



Effect of Water-Soluble Polymers and Nanoparticles on Physical, Mechanical, and Inflationary Properties of Clay

G. Moradi^{1,*}, S. Abbasi², A. Abbasnejad³

¹ Associated Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

² MSc in Geotechnical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

³ Assistant Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

ABSTRACT: In the present study, to investigate and compare the effect of Nanosilica nanoparticles and water-soluble polymer of cationic polyelectrolyte on a set of physical, mechanical and chemical properties of CL clay, a series of laboratory tests were performed on untreated soil samples, treated with Nanosilica and treated with cationic polyelectrolyte. Nanosilica was added to soil with 0.5, 1, 2 and 3% dry weight of soil and cationic polyelectrolyte with concentrations of 3, 6, 9 and 12 gr/liter based on optimum water content and their effects on the soil details have been investigated in 3, 7, 14 and 28 days of processing. Despite the differences in the effectiveness mechanisms, these materials showed similar effects on the variety of soil samples characteristics in this study. By adding of both materials to the soil, optimum water content, liquid limit, unconfined compressive strength, and water retaining potential of soil have been increased and Maximum dry density and free swelling percentage of soil decreased remarkably. On the other hand, regarding small changes of plastic limit and increasing of liquid limit, plasticity index increases. Also, for various amounts of additives, there is no significant change in soil pH.

Review History:

Received: 2019-06-02

Revised: 2019-06-25

Accepted: 2019-10-03

Available Online: 2019-10-12

Keywords:

Clay

Cationic polyelectrolyte

Nano-silica

Physical and Mechanical

specifications

Swelling

1. INTRODUCTION

Soil stabilization is a collective term for any physical, chemical, or biological method, or any combination of such methods, which is employed to improve certain properties of a natural soil to make it adequately serve an intended engineering purpose over the service life of an engineering facility [1]. Nontraditional soil stabilizers can be classified as one of three types [2]:

- Ionic stabilizers, reported to work through cation exchange within the clay mineral
- Enzyme stabilizers, described as consisting of various organic catalysts
- Polymer stabilizers, comprised of various organic and inorganic polymers

Effect of various organic and inorganic polymers on different properties of various soils has been investigated in many studies [3,4], also according to studies in recent years on usage of Nanoparticles in soil stabilizing. Nanoparticles also can be regarded as the fourth group of soil stabilizers [5,6]. Although these materials are not cohesive but it is expected to enter the soil and decrease the distance between soil particles and finally make it reinforced in Nano scale [7].

In this paper, the effects of cationic polyelectrolyte and Nano-silica as soil stabilizers were investigated and compared. Nano-silica was added to soil with 0.5, 1, 2 and 3% dry weight of soil and cationic polyelectrolyte with concentrations

of 3, 6, 9 and 12 gr/liter based on optimum water content. Then the effect of different percentages of these materials on compaction, Atterberg limits, unconfined compressive strength, stiffness, free swelling, pH and soil moisture preservation potential was investigated.

2. MATERIALS AND METHODS

In the present study, a set of materials including soil and chemicals have been used, and their specifications are presented respectively. Basic characteristics of the clay used in this experiment are presented in Table 1.

Technical details of cationic polyelectrolyte or Polyacrylamide (PAM) are presented in Table 2, and characteristics of Nano-silica are presented in Table 3 and Table 4.

Nano-silica was added to soil with 0.5, 1, 2 and 3% dry weight of soil and cationic polyelectrolyte with concentrations of 3, 6, 9 and 12 gr/liter based on optimum water content. Then the effect of different percentages of these materials on compaction, Atterberg limits, unconfined compressive strength, stiffness, free swelling, pH and soil moisture retaining potential were investigated. All of tests conducted according to ASTM standards.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Compaction

According to Figure 1(a) with the addition of Nano-

*Corresponding author's email: gmoradi@tabrizu.ac.ir



Table 1. Engineering Properties of Clay

Specific gravity (G_s)	2.75
Liquid limits, (%)	46
Plastic limits, (%)	22
Plasticity index, (%)	24
Optimum Moisture Content, (%)	20
Maximum dry unit weight, (kN/m^3)	17.42
USCS	CL
pH	7.32

Table 2. Properties of Cationic polyelectrolyte

Characteristics	Off white, granular powder
Degree of charge	medium
pH (5% solution)	3.0 – 5.0
Bulk density	750 ± 50
Viscosity @ 25°C/77°F	
0.10 %	180 cps
0.25 %	400 cps
0.50 %	800 cps
1.00 %	2000 cps

Table 3. Properties of Nano-silica

Purity	+99 %
APS	11-13 nm
SSA	200 m^2/gr
Color	white
Bulk density	<0.10 gr/cm^3
True density	2.4 gr/cm^3

Table 4. Chemical Composition of Nano-silica

Compound	Magnitude
SiO_2	>99%
Ti	<120ppm
Ca	<70ppm
Na	<50ppm
Fe	<20ppm

silica, soil maximum dry density decreased, and optimum moisture content of the soil increased. One of the reasons for decreasing the maximum dry density due to the addition of Nano-silica to the soil is the high density of soil particles relative to the Nano-silica particles. This reduction also can be stem from increasing of fine-grained materials and consequently increasing of soil specific surface area and more water absorption by soil and Nano-silica mixture. On the other hand, as shown in Figure 1(b) It is observed that adding PAM causes a decrease in maximum dry density and an increase in optimum moisture. The main reason for increasing optimum moisture is the hydrophilic property of

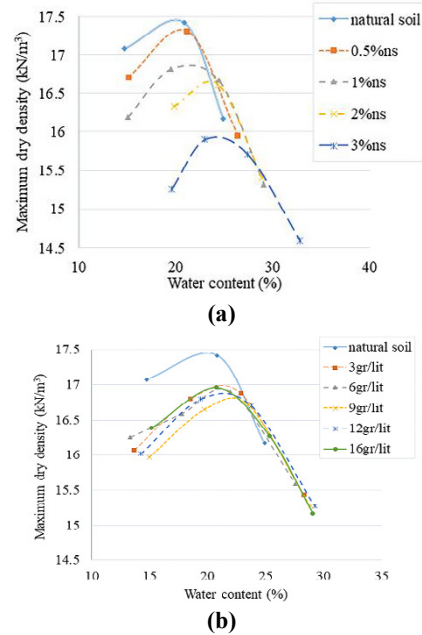


Fig. 1. soil density diagrams for different percentages of (a) Nano-silica and (b) cationic polyelectrolyte.

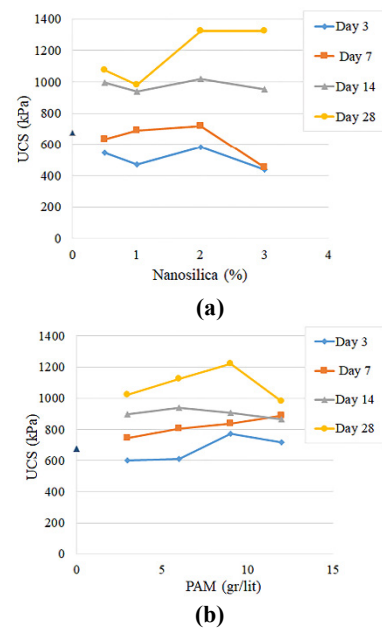


Fig. 2. compressive strength changes diagram by changing amounts of (a) Nano-silica and (b) PAM.

PAM, which is led to absorb much water and consequently rising of optimum moisture. Absorbed water losses a part of the applied energy, and thereby the maximum dry density of PAM stabilized soil reduces.

3.2 Atterberg limits

By increasing Nano-silica amount, both liquid limit and plastic limit of soil increase. however, liquid limit increment rate is more than the plastic limit, and soil plasticity index which is liquid and plastic limit difference increases a little. On the other hand, with increasing PAM to the soil, the liquid

and plastic limits of the soil increase. The hydrophilic property of PAM polymer is the main reason for rising Atterberg limits [8].

3.3 Unconfined compressive strength

Unconfined Compressive strength of control sample (not modified) is equal to 674.5 KPa which is marked with a blue triangle on the vertical axis in Figure 2. According to Figure 2(a), by increasing of the percentage of Nano-silica in the soil to an optimal value of 2%, the strength of the samples is increases and decreases again for 3%. The reason for the loss of UCS of the specimens after an optimal 2% is that, with the excessive increase in the nanoparticles, they begin to accumulate together and form masses in the soil, and due to the low weight of the nanoparticles in comparison with soil particles, Reduces the volumetric density of the soil. On the other hand, according to Figure 2(b), UCS of the polymer containing specimens increases with increasing concentration of the solution to an optimum amount of 9 gr/lit, and then interrupts and decreases. it is especially evident about 28-day specimens.

4. CONCLUSIONS

The test results can be summarized as follows:

- By increasing the amount of Nano-silica and PAM in the soil, the maximum dry density gradually decreased and optimum moisture content of the soil increased.
- Both Nano-silica and PAM increased the liquid and plastic limits. Nano-silica also increased the plasticity index with a significant increase in the liquid and plastic limits.
- Both materials had a positive effect on the UCS of the soil and, for optimal values, soil strength increased about 100%. Regarding the stress-strain curves of the samples, Nano-silica, in spite of increasing soil strength, increased stiffness. Although PAM had little effect on the strain, the PAM also increased soil stiffness by increasing the strength of the samples.

- Both materials had a positive effect on the swelling of the clay and reduced the percentage of soil free swelling.
- For various amounts of additives, there was no significant change in soil pH.
- Natural soil samples lost 30% of their moisture after 28 days, while samples containing nano-silica, 8-10% and samples containing PAM lost 13-18% of their moisture after 28 days.
- In order to reduce inflation and increase soil resistance, 2% Nano-silica and 9 gr/lit PAM were obtained as the optimal amount.

5.

