



## Investigating and studying the effect of Montmorillonite Nanoclay on consolidation and strength behavior of soft and loose fine-grained soil (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture)

R. Fathi<sup>1</sup>, M. R. Elyasi<sup>1</sup>, J. Khazaie<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

### Review History:

Received: Dec. 15, 2022

Revised: May, 03, 2023

Accepted: Nov. 14, 2023

Available Online: Nov. 29, 2023

### Keywords:

Soil Stabilization

Soft Clay Soil

Nanoclay

Consolidation

Wet-Dry Cycle

**ABSTRACT:** Using innovative and environmentally friendly materials to stabilize problematic soils is one of the challenges facing geotechnical engineers. Nanoclays are highly reactive due to their high specific surface area, low specific gravity, fine particles, and making them an effective and environmentally friendly stabilizer due to their uniformity with soil materials. In this study, the effect of Montmorillonite Nanoclay on the behavioral properties of Kermanshah's loose fine-grained soil was evaluated. For this purpose, after conducting index and identification tests on the base soil, Nanoclay was added to the soil at 0.5, 1, 2, and 4 percent by dry weight of the soil, and Atterberg limits, consolidation, unconfined compressive strength, and California bearing ratio tests were conducted on samples with curing periods 1, 14, 28 and 60 days. Also, the durability of the stabilized samples was investigated by subjecting them to wet-dry cycles, and the effect of nanoclay on the soil's microstructure was evaluated using scanning electron microscopy on both unstabilized and stabilized samples. The results show that the stabilization performance is significantly dependent on the amount of Nanoclay and curing periods. Based on the results, the optimal amount of Nanoclay is 4%, and the presence of this amount of Nanoclay along with increasing curing periods has increased the plastic index, compressive strength, and soil bearing ratio and decreased the coefficient of consolidation, settlement, compression, permeability, and soil swelling. It is noteworthy that the durability of stabilized soil against environmental conditions has also increased.

### 1- Introduction

Nanoparticles typically have dimensions ranging from 1 to 100 nanometers. Due to their high specific surface area and reactivity, they have gained significant attention in recent years as stabilizers [1]. Nanoclays, a subcategory of nanotechnology, comprise small and irregular clay sheets. Since they are uniform and compatible with soil materials, their use does not have negative impacts on the environment, and adding these particles on a nano-scale can lead to changes in the behavior and properties of soils [2].

Numerous studies have been carried out to date regarding the stabilization of soils using nanoclay particles; however, only a limited amount of previous research has examined the impact of nanoclay particles on the long-term behavior of soil and the durability of soil against environmental conditions.

This study aims to examine the effects of montmorillonite nanoclay particles on the short-term and long-term behavior of soft clay soil, also since environmental conditions such as wet-dry cycles, in the long run, are one of the most destructive factors and lead to decrease in the strength of soil or may fail due to the spread of fine cracks in the soil [3]. So the effect of nanoclay on the soil durability under wet-dry cycles has been investigated.

### 2- Methodology

#### 2- 1- Materials

##### 2- 1- 1- Soil and nanoclay

The soil used in this study was taken from the Faculty of Agriculture of Razi University located in the east of Kermanshah from a depth of approximately one meter above the ground. Table 1 presents the characteristics of soil. Based on the index tests performed, this soil is defined as CL and mainly evaluated as fine-grained, soft, and loose.

The nanoclay used in this research is montmorillonite in powder form, a product of the Sigma Aldrich Factory with a purity of 99%.

#### 2- 2- Method

First Montmorillonite nanoclay was mixed with soil at 0.5, 1, 2, and 4 percent by dry weight of the soil. Then based on maximum dry density and optimum moisture, samples were prepared and sealed in a double-layered plastic wrap and kept in a room with the temperature maintained at  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  under various curing times (1, 14, 28, and 60 days). After completion of curing time, Atterberg limits, one-dimensional consolidation, uniaxial compressive strength (UCS), California bearing ratio tests, and wet-dry cycles were

\*Corresponding author's email: J.khazaie@razi.ac.ir



**Table 1. Geotechnical properties of studied soil.**

Characterizes	Value
Optimum Moisture (%)	22.1
Maximum Dry Density (gr/cm <sup>3</sup> )	1.62
Gs	2.67
Liquid Limit (%)	46.64
Plastic Limit (%)	21.23
Plasticity Index (%)	25.41

conducted on samples. To achieve the optimal amount of nanoclay, the samples containing higher amounts of nanoclay (8% of the dry weight of the soil) were also examined in the consolidation and UCS tests. Also, to perform a wet-dry cycle, the cured samples were first immersed in distilled water at room temperature ( $20 \pm 2$  °C) for 5 h. Once removed, the samples were placed in an oven at  $71 \pm 2$  °C for 42 h. Finally, to investigate the effect of nanoclay on the soil's microstructure, scanning electron microscopy (SEM) was performed on unstabilized and stabilized samples.

### 3- Results and Discussion

#### 3- 1- The effect of nanoclay on plasticity properties

With increasing the amount of nanoclay from 0 to 4% of soil dry weight and curing time from 1 to 60 days, the liquid limit, plastic limit, and plasticity index increased. This increase is due to the high specific surface of nanoclay, which increases the water absorption of stabilized samples and consequently raises the Atterberg limits of stabilized samples.

#### 3- 2- The effect of nanoclay on consolidation

Based on the results, with the presence of nanoclay up to 4% of weight, and with increased curing times, the compression index, consolidation coefficient, settlement, permeability, and soil swelling index decreased. By adding 4% nanoclay and a curing period of 60 days the compression index, consolidation coefficient, settlement, permeability, and swelling decreased by 58%, 59%, 55%, 69%, and 62% respectively compared to the base soil, and the sample became overconsolidated up to 0.6 kg/cm<sup>2</sup> compared to base soil which is normally consolidated. It is noteworthy that the reaction speed of nanoclay with soil was very high in the initial 14 days. It can be said that the presence of nanoclay particles in the soil increases the contact surface between soil particles so that a part of the existing voids between soil particles are filled, resulting in decreased soil settlement against applied loads. Also, the reduction in permeability is due to the decrease in voids between soil particles.

Furthermore, the reduction of soil swelling is attributed to the high water absorption of montmorillonite nanoclay particles, which absorb most of the water in the sample. On the other hand, when nanoclay was increased to 8% by weight, the compression index, consolidation coefficient, settlement, permeability, and soil swelling index increased. This is because, in this case, the sample's behavior is influenced more by the nanoclay particles.

#### 3- 3- The effect of nanoclay on UCS

According to the results with increasing the curing periods and amount of the nanoclay, the compressive strength of samples increased and the peak of the UCS of stabilized soils occurred at a lower strain compared to the unstabilized soil. The most compressive strength was obtained in the presence of 8% nanoclay after a curing period of 60 days which compressive strength increased by 750% and the strain values decreased by 36% compared to the base soil. However, it should be noted that the presence of nanoclay at 8% by weight had no significant effect on the compressive strength of the soil compared to 4% by weight. So optimum amount of nanoclay for the soil being studied based on consolidation and UCS test results is 4%.

#### 3- 4- The effect of nanoclay on CBR

The addition of an optimal amount of nanoclay increases the bearing ratio of the soil. With the increase in curing periods, this parameter has shown an upward trend. For instance, after the 60-day curing period, the CBR value of the stabilized sample with 4% nanoclay reached 16.3%, whereas the CBR of the base soil was 3.5%. This increase in the bearing ratio over time is due to the improvement of nanoclay cementation reactions.

#### 3- 5- The effect of wet-dry cycles on stabilized samples

Generally, the samples with longer curing periods and higher amounts of nanoclay additives, up to 4%, demonstrated greater durability and experienced less weight loss during the wet and dry cycles. This is due to the cementation reactions of nanoclay with soil. The unstabilized sample had the lowest durability during these cycles, completely failing in the first wet cycle as a result of water absorption and the dominance of the soil particles' swelling forces over the van der Waals force between the particles. Conversely, the highest durability against wet and dry cycles was observed in samples stabilized with 2% and 4% of nanoclay at the curing periods of 14, 28, and 60 days. These samples withstood 2 wet-dry cycles and then failed during the third cycle.

#### 3- 6- The effect of nanoclay on soil's microstructure

The SEM analysis showed that the stabilized soil with the optimum percentage nanoclay at 60 days curing period had a more homogeneous structure and more uniform surface than the unstabilized sample. Also, nanoclay causes larger pores to be filled and converted into smaller pores.

### 4- Conclusion

Laboratory tests conducted in this study showed

considerable improvement in the soil engineering properties containing montmorillonite nanoclay particles. The main results obtained in this study are as follows:

-By adding nanoclay up to 4% to soil and with curing periods from 1 to 60, the water absorption, and plasticity properties of soil were increased because of the high specific surface of nanoclay. Also compression index, consolidation coefficient, settlement, permeability, and swelling decreased by 58%, 59%, 55%, 69%, and 62% respectively compared to the base soil. But, when nanoclay was increased to 8% by weight, the sample's behavior was influenced more by the nanoclay particles, and consolidation parameters were increased.

-The compressive strength of samples increased and the peak of the UCS of stabilized soils occurred at a lower strain compared to the unstabilized soil with increasing the curing periods and amount of the nanoclay. The presence of nanoclay at 8% by weight had no significant effect on the compressive strength of the soil compared to 4% by weight. So the optimum amount of nanoclay for the soil being studied based on consolidation and UCS test results is 4%.

-The CBR value of the stabilized sample with the optimum amount of nanoclay after the 60-day curing period reached 16.3%, whereas the CBR of the base soil was 3.5%.

-With the presence of nanoclay up to 4% of weight, and

with increased curing times, the soil durability under wet-dry cycles has been increased. The highest durability against wet and dry cycles was observed in samples stabilized with 2% and 4% nanoclay at the curing periods of 14, 28, and 60 days. These samples withstood 2 wet-dry cycles and then failed during the third cycle.

-Based on SEM analysis stabilized sample had a more homogeneous structure, less porosity, and a more uniform surface than the unstabilized sample.

## References

- [1] A. Kalhor., M. Ghazavi., M. Roustaei., and M. Mirhosseini., 2019. "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles". *Cold Regions Science and Technology*, 161.
- [2] M.R. Taha., 2009. "Geotechnical Properties of Soil-Ball Milled Soil Mixtures", in: *Nanotechnology in Construction 3*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 377-382.
- [3] H.R. Akbari., H. Sharafi., and A.R. Goodarzi., 2021 "Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles". *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6), pp. 1470-1482.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

R. Fathi, M. R. Elyasi, J. Khazaei, *Investigating and studying the effect of Montmorillonite Nanoclay on consolidation and strength behavior of soft and loose fine-grained soil (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(12) (2024) 511-514.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22016.7880](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22016.7880)







## بررسی و مطالعه اثر نانورس مونت موریلونیت بر رفتار تحکیمی و مقاومتی خاک ریزدانه سست و نرم (مطالعه موردی: خاک ریزدانه دانشکده کشاورزی کرمانشاه)

رضا فتحی<sup>۱</sup>، محمدرضا الیاسی<sup>۱</sup>، جهانگیر خزایی<sup>۲\*</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران  
۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۴  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸

### کلمات کلیدی:

تثبیت خاک  
خاک رس نرم  
نانورس  
تحکیم  
سیکل تر و خشک

**خلاصه:** استفاده از مصالح نوین و سازگار با محیط زیست در جهت تثبیت خاک‌های مسئله دار یکی از چالش‌های پیش روی مهندسان ژئوتکنیک می باشد. نانورسها به دلیل سطح مخصوص بالا، وزن مخصوص پایین و ریز بودن ذرات واکنش پذیری بالایی داشته و همچنین به دلیل یکسان بودن جنس آنها با مصالح خاکی به عنوان یک تثبیت کننده موثر و سازگار با محیط زیست در نظر گرفته می شوند. در پژوهش حاضر اثر نانورس مونت موریلونیت بر خصوصیات رفتاری خاک ریزدانه سست کرمانشاه ارزیابی شده است. به این منظور پس از انجام آزمایشهای شاخص روی خاک پایه، نانورس به میزان ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزن خشک خاک به خاک افزوده شده و آزمایشهای حدود اتیربرگ، تحکیم، مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالفرنیا در دوره‌های عمل آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه صورت پذیرفته است. همچنین پایداری نمونه های تثبیت شده با اعمال سیکلهای تر و خشک بررسی شده و به منظور بررسی اثر نانورس بر ریز ساختار خاک نیز از نمونه های تثبیت نشده و تثبیت شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری گردیده است. نتایج نشان می دهد که عملکرد تثبیت به میزان قابل توجهی به مقدار نانورس و دوره های عمل آوری وابسته است. مطابق نتایج، میزان بهینه نانورس ۰/۴٪ می باشد و حضور این میزان نانورس و افزایش دوره های عمل آوری سبب افزایش شاخص خمیری، مقاومت فشاری، نسبت باربری خاک و کاهش ضرایب تحکیم، نشست، فشردگی، نفوذپذیری و تورم خاک گردیده است. قابل ذکر است که پایداری خاک تثبیت شده در برابر شرایط محیطی نیز افزایش یافت.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد جمعیت و گسترش ساخت و سازها در جهت رفع نیازهای بشر، ساخت و ساز در اغلب موارد بر روی بسترهای نامناسب به امری غیر قابل اجتناب تبدیل شده است از طرفی وجود خاک‌های ریزدانه سست نظیر رس‌های نرم در بستر پروژه‌ها به دلیل نشست پذیری زیاد، مقاومت و نسبت باربری کم عموماً بر سازه‌های احداث شده اثر نامطلوب می‌گذارد. به همین دلیل کمبود توانایی‌های فنی خاک یکی از مسائل مهم در زمینه‌های ژئوتکنیک و راه‌سازی می‌باشد. در صورت برخورد با این نوع خاک‌های مسئله‌دار<sup>۱</sup>، جابجائی محل پروژه یا تعویض خاک محل در دستور کار قرار می‌گیرد. هرگاه بنا به عللی امکان تغییر محل اجرای پروژه و یا تعویض خاک نباشد، با استفاده از بهسازی و تثبیت<sup>۲</sup> می‌توان خصوصیات

مکانیکی خاک را بهبود بخشید.

از روش‌های تثبیت خاک می‌توان به تثبیت شیمیایی<sup>۳</sup> اشاره نمود که در این روش با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی امکان اصلاح خصوصیات رفتاری خاک‌ها فراهم می‌گردد. آهک و سیمان از مصالح ابتدایی در جهت تثبیت خاک می‌باشند. استفاده از این مصالح سبب بروز معایبی همچون انتشار گاز کربن دی اکسید و کاهش پایداری<sup>۴</sup> خاک (در برابر سیکل‌های تر و خشک<sup>۵</sup>) می‌گردد [۱، ۲]. به همین دلیل پژوهشگران امروزه با استفاده از مصالح نوین و سازگار با محیط زیست سعی در بهبود رفتار خاک دارند به نحوی که نسبت به گذشته به بیشترین میزان بازدهی دست یابند. با پیشرفت در تکنولوژی، نانوذرات در حوزه‌های مختلفی از جمله تثبیت استفاده می‌شوند. نانوذرات دارای اندازه‌هایی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشند و به دلیل سطح مخصوص بالا و واکنش پذیری بالایی که دارند در سال‌های اخیر مورد

- 1 Problematic Soils
- 2 Improvement and Stabilization

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.khazaie@razi.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





توجه بسیاری قرار گرفته‌اند [۳]. نانورس‌ها یکی از زیرشاخه‌های فناوری نانو می‌باشند که شامل صفحات کوچک و نامنظم رسی هستند و به دلیل یکسان بودن جنس آن‌ها با مصالح خاکی، استفاده از این ذرات تاثیر مخربی بر محیط زیست ندارد و افزودن این ذرات در مقیاس نانو می‌تواند موجب تغییراتی در رفتار و خصوصیات خاک‌ها گردد [۴].

به طور کلی در شاخه ژئوتکنیک به دو صورت از فناوری نانو استفاده می‌شود. در روش اول ساختار خاک در مقیاس نانومتر مطالعه می‌گردد و در نتیجه درک بهتری از طبیعت خاک در مقایسه با نانو ساختارهای متفاوت حاصل می‌شود و در روش دوم تاثیر افزودن نانوذرات به عنوان یک عامل خارجی در خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد که این پژوهش در دسته دوم قرار دارد [۵].

