیت نشده و همچنین مارن تثبیت شده با ۰/۱۶ درصد کیتوسان بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری با اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب نمایش می‌دهند. با توجه به شکل ۱۲ مشخص شد که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی مارن تثبیت نشده با افزایش تعداد

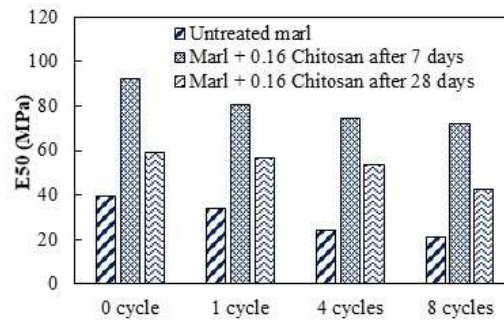
#### ۳-۳- اثر کیتوسان بر مدول‌های E50 و Eu مارن تحت سیکل‌های انجماد-ذوب

در این مطالعه، مساحت زیر منحنی‌های تنش-کرنش تا حداکثر تنش از شکل‌های ۷ تا ۹ محاسبه شدند که به‌عنوان حداکثر انرژی کرنشی یا ظرفیت جذب انرژی (Eu) تعریف می‌شود (Soltani et al., 2019; Salimi and Ghorbani, 2020; ) (Salimi et al., 2024). علاوه بر این، مدول سکانت (E50) نمونه‌ها از منحنی‌های تنش کرنش استخراج شد که سختی نمونه‌ها را مشخص می‌کند و به‌عنوان شیب یک خط مستقیم از مبدا در نمودار تنش کرنش تا ۵۰٪ نقطه شکست تعریف می‌شود. این دو پارامتر مشخصات خوبی از رفتار خاک در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند.

شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج بدست آمده برای پارامتر مدول سکانت و مدول انرژی کرنشی را برای نمونه مارن تثبیت نشده و تثبیت شده با ۰/۱۶٪ کیتوسان به‌عنوان ترکیب بهینه بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری برای سیکل‌های مختلف انجماد و ذوب را نمایش می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر Eu و E50 به ترتیب برای نمونه مارن در حدود ۰/۸ کیلوژول بر متر مکعب و ۳۹/۲۹ مگاپاسکال بدست آمد که با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب از میزان آنها کاسته شد، به طوری که بعد از ۸ سیکل به ۰/۲۲ کیلوژول بر متر مکعب و ۲۰/۸۵ مگاپاسکال رسیدند. باید توجه داشت که این مقادیر برای خاک تثبیت شده با کیتوسان به مراتب بیشتر از خاک تثبیت نشده گزارش شد. مقادیر Eu و E50 برای نمونه‌های حاوی ۰/۱۶ درصد کیتوسان بدون سیکل انجماد-ذوب بعد از ۷ روز عمل

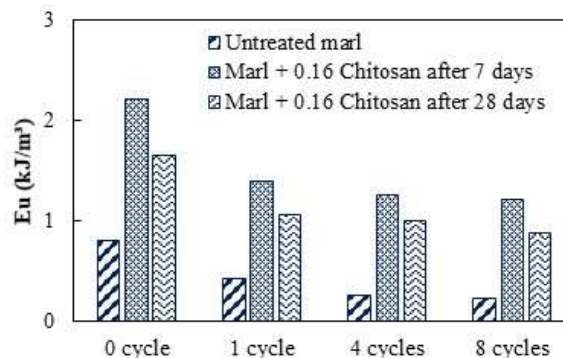
بدست آمده از پژوهش‌های گذشته نظیر Ogata و همکاران (۱۹۸۵) و Wang و همکاران (۲۰۰۷) دارد. مطابق با نتایج مطالعات پیشین نیز، سیکل‌های انجماد-ذوب می‌تواند منجر به کاهش چسبندگی و همچنان افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها شود.