REFERENCES

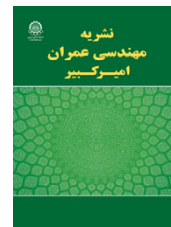
- [1]Fang H. Y. (1991). Foundation engineering handbook, Chapman & Hall, New York, NY10119.
- [2]Rauch, A. F., et al. (2003). Evaluation of nontraditional soil and aggregate stabilizers: A summary, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin.
- [3]Naeini, S. A., et al. (2012). "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer." KSCE Journal of Civil Engineering 16(6): 943-949.
- [4]Mirzababaei, M., et al. (2017). "Polymers for Stabilization of Soft Clay Soils." Procedia Engineering 189: 25-32.
- [5]Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A., & Kutanaei, S. S. (2019). Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers. Construction and Building Materials, 211, 1094-1104.
- [6]Shahidi, M., Farrokhi, F., & Asemi, F. (2019). Changes in Physical and Mechanical Properties of Gas Oil-Contaminated Clayey Sand after Addition of Clay Nanoparticles. Journal of Environmental Engineering, 145(4), 04019004.
- [7]Correia, A. A. S. and M. G. Rasteiro (2016). "Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization." Procedia Engineering 143: 1252-1259.
- [8]Kim, S., Palomino, A.M., Colina, C.M., 2012. Responsive polymer conformation and resulting permeability of clay-polymer nanocomposites. Mol. Simul. 38 (8-9), 723-734.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

GH. Moradi, S. Abbasi, A. Abbasnejad, Effect of Water-Soluble Polymers and Nanoparticles on Physical, Mechanical, and Inflationary Properties of Clay, Amirkabir J. Civil Eng., 52(11) (2021) 689-692.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16472.6242](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16472.6242)





بررسی و مقایسه‌ی تأثیر پلیمرهای محلول در آب و نانوذرات بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و تورم‌پذیری خاک رس

غلام مرادی^{۱*}، سجاد عباسی^۲، علیرضا عباس‌نژاد^۳

^۱ دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۱۲

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۰۴

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۷-۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۷-۲۰

کلمات کلیدی:

خاک رس

پلی الکترولیت کاتیونی

نانوسیلیکا

مشخصات فیزیکی و مکانیکی

تورم و pH

خلاصه: بدون تردید یکی از مقدماتی‌ترین و مهم‌ترین اصول در اجرای طرح‌های عمرانی، داشتن زمینی مقاوم برای احداث بناست و لازمه‌ی آن وجود خاکی مناسب، با ویژگی‌های ژئوتکنیکی مطلوب در محل است. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در خصوص استفاده از مواد شیمیایی نوین از جمله پلیمرهای شیمیایی و نانو ذرات به منظور اصلاح خاک‌های ریزدانه صورت گرفته است. استفاده از پلیمرهای آلی در سالیان اخیر اهمیت فراوانی یافته است و این پلیمرها توانایی خود را برای آنکه به عنوان ماده‌ی افزودنی جهت تثبیت خاک استفاده شوند، نشان داده‌اند. از سوی دیگر در سال‌های اخیر گام‌های بزرگی در زمینه فناوری نانو برداشته شده است و پیشرفت‌های فراوانی مبتنی بر فناوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک اتفاق افتاده است. در این مقاله از دو ماده نانوسیلیکا و پلی الکترولیت کاتیونی برای بهسازی و تثبیت خاک استفاده شده است، این مواد با درصد‌های مختلف به خاک اضافه شده و تأثیر آن‌ها بر مشخصات خاک در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش هر دو ماده به خاک درصد رطوبت بهینه، حد روانی، مقاومت فشاری محدود نشده و پتانسیل حفظ رطوبت خاک افزایش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد تورم آزاد نمونه‌های خاک کاهش نشان داده است، از سویی با توجه به تغییرات ناچیز حد خمیری، شاهد افزایش شاخص خمیری خاک نیز هستیم.

۱- مقدمه

یک سازه مهندسی را به خوبی تأمین نماید [۱]. تثبیت ممکن است با مخلوط کردن خاک طبیعی و مواد تثبیت‌کننده به منظور ایجاد یک مخلوط همگن یا با اضافه کردن یک ماده تثبیت‌کننده به یک توده خاک طبیعی و اجازه دادن به آن نفوذ در حفره‌های خاک تحصیل شود [۲]. و تثبیت شیمیایی عبارت است از اختلاط خاک با یک یا ترکیبی از مواد افزودنی به شکل پودر، محلول یا مایع، برای اهداف کلی بهبود یا کنترل حجم، مقاومت و رفتار تنش-کرنش، نفوذپذیری و دوام خاک [۳]. امروزه تثبیت‌کننده‌های شیمیایی را به دو دسته کلی تقسیم می‌کنند:

الف) تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی

ب) تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نوین

تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی عبارتند از ترکیبات مختلف

بسیاری از طرح‌های اجرایی مانند جاده‌سازی، احداث شبکه‌های آبیاری و زهکشی و سد‌های خاکی ممکن است با کمبود مصالح خاکی مناسب مواجه شوند و لذا ضرورت دارد که مصالح موجود اصلاح شوند. خاک رس به دلیل مقاومت و ظرفیت باربری کم و رفتار نامناسب و قابلیت تورم در حضور آب، یکی از خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌ها به خصوص راهسازی و سدسازی می‌باشد. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس، تثبیت خاک است. تثبیت خاک یک اصطلاح رایج برای هر نوع روش فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی، یا هر ترکیبی از این روش‌ها برای بهبود خصوصیات معینی از یک خاک طبیعی است تا اهداف مهندسی پیش‌بینی شده برای دوره عمر *نویسنده عهده‌دار مکاتبات: gmoradi@tabrizu.ac.ir



آهک، سیمان، خاکستر بادی و انواع مواد قیری. تحقیقات گسترده‌ای در مورد استفاده از این مواد به منظور تثبیت و بهسازی خاک صورت پذیرفته است و اثربخشی این تثبیت‌کننده‌های سنتی در بسیاری از کاربردها آشکار شده است. با این وجود، تکنیک‌های تثبیت سنتی اغلب به زمان طولانی عمل‌آوری و مقدار نسبتاً زیاد از مواد افزودنی برای بهبود قابل‌توجه مقاومت نیاز دارند. از این رو دانشمندان به دنبال استفاده از مواد و روش‌های جدید برای تثبیت و بهبود مشخصات مختلف خاک هستند. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نوین را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: ۱. تثبیت‌کننده‌های یونی ۲. تثبیت‌کننده‌های آنزیمی و ۳. تثبیت‌کننده‌های پلیمری [۴]. البته با توجه به مطالعاتی که در سال‌های اخیر بر روی کاربرد نانوذرات در تثبیت خاک صورت پذیرفته و نیز امید به گسترش روش‌های تولید نانوذرات و دسترسی آسان‌تر به این مواد، می‌توان نانوذرات را به عنوان دسته چهارم تثبیت‌کننده‌های نوین معرفی نمود. این مواد گرچه چسباننده نیستند، اما در یک خاک وارد می‌شوند و انتظار می‌رود که فاصله‌ی بین ذرات را کاهش داده و خاک را در ابعاد نانو، مسلح نمایند. این امر منجر به ایجاد ساختاری سخت‌تر و مقاوم‌تر برای خاک می‌شود [۵]. این در حالی است که پلیمرها اغلب با ذرات رس خاک واکنش شیمیایی نشان می‌دهند. میزان اندرکنش خاک و پلیمر به خواص پلیمر و خواص خاک بستگی دارد. آن دسته از خواص پلیمر که مهم هستند عبارتند از: نوع و مقدار بار سطحی، شکل پلیمر، وزن مولکولی و اندازه مولکولی. خواص مهم خاک نیز عبارتند از: نوع و مقدار رس خاک، نیروهای یونی خاک، نوع یون‌های موجود در ترکیب خاک و pH [۶]. بیشتر مطالعات به منظور بررسی کاربرد نانومواد در تثبیت خاک به موادی چون نانوسیلیکا، نانو کلئید سیلیکا و نانورس، به دلیل عملکرد بهتر این مواد در تثبیت خاک برمی‌گردد. یونکورا^۱ و میوا^۲ در سال ۱۹۹۲ مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای را با استفاده از نانوسیلیس افزایش دادند [۷]. در همین سال نول^۳ و همکاران از کلئید سیلیکا جهت بهبود مقاومت تحکیمی و کاهش نفوذپذیری خاک استفاده کردند [۸]. در سال ۲۰۰۴، آزمایشات ژانگ^۴ نشان داد که وجود نانوساختارها در خاک موجب افزایش حدود اتربرگ می‌شود [۹]. در سال ۲۰۰۷ ژانگ به بررسی اثر تحکیمی نانوذرات در

1 Yone kura
2 Miwa
3 Noll
4 Zhang

خاک پرداخت. نتایج تحقیقات او نشان داد که با افزودن نانوذرات به خاک، ثابت تحکیم در نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ یینگ^۵ و طاها تأثیر نانو لوله‌های کربنی را روی رفتار ژئوتکنیکی خاک کائولینیت بررسی کردند. آزمایش حدود اتربرگ را برای محدوده ۰ تا ۰/۵ درصد نانو و آزمایش تحکیم را برای محدوده ۰ تا ۱ درصد نانو انجام دادند. افزایش نانو لوله‌های کربنی در مخلوط، حدود خمیری و روانی و دامنه خمیری را افزایش داد. همچنین با افزودن نانوذرات مقاومت فشاری محدود نشده نیز افزایش پیدا کرد [۱۱]. در سال ۲۰۱۴ زائد^۶ و همکاران اثر افزودن سه ماده نانو مس اکسید، نانو منیزیم اکسید و نانو رس بر خواص زمین‌شناسی خاک نرم را مورد بررسی قرار دادند. براساس این مطالعات هر سه ماده، حد روانی، حد خمیری، شاخص پلاستیسیته و انقباض خطی خاک را کاهش داد. وزن مخصوص خشک حداکثر با افزایش درصد نانو مواد افزایش یافته و رطوبت بهینه کاهش یافت. همین‌طور با عبور از مقدار بهینه نانو مواد، افزایش مقدار نانو مواد باعث تأثیر منفی بر مشخصات ژئوتکنیکی مخلوط خاک و نانو می‌شود [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر توسط بهمنی و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر روی تأثیر نانوذرات نانوسیلیکا بر مشخصات خاک پسماند تثبیت شده با سیمان، مشاهده شد که نانوسیلیکا تأثیر مناسبی روی هدایت هیدرولیکی و تراکم پذیری خاک داشته و از طرف دیگر اضافه کردن ۰/۴ درصد نانوسیلیکا به خاک تثبیت شده با سیمان مقاومت فشاری آن را تا ۸۰ درصد افزایش می‌دهد [۱۳]. آقای جانعلیزاده و سلیمانی در سال ۲۰۱۷ در یک برنامه آزمایشی تأثیر نانوسیلیکا بر ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های مکانیکی ماسه تثبیت‌شده با سیمان را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که وقتی محتوای نانوسیلیکا به مقدار بهینه ۰/۸٪ وزن سیمان افزایش می‌یابد، UCS نمونه‌ها بهبود یافته و پس از آن با افزایش مقدار نانوسیلیکا از ۰/۸٪ به ۰/۱۲٪ مقدار UCS کاهش می‌یابد. همچنین نتایج SEM نشان داد که اضافه کردن نانوذرات باعث ایجاد مخلوط ماسه-سیمان با میکروساختار فشرده‌تر می‌شود [۱۴]. آقای زمردیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر نانو رس و نانو سیلیکا بر افزایش مقاومت خاک رس در دو حالت تمیز و آلوده به مواد نفتی را بررسی کردند. در این آزمایشات کاهش اساسی و فزاینده در مقاومت به ازای مقادیر بیش از ۸ درصد ماده‌ی نفتی اتفاق افتاد. که پس از تثبیت، خاک CL تمیز