بهاری و همکاران (۲۰۱۳) نانورس را جهت تثبیت دو نوع خاک سیلت با حد روانی کم و سیلت با حد روانی زیاد برگزیدند. آن‌ها با افزودن نانورس تا میزان ۲٪ وزن خشک خاک و انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و برش مستقیم دریافتند حضور این افزودنی سبب افزایش حد روانی، حد خمیری، مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر دو نوع خاک شده است [۶]. خالد<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، با افزودن نانورس به نوعی خاک ماسه رسی دریافتند که افزودن ۳٪ نانورس سبب افزایش حد روانی، حد خمیری، مقاومت فشاری و تنش موثر خاک می‌گردد [۷]. در مطالعه‌ای در سال (۲۰۱۶)، به بررسی اثر افزودنی نانورس تا میزان ۳٪ وزنی بر میزان پتانسیل تورمی و مقاومتی نوعی خاک رس منبسط شونده پرداخته شد. نتایج آزمایش نشان داد که با افزودن ۶٪ نانورس مقاومت فشاری تک محوری خاک تا میزان ۴۵٪ افزایش می‌یابد و در مقادیر بالاتر میزان تاثیرگذاری افزودنی به مراتب کاهش یافته است. همینطور افزودن نانورس تا ۳٪ وزنی می‌تواند موجب کاهش تورم خاک رس منبسط شونده گردد [۸]. ابیسا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، با بررسی تاثیر نانورس بر پارامترهای مقاومتی نوعی خاک رسی به این نتیجه رسیدند که حضور نانورس تا میزان ۳٪ وزنی سبب افزایش مقاومت برشی، مقاومت فشاری و نسبت باربری خاک می‌گردد [۹]. اونیلا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، نشان دادند افزودن نانورس به نوعی خاک لاتریتی در جهت استفاده به عنوان زیراساس در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌تواند سبب کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و افزایش مقدار

- 1 NanoClays
- 2 Khalid
- 3 Abisha
- 4 Onyelowo

رطوبت بهینه خاک گردد. همچنین افزودن نانورس موجب کاهش شاخص خمیری خاک و افزایش نسبت باربری خاک می‌گردد [۱۰]. بدو و حسین‌زاده (۲۰۱۸)، تاثیر افزودن نانورس را بر خاک رسی نازلو و ماسه‌ی فیروزکوه به منظور استفاده در آستر رسی بررسی نمودند و نشان دادند که نانورس تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود خصوصیات تراکمی ماسه‌ی فیروزکوه ایجاد نمی‌کند اما موجب کاهش ۱۰۰ درصدی ضریب نفوذپذیری این نوع خاک می‌شود. همچنین افزودن نانورس تا ۴٪ وزنی به خاک رسی نازلو موجب افزایش حد روانی، حد خمیری به میزان جزئی، شاخص خمیری، رطوبت بهینه خاک و کاهش نسبی حداکثر وزن مخصوص خشک و نفوذپذیری گردیده است [۱۱]. باقرزاده خلخالی و همکاران (۲۰۱۹)، با بهره‌گیری از نانورس تا ۲٪ وزنی به تثبیت یک نوع خاک رس و دو نوع خاک سیلت با حد روانی کم پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن نانورس سبب کاهش رطوبت بهینه هر سه نوع خاک و افزایش وزن مخصوص خشک خاک رس می‌گردد همچنین شاخص خمیری هر سه نوع خاک نیز افزایش می‌یابد. همینطور با افزودن نانورس، زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های رسی و سیلتی کاهش یافته ولی چسبندگی و مقاومت فشاری هر سه نوع خاک افزایش یافته است [۱۲]. شهیدی و همکاران (۲۰۱۹)، دریافتند که حضور نانورس به میزان ۱٪ وزنی موجب افزایش حد روانی و حد خمیری و احیاء خواص پلاستیسیته خاک الوده به گازوئیل می‌گردد و تثبیت این نوع خاک با نانورس سبب افزایش مقاومت خاک در برابر سیکل‌های ذوب-یخبندان می‌شود [۱۳].

زمانیان و قهرمانی (۲۰۲۰)، نشان دادند که عملکرد تثبیت خاک با نانورس به طور قابل توجهی به مقدار ماده افزودنی و نیز مدت زمان عمل‌آوری وابسته است و در مقایسه با سیمان، فرآیند تثبیت با نانورس نسبتاً سریع می‌باشد [۱۴]. کارومانچی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، نوعی خاک رسی را با مقادیر مختلف نانورس ترکیب کرده و تحت بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزودن نانورس تا ۱۵٪ سبب افزایش چگالی ویژه و کاهش شاخص خمیری خاک گردیده و با افزایش نانورس به بیش از ۱۵٪ چگالی ویژه کاهش و شاخص خمیری افزایش می‌یابد در نتیجه ۱۵٪ نانورس به عنوان میزان بهینه افزودنی در نظر گرفته شد. در ادامه نتایج آزمایش تحکیم و مقاومت فشاری تک محوری در دوره‌های عمل‌آوری ۱ تا ۱۸ روزه نشان داد که افزودن نانورس به میزان بهینه و گذشت زمان موجب افزایش مقاومت فشاری تک محوری و کاهش نشست خاک می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش نفوذپذیری نشان داد که میزان نفوذپذیری خاک با افزودن میزان بهینه نانورس و گذشت

با افزودن نانورس و نانوسیلیکا به نوعی خاک سیلتی-رسی نشان دادند که حضور افزودنی‌های نانورس و نانوسیلیکا سبب کاهش نشست و افزایش قابل توجه پارامترهای مقاومتی خاک می‌گردد به طوری که افزودن ۱٪ نانوسیلیکا و ۲/۵٪ نانورس به ترتیب موجب افزایش ۶۲۰ و ۱۳۴ درصدی ظرفیت باربری شده است. همچنین افزودن نانورس سبب افزایش شاخص خمیری و افزودن نانوسیلیکا موجب کاهش شاخص خمیری خاک گردیده است این تفاوت در افزایش و کاهش شاخص خمیری ناشی از تاثیر بسیار جزئی نانورس بر افزایش حد خمیری خاک گزارش شده است [۲۲]. جیانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، با انجام دادن آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و آزمایش کششی دو نیم کردن<sup>۳</sup> بر روی خاک آهکی تثبیت شده با نانورس نشان دادند که حضور نانورس تا ۶٪ وزن خشک خاک سبب افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم کردن خاک آهکی می‌گردد. به گونه‌ای که افزودن نانورس می‌تواند تخلخل‌های خاک آهکی را پر نموده و از طرفی واکنش‌های پوزولانی آهک موجود در خاک را گسترش دهد [۲۳].

سیکل تر و خشک بیانگر شرایط محیطی مانند سیل که منجر به اشباع و خشک شدن مکرر خاک می‌گردد، می‌باشد. سیکل تر و خشک از مهمترین و قدرتمندترین عامل هوازدگی از نوع فیزیکی است که خواص فیزیکی و مکانیکی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد و باعث کاهش دوام و پایداری خاک می‌شود [۲۴]. به طور کلی پایداری خاک، به میزان مقاومت و حفظ استحکام کافی خاک در برابر شرایط آب و هوایی مانند سیکل‌های تر و خشک در طولانی مدت گفته می‌شود. در طول سیکل‌های تر و خشک، مقاومت خاک تثبیت شده ممکن است کاهش یابد یا به دلیل گسترش ترک‌های ریز در خاک تثبیت شده از بین برود [۱]. تر و خشک شدن، فشار ناشی از حبس هوا و آماس ناهمگن توده خاک هنگام خیس شدن، سبب شکسته شدن توده خاک به دانه‌های ریزتر می‌شود [۲۵]. همچنین مرطوب شدن خاک موجب سست شدن پیوندهای بین ذرات به ویژه پیوندهای ناپایدار می‌گردد، به گونه‌ای که پیوندهای واندروالس در اثر آگیری بین ذرات، به شدت کاهش می‌یابد [۲۶].

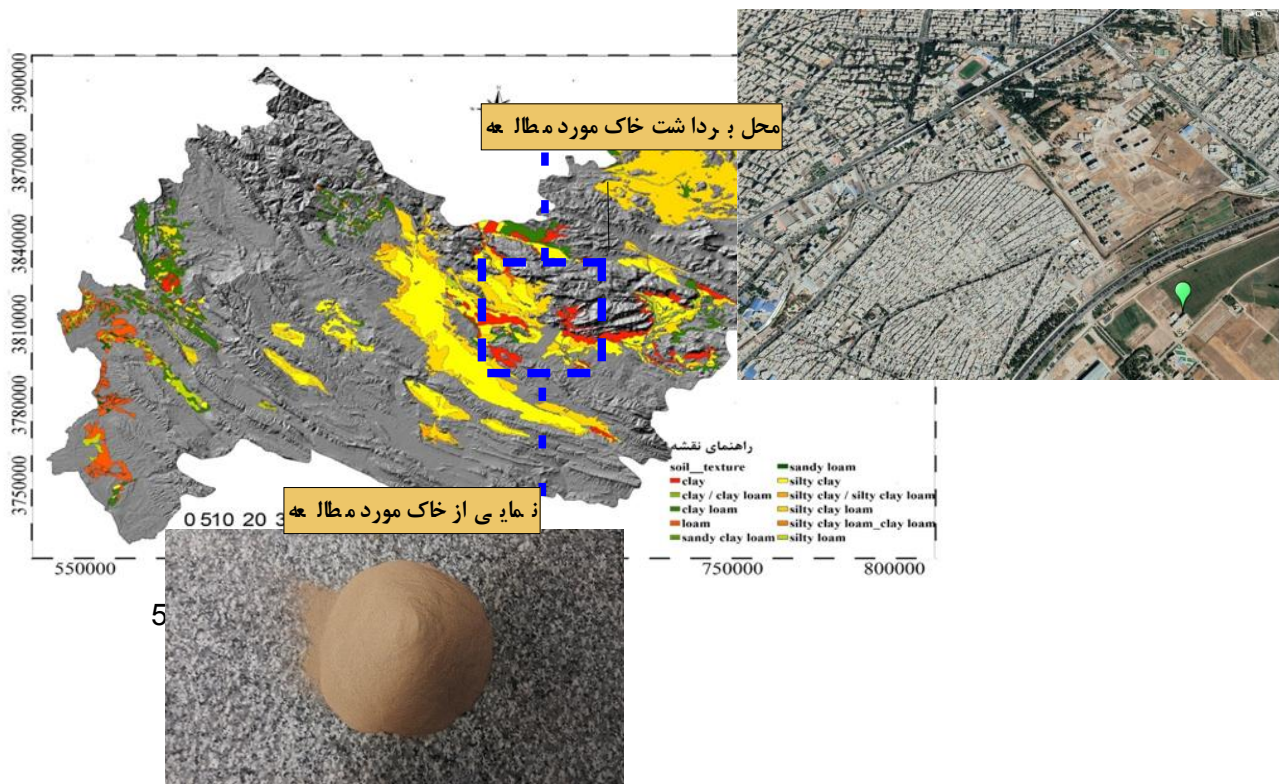
اکبری و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهش خود با افزودن آهک، نانوزئولیت و الیاف پلی پروپیلن در مقادیر مختلف، تاثیر این افزودنی‌ها را بر مقاومت فشاری نوعی خاک کائولینیت، و پایداری خاک در برابر شرایط محیطی بررسی نمودند. آن‌ها با اعمال سیکل‌های تر و خشک متوالی دریافتند که اعمال این سیکل‌ها بر روی نمونه‌های تثبیت نشده بسیار مخرب است اما

زمان کاهش یافته است [۱۵]. قاسمی‌پناه و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تاثیر نانورس در مقادیر مختلف بر مقاومت فشاری و خصوصیات خمیری خاک رس کرمان پرداختند. همچنین تاثیر دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزودن نانورس سبب افزایش مقاومت فشاری، حد روانی و حد خمیری خاک گردیده است. همچنین دوره‌های عمل‌آوری تاثیر مناسبی بر مقاومت فشاری خاک داشته است [۱۶]. کارکوش<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با افزودن نانورس به دو نوع خاک گچی نشان دادند که چگالی ویژه، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد و نفوذپذیری و نشست کاهش می‌یابد. به نحوی که با افزودن ۴٪ وزنی نانورس نفوذپذیری دو نوع خاک به ترتیب ۶۷٪ و ۶۴٪ کاهش یافته است همچنین با افزایش نانورس به ۴٪ وزنی و گذشت زمان تاثیر مثبتی بر میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مشاهده می‌گردد [۱۷]. صدیقی و روشن‌ضمیر (۲۰۲۰)، به بررسی تاثیر نانورس بر خاک آلوده به نفت خام پرداختند. مقادیر افزودنی نانورس تا ۳٪ وزنی بوده و نمونه‌ها در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ روزه تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. نتایج نشان داد میزان بهینه نانورس ۲/۲۵٪ می‌باشد که به ترتیب موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به مقدار ۱/۲ و ۱/۷ برابر می‌شود [۱۸]. مظاهری (۲۰۲۱) در پژوهش خود به این نتیجه رسید که حضور نانورس و دوره‌های عمل‌آوری موجب ترمیم ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های رسی می‌گردد [۱۹]. در مطالعه‌ای در سال (۲۰۲۱)، کامگر و همکاران خاک برداشت شده از منطقه شاهرضا اصفهان را با نانورس تا ۲۵ درصد وزن خشک خاک ترکیب نموده سپس تحت آزمایش‌های چگالی ویژه، مقاومت فشاری تک محوری و برش مستقیم قرار دادند. نتایج نشان داد که نانورس سبب کاهش چگالی ویژه و افزایش مقاومت فشاری و برشی خاک می‌گردد اما با افزایش میزان نانورس به بیش از ۱۵٪، تاثیر افزودنی نانورس بر مقاومت فشاری خاک کاهش می‌یابد [۲۰]. حسینی و همکاران (۲۰۲۱) با افزودن نانورس تا مقدار ۴٪ وزن خشک خاک به نوعی خاک ماسه‌ای خالص و چهار نوع خاک ماسه رس‌دار نشان دادند که حضور نانورس در خاک ماسه‌ای خالص اثر معکوس بر رفتار خاک دارد اما در حضور رس پارامترهای رفتاری خاک بهبود می‌یابد در نتیجه بهترین ترکیب را ۸۰ درصد ماسه + ۲۰ درصد رس و ۴ درصد نانورس معرفی کردند که این میزان نانورس سبب افزایش شاخص خمیری و مقاومت برشی این نوع خاک می‌شود [۲۱]. در مطالعه‌ای (۲۰۲۲)، قره و همکاران

2 Jiang

3 Splitting Tensile Strength

1 Karkush



شکل ۱. محل برداشت خاک مورد مطالعه

Fig. 1. The location of the studied soil sampling

## ۲- مواد و روش کار

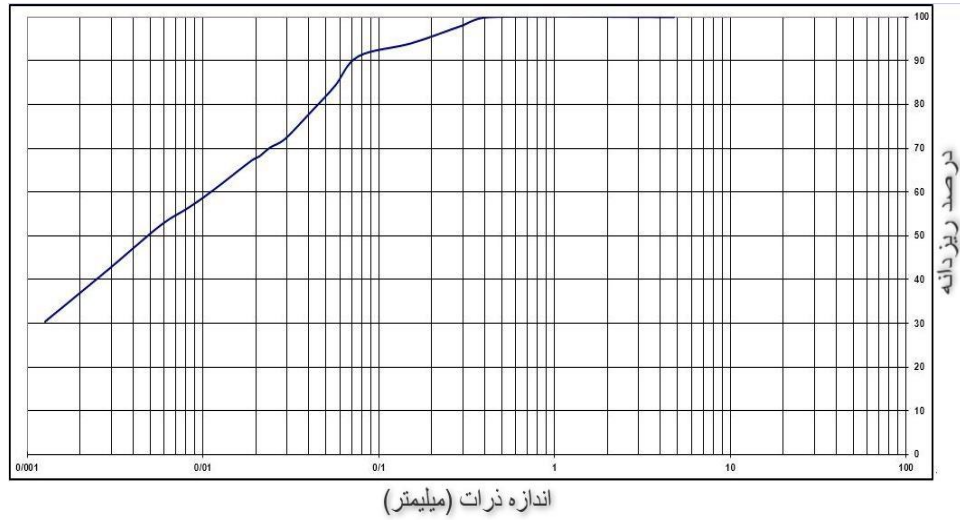
### ۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش، از دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی واقع در قسمت شرقی شهر کرمانشاه از عمق تقریبی یک متری برداشت گردیده است. محل برداشت خاک مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس به منظور تعیین مشخصات فیزیکی آن، آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری (ASTM D 422)، چگالی ویژه (ASTM D 854)، تراکم (ASTM D 698)، حدود ات‌برگ (ASTM D 4318)، مقاومت فشاری تک محوری (ASTM D 2166) انجام گردید [۲۷-۳۱]. نتایج مربوط به آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی خاک در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق آزمایش‌های انجام شده خاک مورد بررسی از نوع ریزدانه نرم و سست ارزیابی گردیده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک مورد بررسی از نوع رس با حد روانی کم (CL) می‌باشد.

حضور ۴۰٪ نانوزئولیت از وزن خشک آهک و ۱٪ وزنی الیاف پلی پروپیلن سبب افزایش ۴۰ درصدی مقاومت فشاری و بهبود ۲۱ درصدی پایداری خاک در برابر شرایط محیطی می‌گردد [۱].