سیکل‌های انجماد-ذوب افزایش یافته است. به طور عکس، مقادیر چسبندگی در نمونه‌های مارن با افزایش تعداد سیکل-های انجماد-ذوب کاهش یافت که دلیل این رفتار را می‌توان به افزایش فضای موجود بین ذرات خاک بر اثر سیکل‌های انجماد-ذوب و همچنین کاهش سطح تماس بین آن‌ها نسبت داد. لازم به ذکر است که این نتایج هم خوانی خوبی با نتایج



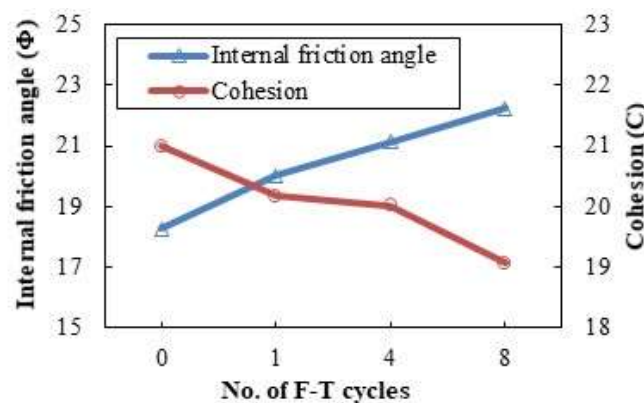
شکل ۱۰- تغییرات مدول سکانت مارن تثبیت نشده و تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری تحت چرخه‌های انجماد-ذوب

Fig. 10. Variation of secant modulus of untreated and chitosan stabilized marl clay after 7 and 28 days under freeze-thaw cycles



شکل ۱۱- تغییرات مدول انرژی کرنشی مارن رسی تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری تحت چرخه‌های انجماد-ذوب

Fig. 11. Variation of peak strain energy of untreated and chitosan stabilized marl clay after 7 and 28 days under freeze-thaw cycles

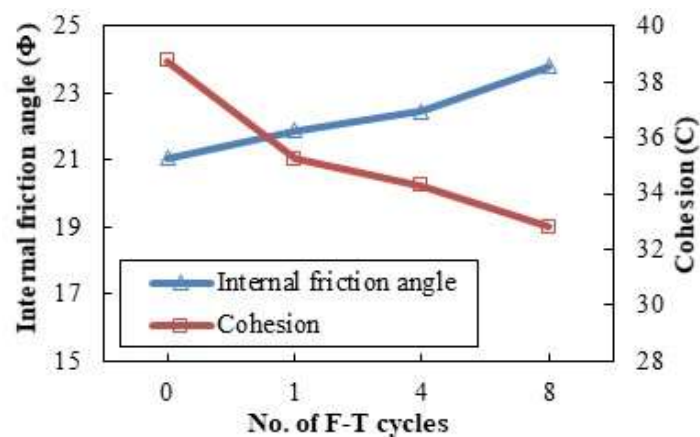


شکل ۱۲- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مارن رسی تحت چرخه‌های انجماد-ذوب

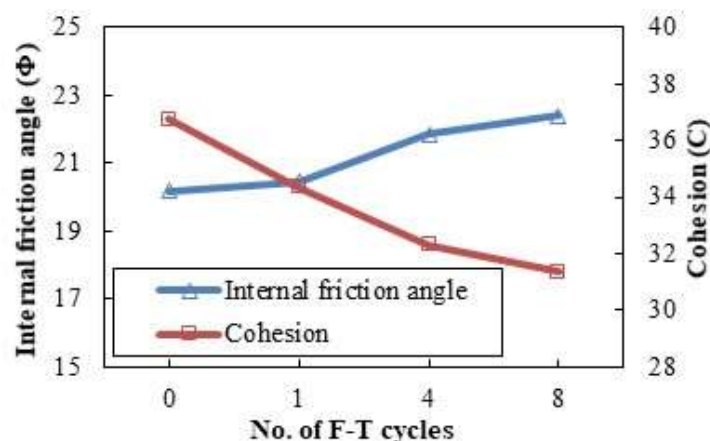
Fig. 12. Variation of internal friction angle and cohesion of marl clay under freeze-thaw cycles

مقایسه شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان می‌دهد که زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مارن تثبیت نشده و تثبیت شده با کیتوسان برای حالت بدون سیکل تقریباً مشابه هستند و تغییرات چشمگیری را شاهد نبودیم. این بدان معناست که افزودن کیتوسان به خاک بر رفتار اصطکاکی ماتریس خاک تأثیر چندانی ندارد. با این حال، از آنجایی که محلول کیتوسان یک مایع منسجم است و به طور یکنواخت در میان ذرات خاک توزیع می‌شود، افزایش مقاومت برشی ماتریس‌ها به بهبود پیوستگی بین ذرات نسبت داده می‌شود (Shariatmadari et al., 2020). در نتیجه، مقدار کمی کیتوسان تا حدود زیادی می‌تواند به بهبود انسجام بین ذرات خاک کمک کند.

