Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 53(5) (2021) 415-418
DOI: 10.22060/ceej.2020.17161.6481

Evaluation of the Effect of Nano-Clay and Pressure Change on the Self-Healing Properties of Clay Soils

A. R. Mazaheri*

Department of Engineering, Ayatollah Ozma Borujerdi University, Borujerd, Iran.

ABSTRACT: Some factors such as soil mass settlement, earthquake activities, and hydraulic failure causing tensile forces in the earth's structures and, consequently, cracks creation and development of water leakage from cracks. In this study, to reduce possible damage caused by cracking and its extension to the erosion of internal structures, the effects of nano-clay on the self-healing properties of clayey soils have been investigated. In this study, the effect of nano-clay additive, pressure, and time elapsed on crack restoration in clay was evaluated. To perform experiments, two types of cracks with thicknesses of 0.5 and 1 mm with a depth of 50 mm were created in the samples and the montmorillonite nano-clay was used as an additive. Twelve tests with different percentages of nano-clay, without pressure and at pressures of 50 to 500 kPa in two steps after the cracking (first day) and 24 hours after the creation of crack (second day) were performed for samples with a thickness of 0.5 and 1 mm. The flow rate is measured in all tests and was the basis for judging the impact of each factor. The results showed that when the cracked sample is made with one millimeter, under non-pressure conditions, in about 60 minutes, approximately 500 ml of water passes through the crack. However, when the sample contains 2 and 5% nano-clay, the amount of water passing through the crack within 60 minutes, would be 40 and 5 ml, respectively. This decrease in the volume of passing water shows the positive effect of nano-scale fine grains on cracking closure.

Review History:

Received: Oct. 08, 2019
Revised: Jan. 24, 2020
Accepted: Feb. 15, 2020
Available Online: Apr. 03, 2020

Keywords:

Self-Healing
Nano-Clay
Water Pressure

1- Introduction

Cracks in soil structures may be a result of a variety of conglomerates, vibration activities, and hydraulic issues that can cause internal erosion in the body of these structures and can cause hydraulic failure if left unattended [1]. Erosion is a progressive process and may occur in the body or the dam. The erosion begins at the drainage focus point and gradually forms a conduit that is washed out by the hydraulic gradient, which expands along the flow and eventually reaches the reservoir. When the conduit approaches the reservoir, a high flow of water can occur at high speeds and may result in damages [2].

In the past, this phenomenon has caused catastrophic events and has caused significant damages and financial losses, so providing methods to reduce leakage and erosion in impermeable and earth dams is very important and economical. The use of stabilizers to correct and reduce soil erosion potential is one of the most effective ways to prevent internal erosion in soil structures. Nowadays, the use of chemical additives is one of the most common methods of increasing soil erosion resistance in soil structures [3].

2- Methodology

To investigate the factors affecting self-healing, clay soil with a unit weight of 1.83 g/cm3, a specific gravity of 2.66, a liquid limit of 31.8, a plastic limit of 18, and optimum moisture content of 15% were considered. The curvature of this soil is shown in Fig. 1. As shown in this figure, 95% of the soil particles are smaller than one millimeter.

To investigate the influence of different factors on the self-healing properties of clay soils, samples with identical conditions were fabricated and tested. These specimens were made with a diameter of 150 mm and a height of 50 mm along with a standard 30 mm sand layer at the top and bottom of the specimen as a filter and protective layer. During the tests, two types of cracks with diameters of 0.5 and 1 mm were made by steel blades. Pressure source, outlet water measurement, and curve drawing were segmented using the obtained results. All experiments were evaluated at three-time intervals one hour after cracking, one day after cracking, and two days after cracking, and water output from cracks was measured.

To test the self-healing properties of cracks in the clay, a test device was designed and manufactured. The three main parts of this machine are the overhead application system,

*Corresponding author's email: a.mazaheri@abru.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

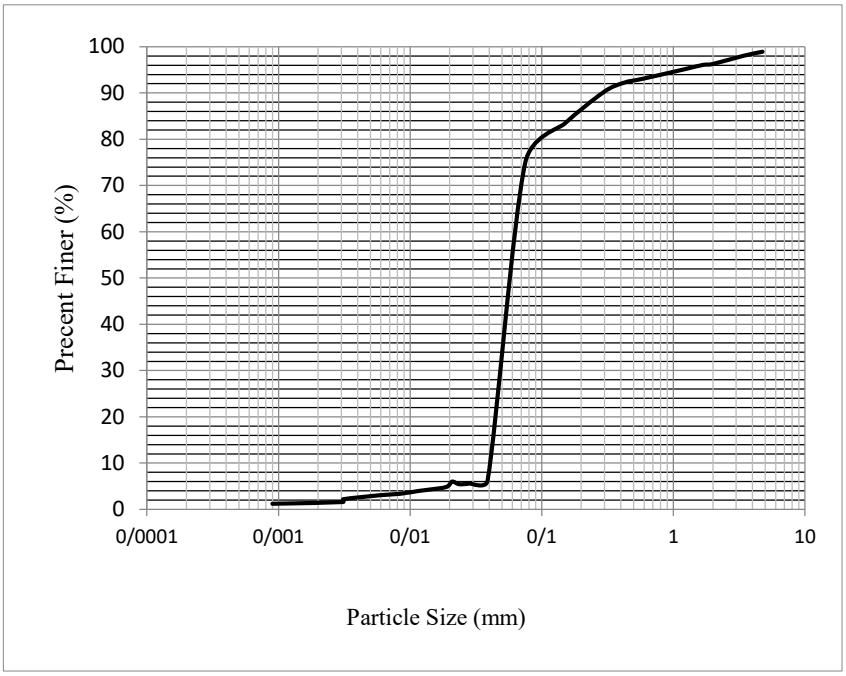


Fig. 1. Grain size distribution

Fig. 2. Soil sample

the soil, and filter system, and the measuring system. The overhead application system is divided into three parts: (1) Pressure source, (2) Pressure tank in the test machine, and (3) Water storage tank. The working process of this part of the machine is that after supplying pressure by an air compressor, the pressure in the range of 0 to 500 kPa is driven by a high-pressure hose and regulator valve into the storage tank.