به طور کلی نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از نانورس‌ها می‌تواند موجب بهبود رفتار خاک‌ها گردد به نحوی که حضور این نانوذرات می‌تواند سبب افزایش مقاومت فشاری، چسبندگی، مقاومت برشی و نسبت باربری خاک گردد و رفتار تحکیمی خاک را بهبود بخشد. در پژوهش‌های صورت گرفته معمولاً رفتار کوتاه مدت خاک تثبیت شده مورد بررسی گردیده است بر همین اساس در پژوهش حاضر علاوه بر رفتار کوتاه مدت خاک، رفتار دراز مدت خاک یعنی دوره‌ی عمل‌آوری ۶۰ روزه نیز بررسی شده است. همچنین با توجه به اینکه چرخه‌های تر و خشک بر اثر شرایط محیطی یکی از علل اصلی رفتار نامناسب خاک‌ها می‌باشد، اثر نانورس بر پایداری خاک رس نرم تحت سیکل‌های تر و خشک نیز بررسی شده است.





شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

Fig. 2. Particle size distributions of the studied soil

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه

Table 1. Geotechnical properties of the studied soil

مقدار	پارامتر
۲۲/۱	درصد رطوبت (%)
۱/۶۲	حداکثر وزن مخصوص خشک خاک ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
۲/۶۷	چگالی ویژه (Gs)
۱/۲۰	مقاومت فشاری تک محوری ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
۴۶/۶۴	حد روانی (%)
۲۱/۲۳	حد خمیری (%)
۲۵/۴۱	شاخص خمیری (%)
CL	نوع خاک



شکل ۳. نمایی از نانورس مونت موریلونیت مورد استفاده

Fig. 3. A view of the montmorillonite Nanoclay used

تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا بررسی گردید. به منظور دستیابی به مقدار بهینه نانورس، نمونه های حاوی مقادیر بالاتر نانورس (۸ درصد وزن خشک خاک) نیز در آزمون تحکیم و مقاومت فشاری تک محوری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تاثیر نانورس بر پایداری خاک با استفاده از سیکل های تر و خشک بررسی شده و جهت بررسی تاثیر نانورس بر ریزساختار خاک عکسبرداری میکروسکوپی الکترونی روبشی<sup>۳</sup> SEM از نمونه های تثبیت نشده و تثبیت شده انجام گردیدند. قابل ذکر است که تمامی آزمایش های صورت گرفته بر اساس استانداردهای ASTM<sup>۴</sup> می باشد. برای درک و نمایش بهتر در شکل ۴ مراحل و روش انجام پژوهش به نمایش گذاشته شده است.

روش اختلاط مصالح، از جمله مسائلی می باشد که توجه به آن امری ضروریست، زیرا در صورت عدم اختلاط مناسب، ممکن است که مصالح مورد بررسی رفتار واقعی و مناسبی نداشته باشند و در نتیجه موجب ایجاد

#### ۲-۲- نانورس

نانورس مورد استفاده در این پژوهش از نوع مونت موریلونیت<sup>۱</sup> به صورت پودری و محصول کارخانه سیگما آلدریک<sup>۲</sup> با خلوص بالای ۹۹٪ می باشد. در شکل ۳ نمایی از نانورس مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین جدول ۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی و جدول ۳ آنالیز شیمیایی نانورس مورد استفاده را نشان می دهد.

#### ۲-۳- مطالعات آزمایشگاهی

یکی از روش های تعیین خصوصیات خاک و پیش بینی رفتار آن در شرایط مختلف، مطالعات آزمایشگاهی می باشد. در این پژوهش تاثیر افزودن نانورس مونت موریلونیت در مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزن خشک خاک پس از عمل آوری در دوره های ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه بر خاک مورد مطالعه با استفاده از آزمایش های حدود اتربرگ، تحکیم یک بعدی، مقاومت فشاری

3 Scanning Electron Microscopy

4 American Society of Testing Materials

1 Montmorillonite

2 Sigma Aldrich

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانورس

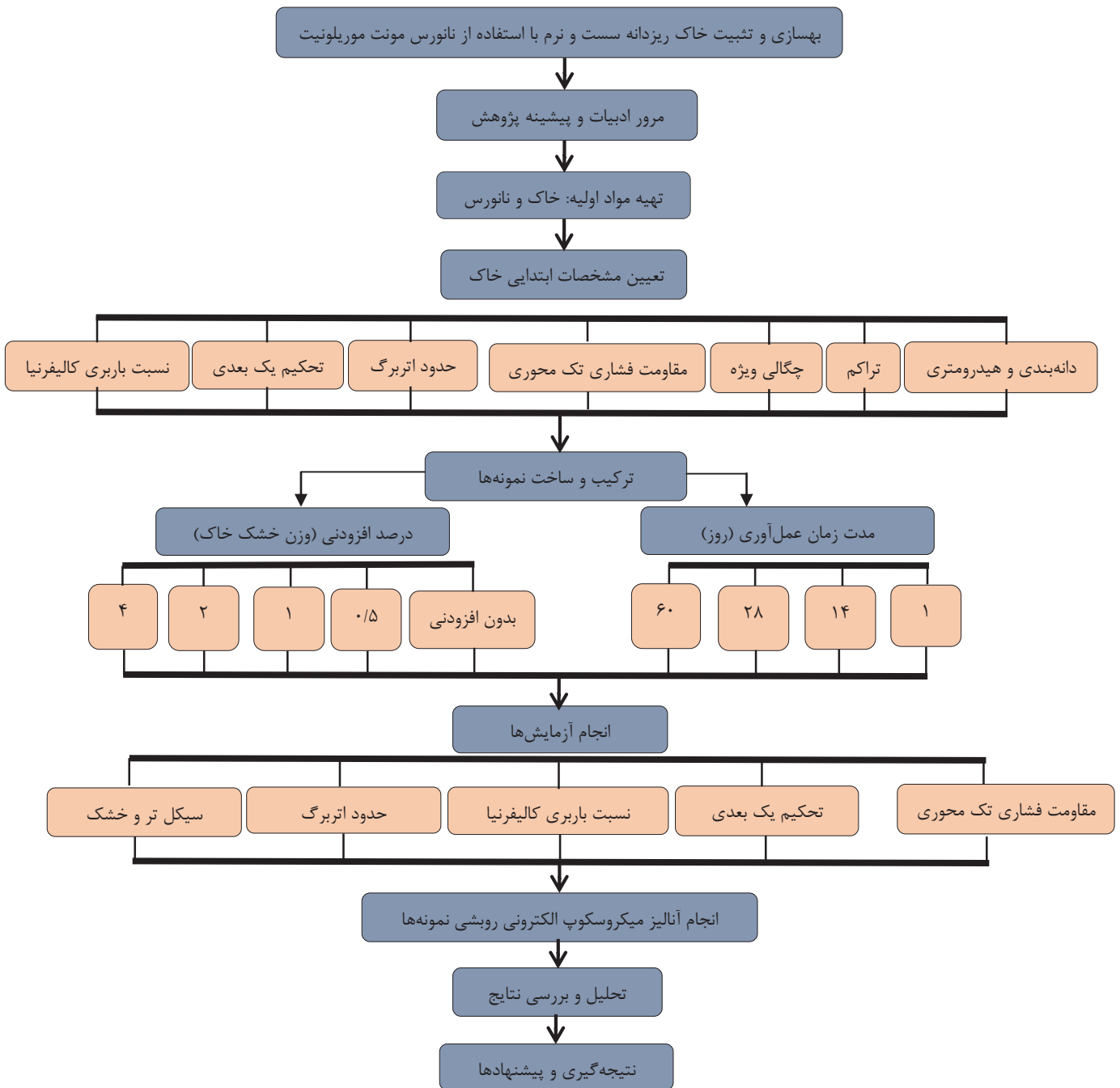
Table 2. Physical and mechanical properties of Nanoclay

پارامتر	مقدار
نوع کانی	مونت موریلونیت
چگالی	$0.7 - 0.5 \text{ gr/cm}^3$
اندازه ذرات	۱-۲ Nm
مساحت سطح ویژه	$220 - 270 \text{ (m}^2/\text{gr)}$
مقدار هدایت الکتریکی	-۲۵ MV
ضریب تبادل یونی	۴۸ (meg/100gr)
فاصله خالی بین ذرات	$60 \text{ \AA}^0$
رنگ	زرد روشن
رطوبت	۱-۲ %

جدول ۳. آنالیز شیمیایی نانورس مونت موریلونیت

Table 3. Chemical analysis of montmorillonite Nanoclay

ترکیب	Na <sub>2</sub> O	Mgo	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Cao	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
درصد وزنی	۰/۹۸	۳/۲۹	۱۹/۶۰	۵۰/۹۵	۰/۸۶	۱/۹۷	۰/۶۲	۵/۶۲	۱۵/۴۵



شکل ۴. روش تثبیت خاک ریزدانه سست و نرم با استفاده از نانورس

Fig. 4. The process of soft and loose fine-grained soil stabilization with Nanoclay



شکل ۵. نمونه های ساخته شده تحت عمل آوری جهت آزمایش حدود اتربرگ

Fig. 5. Prepared samples under curing for Atterberg limit test

از دست دادن رطوبت در دوره های عمل آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه مطابق شکل ۵ در داخل چند لایه کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در دمای اتاق  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد به دور از تابش مستقیم نور خورشید نگهداری گردیدند.

#### ۲-۳-۲- تحکیم یک بعدی

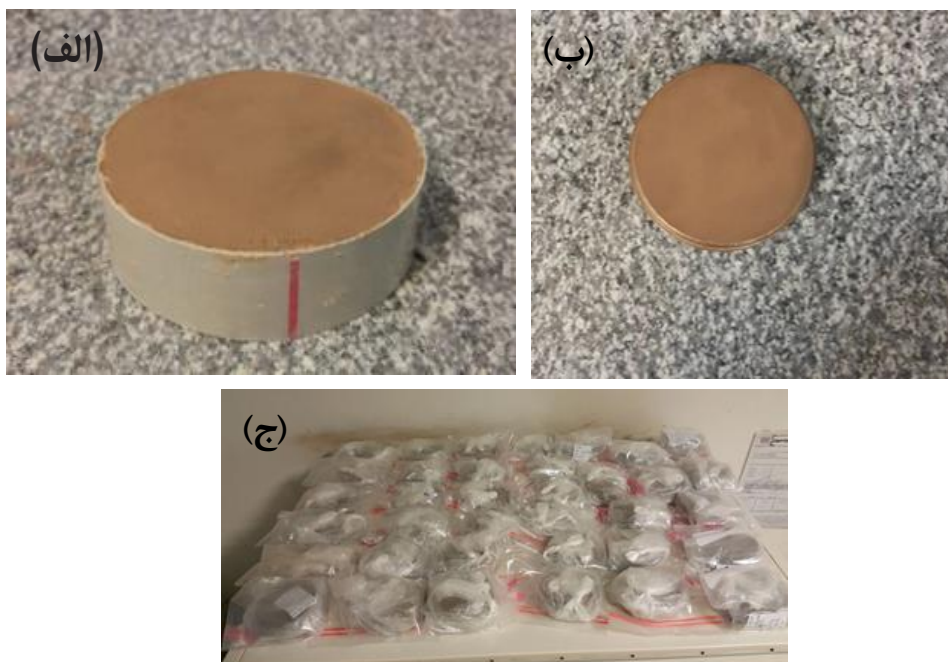
جهت ساخت نمونه های تحکیم، ابتدا خاک برداشت شده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان ۲۴ ساعت داخل گرمخانه قرار داده شد تا کاملاً خشک گردد. سپس خاک خشک شده بر اساس حداکثر وزن مخصوص خشک خاک به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد با نانورس در مقادیر ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد وزنی مخلوط شده و در ادامه با رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم مخلوط گردیدند. پس از ترکیب، مخلوط به دست آمده در قالب های تهیه شده از لوله پلیکا با ابعاد (قطر ۷/۸ و ارتفاع ۲/۵ سانتی متر) مطابق شکل ۶ (الف) در سه لایه به ضخامت یکسان متراکم گردیدند. جهت پیوستگی بیشتر لایه های خاک، پس از تراکم هر

خطا و اشتباه در نتایج به دست آمده گردند. در این پژوهش عمل اختلاط تمامی نمونه ها به صورت دستی با استفاده از کاردک بر روی یک سینی آهنی یک دست و تمیز انجام گردید مدت زمان اختلاط نمونه با افزودنی نانورس حداقل ۱۲ دقیقه بوده و برای اختلاط همگن نمونه ها با ماده افزودنی، در ابتدا مصالح خاک و ماده افزودنی به صورت خشک با هم مخلوط شدند سپس به این مخلوط رطوبت مورد نظر اضافه و ترکیب گردید در نهایت مخلوط به دست آمده به صورت چشمی کنترل گردید تا کاملاً یکنواخت باشد. در ادامه نحوه آماده سازی نمونه های هر آزمایش بیان می گردد.

#### ۲-۳-۱- حدود اتربرگ

جهت ساخت نمونه های حدود اتربرگ، ابتدا خاک برداشت شده در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد در مدت زمان ۲۴ ساعت در داخل گرمخانه قرار داده شد تا کاملاً خشک گردد. سپس خاک خشک شده با افزودنی نانورس در مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی مخلوط شد سپس مقداری آب به مخلوط به دست آمده اضافه گردید. در ادامه نمونه های ساخته شده جهت جلوگیری





شکل ۶. تصاویری از (الف) نمونه ساخته شده درون قالب (ب) قرارگیری نمونه در داخل رینگ تحکیم (ج) نمونه های ساخته شده تحت عمل آوری جهت آزمایش تحکیم یک بعدی

Fig. 6. Pictures of a) Prepared samples in the mold b) Placing the sample in consolidation ring c) Prepared samples under curing for 1D consolidation test

۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد وزنی مخلوط شده و در ادامه با رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم مخلوط گردیدند سپس مخلوط به دست آمده در قالب های استوانه ای شکل، به قطر ۵/۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۱ سانتی متر در پنج لایه با ضخامت یکسان تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر تراکم گردید. در نهایت نمونه های ساخته شده جهت جلوگیری از دست دادن رطوبت در دوره های عمل آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه در داخل چند لایه کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در دمای اتاق  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد به دور از تابش مستقیم نور خورشید نگهداری گردیدند.

#### ۲-۳-۴- نسبت باربری کالیفرنیا

در این پژوهش آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا به صورت خشک انجام شد و تاثیر افزودن میزان بهینه افزودنی نانورس بر نسبت باربری کالیفرنیا خاک رس نرم بررسی گردید. روش ساخت نمونه مطابق با استاندارد

لایه، سطح آن توسط تیغ خراش داده شد. در نهایت نمونه های ساخته شده جهت جلوگیری از دست دادن رطوبت در دوره های عمل آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه مطابق شکل ۶ (ج) در داخل چند لایه کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در دمای اتاق  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد به دور از تابش مستقیم نور خورشید نگهداری گردیدند و پس از گذراندن دوره های عمل آوری نمونه ها با استفاده از دستگاه نمونه درآور خاک<sup>۱</sup> درون رینگ فلزی دستگاه تحکیم مطابق شکل ۶ (ب) با ابعاد (قطر ۷/۵ و ارتفاع ۲ سانتی متر) جای گرفته و تحت آزمایش قرار گرفتند.

#### ۲-۳-۳- مقاومت فشاری تک محوری

در ساخت نمونه های مقاومت فشاری تک محوری، خاک خشک شده را با در نظر گرفتن حداکثر وزن مخصوص خشک خاک با نانورس در مقادیر

1 Soil Sample Ejector



شکل ۷. نمونه ها تحت سیکل تر و خشک

Fig. 7. Samples under wet-dry cycles

آزمایش تحکیم یک بعدی با حضور نانورس به میزان ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزن خشک خاک ساخته شد و در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. به شکلی که نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D559 تر و خشک شدند و پایداری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [۳۳]. برای انجام این آزمایش، نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده ابتدا در آب مقطر در دمای اتاق  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد مطابق شکل ۷ به مدت ۵ ساعت غوطه‌ور شدند. سپس، نمونه‌ها به مدت ۴۲ ساعت در گرمخانه با دمای  $71 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند این مسیر به عنوان یک سیکل در نظر گرفته شد.

در نهایت جهت بررسی تاثیر نانورس بر ریزساختار خاک و صحت‌سنجی نتایج، از نمونه‌های بدون تثبیت و تثبیت شده با ۰/۴ نانورس در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه عکسبرداری میکروسکوپی الکترونی روبشی انجام گردید. جهت ارائه بهتر جزئیات، آزمایش‌های صورت گرفته در جدول ۴ نشان داده شده است.