5 Ying
6 Zaid

خمیری مختلف با مقادیر مختلف از پلیمر (۲، ۳، ۴ و ۵٪) مخلوط شده و در درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر متراکم شدند. نمونه‌های تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده قرار گرفتند تا مقاومت آن‌ها برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف تعیین شود. نتایج آزمایشات نشان داد که پلیمر مایع رفتار مقاومتی خاک‌های رسی غیراشباع را به طور اساسی بهبود می‌بخشد. همچنین، افزایش شاخص خمیری باعث کاهش مقاومت فشاری محدودنشده می‌شود [۳]. نتایج مطالعه آقای میرزابابایی و همکارانشان بر روی نمونه‌های مقاومت فشاری محدود نشده نشان داد که پلیمر PVA می‌تواند مقاومت فشاری محدود نشده و شکل پذیری خاک رس را به طور اساسی بهبود بخشد. مقدار بهینه پلی وینیل الکل به وزن مخصوص خشک حداکثر، نسبت تخلخل خاک و درصد رطوبت وابسته است [۲۰].

در این مقاله به بررسی و مقایسه تأثیر پلی‌الکترولیت کاتیونی و نانوسیلیکا به عنوان تثبیت‌کننده‌های خاک خواهیم پرداخت. نانوسیلیکا با مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزن خشک خاک و پلی‌الکترولیت کاتیونی با غلظت‌های ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۰/۱۲ گرم بر لیتر و بر اساس رطوبت بهینه به خاک اضافه شده‌اند. در ادامه تأثیر درصدهای مختلف این مواد بر تراکم‌پذیری، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده، سختی، تورم آزاد، pH و پتانسیل حفظ رطوبت خاک را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲- مواد و مصالح

در تحقیق حاضر، مجموعه‌ای از مصالح شامل خاک و مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه مشخصات آن‌ها، به ترتیب ارائه می‌گردد.

۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش، از نوع رس بوده که به صورت مرطوب تهیه شده است. خاک رس استفاده شده، متعلق به منطقه آناختون تبریز می‌باشد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک، به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.

به ازای ۱٪ وزن خاک، نانورس و ۱/۵ درصد وزن خاک، نانوسیلیکا، بیشترین بهبود مقاومت را نشان داد. از سوی دیگر در مقایسه با نانوسیلیکا، نانورس تأثیر بیشتری در بهبود سختی و مقاومت فشاری تک محوری هر دو خاک آلوده و تمیز نشان داد [۱۵]. اما هم‌زمان با انجام مطالعات بر روی نانوذرات، جستجو برای یافتن پلیمرهای مؤثرتر و با زمان اثربخشی کمتر برای تثبیت خاک ادامه داشت. الدهام^۱ و همکارانش طی سال‌های ۱۹۴۶ تا ۱۹۷۷، پژوهش‌های کاملی بر روی تثبیت‌کننده‌های شناخته شده تا آن زمان انجام دادند. گزارش آن‌ها در ارتباط با کاربرد اسیدها، قیر، سیمان، آهک، رزین‌ها، نمک‌ها و دیگر محصولات است که دارای پتانسیل تثبیت‌کنندگی هستند. طبق گزارش آن‌ها رزین‌های پلیمری بیشترین افزایش را در مقاومت فشاری مصالح ماسه‌ای نشان دادند [۱۶]. زرنبرگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۴ اثر تثبیت‌کننده‌های نوین بر خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از اوره، فرمالدهید و اوره فرمالدهید به عنوان تثبیت‌کننده استفاده کردند. نتایج نشان دادند که افزایش ۲٪ اوره، فرمالدهید و ملامین و یا ۲/۵٪ اوره فرمالدهید مقاومت خاک ماسه‌ای را به ۲/۴ مگاپاسکال می‌رساند، در صورتی که برای انجام پروژه‌های راه‌سازی رسیدن به مقاومت ۱/۷ مگاپاسکال کافی است [۱۷]. والسکوئز^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۶ مقاومت برشی و ضریب برجهندگی دو نوع خاک، یکی با نشانه خمیری ۹/۴ و دیگری با نشانه خمیری ۱۵/۲ را که با پلیمر تثبیت شده بودند، بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که ضریب برجهندگی نمونه‌های تثبیت شده بسیار بیشتر از نمونه‌های کنترل است که میزان این اختلاف به نوع خاک و میزان پلیمر بستگی دارد [۱۸]. جین لیو^۴ در سال ۲۰۱۰، رفتار خاک رس تثبیت شده با پلیمر آلی STW را بررسی نمود. در این پژوهش مقاومت تک‌محوری افزایش یافته و تغییرات اصلی در ۲۴ ساعت اول اتفاق افتاد. با افزایش مقدار پلیمر، مقاومت، پایداری در آب و مقاومت فرسایشی افزایش یافت، اما در مورد زاویه اصطکاک تغییرات محسوسی مشاهده نشد. سرانجام یک آزمایش صحرایی انجام شد و نتایج نشان داد که آزمایش با STW بر روی رس‌های شیب‌دار مؤثر است [۱۹]. در سال ۲۰۱۲، نائینی و همکاران آزمایش‌هایی را برای بررسی تأثیر شاخص خمیری و درصد پلیمر مایع بر مقاومت فشاری محدودنشده خاک رس انجام دادند. سه نمونه خاک رس با شاخص‌های

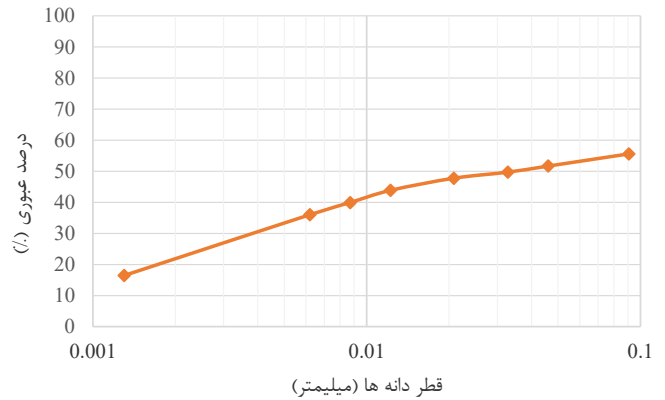
۲-۲- پلی‌الکترولیت کاتیونی یا پلی‌آکریلامید (PAM)

پلی‌الکترولیت کاتیونی یک منعقدکننده کاتیونی به شکل پودر

1 Oldham
2 Zornberg
3 Velasquez
4 Jin Liu

جدول ۳: مشخصات فنی نانو سیلیکا
Table 3. Technical Properties of Nano-silica

۹۹+	درصد خلوص (%)
۱۱-۱۳	اندازه ذرات (nm)
۲۰۰	سطح ویژه (m ² /g)
سفید	رنگ
<۰/۱	دانسیته ظاهری (g/cm ³)
۲/۴	دانسیته واقعی (gr/cm ³)



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه
Fig. 1. Grain Size Distribution of Natural Soil.

جدول ۴: عناصر تشکیل‌دهنده پودر نانو سیلیکا
Table 4. Chemical Composition of Nano-silica

مقدار	ترکیب
>99%	SiO ₂
<120ppm	Ti
<70ppm	Ca
<50ppm	Na
<20ppm	Fe

جدول ۱: ویژگی‌های خاک
Table 1. Engineering Properties of Clay

خاک رس	ویژگی خاک
۲/۷۵	توده ویژه (G _s)
۴۶	حد روانی (LL) (%)
۲۲	حد خمیری (PL) (%)
۲۴	نشانه خمیری (PI) (%)
CL	طبقه‌بندی متحد
A-6	طبقه‌بندی آشتو
۱۷/۴۲	وزن مخصوص حداکثر (KN/m ³)
۲۰	رطوبت بهینه (%)

ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی پلی الکترولیت کاتیونی
Table 2. Technical Properties of Cationic polyelectrolyte

Characteristics	Off white, granular powder
Degree of charge	medium
pH (5% solution)	۳.۰ - ۵.۰ @ ۲۵°C/۷۷°F
Bulk density	۷۵۰ ± 50
Viscosity @ 25°C/77°F	
۰.۱۰ %	۱۸۰ cps
۰.۲۵ %	۴۰۰ cps
۰.۵۰ %	۸۰۰ cps
۱.۰۰ %	۲۰۰۰ cps

۳-۲- نانو سیلیکا

این ماده به شکل پودر سفید رنگ تهیه و به صورت جامد به خاک اضافه شده است. مشخصات فنی این ماده در جدول ۳ و جدول ۴ آمده است.

۳-روش‌ها

۱-۳- تراکم

تراکم عبارت است از کاهش حجم خاک از طریق خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیروی مکانیکی، که به منظور افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذپذیری خاک انجام می‌شود. خاک رس مورد مطالعه بعد از دو روز قرارگیری در گرمخانه، کوبیده شده و از الک شماره ۴ عبور داده شد و بلافاصله پس از مخلوط شدن با مقادیر مختلف تثبیت‌کننده‌ها، مطابق با استاندارد (ASTM D698 (2010)

سفید رنگ می‌باشد که پس از تهیه به شکل پودر، مقادیر مختلف این ماده در آب مقطر حل شده و محلول‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ گرم بر لیتر این پلیمر جهت استفاده در آزمایشات مربوط به پژوهش حاضر، تهیه شد. مشخصات فنی پلیمر مورد استفاده، در جدول ۲

[۲۱] تحت آزمایش تراکم قرار گرفت.