The test mold was 3 mm thick, stainless steel, and was resistant to water, moisture, and pressure. The mold height and diameter were 15 and 15 cm, respectively (Figs. 2 and 3). After attaching the top piece to the mold, the overall height of the mold reaches 45 cm. At the top of the mold, there was an embedded faucet, in which water is poured onto the sample, as well as a pressure gauge at the top of the mold, which can be used to control the pressure on the sample. The pressure applied by the air pump was connected to the inlet valve of the measuring gauge and its pressure level can be controlled. Below the mold, a funnel was attached to the mold that guides the outlet water centrally to the measuring vessel. One of the benefits of this mold is that the dimensions of the device have been selected so that a suitable workspace can be provided while preparing the specimen and, most importantly, that cracking in the specimen range will not cause any damage until the original test is performed. The outflow of water and pressure was the same compared to that of the beginning of the experiment (Fig. 4).

Fig. 3. Crack created in samples

Fig. 4. Self-healing process

3- Results and Discussion

On the first day, the sample with no additive and with 1 mm cracking had the highest volume of water output. However, in two samples containing 2% and 5% nano-clay, the cracking was largely restored after one hour, so that in the sample with 2% nano-clay, the volume of water output decreased from 160 to 89 ml. The presence of the additive percentages had a significant effect on reducing the outlet water from the cracks, which was reduced to 10 ml after 5 hours of cracking in the sample by 5% additive and they have created cracks.

4- Conclusion

Considering the importance of the self-healing process in clay soils, the need to better understand this issue and how to accelerate this process is felt more and more. In this paper, the effect of various factors such as nano-clay additive and overhead pressure on the self-healing properties of clay soils was investigated. For this purpose, a device has been designed and manufactured that can apply different pressures to the specimen. In the experiments carried out in this study, two types of cracks were created in samples. The following results obtained:

Nano-clay additive increased optimum soil moisture content and decreased the maximum dry weight of soil. According to the results obtained from the tested conditions, the optimum content of nano clay was 5%. The nano-clay additive improved the cracking condition by reducing the amount of water passing from 168 to 55 ml in a sample containing 5% nano-clay with one millimeter cracking one hour later. However, the remarkable thing is the price of the nano-clay additive that needs to be taken into consideration. The passage of time was one of the effective factors in improving the condition of the created cracks. In this study, the time of one day and two days after leaving the study was investigated. The results showed that the passage of time is very effective in improving the crack condition in the fine-grained soils and the same effect that 5% nano-clay additive can have on the behavior of the sample can be created in the sample over a day. In addition to factors such as the presence

of additives and the passage of time, the pressure change can also affect the crack condition. A gradual increase in pressure will increase the water passing through the cracks. The important point is that the instantaneous pressure is zero to 500 kPa and in the same amount of time the water passes through the cracks was less than when the pressure gradually reaches 500 kPa.

References

[1] G.T. Dounias, D.M. Potts, P.R. Vaugha, Analysis of progressive failure and cracking in old British dams. Geotechnique, 46(4), (1996), 621–640.

[2] R. Fell, P. Macgregor, D. Stapledon, G. Bell, Geotechnical engineering of dams. Published By: A.A. Balkema Publishers Leiden, the Netherland, a Member of Taylor & Francis Group Plc, (2005), 912.

[3] M.A. Foster, R. Fell, M. Spannagle, The statistics of embankment dam failures accidents. Canadian Geotechnical Journal, (2000) 37-51.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. R. Mazaheri, Evaluation of the Effect of Nano-Clay and Pressure Change on the Self-Healing Properties of Clay Soils. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5) (2021) 415-418.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17161.6481

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۸۲۱ تا ۱۸۳۴
DOI: 10.22060/ceej.2020.17161.6481

بررسی تأثیر افزودنی نانورُس و تغییر فشار بر ترمیم ترک‌های ایجاد شده در خاک رُس

احمدرضا مظاهری*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

خلاصه: خاک‌های رسی به دلیل ریز بودن ذرات قادر خواهند بود ترک‌های ایجاد شده در خود را تا حدودی بهبود داده و ترمیم نمایند. بنابراین سازه‌های خاکی ایجاد شده با خاک رُس به صورت بالقوه خاصیت خودترمیمی دارند و از جمله عواملی که می‌تواند این خاصیت را تقویت نماید می‌توان به افزایش فشار سربار، وجود افزودنی در خاک رُس و خصوصیات اولیه خاک اشاره نمود. در این مقاله تأثیر حضور افزودنی نانورس، تغییرات فشار آب منفذی و گذشت زمان بر خاصیت خود ترمیمی خاک رُس مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای انجام آزمایشات موردنظر و کنترل فشار وارد بر نمونه‌ها دستگاهی طراحی و ساخته شده است که در این دستگاه نمونه به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر ساخته می‌شود و فشار آب را می‌توان از ۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال تغییر داد. در این تحقیق مجموعاً ۴۸ آزمایش با درصد نانورُس‌های متفاوت و با ضخامت ترک ۰/۵ و ۱ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد هنگامی که در نمونه ترک یک میلی‌متر ایجاد شده باشد در شرایط بدون اعمال فشار و طی ۶۰ دقیقه حدود ۵۰۰ میلی‌لیتر آب از ترک عبور می‌کند؛ ولی زمانی که نمونه حاوی ۲ و ۵ درصد نانورُس باشد با وجود ترک ۱ میلی‌متر در آن میزان آب عبوری از ترک طی ۶۰ دقیقه به ترتیب ۴۰ و ۵ میلی‌لیتر خواهد بود. این میزان کاهش آب عبوری تأثیر مثبت ریزدانه‌های در مقیاس نانو را در بسته شدن ترک ایجاد شده نشان می‌دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۴
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:
خاصیت خود ترمیمی
فشار آب منفذی
نانورُس مونت‌موریلونیت