ASTM D1883 انجام گردید [۳۲]. بدین شکل خاک مورد تثبیت با در نظر گرفتن حداکثر وزن مخصوص به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد با میزان بهینه افزودنی نانورس به صورت خشک مخلوط گردیده سپس با میزان رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم مخلوط گردید تا زمانی که مصالح یک دست و همگن حاصل شود در ادامه مخلوط به دست آمده مطابق با روش تراکم ASTM D698 در سه لایه و هر لایه با ۵۶ ضربه چکش ۲/۵ کیلوگرمی در قالب CBR<sup>1</sup> با ابعاد (قطر ۱۵/۲ و ارتفاع ۱۷/۷ سانتی‌متر) متراکم گردید. در نهایت نمونه‌های ساخته شده جهت جلوگیری از دست دادن رطوبت در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه در داخل چند کیسه پلاستیکی قرار داده شده و در دمای اتاق  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد به دور از تابش مستقیم نور خورشید نگهداری گردیدند.

#### ۲-۳-۵- سیکل تر و خشک

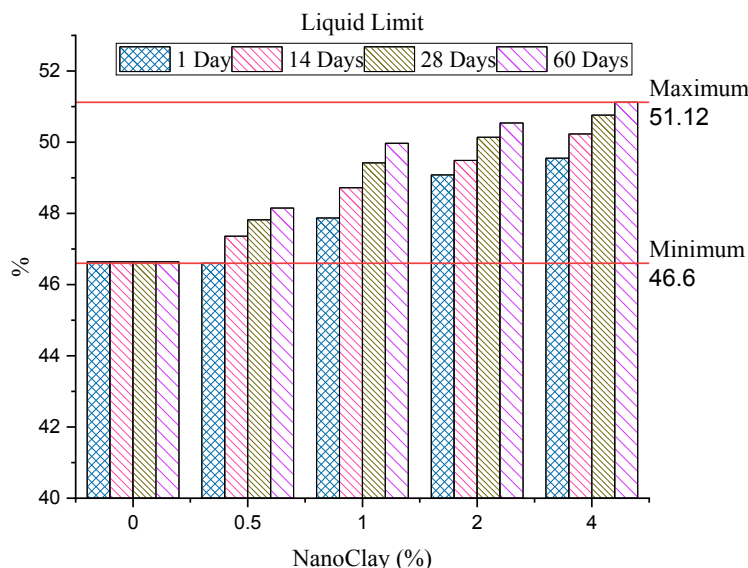
این آزمایش مطابق با روش انجام شده توسط اکبری و همکاران (۲۰۲۱) انجام گردید [۱]. نمونه‌های این آزمایش مطابق با روش ساخت نمونه‌های

1 California Bearing Ratio

جدول ۴. آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تاثیر نانورس بر خاک مورد مطالعه

Table 4. Conducted tests to investigate the effect of Nanoclay on the studied soil

SEM	سیکل تر و خشک (۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)	نسبت باربری کالیفرنیا (۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)	مقاومت فشاری تک محوری (۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)	تحکیم یک بعدی (۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)	حدود اتربرگ (۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روز)	نوع آزمایش (دوره‌های عمل‌آوری)
-	ASTM D559	ASTM D1883	ASTM D2166	ASTM D2435	ASTM D4318	درصد وزنی
✓	✓	✓	✓	✓	✓	۰
-	✓	-	✓	✓	✓	۰/۵
-	✓	-	✓	✓	✓	۱
-	✓	-	✓	✓	✓	۲
✓	✓	✓	✓	✓	✓	۴
-	-	-	✓	✓	-	۸



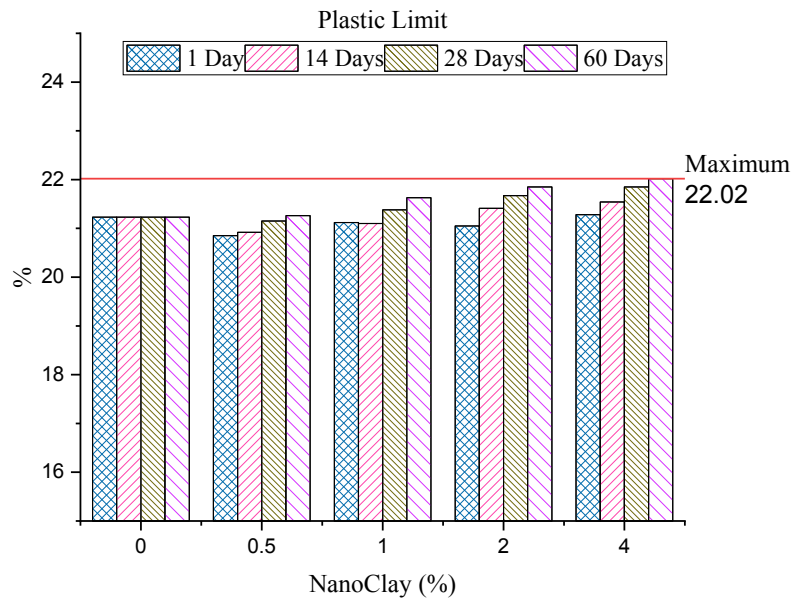
شکل ۸. حد روانی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 8. Liquid limit of unstabilized and stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods

روانی، حد خمیری به میزان جزئی و شاخص خمیری خاک می‌گردند به نحوی که با افزودن ۴ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه حد روانی از ۴۶/۶٪ به ۵۱/۱۲٪، حد خمیری از ۲۱/۲۳٪ به ۲۲/۰۲٪ و شاخص خمیری از ۲۵/۴۱٪ به ۲۹/۱٪ افزایش یافته است. این افزایش، ناشی از سطح مخصوص بالا، ذرات ریز و ساختمان کریستالی نانورس می‌باشد که باعث می‌شود میزان جذب آب نمونه‌های تثبیت شده افزایش یافته و در نتیجه حدود اتربرگ خاک مخلوط شده با افزودنی نانورس افزایش یابد. این نتایج

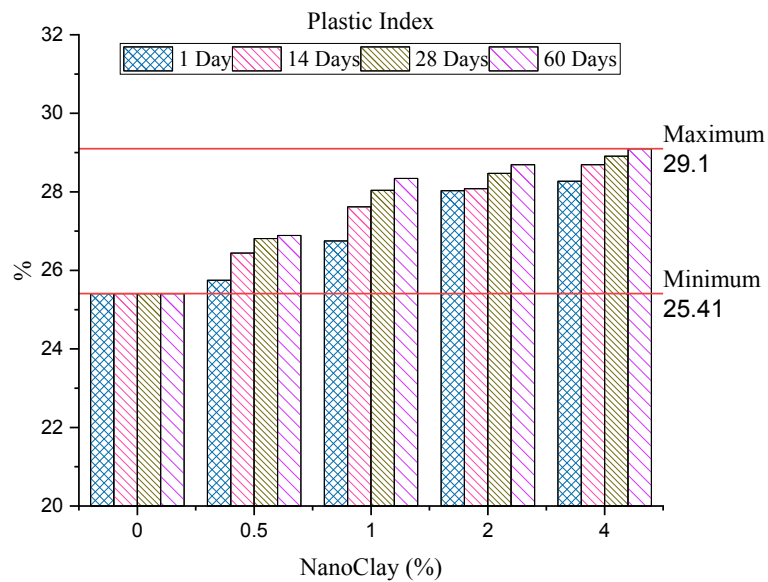
### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- تاثیر نانورس مونت موریلونیت بر خواص پلاستیسیته خاک جهت بررسی اثر افزودنی نانورس بر خواص پلاستیسیته خاک، آزمایش حدود اتربرگ مطابق استاندارد ASTM D 4318 بر نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده انجام گردید. نتایج این آزمایش در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد افزایش مقادیر نانورس از ۰ تا ۴ درصد وزنی و افزایش دوره‌های عمل‌آوری سبب افزایش حد



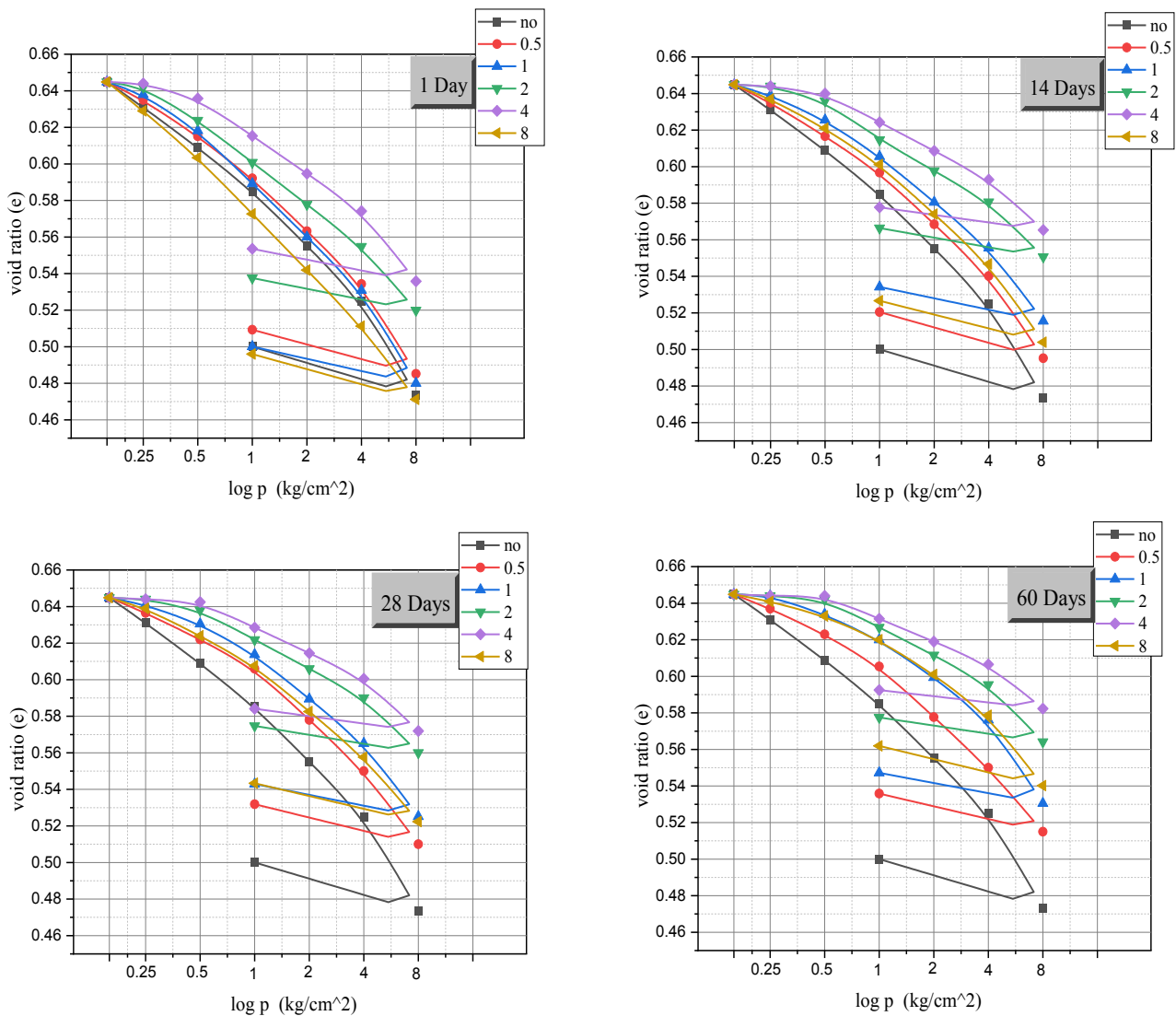
شکل ۹. حد خمیری نمونه های تثبیت نشده و تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره های عمل آوری مختلف

Fig. 9. Plastic limit of unstabilized and stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods



شکل ۱۰. شاخص خمیری نمونه های تثبیت نشده و تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره های عمل آوری مختلف

Fig. 10. Plastic index of unstabilized and stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods



شکل ۱۱. نمودارهای نسبت تخلخل - لگاریتم تنش نمونه‌های تثبیت شده با نانورس به تفکیک دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 11. Diagrams of void ratio-logarithm of pressure of stabilized samples with nanoclay separately sorted by different curing periods

به آزمایش‌های تحکیم برای افزودنی نانورس در مقادیر ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد وزنی در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه در شکل‌های ۱۱ تا ۱۷ ارائه شده است. به نحوی که شکل ۱۱ و ۱۲ نمایانگر نمودارهای نسبت تخلخل-لگاریتم تنش، شکل ۱۳ تا ۱۶ شامل نمودارهای نشست-جذر زمان در دوره‌های عمل‌آوری ۱ تا ۶۰ روزه، شکل ۱۷ نمایانگر نمودارهای نشست، شاخص تورم<sup>۱</sup> (CS)، نفوذپذیری، ضریب تحکیم<sup>۲</sup> (CV) و شاخص فشردگی<sup>۳</sup> (CC) خاک می‌باشد. همانطور که از نتایج مشاهده می‌شود

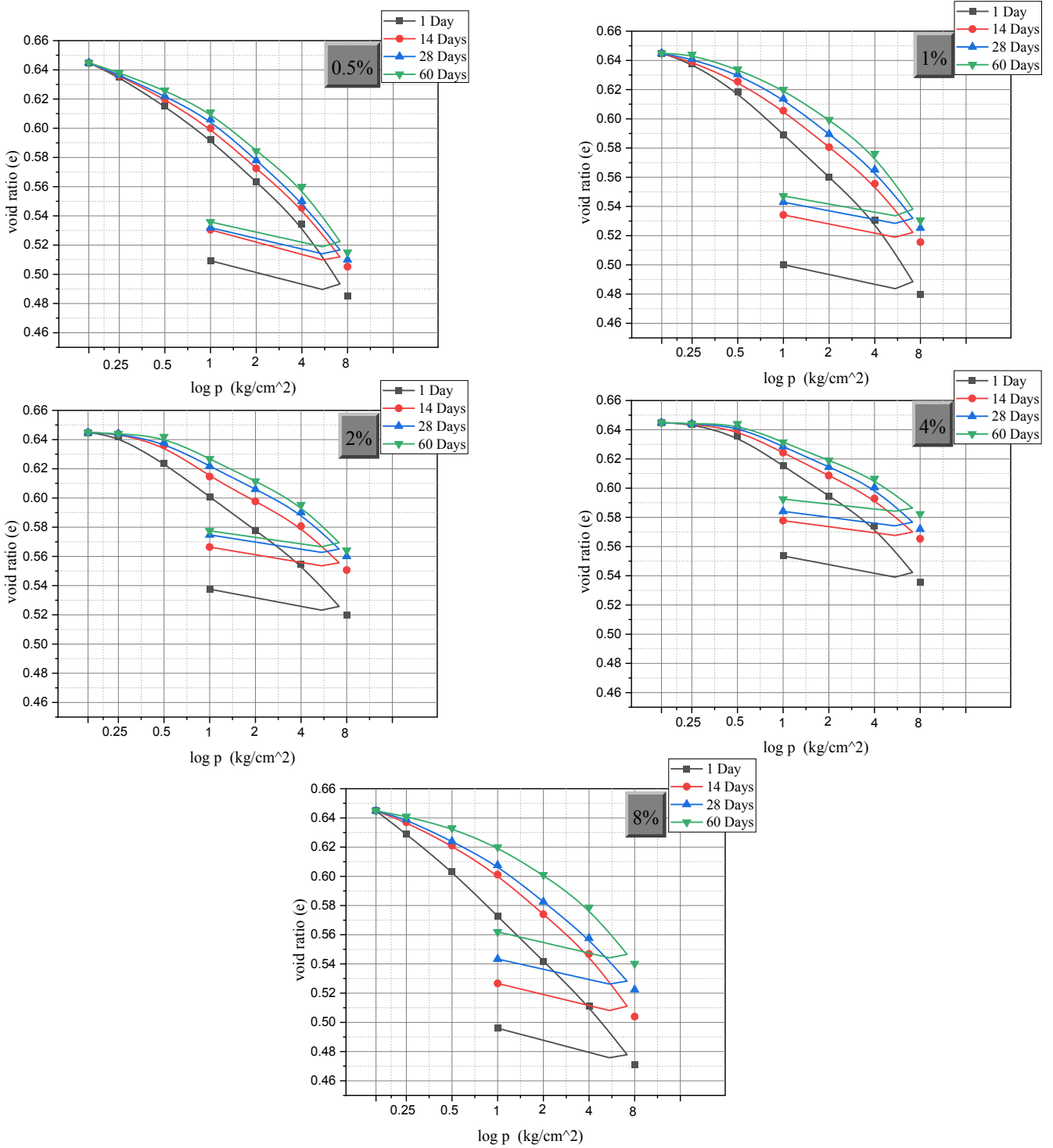
با مطالعات بهاری و همکاران (۲۰۱۳)، بدو و حسین‌زاده (۲۰۱۸)، باقرزاده خلخالی و همکاران (۲۰۱۹) و قره و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

### ۳-۲- تاثیر نانورس مونت موریلونیت بر رفتار تحکیمی خاک

در جهت بررسی تاثیر نانورس بر رفتار تحکیمی خاک مورد مطالعه، آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D 2435 انجام گردید و نمونه‌های بدون تثبیت و تثبیت شده تحت اعمال وزنه‌های ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ کیلوگرمی که به ترتیب معادل تنش‌های قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند، قرار گرفتند [۳۴]. نتایج مربوط