۲-۳- حدود اتربرگ

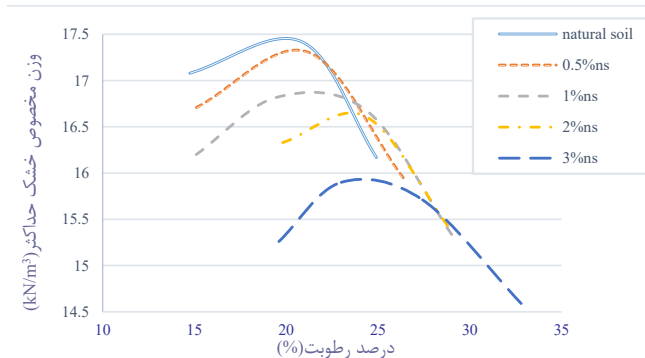
خاک عبوری از الک ۴۰ پس از مخلوط شدن با مقادیر مختلف مواد افزودنی و اضافه شدن رطوبت، به مدت ۲۴ ساعت در داخل نایلون قرار گرفت تا آب به خوبی و به صورت یکنواخت جذب ذرات خاک شود. پس از گذشت یک روز نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D4318 (2008) [۲۲]، تحت آزمایش قرار گرفته و مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی به دست آمد.

۳-۳- مقاومت فشاری محدود نشده و پتانسیل حفظ رطوبت

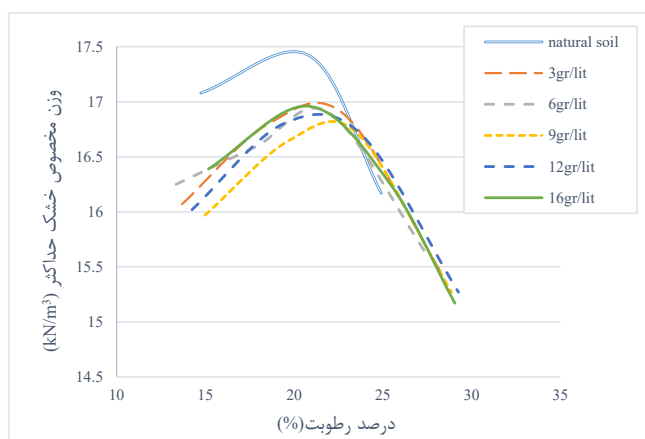
نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده پس از تهیه، به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در داخل نایلون و در دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. پس از طی زمان عمل‌آوری، مطابق استاندارد ASTM D2166 (2006) [۲۳] نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و مقادیر حداکثر مقاومت نمونه‌ها و منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمد. همچنین آزمایش تعیین درصد رطوبت برای تمامی نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام گرفت و تغییرات رطوبت خاک در بازه‌های ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای نمونه‌های حاوی هر دو ماده‌ی نانوسیلیکا و PAM انجام گرفت تا با انجام مقایسه مشخص شود، کدام ماده تغییرات رطوبت کمتری در بازه ۲۸ روزه از خود نشان می‌دهند و اینکه نسبت به خاک طبیعی چه وضعیتی خواهند داشت.

۳-۴- تورم آزاد

تورم در تعریف عبارت است از واکنش فیزیکی-شیمیایی خاک و محیط. مقدار تورم بستگی کامل به شدت نیروی جاذبه و دافعه‌ی فیزیکی و شیمیایی دارد. ساختمان توده‌ی رس، ساختمان شبکه بلوری و ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در بروز پدیده تورم نقش بسزایی ایفا می‌کند. نوع کانی رس، نوع یون موجود در خاک و شاخص خمیری خاک نیز عواملی هستند که بر میزان تورم خاک تأثیرگذارند [۲۴]. از مشخص‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری درصد تورم و فشار تورم، روش استاندارد ASTM D4546-96 [۲۵] می‌باشد، بدین صورت که خاک باید به صورت جانبی محدود شده و تغییرات حجم به



(الف)



(ب)

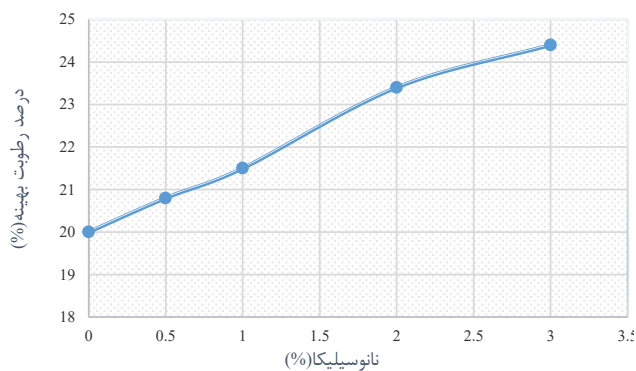
شکل ۲: منحنی‌های تراکم خاک با درصدهای مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

Fig. 2. soil density diagrams for different percentages of (a) Nano-silica and (b) cationic polyelectrolyte.

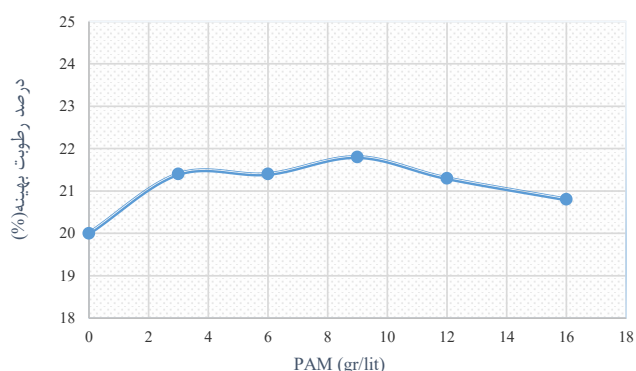
صورت محوری انجام می‌گیرد و نمونه باید به آب آزاد دسترسی داشته باشد. در این مطالعه، نمونه‌ها پس از تهیه تحت زمان عمل‌آوری ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفته و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه تحکیم یک بعدی قرار گرفتند، تا تغییرات حجم خاک در فواصل زمانی مختلف ثبت گردد.

۳-۵- pH

pH یا واکنش خاک اصطلاحی است که خاصیت اسیدی یا بازی خاک را نشان می‌دهد، pH خاک یکی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی برجسته محلول خاک بوده و در خواص فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی آن تأثیر وافر دارد. بسیاری از واکنش‌های شیمیایی و زیست‌شیمیایی خاک تنها در pH مشخصی از آن رخ می‌دهد. در این تحقیق، نمونه‌ها برای آزمایش pH مطابق با استاندارد ASTM D4972-95 [۲۶]، با نسبت‌های مشخص شده با مواد مضاف مخلوط



(الف)



(ب)

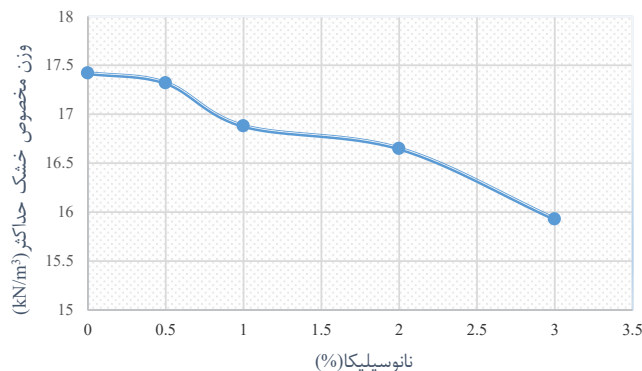
شکل ۴: منحنی تغییرات رطوبت بهینه نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی الکترولیت کاتیونی.

Fig. 4. optimum moisture contents for different amounts of (a) Nano-silica and (b) cationic polyelectrolyte.

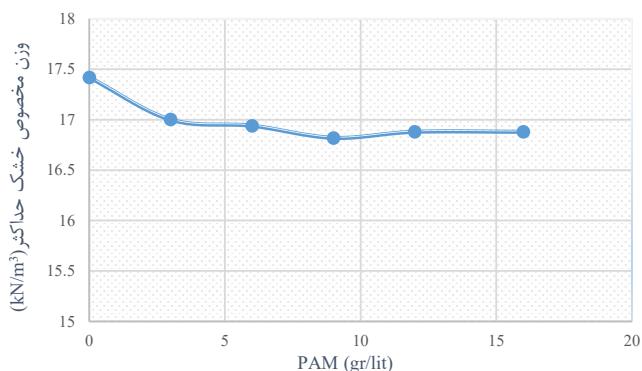
خاک نسبت به دانه‌های نانوسیلیکا است. همچنین این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش مصالح ریزدانه و در نتیجه افزایش سطح ویژه خاک و جذب آب بیشتر به وسیله مخلوط خاک و نانوسیلیکا باشد؛ به این صورت که با افزایش رطوبت بهینه، آب کم‌کم جای ذرات خاک را گرفته و به دلیل وزن مخصوص کم‌تر آب نسبت به مصالح مصرفی، حداکثر دانسیته خشک نیز کاهش می‌یابد.

همچنین با توجه به منحنی شکل ۴-ب نیز می‌توان دریافت که با افزایش نانوسیلیکا به خاک، رطوبت بهینه خاک افزایش پیدا می‌کند. با اضافه نمودن نانوسیلیکا به خاک رس، سطح ویژه مخلوط خاک و نانوسیلیکا افزایش یافته و رطوبت مورد نیاز برای روغن کاری ذرات افزایش پیدا می‌کند.

از سوی دیگر، مطابق شکل ۳-الف، با اضافه شدن پلی الکترولیت کاتیونی به خاک، به طور کلی وزن مخصوص خشک حداکثر خاک نسبت به خاک طبیعی، کاهش می‌یابد. با این وجود، در خاک‌های



(الف)



(ب)

شکل ۳: منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک حداکثر نسبت به مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی الکترولیت کاتیونی.