باید توجه داشت که زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها با افزایش زمان عمل آوری تا ۷ روز عموماً افزایش یافته و رفته رفته با افزایش مدت زمان عمل آوری تا ۲۸ روز از میزان آن‌ها کاسته شده است. از آنجایی که کیتوسان ماده‌ای است که به مرور در آب حل و دچار تخریب می‌شود، لذا با افزایش زمان عمل آوری تا ۲۸ روز از میزان کارایی آن در فرایند تثبیت کاسته می‌شود. هرچند باید توجه داشت که با وجود سیکل‌های انجماد-ذوب و همچنین افزایش زمان عمل آوری، پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت شده با ۰/۱۶ درصد کیتوسان همچنان بهتر از مارن تثبیت نشده گزارش شد.



شکل ۱۳- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مارن تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۷ روز عمل آوری تحت چرخه‌های انجماد-ذوب  
Fig. 13. Variation of internal friction angle and cohesion of chitosan stabilized marl clay after 7 days under freeze-thaw cycles



شکل ۱۴- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مارن تثبیت شده با کیتوسان بعد از ۲۸ روز عمل آوری تحت چرخه‌های انجماد-ذوب  
Fig. 14. Variation of internal friction angle and cohesion of chitosan stabilized marl clay after 28 days under freeze-thaw cycles

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به اثر ماده افزودنی کیتوسان با خاک مارن رسی تحت اعمال سیکل‌های انجماد-ذوب مختلف بر روی خصوصیات مقاومتی ترکیبات متفاوت پرداخته شد. برای این منظور، مقادیر متفاوت این ماده افزودنی با مارن ترکیب شده و بعد از انجام عمل آوری در مدت‌های ۷ و ۲۸ روز در معرض سیکل‌های متفاوت انجماد-ذوب قرار گرفتند. نهایتاً بر روی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با کیتوسان، آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و برش مستقیم انجام گرفت. خلاصه نتایج آزمایش‌ها و یافته‌های بدست آمده از این مطالعه عبارتند از:

- در تمامی نمونه‌ها بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری بعد از سیکل اول اتفاق افتاده است به طوری که مقاومت از حدود ۱۷۸ کیلوپاسکال به حدود ۱۲۲ کیلوپاسکال می‌رسد. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب از میزان کرنش نمونه‌های به هنگام شکست نیز کاسته شده است. با افزایش سیکل‌های انجماد-ذوب مقاومت نمونه خاک مارن در عدم حضور کیتوسان کاهش می‌یابد به نحوی که بعد از ۸ سیکل انجماد-ذوب نمونه ترک خورده مقاومتی در حدود ۹۰ کیلوپاسکال از خود نشان داد.

- مستقل از درصد کیتوسان و زمان عمل آوری، ترکیب خاک به همراه کیتوسان باعث افزایش مقاومت فشاری (به عبارت دیگر تنش نهایی) و همچنین کرنش نمونه‌های خاک شده است. افزایش کیتوسان منجر به افزایش مشخصات مکانیکی بیشتر در روزهای اولیه می‌شود. تغییر مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان‌های عمل آوری مختلف را می‌توان به تشکیل ژل کیتوسان در اطراف ذرات خاک برای افزایش انسجام ماتریس نسبت داد. از سوی دیگر، با افزایش زمان عمل آوری رفته رفته از مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده کاسته شده است. کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان عمل آوری بیشتر ممکن است به دلیل تخریب هیدرولیکی کیتوسان باشد.