۱- مقدمه

ترک‌های به وجود آمده در سازه‌های خاکی ممکن است نتیجه عواملی همجون اختلاف نشست‌ها، فعالیت‌های لرزشی، مسائل هیدرولیکی باشد که منجر به ایجاد فرسایش داخلی در بدنه این سازه‌ها می‌شود و در صورت عدم توجه میتواند سبب شکست هیدرولیکی سد شود [۱]فرسایش یک فرآیند پیش رونده است و ممکن است در بدنه یا پی سد ایجاد شود. فرسایش از نقطه‌ی تمرکز زه شروع می‌شود و به تدریج با شسته شدن ذرات خاک در اثر گرادیان هیدرولیکی، مجرایی ایجاد می‌گردد که این مجرا در امتداد جریان گسترش یافته و در نهایت به مخزن می‌رسد. زمانی که مجرا به نزدیکی مخزن برسد، جریان شدید آب با سرعت زیاد ایجاد شده و ممکن است منجر به تخریب سد گردد [۲] در گذشته این پدیده موجب بروز فاجعه در سدها گردیده است و خسارات جانی و مالی عمده‌ای را به دنبال داشته است بنابراین ارائه روش‌هایی برای کاهش نشت و فرسایش در سدهای خاکی و سدهای نفوذناپذیر بسیار مهم و اقتصادی می‌باشد [۳] از موارد مؤثر برای جلوگیری از فرسایش داخلی در سازه‌های خاکی، استفاده از تثبیت‌کننده‌ها جهت اصلاح و کاهش پتانسیل فرسایش خاک‌ها است. امروزه استفاده از افزودنی‌های شیمیایی یکی از روش‌های رایج افزایش مقاومت در برابر فرسایش خاک‌ها در سازه‌های خاکی می‌باشد [۴] تاکنون روش‌های متعددی برای اصلاح خواص ژئوتکنیکی و کاهش فرسایش پذیری خاک ارائه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.mazaheri@abru.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.

شده است که استفاده از افزودنی‌ها جزئی از این روش‌ها به حساب می‌آید. در این قبیل روش‌ها سیلیکات و سایر مواد به منظور ایجاد چسبندگی میان ذرات خاک به درون حفره‌های میان ذرات تزریق می‌شوند. این روش در اغلب موارد با محیط زیست سازگار نمی‌باشد، زیرا گاهی مواد مورد استفاده در آن شیمیایی و سمی هستند. بنابراین یافتن راهکارهای جدید و سازگار با محیط زیست ضروری است [۵] نفوذپذیری خاک‌ها، یکی از ویژگی‌های مهم است که نقش اساسی در مسائل مرتبط با جریان آب داخل خاک ایفا می‌کند. تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی دقیق مصالح کم تراوا و ناتروا مثل خاک رُس با توجه به نقش مهم در سازه‌های هیدرولیکی و سدهای خاکی از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۶]

با توجه به پیشرفت های صورت گرفته در دهه اخیر استفاده از تکنولوژی نانو در کلیه علوم افزایش چشم‌گیری یافته است. در مهندسی ژئوتکنیک نیز استفاده از نانوفن‌آوری سبب بهبود عملکرد و رفتار خاک‌ها شده است؛ اما گستردگی استفاده از آن مانند سایر علوم گسترش نیافته است [۷] ذرات نانو با توجه با سطح ویژه‌ی بالای خود که ناشی از ریز بودن ذرات آن است و بار سطحی که دارند بسیار واکنش‌پذیرتر از ذرات خاک می‌باشند و باعث فعل و انفعالات بین ذره‌ای، قفل و بست‌دهندگی ذرات خاک می‌شوند. این خاصیت سبب کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود [۸] علاوه بر آن افزایش در سطح ویژه خاک موجب تغییر ویژگی‌های آن می‌شود که از آن جمله می‌توان به خواص خمیری، ضریب نفوذپذیری و ضخامت آب لایه دوگانه اطراف ذره رس اشاره نمود [۹] ایرانپور و حداد (۲۰۱۶) در تحقیقی به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نمونه‌های مختلف نانورُس بر عمکلرد و خصوصیات خاک‌های رسی پرداختند. آنها دریافتند که رطوبت خاک و وزن مخصوص آن تأثیر بسزایی بر گسیختگی آن دارد. از آنجا که نانورُس سطح ویژه بیشتری نسبت به نانو سیلیکا دارد تأثیر بهتر و بیشتری برکاهش پتانسیل گسیختگی خاک دارد [۱۰] زمردیان و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نفت سفید بر رفتار مقاومتی خاک رُسی با پلاستیسیته پایین پرداختند. در تحقیق صورت گرفته تأثیر افزودنی‌های نانورُس و نانوسیلیکا بر رفتار خاک رُسی آغشته به نفت سفید و بدون نفت سفید را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند وجود نفت سفید سبب کاهش مقاومت می‌شود؛ ولی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای افزودنی نانو سیلیکا و نانورُس مقاومت خاک رُس آغشته به نفت سفید را افزایش می دهد [۱۱]