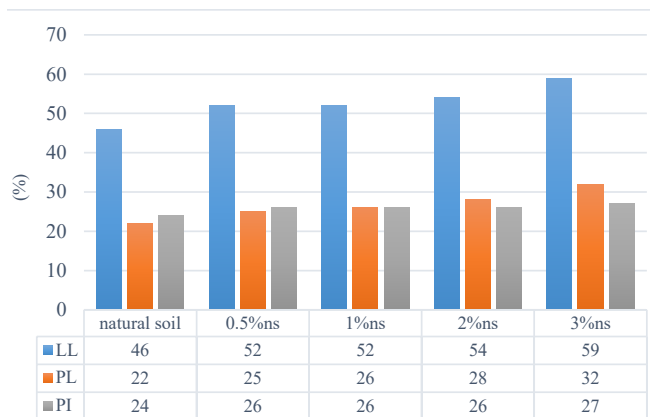
Fig. 3. maximum dry density changes diagrams for different amounts of (a) Nano-silica and (b) cationic polyelectrolyte.

گشته و به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. هر نمونه پس از طی زمان عمل‌آوری، از الک ۱۰ عبور کرده و سپس مقداری آب مقطر به نمونه‌ها اضافه شد و یک ساعت در محلی بدون حرکت قرار داده شد. دستگاه با استفاده از تامپون‌های ۷ و ۹ کالیبره شده و آزمایش انجام گرفت.

۴- نتایج و بحث

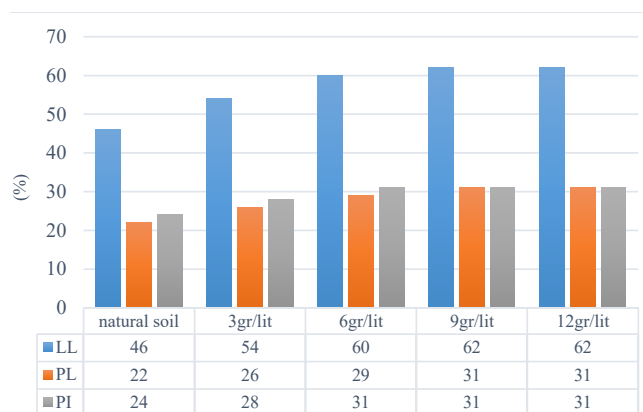
۴-۱- تراکم پذیری خاک

در شکل ۲، منحنی‌های تراکم خاک به ازای مقادیر مختلف افزودنی‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳-الف، با اضافه شدن نانوسیلیکا به خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش می‌یابد. البته این کاهش از ۰/۵ به ۱ درصد و نیز از ۲ به ۳ درصد با شیب بیشتری اتفاق می‌افتد. یکی از دلایل کاهش حداکثر دانسیته خشک در اثر افزودن نانوسیلیکا به خاک، بالا بودن چگالی دانه‌های



شکل ۵: نمودار مقادیر حدود اتربرگ خاک به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا.

Fig. 5. soil atterberg limit amounts for different percentages of Nano-silica.



شکل ۶: نمودار مقادیر حدود اتربرگ خاک به ازای مقادیر مختلف PAM.

Fig. 6. soil atterberg limit amounts for different percentages of cationic polyelectrolyte.

می‌یابد. دلیل کاهش مقاومت نمونه‌ها پس از مقدار بهینه ۲٪ این است که با افزایش بیش از حد نانوذرات، آنها شروع به تجمع در کنار هم و تشکیل توده‌هایی در خاک می‌کنند که این امر به علت کم وزن بودن نانوذرات نسبت به دانه‌های خاک، سبب کاهش چگالی حجمی خاک می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۷-ب، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی پلیمر، با افزایش غلظت محلول، تا مقدار بهینه ۹ گرم بر لیتر روند افزایشی داشته و پس از آن دچار وقفه و کاهش می‌شود. این امر مخصوصاً در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه به وضوح قابل مشاهده است.

به منظور بررسی تأثیر افزایش مقدار نانوذرات و پلیمر بر سختی نمونه‌ها، منحنی تنش-کرنش تمامی نمونه‌ها رسم شد. مشاهده شد که در تمامی نمونه‌های ۳، ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه، با افزودن نانوسیلیکا و

حاوی PAM، با افزایش غلظت محلول تغییرات وزن مخصوص خاک قابل ملاحظه نیست، طوری که به ازای ۱۶ گرم بر لیتر نیز تغییری اتفاق نمی‌افتد.

در شکل ۴-ب نیز مشاهده می‌شود که رطوبت بهینه خاک با افزایش مقدار محلول تا ۹ گرم بر لیتر روند افزایشی داشته و پس از آن دوباره روند کاهشی می‌یابد. با این وجود رطوبت بهینه نمونه‌های خاک حاوی PAM به ازای تمامی مقادیر محلول از خاک طبیعی بیشتر است.

۴-۲- حدود اتربرگ

مطابق شکل ۵، با افزایش مقدار نانوسیلیکا حد روانی و حد خمیری خاک هر دو افزایش می‌یابند. با این وجود نرخ افزایش حد روانی نسبت به حد خمیری بیشتر بوده و در نتیجه شاخص خمیری خاک که حاصل تفاضل حد روانی و حد خمیری است به مقدار ناچیزی افزایش پیدا می‌کند.

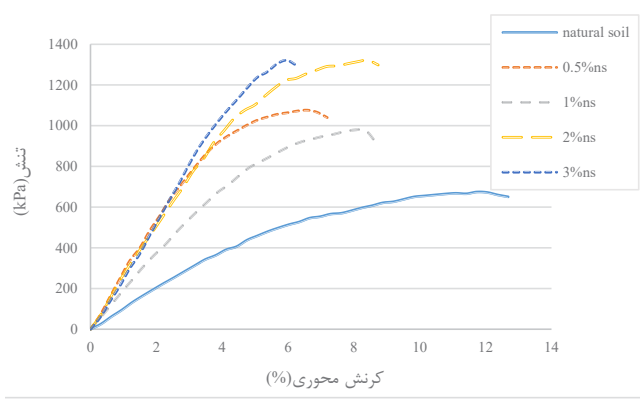
از سوی دیگر، مطابق شکل ۶، با افزایش PAM به خاک، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. این افزایش تا ۶ گرم بر لیتر با شیب زیاد و از ۶ تا ۱۲ گرم بر لیتر با شیب کم اتفاق می‌افتد؛ طوری که می‌توان گفت از ۶ گرم بر لیتر به بعد حدود اتربرگ ثابت است. شاخص خمیری نیز روندی مشابه داشته و به ازای ۳ و ۶ گرم بر لیتر، افزایش نشان می‌دهد، اما با افزایش غلظت محلول، به دلیل ثابت شدن مقدار حد روانی و حد خمیری، شاخص خمیری نیز ثابت می‌ماند.

با مقایسه دو ماده نیز شاهد تأثیر بیشتر پلیمر محلول، بر هر سه پارامتر مورد بررسی در این آزمایش هستیم.

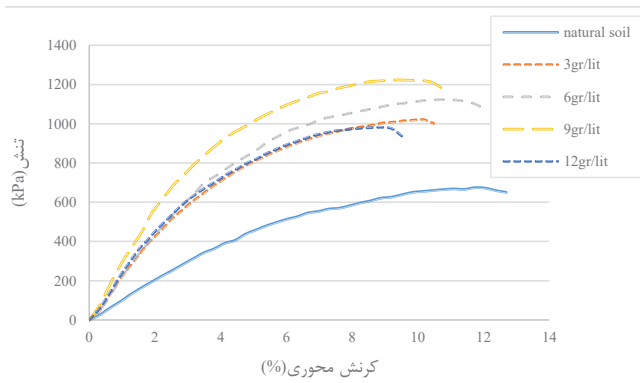
۴-۳- مقاومت فشاری محدود نشده

۴-۳-۱- تأثیر مقدار پلیمر و نانوذرات بر مقاومت فشاری محدود نشده و سختی نمونه‌ها

مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه کنترل (اصلاح نشده) برابر ۶۷۴/۵ کیلوپاسکال به دست آمد که بر روی نمودارهای شکل ۷ و شکل ۹ با مثلث آبی روی محور قائم مشخص است. مطابق شکل ۷-الف، با افزایش درصد نانوسیلیکا در خاک مقاومت نمونه‌ها تا مقدار بهینه ۲٪ روند افزایشی داشته و به ازای مقدار ۳٪ دوباره کاهش



(الف)



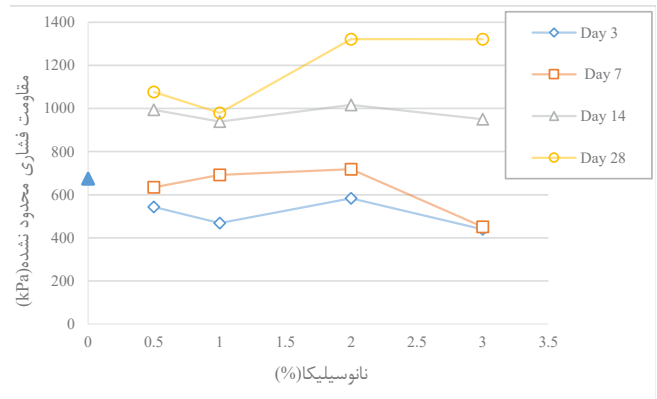
(ب)

شکل ۸: تأثیر مقدار (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM بر سختی نمونه‌های ۲۸ روزه.

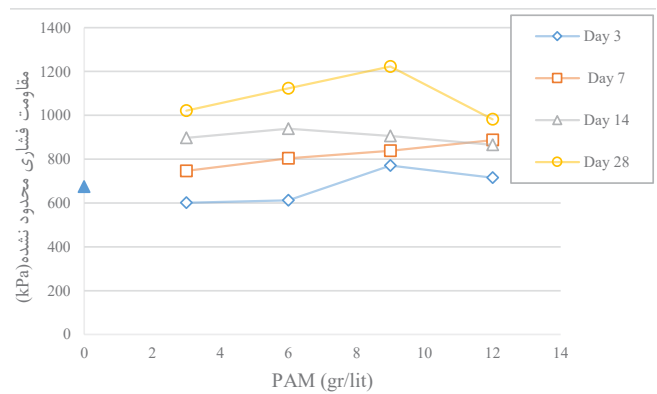
Fig. 8. effect of (a) Nano-silica and (b) PAM on stiffness of 28 days' samples.