- افزودن کیتوسان سبب می‌شود تا علاوه بر سختی بیشتر، میزان انرژی بسیار بیشتری برای رساندن نمونه به نقطه شکست لازم باشد. این امر حاکی کارآمد بودن کیتوسان در بهبود خصوصیات مکانیکی مارن بخصوص در شرایط سخت انجماد-ذوب می‌باشد. باید توجه داشت، با وجود اینکه بعد از زمان عمل آوری ۲۸ روز از میزان مقادیر مدول سکانت و مدول کرنش

برشی در مقایسه با زمان عمل آوری ۷ روز کاسته شده است اما همچنان مقادیر آنها از مارن تثبیت نشده بیشتر است.

- مشخصات برشی برای ترکیب بهینه (نمونه تثبیت شده با ۰/۱۶ درصد کیتوسان) بعد از ۷ روز عمل آوری به مراتب بیشتر از نتایج بدست آمده از مارن اولیه بود. دلیل این امر را می‌توان به انجام واکنش‌هایی بین ذرات خاک و کیتوسان نسبت داد که طی آن ژل‌هایی پیرامون ذرات خاک را گرفته و سبب به هم پیوستگی آن‌ها می‌شوند. حضور کیتوسان در نمونه‌ها باعث ایجاد یک دانه‌بندی متفاوت از دانه بندی اصلی خاک می‌شود و با ایجاد ژل‌های نهایی در ترکیب، این دانه بندی‌های جدا به یکدیگر پیوند خورده و حالتی مقاوم را در کل ترکیب به وجود می‌آورند. به عبارت دیگر این ژل‌ها بر روی ذرات خاک قرار گرفته که نهایتاً به بهبود خصوصیات مکانیکی خاک می‌انجامد. - مقادیر زاویه اصطکاک داخلی مارن تثبیت نشده با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب افزایش یافته است. به طور عکس، مقادیر چسبندگی در نمونه‌های مارن با افزایش تعداد سیکل‌های انجماد-ذوب کاهش یافت که دلیل این رفتار را می‌توان به افزایش فضای موجود بین ذرات خاک بر اثر سیکل‌های انجماد-ذوب و همچنین کاهش سطح تماس بین آن‌ها نسبت داد.

- زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مارن تثبیت نشده و تثبیت شده با کیتوسان برای حالت بدون سیکل تقریباً مشابه هستند و تغییرات چشمگیری را شاهد نبودیم. این بدان معناست که افزودن کیتوسان به خاک بر رفتار اصطکاکی ماتریس خاک تاثیر چندانی ندارد. با این حال، از آنجایی که محلول کیتوسان یک مایع منسجم است و به طور یکنواخت در میان ذرات خاک توزیع می‌شود، افزایش مقاومت برشی ماتریس‌ها به بهبود پیوستگی بین ذرات نسبت داده می‌شود. در نتیجه، مقدار کمی کیتوسان تا حدود زیادی می‌تواند به بهبود انسجام بین ذرات خاک کمک کند.

- لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر به امکان سنجی استفاده از این مواد افزودنی برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک مارن رسی پرداخته شده است. لذا برای انجام مطالعات بیشتر و بررسی مطالعات میدانی در مقیاس‌های بزرگ نیاز است که تمهیدات لازم جهت دستیابی به این مواد در ابعاد بیشتر، به عمل آید.