یکی از مهمترین کاربرد نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک استفاده از آنها در بهبود ترک و فرسایش ایجاد شده در سازه‌های خاکی می‌باشد. استفاده از نانومواد میتواند باعث افزایش سرعت ترمیم ترکهای ریز ایجاد شده در خاک رُس گردد که به عنوان پدیده خودترمیمی از آن یاد میشود [۱۲] از جمله عوامل مؤثر بر خودترمیمی می‌توان به خواص شیمیایی خاک، میزان ریزدانه موجود در خاک و شرایط هندسی خاک مورد آزمایش اشاره نمود [۱۳] در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در زمینه پدیده خودترمیمی در خاک‌های رسی انجام گرفته است. کاکاتور و ردی (۲۰۰۶) به بررسی خود ترمیمی در ترک‌های ایجاد شده در سد خاکی پرداختند. آنها در تحقیقات خود دو نوع محل متفاوت در هسته برای ترک در نظر گرفتند. یکی از هسته تا فیلتر پایین دست و دیگر از محل هسته تا فیلتر بالادست و چندین پارامتر از جمله شرایط هیدرولیکی، پارامترهای خاک و فیلتر در تحقیق خود مدنظر قراردادند [۱۴] ونگ و همکاران به بررسی خودترمیمی در سازه‌های خاکی پرداختند. آنها دوازده آزمایش به منظور بررسی عوامل مؤثر در خود ترمیمی ترک در هسته رُسی انجام دادند که عواملی همچون عمق ترک، اندازه‌ی دانه‌های خاک هسته، افزایش اندازه‌ی خاک فیلتر مورد ارزیابی قرار گرفتند [۱۵] کلهر و همکاران به بررسی تأثیر نانومواد بر خاک‌هایی که در معرض ذوب و یخزدگی قرار می‌گیرند، پرداختند. در تحقیقات خود از نانوسیلیس به عنوان افزودنی استفاده نمودند و آزمایش‌های پروکتور استاندارد، اتربرگ و مقاومت تک‌محوری را به انجام رساندند [۱۶]

در این مقاله به بررسی تأثیر عوامل مختلف از جمله افزودنی نانورُس و فشار سربار بر خاصیت خودترمیمی خاک‌های رسی پرداخته می‌شود. برای این منظور دستگاهی طراحی و ساخته شده است که با استفاده از آن میتوان فشارهای مختلف به نمونه را اعمال نمود. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش دو نوع ترک به ضخامت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر در نمونه ایجاد و تأثیر درصدهای مختلف افزودنی، فشار و زمان در ترمیم ترک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- بیان مسأله و مصالح مورد استفاده

۲-۱- بیان مسأله

دوام خاک‌های رُسی در اکثر آب‌بندها، هسته‌ی سدهای خاکی، خاکریزها و پی‌هایی که در معرض جریان آب هستند بسیار حائز اهمیت است. اما عواملی مختلفی از جمله دانه‌بندی نامناسب مصالح، فشار هیدرولیکی و نیروهای دینامیکی ممکن است باعث ایجاد ترک در این سازه‌ها شده و به مرور زمان و با گسترش آن سبب ایجاد فرسایش در سازه خاکی شود. در بسیاری از موارد ایجاد فرسایش در بدنه سدهای خاکی اگر به موقع علاج بخشی گردد مانع از صرف هزینه‌های زیاد و اتفاقات ناخوشایند میشود. در این پژوهش سعی بر آن است تا عواملی که ممکن است سبب ترمیم یا بهبود ترک ایجاد شده در بدنه سازه خاکی شده است، مورد ارزیابی قرار گیرد. این عوامل فشار هیدرولیکی مخزن، ضخامت ترک ایجاد شده و افزودنی‌های موجود در خاک در نظر گرفته شده‌اند.