افزایش رطوبت بهینه نمونه‌ها و از سوی دیگر عدم انجام واکنش‌ها بین خاک و نانومواد در روزهای ابتدایی جستجو کرد، اما در ادامه شاهد افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری هستیم. با افزایش زمان عمل‌آوری به سبب انجام واکنش‌های تبادل کاتیونی و جابجایی نانوذرات در خاک و قرارگیری این نانو ذرات در نانو حفرات، خاک در مقیاس نانو مسلح شده و رفته رفته بر مقاومت نمونه‌ها اضافه می‌شود. همچنین در شکل ۹-ب، شاهد افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی PAM با افزایش زمان عمل‌آوری هستیم که ناشی از انجام واکنش بین پلیمر و ذرات خاک بوده و تأثیر مثبت پلیمر را که خاصیت لخته‌سازی و منعقدکنندگی دارد، بر خاک نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر سختی نمونه‌های اصلاح شده، منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های حاوی مقادیر بهینه نانوذرات و پلیمر به ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف رسم شد. مطابق شکل ۱۰ هم به ازای نانوسیلیکا و هم به ازای PAM، با افزایش زمان



(الف)



(ب)

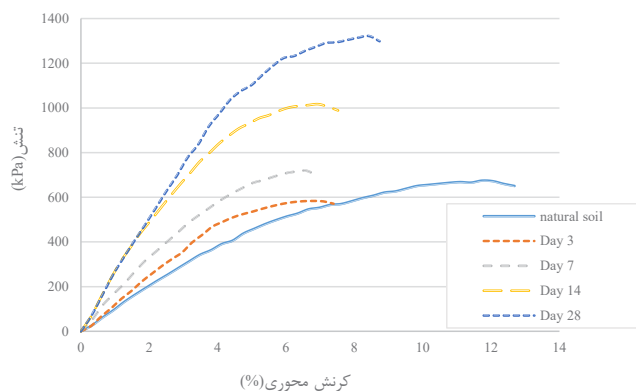
شکل ۷: نمودار تغییرات مقاومت فشاری با تغییر مقادیر (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

Fig. 7. compressive strength changes diagram by changing amounts of (a) Nano-silica and (b) PAM.

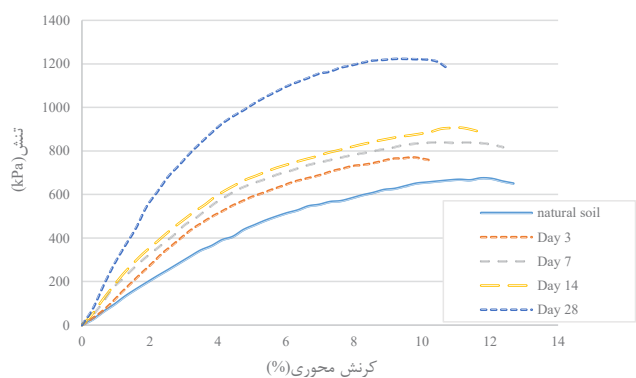
PAM به خاک، سختی نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. افزایش نانوسیلیکا، ضمن افزایش مقاومت نمونه‌ها سبب کاهش کرنش گسیختگی نیز می‌شود. پلیمر نیز با اینکه تأثیر چندانی بر کرنش گسیختگی ندارد، با افزایش تنش نهایی تسلیم، شیب منحنی تنش-کرنش و در نتیجه سختی نمونه را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، نمونه‌های تیمار شده مقاومت بیشتری را به ازای کرنش مشابه و یا کمتر، از خود نشان می‌دهند. البته روند تغییرات سختی به ازای مقادیر مختلف مواد، با روند تغییرات مقاومت خاک رابطه مستقیم دارد.

۲-۳-۴- تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و سختی نمونه‌ها

با بارگذاری نمونه‌های اصلاح شده با نانوسیلیکا، مطابق شکل ۹-الف، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌های ۳ روزه کمی کاهش یافته است که دلیل آن را می‌توان در کاهش توانایی تراکم خاک و



(الف)



(ب)

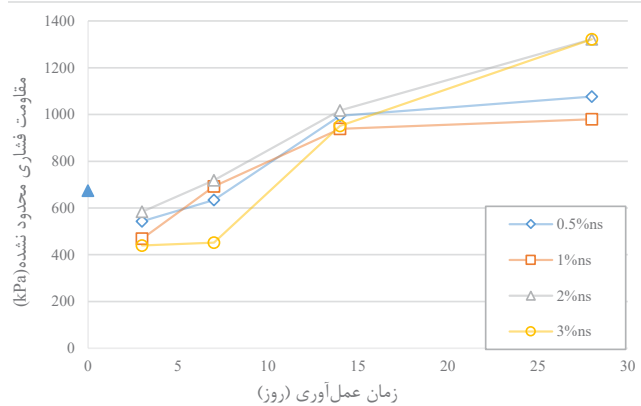
شکل ۱۰: تأثیر زمان عمل‌آوری بر سختی نمونه‌های حاوی (الف) ۲٪ نانوسیلیکا و (ب) ۹ گرم بر لیتر PAM

Fig. 10. effect of curing time on stiffness of samples containing (a) 2% of Nano-silica and (b) 9 gr/lit PAM.

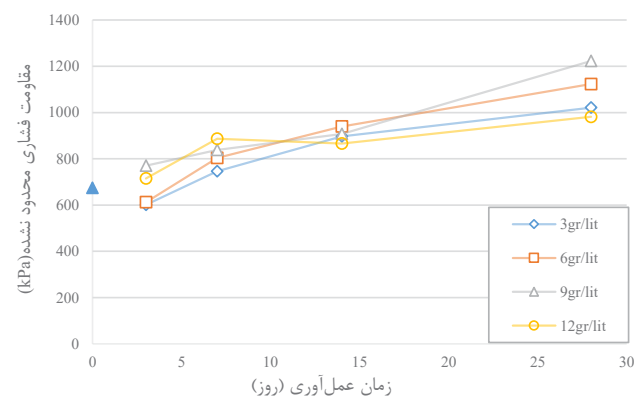
مطالعه، قابل مشاهده است. مطابق شکل ۱۲، برای نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه نانوسیلیکا، به ازای تغییرات درصد نانوذرات، شاهد روند کاهشی تورم تا ۲٪ و افزایش دوباره این پارامتر به ازای ۳٪ هستیم که برای آزمایش تورم نیز مقدار ۲٪ نانوسیلیکا را به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌کند. همچنین در شکل ۱۳، گرچه در نمونه‌های ۳ روزه به ازای ۶ گرم بر لیتر کمترین تورم مشاهده شد، با افزایش زمان عمل‌آوری، برای نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه، شاهد روند کاهشی تورم تا ۹ گرم بر لیتر و افزایش دوباره این پارامتر به ازای ۱۲ گرم بر لیتر هستیم که برای آزمایش تورم نیز مقدار ۹ گرم بر لیتر را به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌کند.

۴-۴-۲- تأثیر زمان عمل‌آوری بر تورم آزاد نمونه‌ها

مطابق شکل ۱۲ و ۱۳، در صورت مقایسه کلی نمونه‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه می‌توان دریافت که تمامی نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و



(الف)



(ب)

شکل ۹: تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های با درصدهای مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

Fig. 9. effect of curing time on compressive strength of samples with different percentages of (a) Nano-silica and (b) PAM.

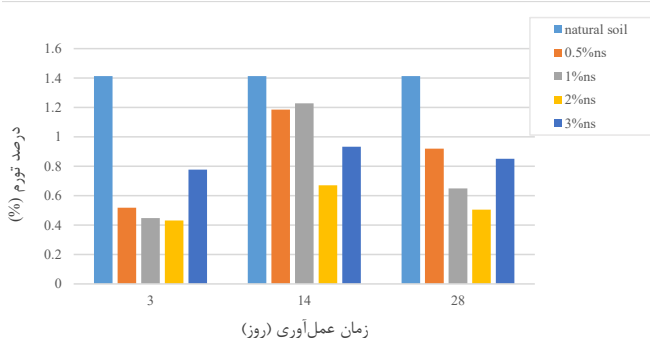
عمل‌آوری، سختی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

۴-۴-۴- تورم آزاد

نمونه‌های آزمایش تورم آزاد به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا و پلی‌اکترولیت کاتیونی و مطابق استاندارد آزمایش تهیه، و به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر تورم خاک‌های اصلاح شده، تحت عمل‌آوری‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روز قرار گرفتند. مطابق شکل (۱۱)، می‌توان گفت که اکثر تغییرات حجم خاک و بیشترین مقدار تورم در ۴ ساعت اولیه که نمونه غرقاب شده است، اتفاق افتاده و در ادامه تغییرات حجم با شیب ملایمی ادامه می‌یابد.

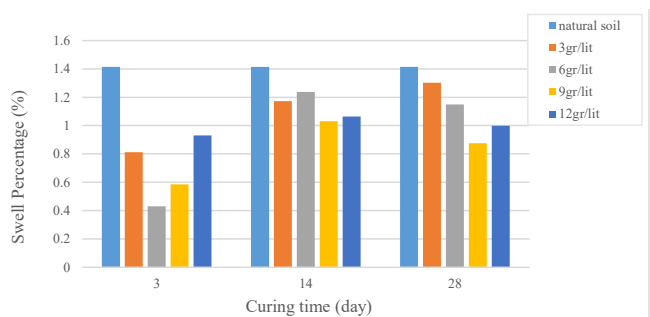
۴-۴-۱- تأثیر مقدار مواد افزودنی بر تورم آزاد نمونه‌ها

در شکل ۱۲ و ۱۳، تأثیر درصدهای مختلف نانوسیلیکا و پلی‌اکترولیت کاتیونی و زمان عمل‌آوری بر تورم آزاد خاک رس مورد



شکل ۱۲: نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر درصد نانوسیلیکا.

Fig. 12. diagram of swelling changes with changing curing time and percentage of Nano-silica.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات تورم با تغییر زمان عمل‌آوری و تغییر غلظت PAM.