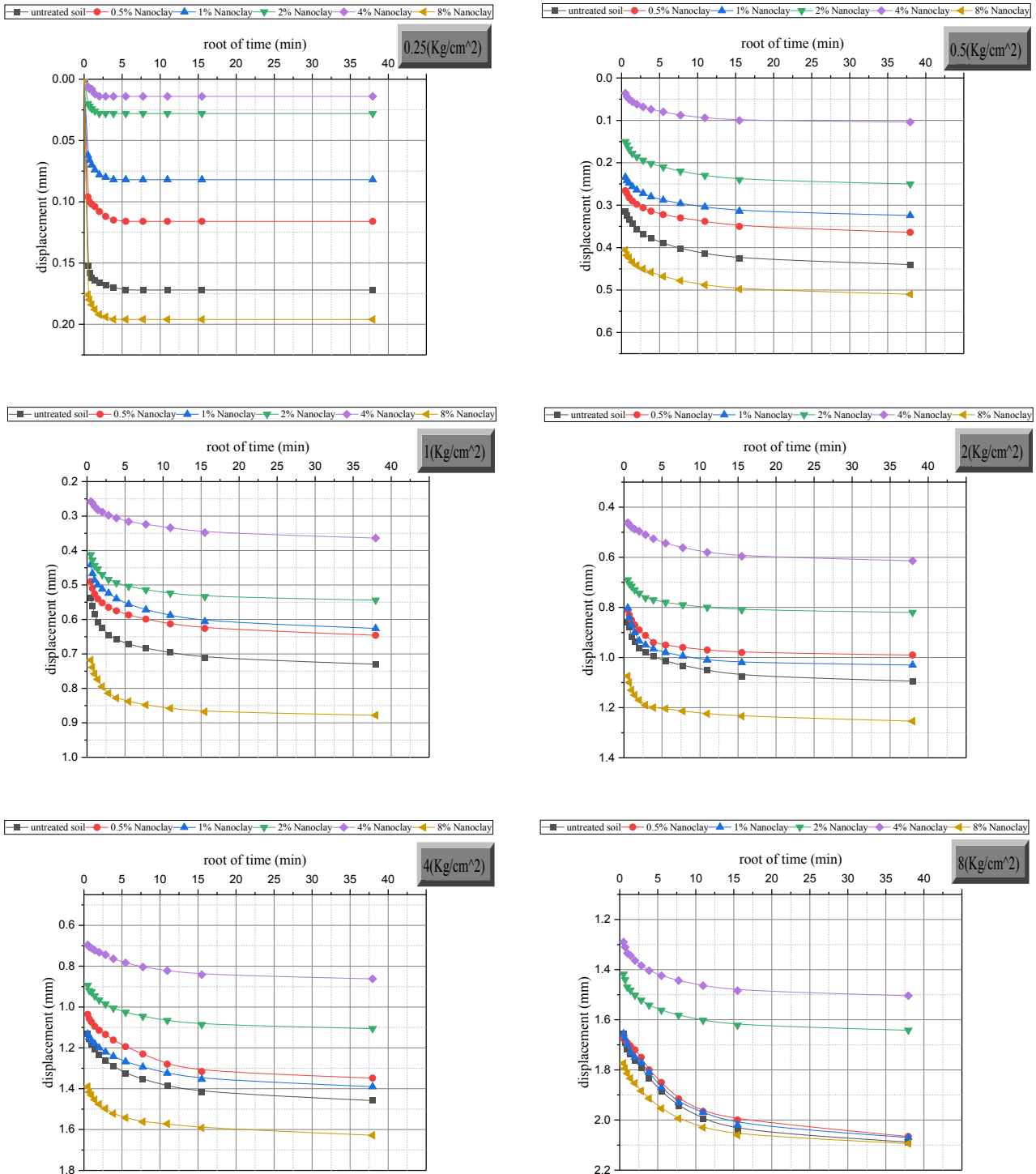
- 1 Swelling Index
- 2 Coefficient of Consolidation
- 3 Compression Index





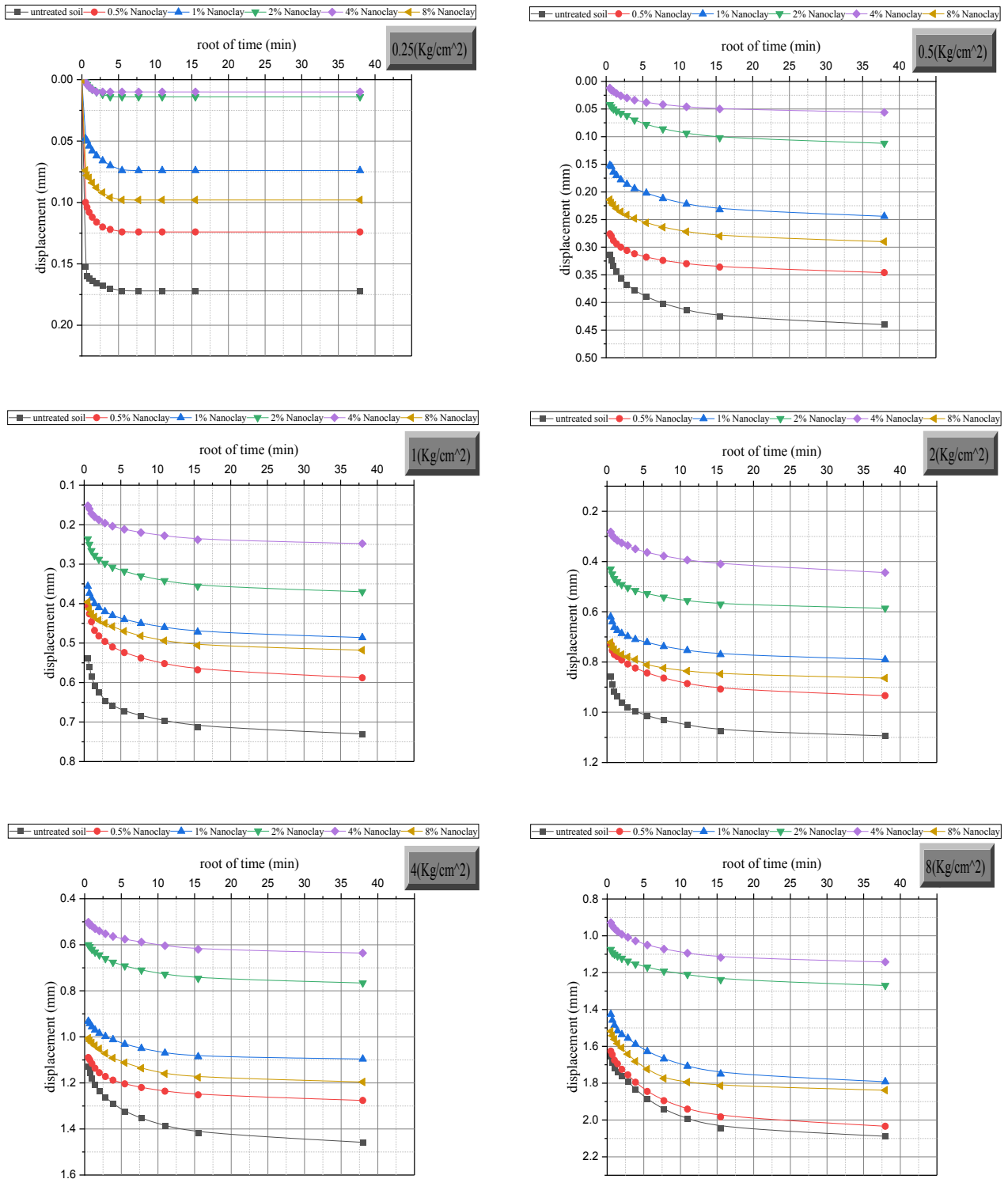
شکل ۱۲. نمودارهای نسبت تخلخل-لگاریتم تنش نمونه‌های تثبیت شده با نانورس به تفکیک مقادیر مختلف نانورس

Fig. 12. Diagrams of void ratio-logarithm of pressure of stabilized samples with nanoclay separately sorted by different contents of nanoclay



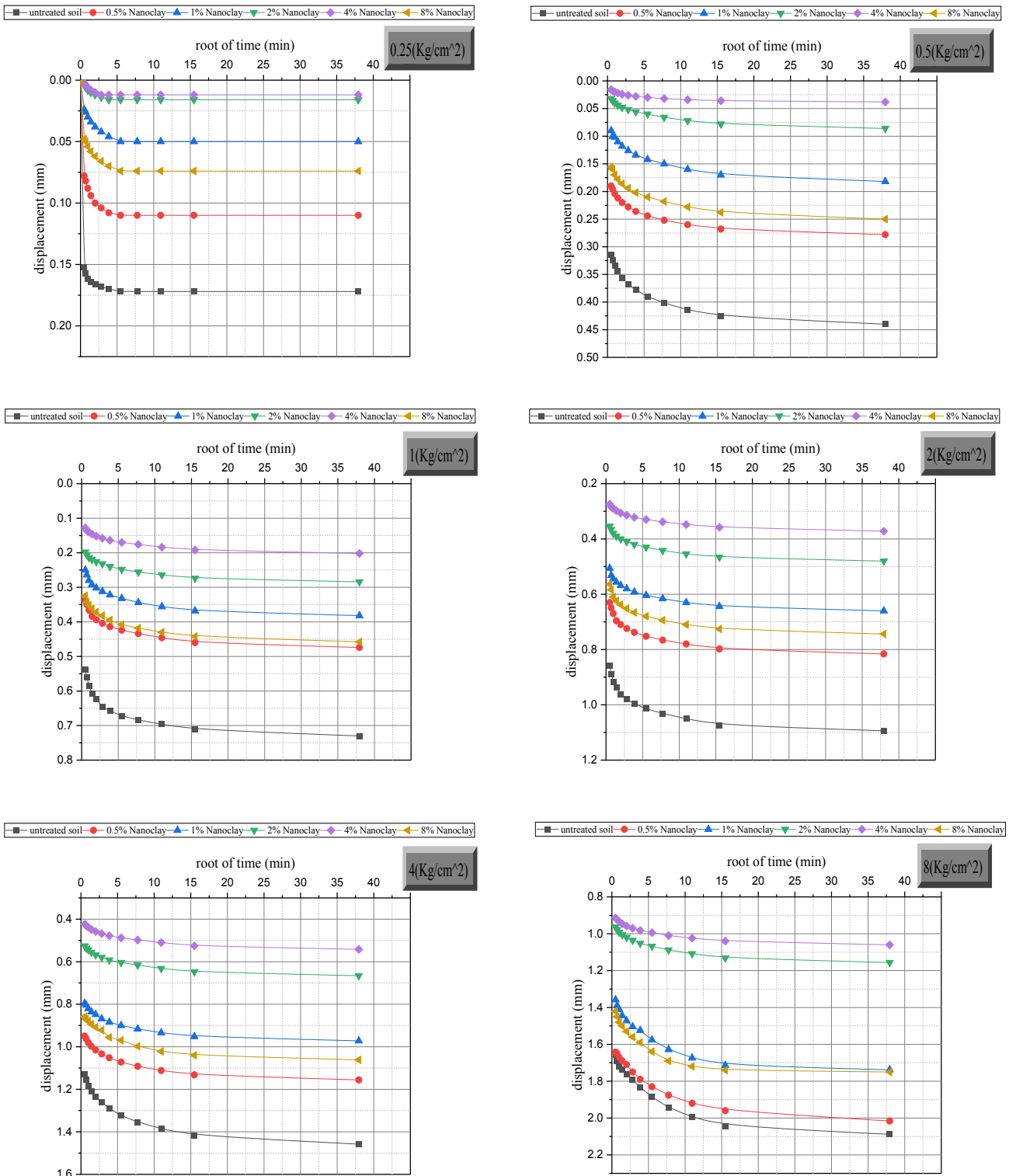
شکل ۱۳. نمودارهای نشست-جذر زمان با اعمال تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ (Kg/cm<sup>2</sup>) پس از دوره عمل‌آوری ۱ روز

Fig. 13. Diagrams of the settlement-square root of time by applying stresses of 0.25, 0.5, 1, 2, 4, and 8 (Kg/cm<sup>2</sup>) after a curing period of 1 day



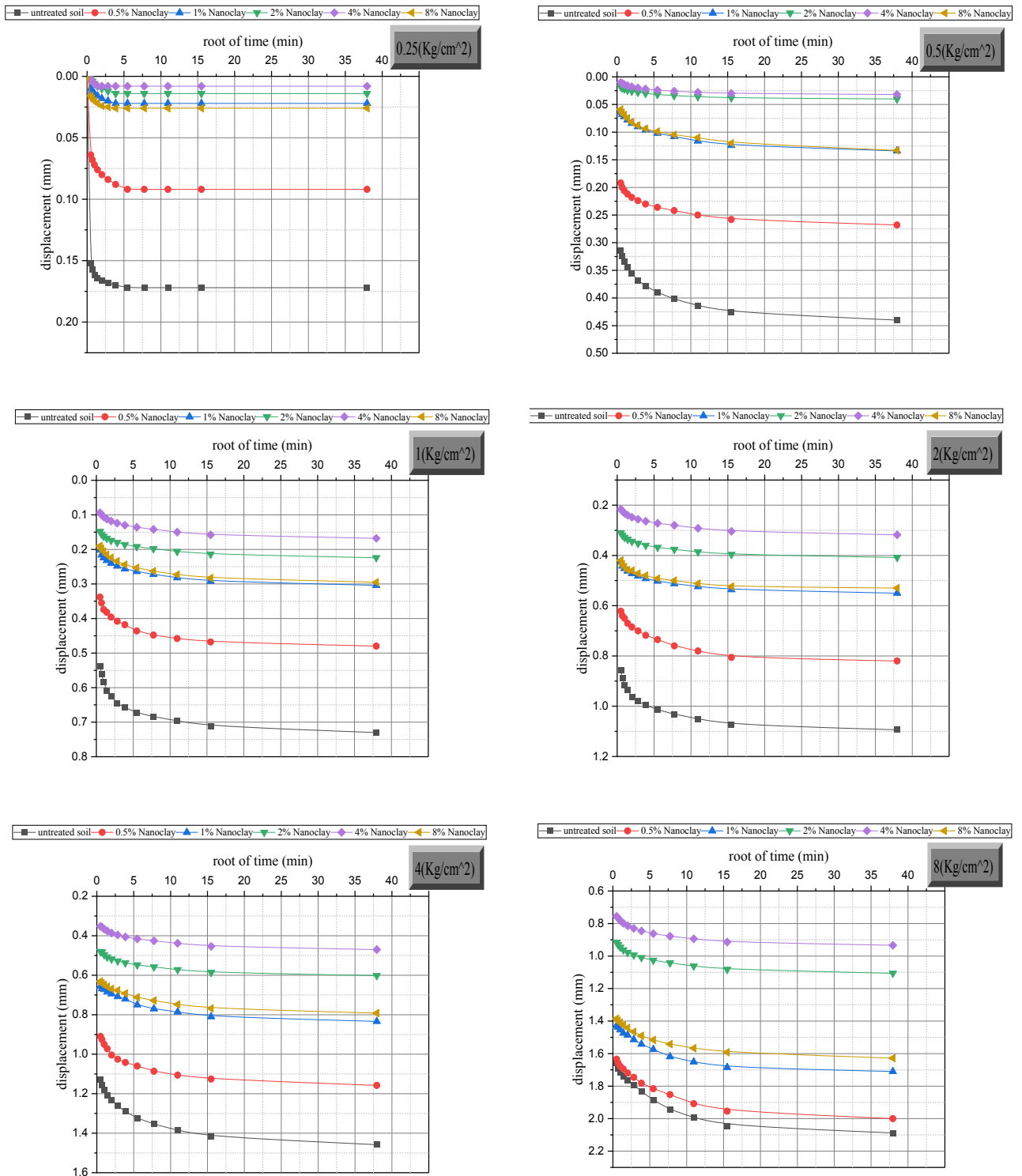
شکل ۱۴. نمودارهای نشست-جذر زمان با اعمال تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ (Kg/cm<sup>2</sup>) پس از دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه

Fig. 14. Diagrams of the settlement-square root of time by applying stresses of 0.25, 0.5, 1, 2, 4, and 8 (Kg/cm<sup>2</sup>) after a curing period of 14 days



شکل ۱۵. نمودارهای نشست- جذر زمان با اعمال تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ (Kg/cm<sup>2</sup>) پس از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه