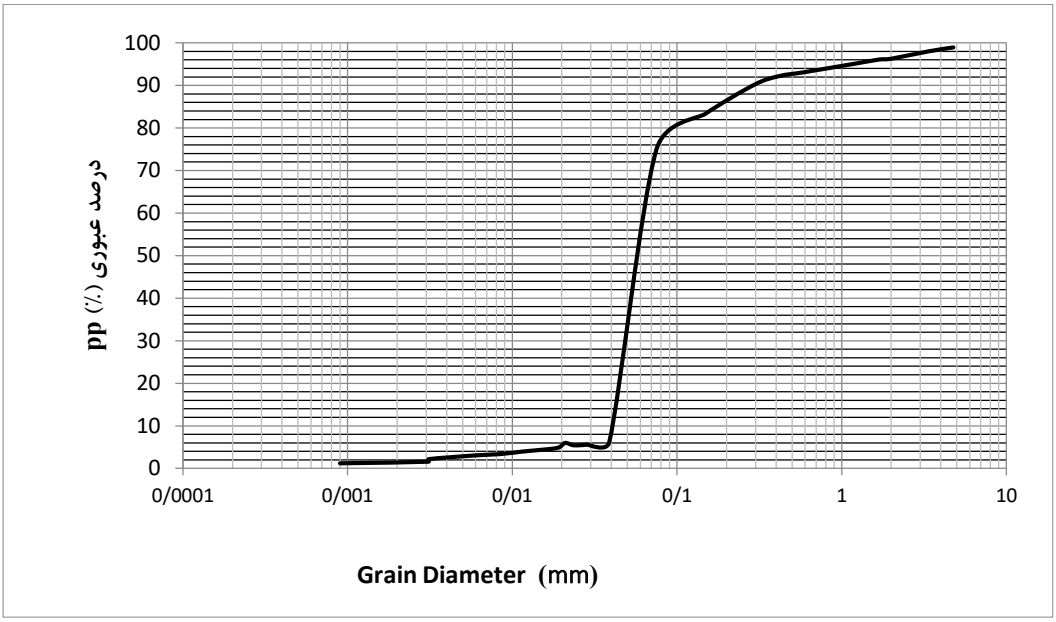
۲-۲- مصالح مورد استفاده

به منظور بررسی عوامل تأثیرگذار بر خودترمیمی، خاک رُسی با وزن مخصوص ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، چگالی ویژه ۲/۶۶، حد روانی ۳۱/۸، حد خمیری ۱۸ و درصد رطوبت بهینه ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ۹۵ درصد خاک ذراتی ریزتر از یک میلی‌متر می‌باشند.

نانورُس مورد استفاده در این تحقیق نانورُس مونت‌موریلونیت K(۱۰) از شرکت سیگما-الدریچ آمریکا است که مشخصات آن در جداول ۱ و ۲ مطرح شده است.

یکی از پارامترهای مهم خاک که بایستی در این تحقیق به آن توجه گردد ضریب نفوذپذیری خاک می‌باشد. این ضریب برای خاک بدون افزودنی بر اساس آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری با بار افتان در آزمایشگاه مکانیک خاک تعیین شده است و مقدار آن برابر $K = 1.22\times10^{-6}\ m/s$ دست آمده است.

به منظور ایجاد شرایط یکسان در آزمایش‌ها، ابتدا میزان رطوبت بهینه و بیشینه تراکم براساس آزمایش پروکتور استاندارد برای خاک بدون افزودنی و با درصدهای مختلف افزودنی تعیین شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک رُس مورد استفاده در آزمایش

Fig. 1. Aggregation curve of soil in the study area

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورُس مونت‌موریلنیت

Table 1. Physical and Chemical properties of montmorillonite nanoclay

نوع کانی	مونت‌موریلونیت
چگالی	gr/m³ ۰/۵ –۰/۷
اندازه ذرات	nm ۲ – ۱
مساحت سطح ویژه	m²/gr ۲۷۰ – ۲۲۰
مقدار تبادل الکتریکی	Mv -۲۵۰
ضریب تبادل یونی	(۴۸) Meg/100gr
فاصله خالی بین ذرات	A° ۶۰
رنگ	زرد کم‌رنگ

جدول ۲. آنالیز شیمیایی نانورُس مونت‌موریلونیت

Table 2. Chemical analysis of montmorillonite nanoclay

شماره	symbol	مقدار(%)
۱	Na_2O	۹۸
۲	MgO	۲۹/۳
۳	Al_2O_3	۶۰/۱۹
۴	SiO_2	۹۵/۵۰
۵	K_2O	۸۶
۶	Cao	۹۷/۱
۷	TiO_2	۶۲
۸	Fe_2O_3	۶۲/۵
۹	LOI	۴۵/۱۵

جدول ۳. درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه خاک رُس با درصدهای مختلف افزودنی

Table 3. Optimal moisture content and clay maximum specific gravity with different percentages of additives

مشخصات نمونه	رطوبت بهینه (٪)	وزن مخصوص بیشینه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
نمونه بدون افزودنی	۱۵	۱/۸۳
نمونه با ۲ درصد نانورُس	۱۶/۵	۱/۷۸
نمونه با ۵ درصد نانورُس	۱۷/۵	۱/۷۴

۳- روش شناسی آزمایش

به منظور بررسی آزمایشگاهی تأثیر عوامل مختلف بر خاصیت خودترمیمی خاک‌های رسی نمونه‌هایی با شرایط یکسان ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر به همراه یک لایه ماسه ۳۰ میلی‌متری با اندازه استاندارد در بالا و پایین نمونه به عنوان لایه فیلتر و محافظ ساخته شده‌اند. در طی آزمایش‌ها دو نوع ترک با قطر های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر به وسیله تیغه‌های فولادی ایجاد شده است به طور کلی روش انجام