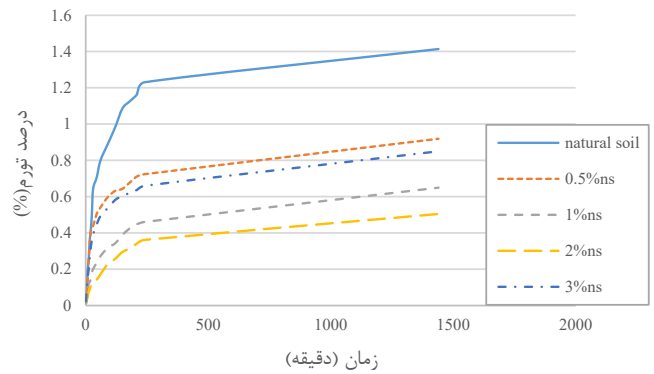
Fig. 13. diagram of swelling changes with changing curing time and percentage of PAM.

۴-۵- pH

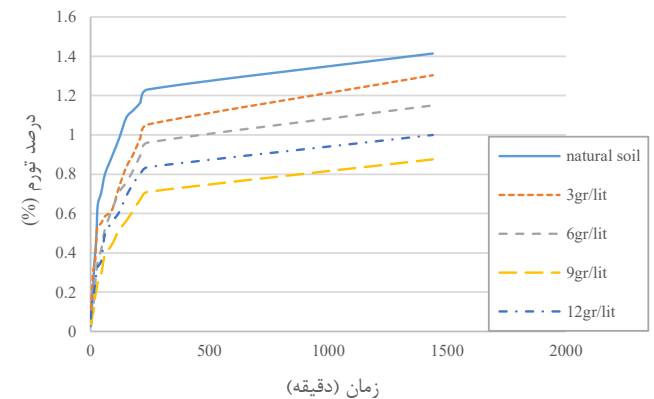
آزمایش pH برای تعیین میزان تأثیر شیمیایی درصدهای مختلف نانوذرات و غلظت‌های مختلف پلیمر و نیز تأثیر زمان‌های عمل‌آوری بر خاک مورد آزمایش، و تغییرات میزان اسیدی و یا قلیایی خاک انجام گرفت. مقدار pH خاک طبیعی برابر ۷/۳۲ به دست آمد. نمونه‌ها پس از اضافه شدن مواد افزودنی تحت عمل‌آوری قرار گرفته و به‌وسیله دستگاه pH متر مقادیر pH محاسبه شد.

۴-۵-۱- تأثیر مقدار پلیمر و نانوذرات بر pH نمونه‌ها

با توجه به شکل ۱۴-الف، می‌توان دریافت که با افزایش نانوذرات نانوسیلیکا به خاک، pH به مقدار ناچیز در حد ۰/۱ الی ۰/۴ افزایش یافته و به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیکا، pH ثابت است. از سوی دیگر، مطابق شکل ۱۴-ب، با افزایش غلظت پلیمر در محلول، در نمونه‌های ۳، ۷ و ۱۴ روزه تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در نمونه‌های ۲۸ روزه نیز به مقدار ناچیزی شاهد افزایش pH خاک با



(الف)

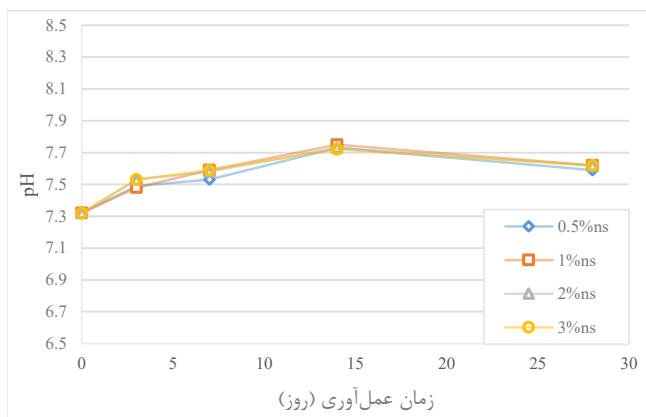


(ب)

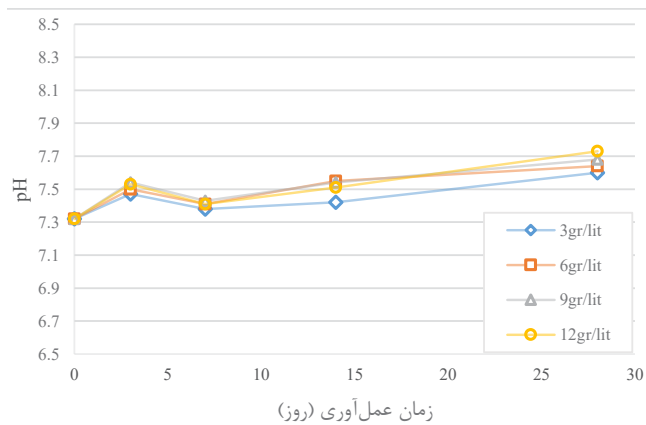
شکل ۱۱: منحنی تورم آزاد نمونه‌های ۲۸ روزه (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

Fig. 11. free swelling diagrams of 28 days' samples of (a) Nano-silica and (b) PAM.

PAM پس از ۳ روز کاهش قابل توجهی در تورم نشان می‌دهند. در فاصله ۳ تا ۱۴ روز جهشی منفی در مقادیر تورم به ازای درصدهای مختلف ماده روی داده و شاهد افزایش تورم نمونه‌ها هستیم. در نهایت مجدداً برای نمونه‌های ۲۸ روزه تورم کاهش می‌یابد. دلیل این اتفاق را می‌توان در تغییرات رطوبت خاک در زمان عمل‌آوری جستجو کرد. در فاصله ۳ تا ۱۴ روز نمونه‌ها دچار کاهش رطوبت و مقداری انقباض می‌شوند؛ در نتیجه نمونه‌های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه هنگام آزمایش در دو مرحله متورم می‌شوند، در مرحله اول انقباض ناشی از کاهش رطوبت جبران شده و در مرحله بعد تورم مازاد ناشی از غرقاب نمونه که مورد نظر ماست رخ می‌دهد. در فاصله ۱۴ تا ۲۸ روز به دلیل ثابت بودن حجم نمونه‌ها و عدم تغییرات زیاد رطوبت از یک سو و تداوم تأثیر مثبت نانوذرات و پلیمر از سوی دیگر، مجدداً درصد تورم خاک کاهش می‌یابد.



(الف)

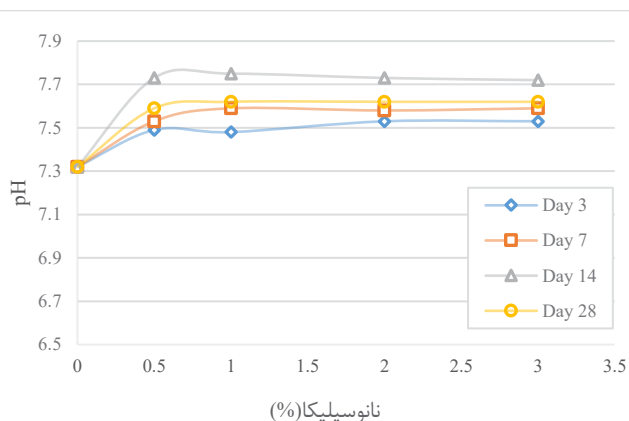


(ب)

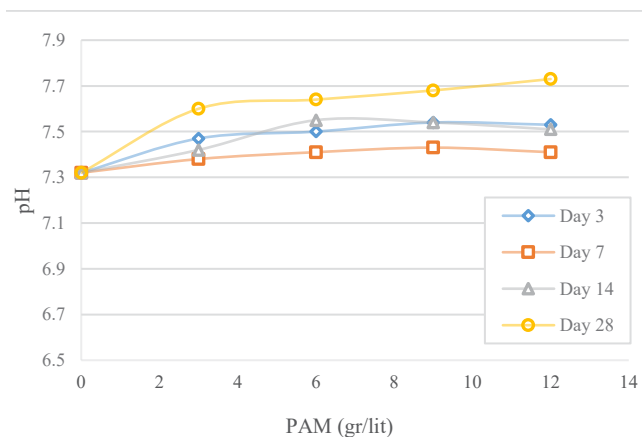
شکل ۱۵: تأثیر زمان عمل آوری بر pH نمونه‌های حاوی (الف) نانوسیلیکا و (ب) پلی‌الکترولیت کاتیونی.

Fig. 15. effect of curing time on pH of samples containing (a) Nano-silica and (b) cationic polyelectrolyte.

در ایران و همچنین ضرورت توسعه پوشش گیاهی و درخت‌کاری، استفاده از روش‌هایی که بتوان به واسطه‌ی آن از تلفات آب در محیط ریشه جلوگیری کرد و آب قابل دسترس گیاه را افزایش داد، به طوری که بتوان از حداقل آب موجود حداکثر جذب و رشد را برای گیاه به وجود آورد، بسیار مفید و کارآمد خواهد بود. از سوی دیگر در مهندسی عمران، تغییرات گسترده در مقادیر رطوبت خاک‌هایی چون رس، باعث مشکلاتی برای سازه‌ها می‌شود. خاک رس در اثر تغییرات رطوبت دچار تورم و انقباض شده و تغییر شکل‌هایی در سازه ایجاد می‌کند که در کوتاه‌مدت و بلندمدت سبب ناپایداری سازه می‌شود. به منظور بررسی تأثیر مواد افزودنی بر روند تغییرات رطوبت خاک، درصد رطوبت تمامی نمونه‌های آزمایش تک محوری، هم در هنگام تهیه و هم در هنگام آزمایش محاسبه شد. خاک طبیعی بعد از ۲۸ روز ۲۹/۲٪ از رطوبت خود را از دست داد. با اضافه شدن نانوذرات



(الف)



(ب)

شکل ۱۴: منحنی تغییرات pH به ازای مقادیر مختلف (الف) نانوسیلیکا و (ب) PAM.

Fig. 14. pH changes diagrams for different amounts of (a) Nano-silica and (b) PAM.

افزایش غلظت پلیمر هستیم.