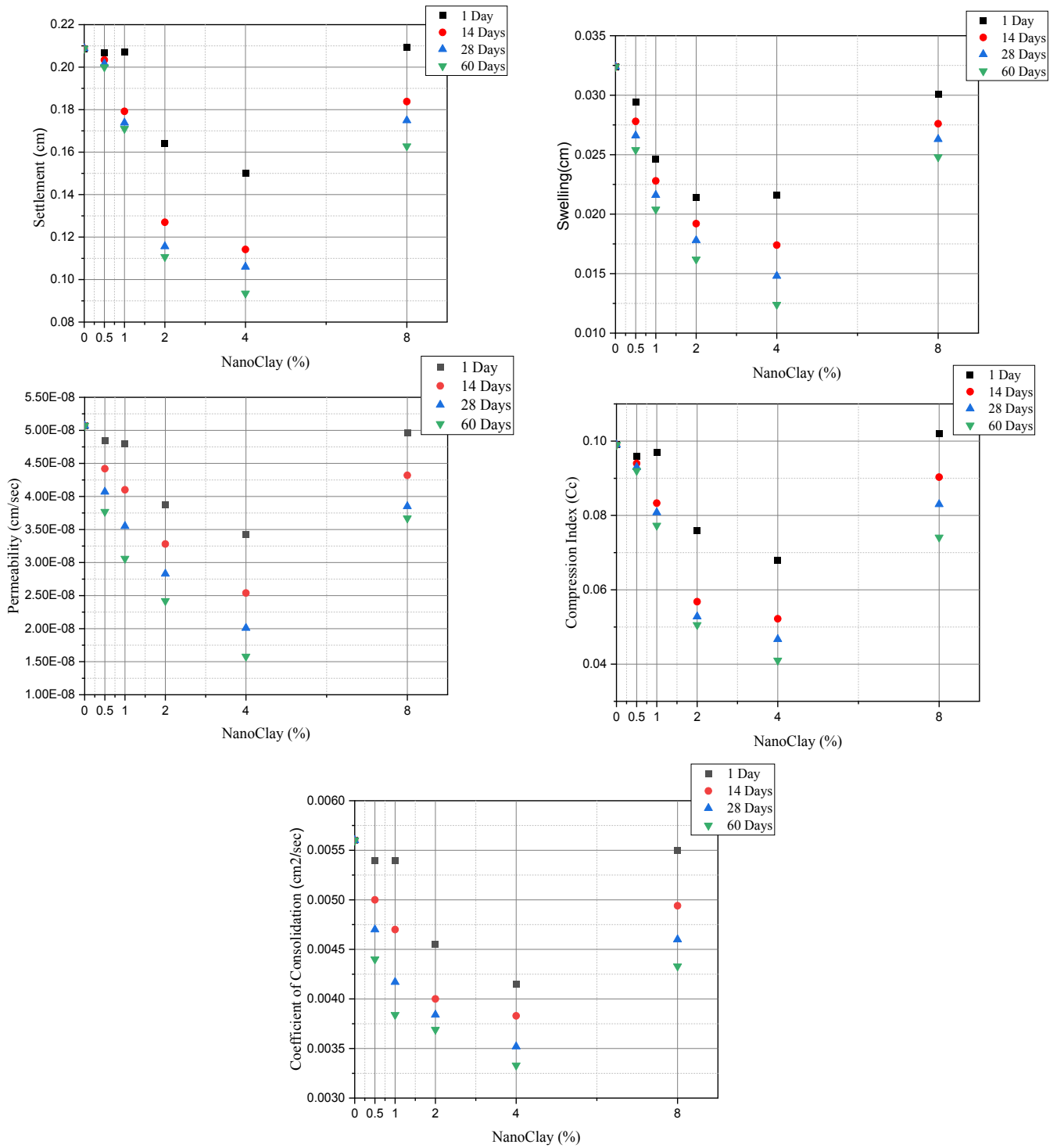
Fig. 15. Diagrams of the settlement-square root of time by applying stresses of 0.25, 0.5, 1, 2, 4, and 8 (Kg/cm<sup>2</sup>) after a curing period of 28 days



شکل ۱۶. نمودارهای نشست-جذر زمان با اعمال تنش‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ (Kg/cm<sup>2</sup>) پس از دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه

Fig. 16. Diagrams of the settlement-square root of time by applying stresses of 0.25, 0.5, 1, 2, 4, and 8 (Kg/cm<sup>2</sup>) after a curing period of 60 days





شکل ۱۷. نمودارهای تغییرات نشست، شاخص تورم، نفوذپذیری، شاخص فشردگی و ضریب تحکیم خاک در حضور مقادیر مختلف نانوس و دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 17. Diagrams of changes of settlement, swelling index, permeability, compression index, and coefficient of consolidation of soil in the presence of different contents of nanoclay and different curing periods

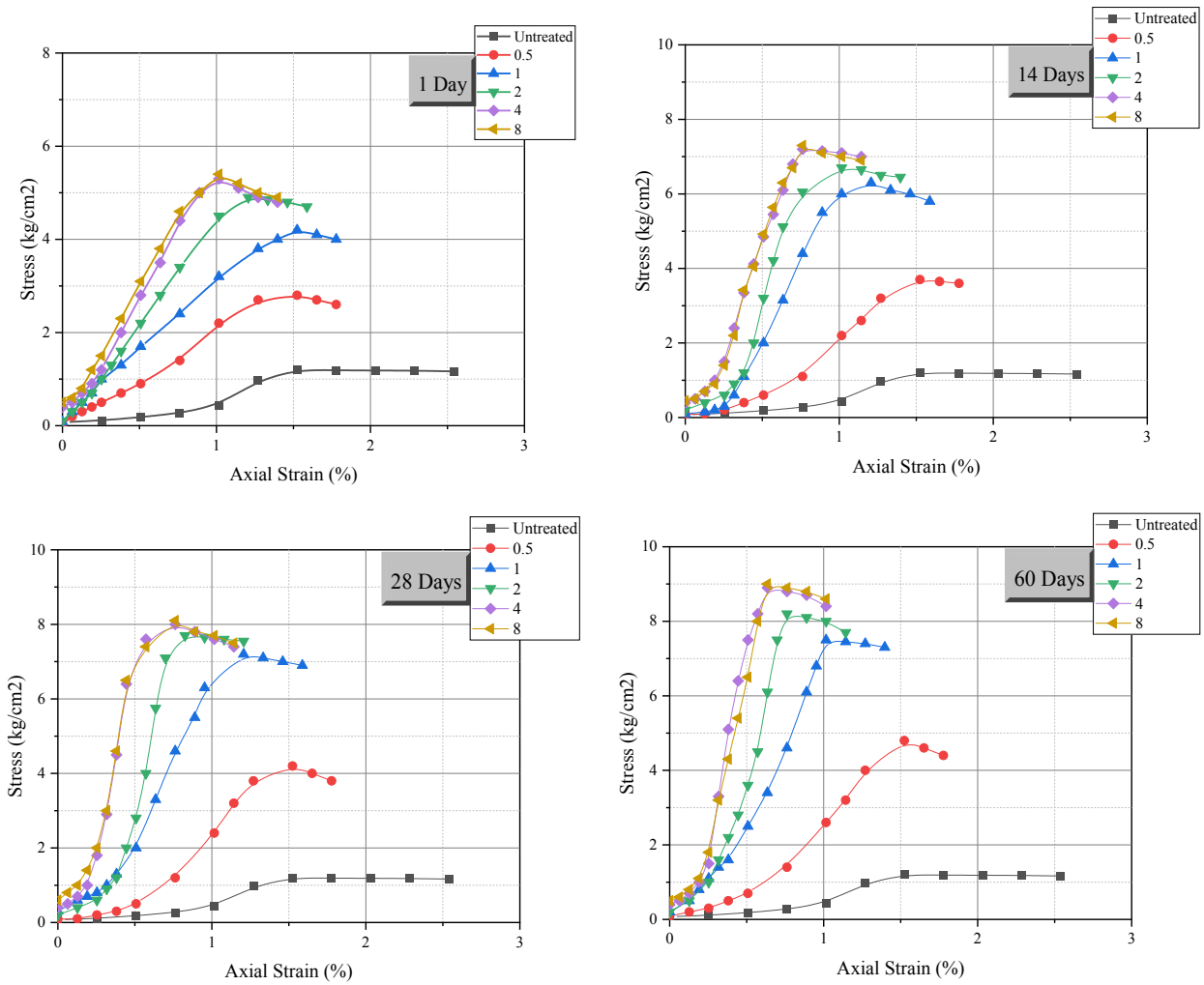
موجود میان ذرات خاک قرار گرفته و بیشتر آب موجود را جذب نموده و از اندرکنش آن با ذرات خاک می‌کاهند.

همچنین از دلایل کاهش اثر گذاری نانورس در مقادیر ۸ درصد وزنی، می‌توان گفت که با افزایش نانورس به بیش از میزان بهینه، رفتار خاک بیشتر تحت تاثیر ساختار و کلوخه‌های ایجاد شده توسط ذرات نانورس مازاد قرار می‌گیرد و با افزایش بارهای اعمالی به نمونه، این ساختار ایجاد شده توسط نانورس گسیخته شده و در نتیجه رفتار خاک روندی معکوس را در پیش می‌گیرد و منجر به کاهش تاثیرگذاری نانورس می‌گردد. قابل ذکر است که نتایج به دست آمده با پژوهش‌های کارومانچی و همکاران (۲۰۲۰)، کارکوش و همکاران (۲۰۲۰) و شارو و الاونه (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

**۳-۳- تاثیر نانورس مونت موریلونیت بر مقاومت فشاری تک محوری خاک**  
پس از گذراندن دوره‌های عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده مطابق استاندارد ASTM D2166 تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور نانورس و افزایش دوره‌های عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش در لحظه گسیختگی خاک می‌شود. بیشترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به حضور نانورس به میزان ۸ درصد وزنی در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه می‌باشد که مقاومت فشاری به میزان ۷۵٪ افزایش یافته و کرنش گسیختگی نیز با کاهش ۳۶ درصدی همراه است که ناشی از کاهش تخلخل و افزایش سطح تماس بین ذرات به کمک نانورس می‌باشد. قابل ذکر است که حضور نانورس به میزان ۸ درصد وزنی به نسبت ۴ درصد وزنی تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری خاک نداشته به نحوی که در شکل ۱۹ شیب افزایش منحنی‌های مقاومت فشاری با افزایش نانورس از ۴ درصد به ۸ درصد تقریباً ثابت مانده و در مدت زمان ۶۰ روزه مقاومت فشاری از ۸/۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش یافته است و با توجه به تاثیر معکوس حضور ۸ درصد وزنی از نانورس بر پارامترهای تحکیمی خاک، می‌توان میزان بهینه نانورس را ۴ درصد وزن خشک خاک در نظر گرفت. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج پژوهش‌های خالید و همکاران (۲۰۱۷)، ابیسا و همکاران (۲۰۱۷) و قره و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

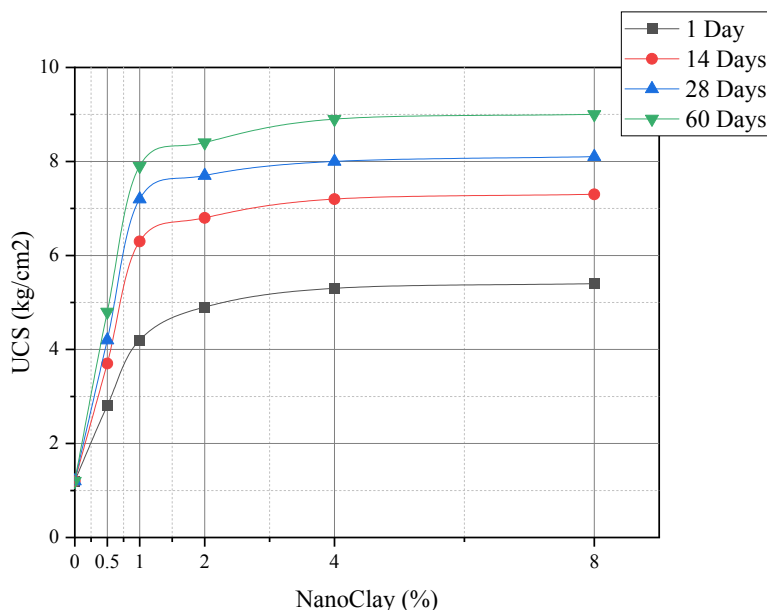
رفتار خاک تثبیت نشده عادی تحکیم یافته می‌باشد اما با افزایش مقادیر نانورس تا ۴٪ و افزایش دوره‌های عمل‌آوری رفتار خاک پیش تحکیم یافته می‌شود به نحوی که بیشترین میزان پیش تحکیمی در افزودن ۴٪ نانورس در مدت زمان عمل‌آوری ۶۰ روزه به دست آمده که رفتار خاک تا حدود ۰/۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع پیش تحکیم یافته می‌باشد. همچنین از نمودارهای نشست-جذر زمان می‌توان به این نکته پی برد حضور افزودنی تا ۴ درصد وزنی و افزایش دوره‌های عمل‌آوری سبب کاهش نشست خاک در برابر تنش‌های اعمالی می‌شود. حضور نانورس تا ۴ درصد وزنی و دوره‌های عمل‌آوری سبب کاهش شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، میزان نشست، نفوذپذیری و شاخص تورم خاک می‌گردد. به نحوی که حضور ۴٪ نانورس و دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه موجب گردیده که شاخص فشردگی از ۰/۰۹۹ به ۰/۰۴۱، ضریب تحکیم از ۰/۰۰۵۶ به ۰/۰۰۳۳، نشست از ۰/۲۰۸۸ سانتی‌متر به ۰/۰۹۳۵ سانتی‌متر، نفوذپذیری از ۵/۰۷<sup>-۸</sup> سانتی‌متر بر ثانیه به ۱/۵۸<sup>-۸</sup> سانتی‌متر بر ثانیه و شاخص تورم از ۰/۰۳۲۴ سانتی‌متر به ۰/۰۱۲۴ سانتی‌متر کاهش یابد. به عبارتی، شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، میزان نشست، نفوذپذیری و تورم نسبت به نمونه تثبیت نشده به ترتیب به میزان ۵۸٪، ۵۹٪، ۵۵٪، ۶۹٪ و ۶۲٪ کاهش یافته است. اما با افزودن نانورس به میزان ۸ درصد وزنی رفتار خاک روندی معکوس را در پیش گرفته و موجب افزایش شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، نشست، نفوذپذیری و شاخص تورم خاک گردیده است. همینطور از نتایج مشخص است که سرعت واکنش نانورس با خاک در ۱۴ روز ابتدایی بسیار سریع بوده و سبب تاثیرگذاری بیشتری بر رفتار خاک گردیده است اما با افزایش دوره‌های عمل‌آوری به بیش از ۱۴ روز از میزان سرعت واکنش نانورس با خاک کاهش یافته است.

این کاهش در شاخص فشردگی و میزان نشست خاک ناشی از وجود ذرات نانورس می‌باشد که موجب افزایش سطح تماس بین ذرات خاک می‌شود به صورتی که بخشی از حفره‌های موجود بین ذرات خاک را پر نموده و باعث افزایش نیروهای پیوندی و قفل‌شدگی بین ذرات خاک می‌شود و در نتیجه مقاومت خاک در برابر بارهای اعمالی افزایش یافته است. کاهش نفوذپذیری نیز ناشی از کاهش حفره‌های موجود در ذرات خاک می‌باشد که موجب پیوند میان ذرات خاک و نانورس گردیده و در نتیجه جریان نفوذپذیری در خاک کاهش می‌یابد. همچنین کاهش تورم خاک نیز به علت مونت موریلونیت بودن ذرات نانورس می‌باشد زیرا این ذرات قدرت جذب آب بالایی دارد به همین دلیل با افزودن نانورس، این نانو ذرات در حفره‌های



شکل ۱۸. نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 18. Diagrams of stress-strain of stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods



شکل ۱۹. نمودار مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 19. Diagram of uniaxial compressive strength of stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods

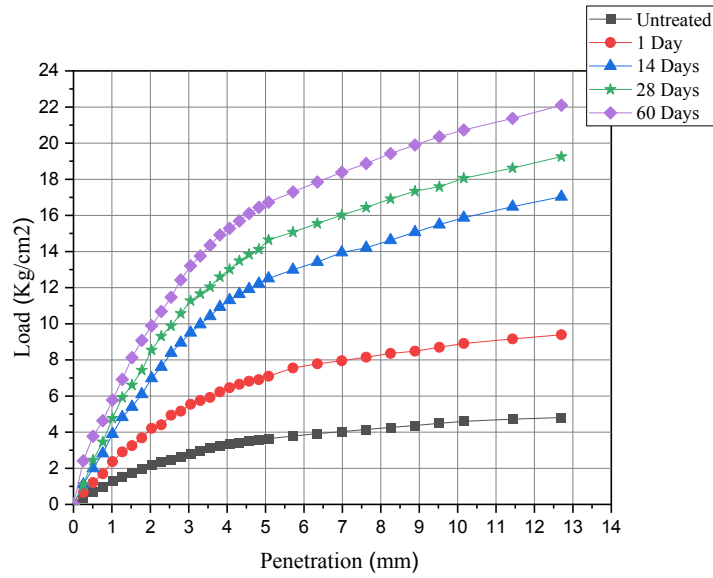
۳-۵- تاثیر نانورس مونت موریلونیت بر پایداری نمونه‌های تثبیت شده در مقابل سیکل‌های تر و خشک

با اعمال سیکل‌های تر و خشک، نمونه‌های تثبیت شده با نانورس رفتار متفاوتی از خود نشان دادند. شکل ۲۲ نتایج اعمال سیکل‌های تر و خشک بر میزان افت وزنی نمونه‌های تثبیت شده با ۱، ۲ و ۴ درصد افزودنی نانورس در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه را نشان می‌دهد.