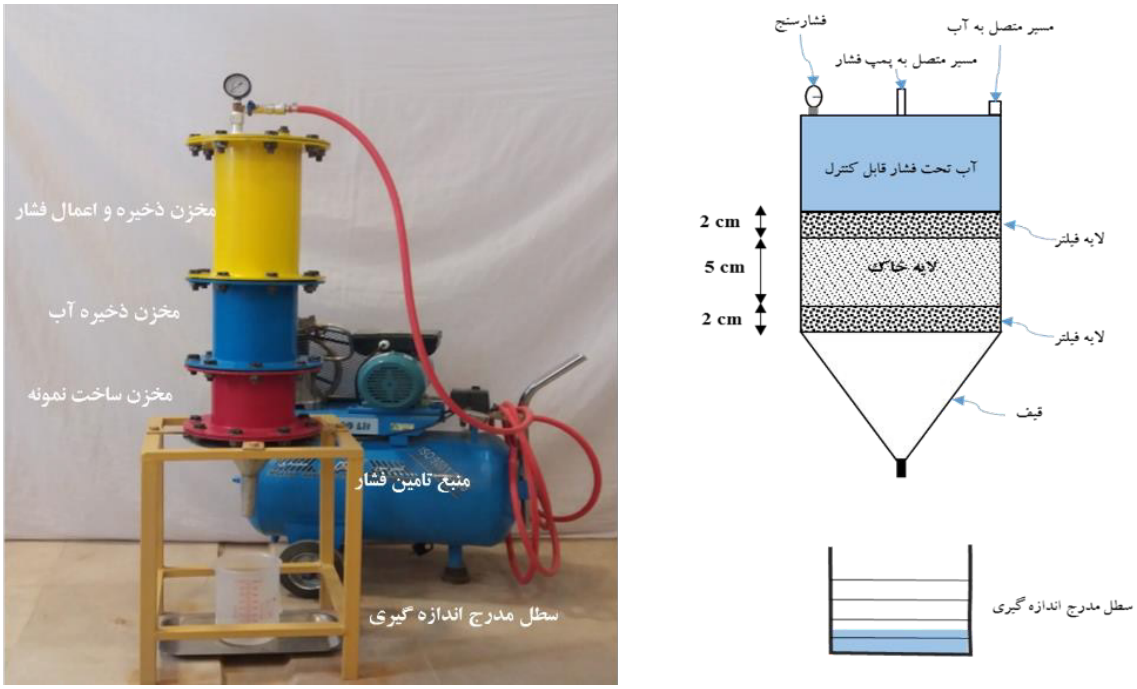
آزمایش را می‌توان به پنج مرحله آماده کردن دستگاه آزمایش، تهیه نمونه طبق برنامه آزمایشی، اعمال فشار از منبع فشار، اندازه‌گیری دبی خروجی و رسم منحنی با استفاده از نتایج بدست آمده تقسیم بندی نمود. تمامی آزمایش‌ها در سه بازه یک ساعت پس از ایجاد ترک، یک روز پس از ایجاد و دو روز پس از ایجاد ترک مورد ارزیابی قرار گرفته و دبی خروجی از ترک اندازه‌گیری شده است.

۳-۱- ابزار آزمایش

به منظور بررسی خاصیت خود ترمیمی ترک در خاک رُس یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شده است. مکانیسم کار دستگاه در شکل ۱- الف و ۱-ب نشان داده شده است. سه بخش اصلی این دستگاه عبارت است از سیستم اعمال سربار، سیستم خاک و فیلتر و سیستم اندازه‌گیری. سیستم اعمال سربار خود به سه قسمت تقسیم می‌شود که عبارتند از: ۱) منبع تأمین فشار ۲) مخزن ذخیره فشار در دستگاه آزمایش و ۳) مخزن ذخیره آب. روند کار این بخش از دستگاه به این صورت است که بعد از تأمین فشار توسط یک کمپراسور هوا، فشار در دامنه ۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال توسط یک شیلنگ فشار قوی و شیر تنظیم کننده به داخل مخزن ذخیره هدایت می‌شود. در قسمت مخزن ذخیره آب ذخیره شده و در نهایت با فشار قابل تنظیم به خاک متراکم اعمال می‌گردد. در سیستم اندازه‌گیری، فشاری که از بالا نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب خروج آب از نمونه می‌شود توسط یک رگلاتور، ساعت و یک قیف نصب شده بر روی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۲- برنامه آزمایش

در این تحقیق تأثیر چهار عامل مختلف فشار، افزودنی نانورُس، ضخامت ترک و زمان بر پدیده خودترمیمی خاک رُس مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد افزایش فشار در نمونه‌ها سبب ایجاد تنش سطحی بر روی نمونه و به تبع آن فشردگی لبه‌های ترک و نزدیک شده آنها به یکدیگر می‌گردد. علاوه بر آن



شکل ۲. دستگاه آزمایش خود ترمیمی ترک با منبع فشار: الف) شماتیک دستگاه، ب) دستگاه واقعی