۴-۵-۲- تأثیر زمان عمل آوری بر pH نمونه‌ها

با توجه به شکل ۱۵-الف، مقدار pH تا مدت ۱۴ روز که شدت واکنش‌های بین خاک و نانوذرات نانوسیلیکا بیشتر است، روند افزایشی داشته و با کاهش شدت واکنش‌ها روند نزولی به خود می‌گیرد. در شکل ۱۵-ب نیز مشاهده می‌شود که پس از تغییرات pH خاک در روزهای ابتدایی، با افزایش زمان عمل آوری، شاهد افزایش pH با شیبی ملایم و یکنواخت هستیم. تداوم افزایش یکنواخت pH در نمونه‌های حاوی PAM می‌تواند نشانه‌ای از تداوم واکنش‌ها در خاک باشد.

۴-۶- پتانسیل حفظ رطوبت

در مهندسی کشاورزی، با توجه به گستردگی اراضی خشک

خاک رس مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. نتایج آزمایش را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. در این آزمایش، با افزایش مقادیر نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی در خاک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک به تدریج کاهش یافته و رطوبت بهینه خاک افزایش نشان داد.

۲. هر دو ماده‌ی نانوسیلیکا و PAM سبب افزایش حد روانی و حد خمیری خاک شدند. نانوسیلیکا با افزایش قابل توجه حد خمیری و حد روانی در نهایت شاخص خمیری خاک را نیز افزایش داد. محلول پلی‌الکترولیت کاتیونی نیز تا غلظت ۶ گرم بر لیتر، مقادیر حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد، اما به ازای غلظت‌های بالاتر، این پارامترها تغییر چندانی از خود نشان ندادند.

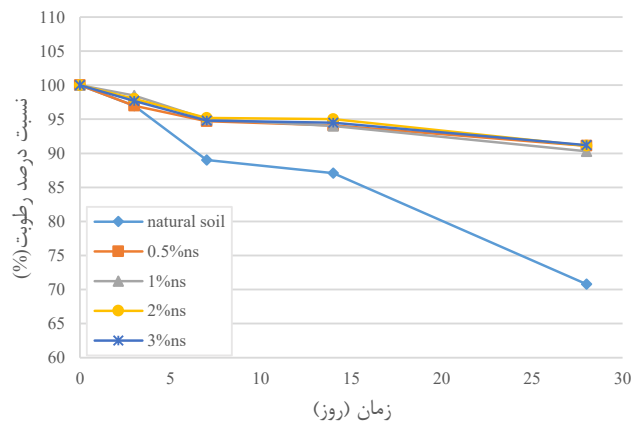
۳. هر دو ماده تأثیر مثبت بر مقاومت فشاری تک محوری خاک داشته و به ازای مقادیر بهینه، تقریباً ۱۰۰٪ مقاومت خاک را افزایش دادند. با توجه به منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌ها، نانوسیلیکا با وجود افزایش مقاومت خاک، سبب کاهش شکل‌پذیری خاک و افزایش سختی آن شد. PAM نیز با اینکه تأثیر چندانی بر کرنش گسیختگی ندارد، با افزایش مقاومت نمونه‌ها سختی خاک را افزایش داد.

۴. هر دو ماده به ازای تمامی مقادیر، تأثیر مثبت بر تورم پذیری خاک رس داشته و درصد تورم خاک را کاهش دادند.

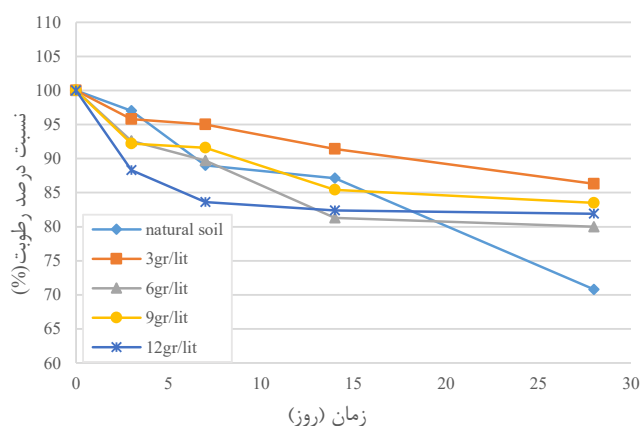
۵. برای نمونه‌های نانوسیلیکا، مقدار pH در ۱۴ روز اول روند افزایشی داشته و برای نمونه‌های ۲۸ روزه، کاهش نشان می‌دهد. تغییر درصد ذرات تأثیری بر مقدار pH ندارد. همچنین pH نمونه‌های پلی‌الکترولیت کاتیونی، با افزایش غلظت محلول و افزایش زمان عمل‌آوری با شیبی ملایم به مقدار ناچیز افزایش می‌یابد.

۶. نمونه‌های خاک طبیعی بعد از ۲۸ روز ۳۰٪ از رطوبت خود را از دست دادند، در حالی که نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا، ۸ الی ۱۰ درصد و نمونه‌های حاوی پلی‌الکترولیت کاتیونی، ۱۳ الی ۱۸ درصد از رطوبت خود را پس از ۲۸ روز از دست دادند.

۷. با هدف کاهش تورم و افزایش مقاومت خاک، مقادیر ۲٪ نانو سیلیکا و ۹ گرم بر لیتر PAM به عنوان مقدار بهینه، به دست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: تأثیر زمان عمل‌آوری بر توانایی حفظ رطوبت نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا و (الف) PAM و (ب)

Fig. 16. effect of curing time on moisture retaining potential of samples containing (a) Nano-silica and (b) PAM.

پلیمر به خاک تغییرات رطوبت خاک کاهش یافت، طوری که مطابق شکل ۱۶-الف، نمونه‌های حاوی نانوسیلیکا پس از ۲۸ روز تنها ۸ الی ۱۰ درصد از رطوبت خود را از دست دادند. از سوی دیگر مطابق شکل ۱۶-ب، نمونه‌های حاوی PAM پس از ۲۸ روز، ۱۳ الی ۱۸ درصد از رطوبت خود را از دست دادند. بر خلاف نانوذرات، مقادیر مختلف PAM در ۱۴ روز ابتدایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته، اما در بلند مدت سبب کاهش تغییرات رطوبت می‌شوند. همچنین تأثیر افزایش درصد نانوذرات و غلظت پلیمر بر حفظ رطوبت خاک قابل ملاحظه نیست.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شد تا تأثیر دو ماده نانوسیلیکا و پلی‌الکترولیت کاتیونی بر مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

مقاومت فشاری محدود نشده، kPa	UCS
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
پلی‌وینیل‌الکل	PVA

منابع

- the 5rd international symposium on nanotechnology in construction, Prague, Czech Republic, pp: 377-382, 2012.
- [12] zaid, H, M. Mohd, R, T. Ibtehaj, T, J. 2014, "Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(4): 503-509, 2014.
- [13] Bahmani, S. H., et al. (2014). "Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement." Construction and Building Materials 64: 350-359.
- [14] Choobasti, A. J. and S. S. Kutanaei (2017). "Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9(5): 981-988.
- [15] Zomorodian, S. A., et al. (2017). "Strength enhancement of clean and kerosene contaminated sandy lean clay using Nano clay and nanosilica as additives." Applied Clay Science 140: 140-1.
- [16] Oldham J, C, Eaves R.C, and White D.W. "Materials evaluated as potential soil stabilizers". Miscellaneous paper S-77-15-15, U.S. Army engineer waterways experiment station, Vicksburg, MS, September (1977).
- [17] Zornberg, J, Gabrel. A. R, Virat Jandr. C., "Baehavior of tire shred-sand mixtures", Geotech. J., Vol.41, No.2, PP.227-241., (2004).
- [18] Velasquez. R. A, "Investigation of the effectiveness and mechanisms of enzyme products for subgrade stabilization", International tournal pavement engineering, Vol.7, No.3, PP. 213-220, (2006).
- [19] Jin Liu, Bin Shi, "Research on the stabilization on traetment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer", Engineering geology, Vol.117, No.1, PP. 114-120, (2011).
- [20] Mirzababaei, M., et al. (2017). "Polymers for Stabilization of Soft Clay Soils." Procedia Engineering 189: 25-32.
- [21] ASTM D698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2010.
- [22] ASTM (2008). Standard Test Method for Liquid Limit,
- [1] Fang H. Y. (1991). Foundation engineering handbook, Chapman & Hall, New York, NY10119.
- [2] Perloff, W. H. (1976). Soil mechanics, principal and applications, John Wiley & Sons. New York
- [3] Naeini, S. A., et al. (2012). "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer." KSCE Journal of Civil Engineering 16(6): 943-949.
- [4] Rauch, A. F., et al. (2003). Evaluation of nontraditional soil and aggregate stabilizers: A summary, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin.
- [5] Correia, A. A. S. and M. G. Rasteiro (2016). "Nanotechnology Applied to Chemical Soil Stabilization." Procedia Engineering 143: 1252-1259.
- [6] Seybold, C. A. (1994). "Polyacrylamide review: Soil conditioning and environmental fate." Communications in Soil Science and Plant Analysis 25 (12): 2171-2185.
- [7] Yone kura, R., Miwa, M., 1992. Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout.
- [8] Noll, M. R, Bartlett, C. & Dochat, T. M., 1992. In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation Using Colloidal silica. National Outdoor Action Conference, Las Vagas, NV, p. 443-457.
- [9] Zhang, G., Germaine, J. T., Whittle, A. J., & Ladd, C. C., 2004a. Soil structure of a highly weathered old alluvium. Geotechnique 54, No.7, 453-466.
- [10] Zhang G. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils, GSP 173 Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior, New Peaks in Geotechnics, ASCE. (2007).
- [11] Taha M. R. and Ying, T. "Effects of carbon nanotube on kaolinite: Basic geotechnical behaviour", Proc. of

- Problems and practice in foundation and pavement engineering, John wiley and sons, 259p.
- [25] ASTM, "One Dimensional Swell or Settlement of Cohesive Soils", Designation: D 4546-96.
- [26] ASTM D4972-95a, Standard Test Method for pH of Soils, ASTM International, West Conshohochen, PA, 2001, www.astm.org.
- Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils- D 4318-00. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 11 p.
- [23] ASTM D2166 (2006). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [24] Nelson, J. D. and Miller, D. J. 1992, Expansive soils,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

GH. Moradi, S. Abbasi, A. Abbasnejad, Effect of Water-Soluble Polymers and Nanoparticles on Physical, Mechanical, and Inflationary Properties of Clay, Amirkabir J. Civil Eng., 52(11) (2021) 2795-2808.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16472.6242](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16472.6242)