## مراجع

- Aguilar, R., Nakamatsu, J., Ramírez, E., Elgegren, M., Ayarza, J., Kim, S., Pando, M.A., Ortega-San-Martin, L., 2016. The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction. *Construction and Building Materials* 114, 625-637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.218>
- Aiban, S.A., Wahhab, H.I.A.A., Al-Amoudi, O.S.B., Ahmed, H.R., 1998. Performance of a stabilized marl base: a case study. *Construction and Building Materials* 12(6-7), 329-340. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(98\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(98)00023-3)
- Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S., 2010. Stabilization of a Saudi calcareous marl soil. *Construction and Building Materials* 24(10), 1848-1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019>
- Ghazavi, M., Roustaei, M., 2010. The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 61(2-3), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Hataf, N., Ghadir, P., Ranjbar, N., 2018. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer. *Journal of Cleaner Production* 170, 1493-1500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256>
- Jalali-Milani, S., Asghari-Kalajahi, E., Barzegari, G., Hajjalilue-Bonab, M., 2017. Consolidation deformation of Baghmisheh marls of Tabriz, Iran. *Geomechanics and Engineering* 12, 561-577, <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.4.561>
- Kamari, A., Pulford, I., Hargreaves, J., 2011. Chitosan as a potential amendment to remediate metal contaminated soil—A characterisation study. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 82(1), 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.08.019>
- Kumar, M.N.R., 2000. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers* 46(1), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9)
- Lertsutthiwong, P., Boonpuak, D., Pungrasmi, W., Powtongsook, S., 2013. Immobilization of nitrite oxidizing bacteria using biopolymeric chitosan media. *Journal of Environmental Sciences* 25(2), 262-267. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60059-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60059-X)
- Ogata, N., 1985. Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil. *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*. Yichang, China, 201-207. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302409>
- Ouhadi, V., Yong, R., 2003. The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. *Engineering Geology* 70(3-4), 365-375. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00104-2)
- Qi, J., Zhang, J., Zhu, Y., 2003. Influence of freezing-thawing on soil structure and its soil mechanics significance. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 22(S2), 2690-2694. DOI?
- Salimi, M., Payan, M., Hosseinpour, I., Arabani, M., Ranjbar, P.Z., 2024. Effect of glass fiber (GF) on the mechanical properties and freeze-thaw (FT) durability of lime-nanoclay (NC)-stabilized marl clayey soil. *Construction and Building Materials* 416, 135227. DOI
- Salimi, M., Ghorbani, A., 2020. Mechanical and compressibility characteristics of a soft clay stabilized by slag-based mixtures and geopolymers. *Applied Clay Science* 184, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105390>
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., García, B., Prieto, E., 2011. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. *Applied Clay Science* 51(4), 419-423. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.12.032>
- Shahsavani, S., Vakili, A.H., Mokheri, M., 2021. Effects of freeze-thaw cycles on the characteristics of the expansive soils treated by nanosilica and Electric Arc Furnace (EAF) slag. *Cold Regions Science and Technology* 182, 103216. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103216>
- Shariatmadari, N., Reza, M., Tasuji, A., Ghadir, P., Javadi, A.A., 2020. Experimental study on the effect of chitosan biopolymer on sandy soil stabilization. In *E3S Web of conferences* 195, 06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019506007>
- Sol-Sánchez, M., Castro, J., Ureña, C., Azañón, J., 2016. Stabilisation of clayey and marly soils using industrial wastes: pH and laser granulometry indicators. *Engineering Geology* 200, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.11.008>

- Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., Sridharan, A., 2019. Swell-shrink-consolidation behavior of rubber-reinforced expansive soils. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170313>
- Tian, L., Yu, L., Liu, S., Zhang, B., 2020. Deformation research of silty clay under freeze-thaw cycles. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24, 435-442. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0987-0>
- Vakili, A.H., Narimousa, R., Salimi, M., Farhadi, M.S., Dezh, M., 2019. Effect of freeze-thaw cycles on characteristics of marl soils treated by electroosmosis application. *Cold Regions Science and Technology* 167, 102861. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102861>
- Vakili, A.H., Salimi, M., Lu, Y., Shamsi, M., Nazari, Z., 2022. Strength and post-freeze-thaw behavior of a marl soil modified by lignosulfonate and polypropylene fiber: an environmentally friendly approach. *Construction and Building Materials* 332, 127364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127364>
- Wan, M.W., Petrisor, I.G., Lai, H.T., Kim, D., Yen, T. F., 2004. Copper adsorption through chitosan immobilized on sand to demonstrate the feasibility for in situ soil decontamination. *Carbohydrate Polymers* 55(3), 249-254. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.09.009>
- Wang, D.y., Ma, W., Niu, Y.h., Chang, X., Wen, Z., 2007. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. *Cold Regions Science and Technology* 48(1), 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.008>
- Wang, J., Mignon, A., Trenson, G., Van Vlierberghe, S., Boon, N., De Belie, N., 2018. A chitosan based pH-responsive hydrogel for encapsulation of bacteria for self-sealing concrete. *Cement and Concrete Composites* 93, 309-322. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.007>
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Regions Science and Technology* 48(1), 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.09.009>