Fig. 2. Self-healing cracking test apparatus: a) Schematic, b) Real

جدول ۴. برنامه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

Table 4. Performed experiments in this research

شماره آزمایش	درصد افزودنی	ضخامت ترک	فشار سربار	زمان تست	شماره آزمایش	درصد افزودنی	ضخامت ترک	فشار سربار	زمان تست
۱	۰	۱	۰	روز اول	۲۵	۰	۱	۱۰۰	روز دوم
۲	۲	۱	۰	روز اول	۲۶	۲	۱	۱۰۰	روز دوم
۳	۵	۱	۰	روز اول	۲۷	۵	۱	۱۰۰	روز دوم
۴	۰	۰/۵	۰	روز اول	۲۸	۰	۰/۵	۱۰۰	روز دوم
۵	۲	۰/۵	۰	روز اول	۲۹	۲	۰/۵	۱۰۰	روز دوم
۶	۵	۰/۵	۰	روز اول	۳۰	۵	۰/۵	۱۰۰	روز دوم
۷	۰	۱	۰	روز دوم	۳۱	۰	۱	۱۰۰	روز سوم
۸	۲	۱	۰	روز دوم	۳۲	۲	۱	۱۰۰	روز سوم
۹	۵	۱	۰	روز دوم	۳۳	۵	۱	۱۰۰	روز سوم
۱۰	۰	۰/۵	۰	روز دوم	۳۴	۰	۰/۵	۱۰۰	روز سوم
۱۱	۲	۰/۵	۰	روز دوم	۳۵	۲	۰/۵	۱۰۰	روز سوم
۱۲	۵	۰/۵	۰	روز دوم	۳۶	۵	۰/۵	۱۰۰	روز سوم
۱۳	۰	۱	۰	روز سوم	۳۷	۰	۱	افزایش تدریجی	روز اول
۱۴	۲	۱	۰	روز سوم	۳۸	۲	۱	افزایش تدریجی	روز اول
۱۵	۵	۱	۰	روز سوم	۳۹	۵	۱	افزایش تدریجی	روز اول
۱۶	۰	۰/۵	۰	روز سوم	۴۰	۰	۰/۵	افزایش تدریجی	روز اول
۱۷	۲	۰/۵	۰	روز سوم	۴۱	۲	۰/۵	افزایش تدریجی	روز اول
۱۸	۵	۰/۵	۰	روز سوم	۴۲	۵	۰/۵	افزایش تدریجی	روز اول
۱۹	۰	۱	۱۰۰	روز اول	۴۳	۰	۱	افزایش آنی	روز اول
۲۰	۲	۱	۱۰۰	روز اول	۴۴	۲	۱	افزایش آنی	روز اول
۲۱	۵	۱	۱۰۰	روز اول	۴۵	۵	۱	افزایش آنی	روز اول
۲۲	۰	۰/۵	۱۰۰	روز اول	۴۶	۰	۰/۵	افزایش آنی	روز اول
۲۳	۲	۰/۵	۱۰۰	روز اول	۴۷	۲	۰/۵	افزایش آنی	روز اول
۲۴	۵	۰/۵	۱۰۰	روز اول	۴۸	۵	۰/۵	افزایش آنی	روز اول

باید اشاره نمود که اعمال فشار بر نمونه فقط در تراکم های بالا امکان‌پذیر می‌باشد و در تراکم‌های پایین اعمال فشار سبب آبشستگی و جداشدگی می‌شود [۱۷]. در برنامه آزمایش‌ها ۴۸ نمونه تحت شرایط یکسان آزمایشگاه ساخته و تأثیر عوامل ذکر شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۴ برنامه کلی آزمایش‌ها ذکر شده است.

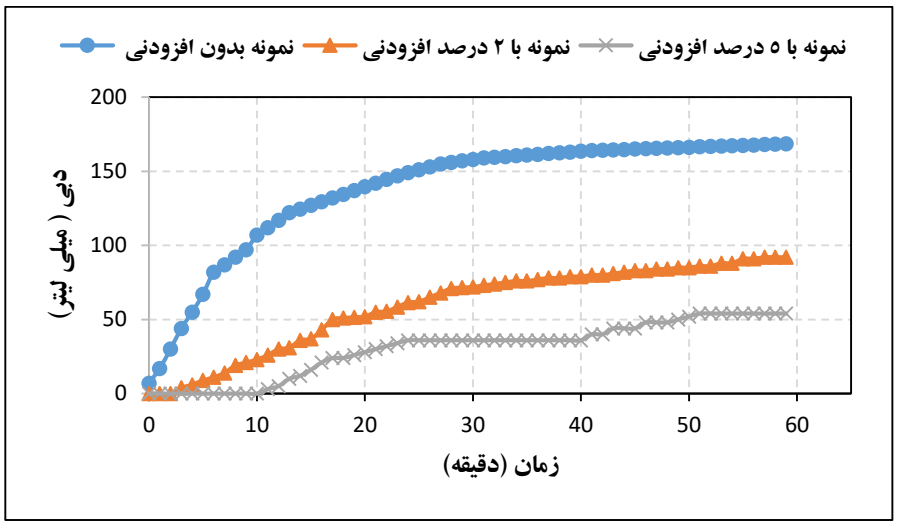
هر نمونه در سه بازه زمانی یک ساعت پس از ایجاد ترک، یک روز پس از ایجاد ترک و دو روز پس از ایجاد ترک مورد بررسی قرار گرفته است. این فواصل زمانی به مصالح ریزدانه و افزودنی نانورُس فرصت کافی جهت بهبود وضعیت ترک را خواهد داد. در ۱۸ آزمایش اول نمونه‌ها بدون فشار منفذی بررسی شده و در آنها قطر ترک، بازه زمانی و درصد نانورُس تغییر نموده است. از آزمایش ۱۹ تا ۳۶ تمامی آزمایش‌ها در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی واقع شده‌اند و آزمایش ۳۷ تا ۴۸ فشار در نمونه به صورت تدریجی و آنی تا ۵۰۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است. قابل ذکر است آزمایش‌های بدون اعمال فشار ۶۰ دقیقه زمان آزمایش بوده است و دبی خروجی برای ۶۰ دقیقه اندازه‌گیری شده است و نمونه‌هایی که تحت فشار قرار گرفته‌اند برای بازه ۱۰ دقیقه‌ای مورد ارزیابی واقع شده‌اند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تأثیر نانورُس بر ترمیم ترک‌های ایجاد شده در خاک