در سیکل ابتدایی تر و خشک نمونه‌های تثبیت نشده در سیکل تر شدگی به دلیل جذب آب و غلبه نیروهای تورمی ذرات بر نیروهای واندروالس بین ذرات، به طور کامل گسیخته شدند. نمونه‌های تثبیت شده با ۱/۵٪ و ۱٪ نانورس در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه و نمونه‌های تثبیت شده با ۲٪ و ۴٪ نانورس در دوره عمل‌آوری ۱ روزه در برابر سیکل تر و خشک اعمالی به نسبت نمونه‌های تثبیت نشده پایداری بیشتری از خود نشان دادند بدین صورت که پس از اعمال سیکل ابتدایی (تر شدگی) دچار گسیختگی نگردیدند ولی حضور آب در میان ذرات خاک موجب شسته شدن مقداری از نانوذرات موجود در خاک گردید و از پایداری نمونه‌ها کاهش یافت به نحوی که پس از قرار گرفتن در سیکل خشک، ترک‌های ریز و افت وزنی در نمونه‌ها مشاهده گردید سپس در سیکل دوم (تر شدگی) حضور آب سبب شسته شدن بیشتر ذرات نانورس در خاک گردید و در نهایت نمونه‌های ذکر

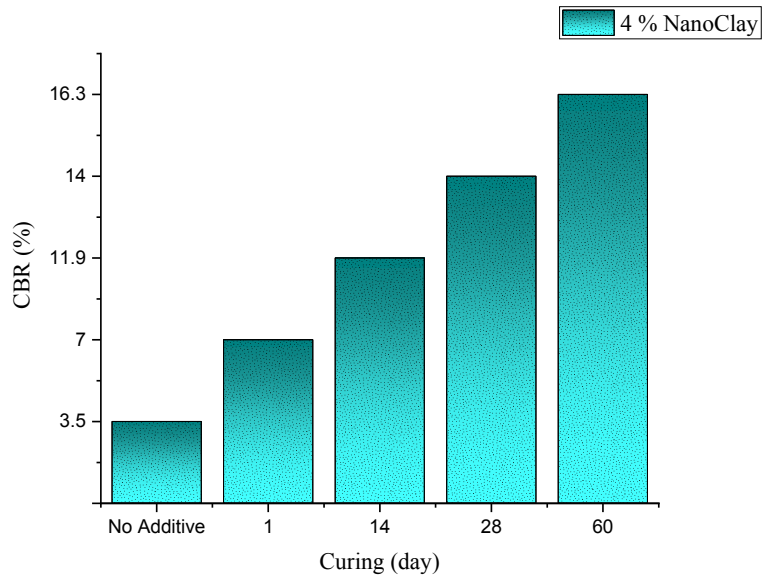
۳-۴- تاثیر نانورس مونت موریلونیت بر نسبت باربری خاک

با افزودن میزان بهینه نانورس اثر آن بر نسبت باربری خاک در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه مطابق استاندارد ASTM D1883 بررسی گردید. در شکل ۲۰ نمودار فشار-فرورفتگی و در شکل ۲۱ مقدار CBR نمونه‌ها در حضور ۴ درصد نانورس در مدت زمان‌های عمل‌آوری مختلف مشخص گردیده است. همانطور که از نتایج مشخص است افزودن ۴ درصد نانورس سبب افزایش نسبت باربری خاک می‌گردد و با افزایش دوره‌های عمل‌آوری این پارامتر روند صعودی را در پیش گرفته است به نحوی که در مدت زمان ۶۰ روزه مقدار CBR خاک به ۱۶/۳٪ رسیده است. این افزایش نسبت باربری با گذشت زمان، ناشی از بهبود واکنش‌های سیماناسیون نانورس می‌باشد. اما باید توجه داشت که نرخ افزایش نسبت باربری خاک در حضور نانورس در ۱۴ روز ابتدایی بسیار بالا می‌باشد بدین شکل که نسبت باربری خاک تثبیت نشده از ۳/۵٪ با افزودن میزان بهینه نانورس در مدت زمان ۱۴ روزه به ۱۱/۹٪ رسیده است و با افزایش دوره‌های عمل‌آوری به ۲۸ و ۶۰ روز، از سرعت رشد این پارامتر کاسته شده است که نشان از سرعت بالای واکنش نانورس در روزهای ابتدایی با خاک دارد. نتایج به دست آمده در این بخش نیز با نتایج پژوهش‌های اونیلانو و همکاران (۲۰۱۷) و ابیسا و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.



شکل ۲۰. نمودار فشار - فرورفتگی نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با ۴٪ نانورس پس از دوره‌های عمل‌آوری مختلف

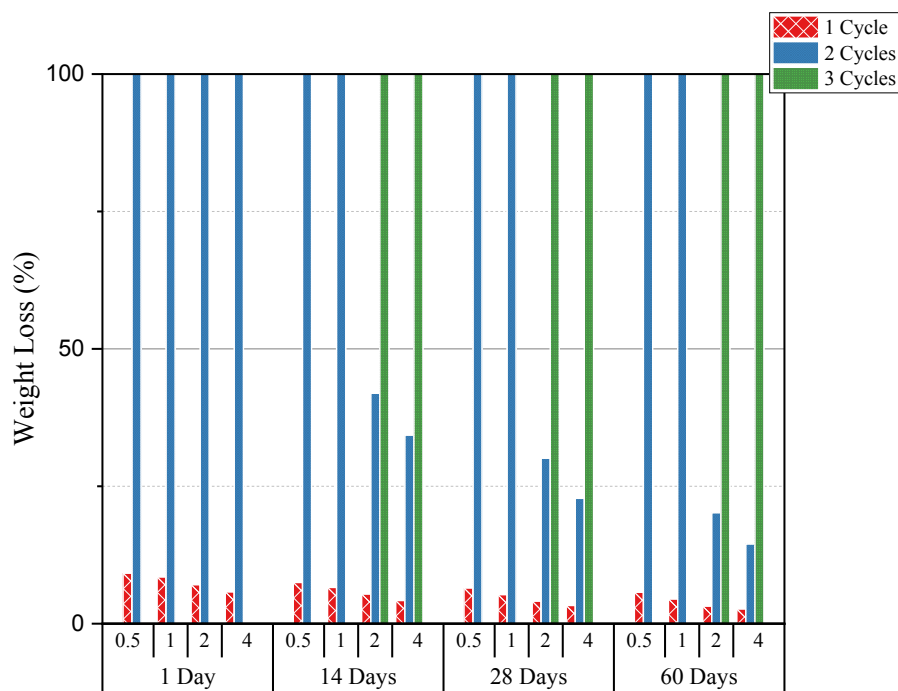
Fig. 20. Diagrams of load-penetration of unstabilized and stabilized samples with 4% nanoclay after different curing periods



شکل ۲۱. مقادیر CBR نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با ۴٪ نانورس پس از دوره‌های عمل‌آوری مختلف

Fig. 21. CBR values of unstabilized and stabilized samples with 4% nanoclay after different curing periods





شکل ۲۲. درصد افت وزنی نمونه‌های تثبیت شده با نانورس در مقادیر و دوره‌های عمل‌آوری مختلف تحت سیکل‌های تر و خشک

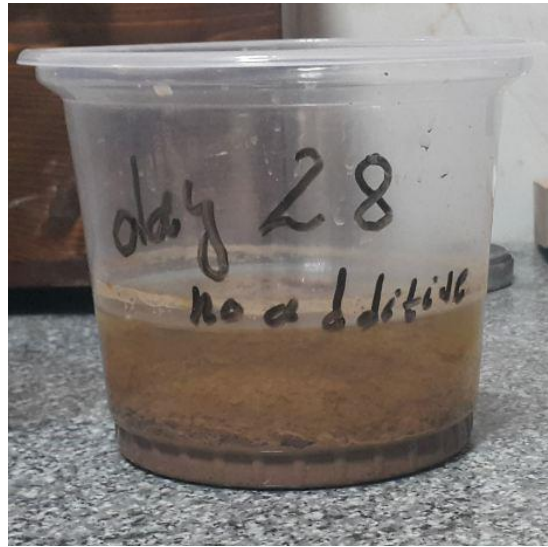
Fig. 22. Weight loss percentage of stabilized samples with nanoclay at different contents and curing periods under wet-dry cycles

با ۲٪ و ۴٪ نانورس پس از دومین سیکل تر و خشک در دوره عمل‌آوری ۱۴ روزه به ترتیب برابر با ۴۱/۹٪ و ۳۴/۳٪، در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۳۰/۱٪ و ۲۲/۸٪ و در نهایت در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه به ترتیب برابر با ۲۰/۲٪ و ۱۴/۵٪ می‌باشد. شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ وضعیت نمونه تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس تحت عمل‌آوری ۲۸ روزه با اعمال سیکل‌های تر و خشک را نشان می‌دهد.

### ۳-۶- نتایج عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی

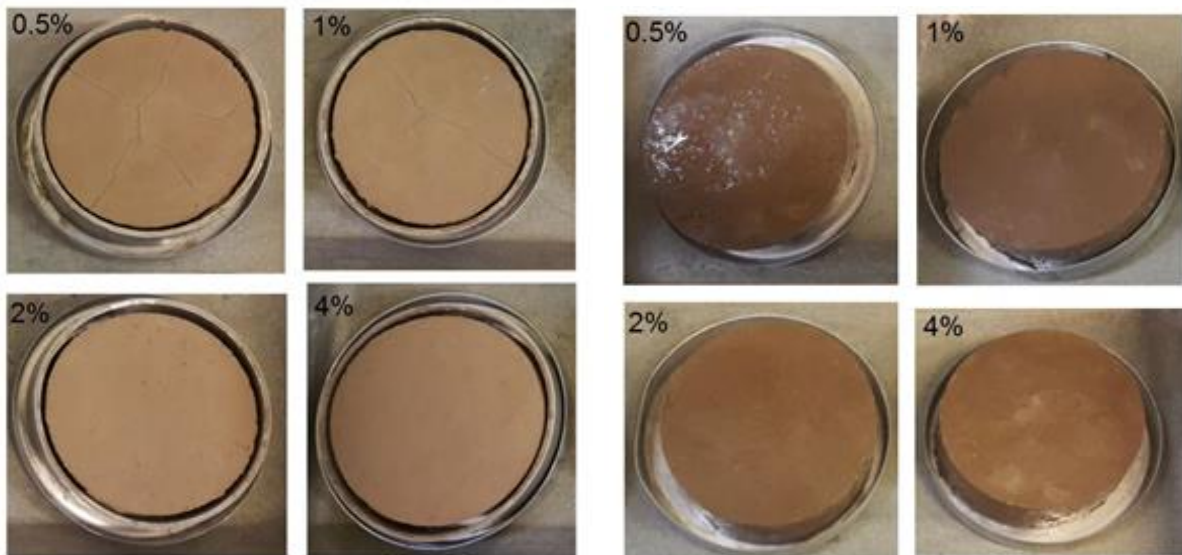
در جهت بررسی تاثیر نانورس بر ساختار خاک و کنترل آن با نتایج به دست آمده عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با مقدار ۴٪ افزودنی نانورس در مدت زمان ۶۰ روزه در دو مقیاس ۵۰ میکرومتر و ۲۰ میکرومتر انجام گردید. در شکل ۲۶ نتایج آنالیز عکسبرداری میکروسکوپی از نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با میزان ۴٪ افزودنی نانورس در مدت زمان ۶۰ روزه در مقیاس ۵۰ میکرومتر

شده در این سیکل به طور کامل گسیخته شدند. ولی نمونه‌های تثبیت شده با میزان ۲٪ و ۴٪ نانورس در مدت زمان‌های ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه به دلیل حضور بیشتر ذرات نانورس و همچنین خاصیت سیمان‌تاسیون مناسب میان افزودنی نانورس و ذرات خاک، پایداری نسبتاً بیشتری در مقابل سیکل‌های تر و خشک اعمالی از خود نشان دادند. این نمونه‌های تثبیت شده در برابر سیکل ابتدایی تر و خشک دچار افت وزنی کمتری گردیدند و همچنین در دومین سیکل تر شدگی تخریب نگردیدند اما افت وزنی نمونه‌ها شدت یافت که این میزان افت وزنی به دوره‌های عمل‌آوری گذرانده شده و میزان حضور نانورس بستگی داشت و در نهایت این نمونه‌ها در سیکل سوم تر شدگی به طور کامل گسیخته شدند. بیشترین میزان افت وزنی در پایان اولین سیکل تر و خشک مربوط به نمونه تثبیت شده با ۰/۵٪ نانورس در دوره عمل‌آوری ۱ روزه برابر با ۹/۲٪ و کمترین میزان افت وزنی در پایان اولین سیکل تر و خشک مربوط به نمونه تثبیت شده با ۴٪ نانورس در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه برابر با ۲/۷٪ می‌باشد همچنین میزان افت وزنی نمونه‌های تثبیت شده



شکل ۲۳. گسیختگی نمونه تثبیت نشده با اعمال اولین سیکل تر شدگی

Fig. 23. Failing of unstabilized sample by applying the first wetting cycle

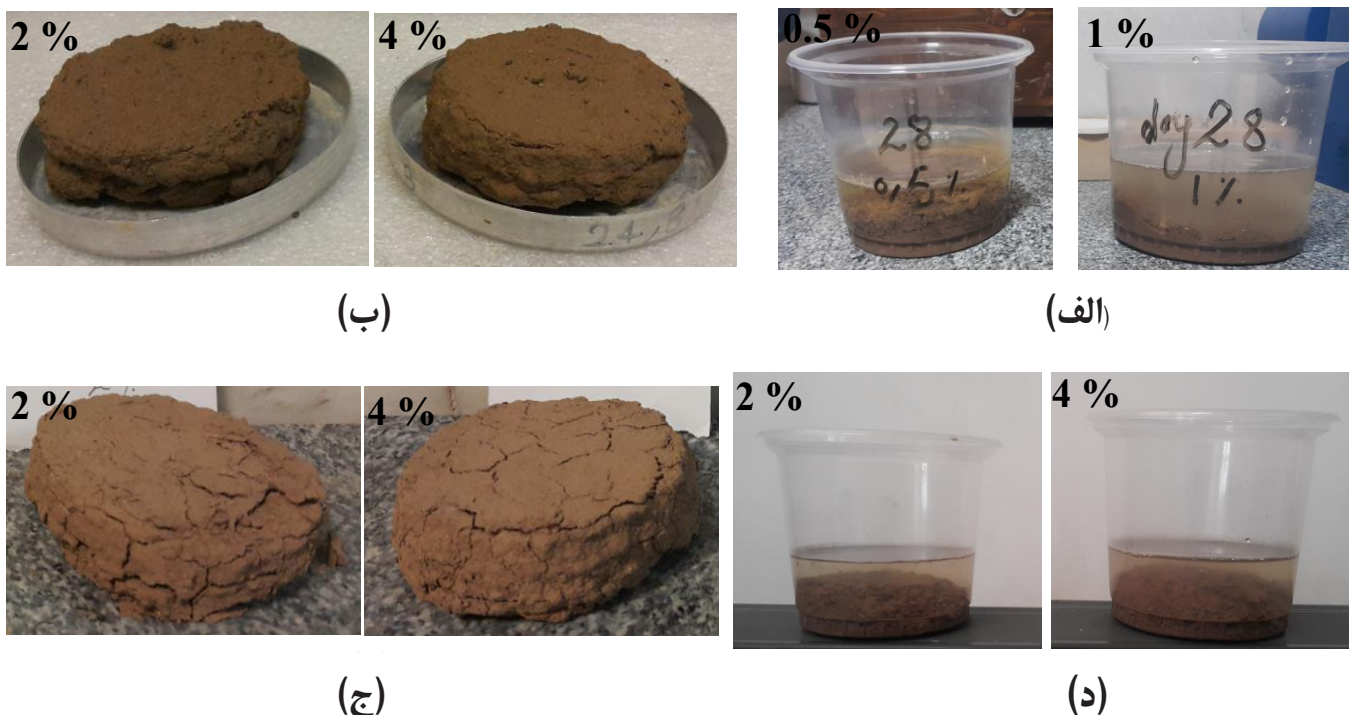


ب

الف

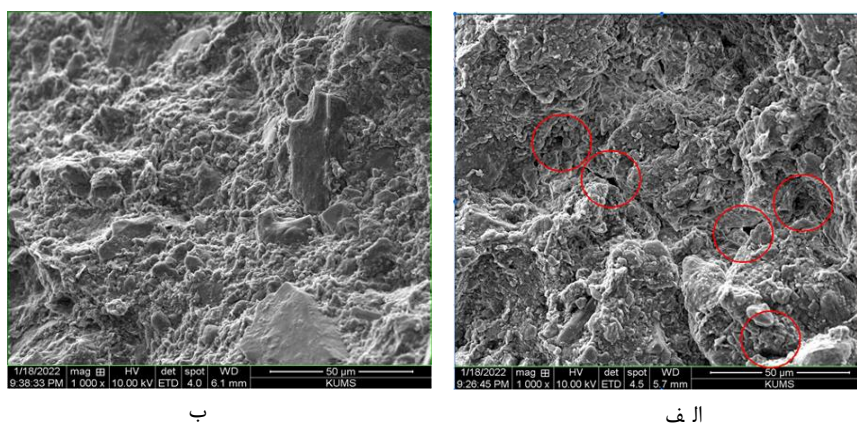
شکل ۲۴. عکس‌هایی از نمونه‌های تثبیت شده با نانورس در مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه (الف) پس از اعمال اولین سیکل تر شدگی (ب) پس از اعمال اولین سیکل خشک شدگی

Fig. 24. Pictures of stabilized samples with 0.5, 1, 2, and 4% nanoclay at 28 days curing a) after applying the first wetting cycle, b) after applying the first drying cycle



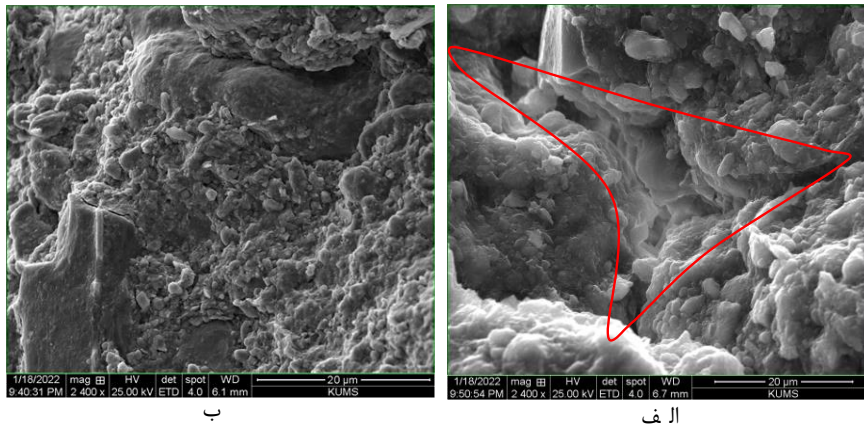
شکل ۲۵. عکس‌هایی از (الف) گسیختگی نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵ و ۱ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه با اعمال دومین سیکل تر شدگی (ب) نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از اعمال دومین سیکل تر شدگی (ج) نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه پس از اعمال دومین سیکل خشک شدگی (د) گسیختگی نمونه‌های تثبیت شده با ۲ و ۴ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه با اعمال سومین سیکل تر شدگی

Fig. 25. Pictures of a) Failing of stabilized samples with 0.5 and 1% nanoclay at 28 days curing by applying second wetting cycle b) Stabilized samples with 2 and 4% nanoclay at 28 days curing after applying second wetting cycle c) Stabilized samples with 2 and 4% nanoclay at 28 days curing after applying second drying cycle d) Failing of stabilized samples with 2 and 4% nanoclay at 28 days curing by applying third wetting cycle



شکل ۲۶. تصاویر SEM با مقیاس ۵۰ میکرومتر (الف) نمونه تثبیت نشده (ب) نمونه تثبیت شده با ۴٪ نانورس پس از دوره عمل‌آوری ۶۰ روز

Fig. 23. SEM images with 50  $\mu\text{m}$  scale a) unstabilized sample b) stabilized sample with 4% nanoclay after 60 days of curing



شکل ۲۶. تصاویر SEM با مقیاس ۲۰ میکرومتر (الف) نمونه تثبیت نشده (ب) نمونه تثبیت شده با ۴٪ نانورس پس از دوره عمل‌آوری ۶۰ روز

Fig. 23. SEM images with 20  $\mu\text{m}$  scale a) unstabilized sample b) stabilized sample with 4% nanoclay after 60 days of curing

ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۲۷ نتایج عکسبرداری میکروسکوپی از نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با میزان ۴٪ افزودنی نانورس تحت عمل‌آوری ۶۰ روزه در مقیاس ۲۰ میکرومتر نشان داده شده است.

از پارامترهای بسیار مهم در استحکام خاک، تخلخل‌های موجود در آن می‌باشد. ناحیه‌های مشخص شده قرمز رنگ در شکل‌های ۲۶ (الف) و ۲۷ (الف) نشان دهنده این تخلخل‌ها می‌باشند و وجود این تخلخل‌ها در خاک تثبیت نشده موجب کاهش مقاومت و افزایش نشست در خاک می‌گردد. با مقایسه شکل‌های ۲۶ (الف) و ۲۷ (الف) با شکل‌های ۲۶ (ب) و ۲۷ (ب) به راحتی می‌توان تفاوت و تغییرات ایجاد شده در میزان تخلخل‌ها را بعد از تثبیت خاک مشاهده نمود بدین شکل که حضور ذرات نانورس موجب کاهش حفره‌های موجود در خاک گردیده و اتصالات بین دانه‌ای را از طریق اتصال با ذرات نانو افزایش داده و موجب پیوستگی بین ذرات گردیده و یک بافت پیوسته‌ای را ایجاد کرده است. به همین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سیمان‌تاسیون و میل چسبندگی نانورس‌ها به سایر ذرات در حضور رطوبت، موجب ایجاد ساختار متراکم‌تر و همگن‌تر می‌شود و خلل و فرج خاک را پر می‌کند. این پیوستگی می‌تواند موجب بهبود رفتار خاک گردد به نحوی که رفتار تحکیمی و مقاومت فشاری خاک را بهبود یافته و نسبت باربری خاک را نیز افزایش دهد همچنین موجب افزایش پایداری خاک را در برابر شرایط محیطی می‌گردد که این باورها با انجام آزمایش‌های تحکیم، مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا و اعمال سیکل‌های تر و خشک تایید گردیدند.

#### ۴- جمع‌بندی

در این پژوهش اثر نانورس در مقادیر مختلف و دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۶۰ روزه بر خصوصیات رفتاری خاک نرم و سست ریزدانه کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- به دلیل سطح مخصوص بالا و ذرات ریز نانورس افزایش مقادیر نانورس از ۰ تا ۴ درصد وزنی و افزایش دوره‌های عمل‌آوری سبب افزایش حد روانی، حد خمیری به میزان جزئی و شاخص خمیری خاک می‌گردد به نحوی که با افزودن ۴ درصد نانورس در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه حد روانی از ۰.۴۶/۶ به ۰.۵۱/۱۲، حد خمیری از ۰.۲۱/۲۳ به ۰.۲۲/۰۲ و شاخص خمیری از ۰.۲۵/۴۱ به ۰.۲۹/۱ افزایش یافته است.

- حضور نانورس تا ۴ درصد وزنی و دوره‌های عمل‌آوری موجب تغییر رفتار خاک از عادی تحکیم یافته به پیش تحکیم یافته می‌شود همچنین شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، میزان نشست، نفوذپذیری و تورم خاک کاهش می‌یابد. به نحوی که شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، میزان نشست، نفوذپذیری و تورم به نسبت نمونه تثبیت نشده به ترتیب ۰.۵۸، ۰.۵۹، ۰.۵۵، ۰.۶۹ و ۰.۶۲ کاهش یافته است. اما با افزودن نانورس به میزان ۸ درصد وزنی رفتار خاک روندی معکوس را در پیش گرفته و موجب افزایش شاخص فشردگی، ضریب تحکیم، نشست، نفوذپذیری و تورم خاک می‌گردد.

- حضور نانورس تا میزان ۸ درصد وزنی و دوره‌های عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش کرنش در لحظه گسیختگی



## منابع

- [1] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6) (2021) 1470-1482.
- [2] N.C. Consoli, H.P. Nierwinski, A. Peccin da Silva, J. Sosnoski, Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends, *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2) (2017) 98-102.
- [3] A. Kalhor, M. Ghazavi, M. Roustaei, M. Mirhosseini, Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 161 (2019).
- [4] M.R. Taha, Geotechnical Properties of Soil-Ball Milled Soil Mixtures, in: Z. Bittnar, P.J.M. Bartos, J. Němeček, V. Šmilauer, J. Zeman (Eds.) *Nanotechnology in Construction 3*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 377-382.
- [5] Z.H. Majeed, M.R. Taha, A review of stabilization of soils by using Nanomaterials, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2) (2013) 576-581.
- [6] M. Bahari, M. Nikookar, M. Arabani, A.K. Haghi, H. Khodabandeh, Stabilization of silt by nano-clay, in: 7th National Congress on Civil Engineering, (2013), pp. 7-8.
- [7] N. Khalid, M. Mukri, F. Kamarudin, A.H.A. Ghani, M.F. Arshad, N. Sidek, A.Z.A. Jalani, B. Bilong, Effect of Nanoclay in soft soil stabilization, in: *Second International Civil and Infrastructure Engineering Conference*, Springer, Singapore, (2015).
- [8] A.A. Sharo, A.S. Alawneh, Enhancement of the strength and swelling characteristics of expansive clayey soil using nano-clay material, in: *Geo-chicago*, (2016), pp. 451-457.
- [9] M. Abisha, S. Anushia, J. Jenitha Singh, S. Dynisha, S. Lavanya, Stabilization of weak clay soil using nanoclay, *International Journal Ijariic*, 3(5) (2017) 1476-1482.
- [10] K. Onyelowe, I. Onuoha, O. Ikpemo, F.O. Okafor, M. Maduabuchi, K.-N. Judith, P. Aguwa, Nanostructured Clay (NC) and the Stabilization of Lateritic Soil

می‌گردد همچنین تاثیر حضور نانورس بر مقاومت فشاری خاک در مقادیر ۸ درصد وزنی به نسبت ۴ درصد وزنی بسیار ناچیز می‌باشد.

● با توجه به نتایج آزمایش‌های تحکیم و مقاومت فشاری تک محوری مشخص گردید که میزان بهینه نانورس ۴ درصد وزن خشک خاک می‌باشد.

● از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا مشخص گردید که حضور میزان بهینه نانورس در خاک سبب می‌شود که نسبت باربری خاک افزایش یابد و همچنین با افزایش دوره‌های عمل‌آوری نسبت باربری خاک به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد. با افزودن میزان بهینه نانورس در دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه، مقدار CBR خاک به ۱۶/۳٪ افزایش یافته است که بیشترین تاثیر را بر نسبت باربری خاک دارد.

● با انجام آزمایش‌های صورت گرفته مشخص گردید که واکنش نانورس با خاک در ۱۴ روز ابتدایی سرعت بیشتری داشته و با افزایش دوره‌های عمل‌آوری از سرعت واکنش نانورس با خاک کاسته می‌شود. در نتیجه استفاده از این افزودنی در پروژه‌هایی که محدودیت زمانی حکم فرماست، بسیار سودمند می‌باشد.

● با اعمال سیکل‌های تر و خشک بر نمونه‌های تثبیت شده مشخص گردید که با افزودن نانورس، پایداری خاک در برابر سیکل‌های تر و خشک اعمالی افزایش می‌یابد. همچنین دوره‌های عمل‌آوری نیز موجب افزایش میزان پایداری نمونه‌های تثبیت شده می‌شود. بیشترین میزان پایداری در برابر سیکل‌های تر و خشک اعمالی، نمونه‌ی تثبیت شده با ۴٪ نانورس و تحت دوره عمل‌آوری ۶۰ روزه می‌باشد که در مقابل دو سیکل ابتدایی پایداری بیشتری را از خود نشان داد و کمتر دچار افت وزنی گردید و در سیکل سوم گسیخته شد.

● از عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص گردید که حضور ذرات نانورس موجب ایجاد تغییراتی در ساختار خاک می‌گردد به نحوی که حفره‌های موجود در خاک کاهش یافته، اتصالات بین دانه‌ای را از طریق اتصال با ذرات نانو افزایش داده و موجب پیوستگی بین ذرات گردیده و یک بافت پیوسته‌ای را ایجاد کرده است.

● با توجه به نتایج به دست آمده استفاده از نانوذرات در جهت تثبیت خاک‌های ریزدانه گزینه مناسبی می‌باشد. همچنین با توجه به این نکته که درصد‌های کمی از این افزودنی موجب بهبود خصوصیات رفتاری خاک می‌گردد می‌توان از مشکلات قیمت بالای نانوذرات و مسائل اقتصادی صرف نظر نمود.



- (2021) 1821-1834.
- [20] R. Kamgar, M. Naghani, H. Heidarzadeh, F. Nasiri, Modeling nanoclay effects on different parameters of a clayey sand, *Modeling Earth Systems and Environment*, 1 (2021) 1-14.
- [21] M.E. Hosseini, M. Oliaei, H. Heidarzadeh, Laboratory investigation of the Nano Montmorillonite clay effect on Strength and Plasticity properties of the clayey sand, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 37.2(2.2) (2021) 13-24. (In Persian)
- [22] S. Ghareh, K. Yazdani, V. Besharat, Laboratory Study of the Effect of Clay and Silica Nanoparticles on the Behavior of Silty-Clay Soils in Mashhad, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(11) (2022) 4723-4741.
- [23] P. Jiang, L. Zhou, W. Zhang, W. Wang, N. Li, Unconfined Compressive Strength and Splitting Tensile Strength of Lime Soil Modified by Nano Clay and Polypropylene Fiber, *Crystals*, 12(2) (2022) 285.
- [24] G. Zappia, C. Sabbioni, C. Riontino, G. Gobbi, O. Favoni, Exposure tests of building materials in urban atmosphere, *Science of the Total Environment*, 224(1-3) (1998) 235-244.
- [25] R.S. Shiel, M.A. Adey, M. Lodder, The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil, *Journal of Soil Science*, 39(1) (1998) 71-80.
- [26] W.H. Utomo, A.R. Dexter, Age hardening of agricultural top soils, *Journal of Soil Science*, 32(3) (1981) 335-350.
- [27] ASTM Standard D 422, Standard test method for particle-size analysis of soils, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (2002).
- [28] ASTM Standard D 854, Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (2002).
- [29] ASTM Standard D 698, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, for Construction Purposes, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 22(10) (2017) 4177-4196.
- [11] K. Badv, S. Hosseinzadeh, the Effect of admixing of Nanoclay to Nazloo Clay and Firoozkouh sand for clayey liner applications, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(4.1) (2018) 152-133. (In Persian)
- [12] A. Bagherzadeh Khalkhali, I. Safarzadeh, H. Rahimi Manbar, Investigating the Effect of Nanoclay Additives on the Geotechnical Properties of Clay and Silt Soil, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 3(2) (2019) 65-77.
- [13] M. Shahidi, F. Farrokhi, F. Asemi, Changes in physical and mechanical properties of gas oil-contaminated clayey sand after addition of clay Nanoparticles, *Journal of Environmental Engineering*, 145(4) (2019) 4019004.
- [14] M. Zamanian, F. Qahremani, Investigating the effect of Portland cement and Nano-clay on the collapse potential and consolidation indexes of the collapsible soil, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(6) (2020) 1439-1454.
- [15] M. Karumanchi, G. Avula, R. Pangi, S. Sirigiri, Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: Nanoclay, *Materials Today: Proceedings*, 33 (2020) 232-238.
- [16] A. Ghasemipanah, R.Z. Moayed, H. Niroumand, Effect of nanobentonite particles on geotechnical properties of Kerman clay, *International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, 14(1) (2020) 34-39.
- [17] M.O. Karkush, A.D. Al-Murshedi, H.H. Karim, Investigation of the impacts of nano-clay on the collapse potential and geotechnical properties of gypseous soils, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14(4), (2020).
- [18] H. Sadighi, M.A. Roshan Zamir, Nanoclay Stabilization of Crude Oil Contaminated Soils, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 4(2) (2020) 175-184.
- [19] A.R. Mazaheri, Evaluation of the effect of Nano-clay and Pressure change on the self-healing properties of clay soils, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5)

- American Society of Testing and Materials, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (1999).
- [33] ASTM Standard D 559, Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (2003).
- [34] ASTM Standard D 2435, Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, (2011).
- (2007).
- [30] ASTM Standard D 4318, Standard test method for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (2000).
- [31] ASTM Standard D 2166, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, (2000).
- [32] ASTM Standard D 1883, Standard test method for california bearing ratio of laboratory-compacted soils.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Fathi, M. R. Elyasi, J. Khazaei, *Investigating and studying the effect of Montmorillonite Nanoclay on consolidation and strength behavior of soft and loose fine-grained soil (Case study: fine-grained soil of Kermanshah Faculty of Agriculture)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(12) (2024) 2441-2472.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22016.7880](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22016.7880)