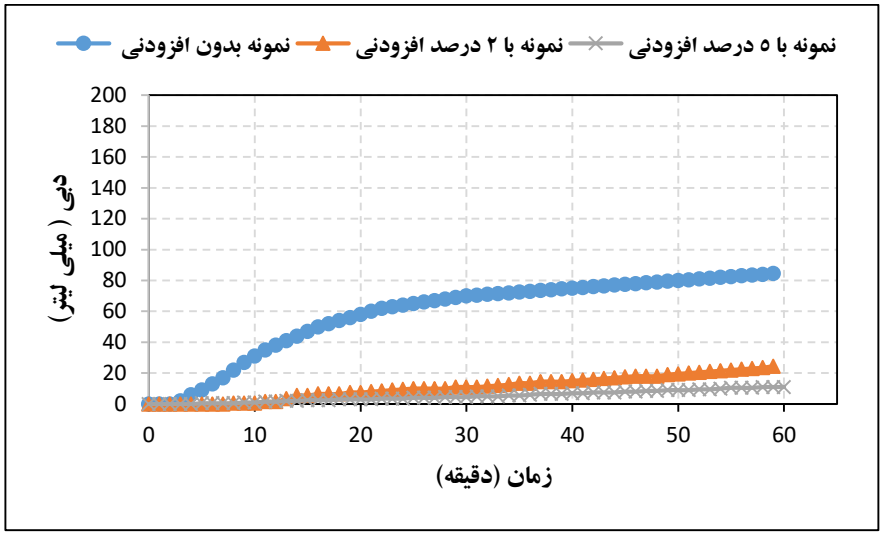
در این قسمت به بررسی تأثیر نانورُس بر ترمیم ترک‌های ایجاد شده در خاک پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌هایی بدون حضور نانورُس و با ۲ و ۵ درصد نانورُس ساخته شده و در این نمونه‌ها ترک‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متری ایجاد گردیده است. سپس نمونه‌ها در زمان مختلف تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۳ و ۴ نمونه تحت شرایط بدون اعمال فشار و با درصدهای مختلف افزودنی برای ترک با ضخامت ۱ میلی‌متر یک ساعت پس از ایجاد ترک بررسی شده‌اند. همان‌طور که مشخص است در روز اول نمونه بدون افزودنی و با ترک ۱ میلی‌متر بیشترین حجم آب خروجی را دارد. اما در دو نمونه که حاوی ۲ و ۵ درصد نانورُس هستند ترک ایجاد شده پس از یک ساعت تا حدود زیادی ترمیم شده است؛ به طوری که در نمونه با ۲ درصد نانورُس حجم دبی خروجی از ۱۶۰ میلی‌لیتر به ۸۹ میلی‌لیتر کاهش یافته است.

در شکل ۴، تأثیر ۲ و ۵ درصد افزودنی بر اصلاح ترک ۰/۵ میلی‌متر ایجاد شده در رُس پرداخته شده است. همان‌طور که مشخص است حضور درصدهای افزودنی تأثیر بسزایی بر کاهش دبی خروجی از ترک دارد؛ به صورتی که پس از یک ساعت از ایجاد ترک، دبی خروجی در نمونه با ۵ درصد افزودنی به ۱۰ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد. این نتایج نشان از تأثیر ریزدانه‌های نانورُس بر بهبود وضعیت ترک ایجاد شده دارند. در ادامه و در شکل‌های ۵ و ۶ به بررسی تأثیر افزودنی نانورُس بر خاصیت ترمیمی ترک در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، افزایش فشار سبب افزایش دبی عبوری از ترک شده است؛ ولی در این شرایط نیز حضور افزودنی نانورُس به میزان ۲ و ۵ درصد سبب کاهش



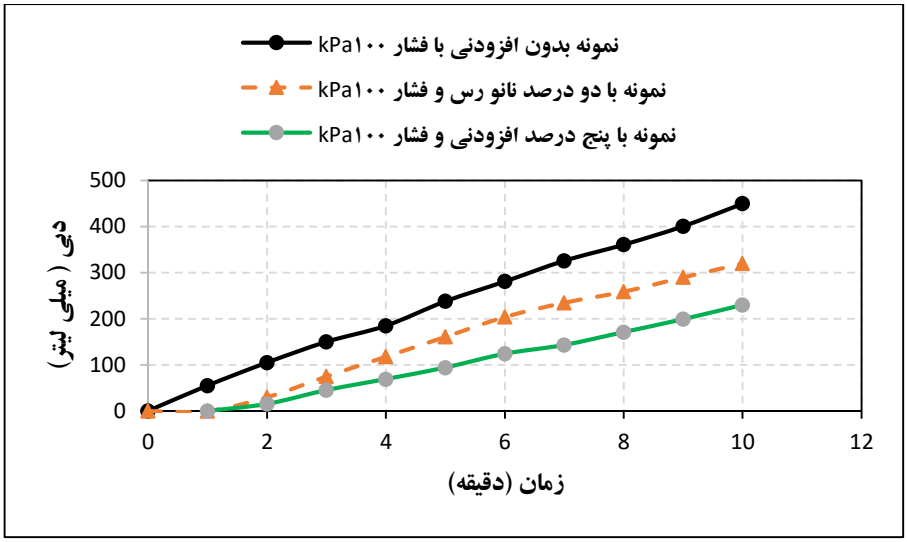
شکل ۳. تأثیر افزودنی نانورُس بر ترمیم ترک ۱ میلی‌متر یک ساعت بعد از ایجاد ترک

Fig. 3. The effect of nanoclay additive on crack repair 1 mm at 1 hour after crack creation



شکل ۴. تأثیر افزودنی نانورُس بر ترمیم ترک ۰/۵ میلی‌متر یک ساعت بعد از ایجاد ترک

Fig. 4. The effect of nanoclay additive on crack repair 0.5 mm at 1 hour after crack creation



شکل ۵. تأثیر افزودنی نانورُس بر ترمیم ترک ۱ میلی‌متر یک ساعت بعد از ایجاد ترک در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

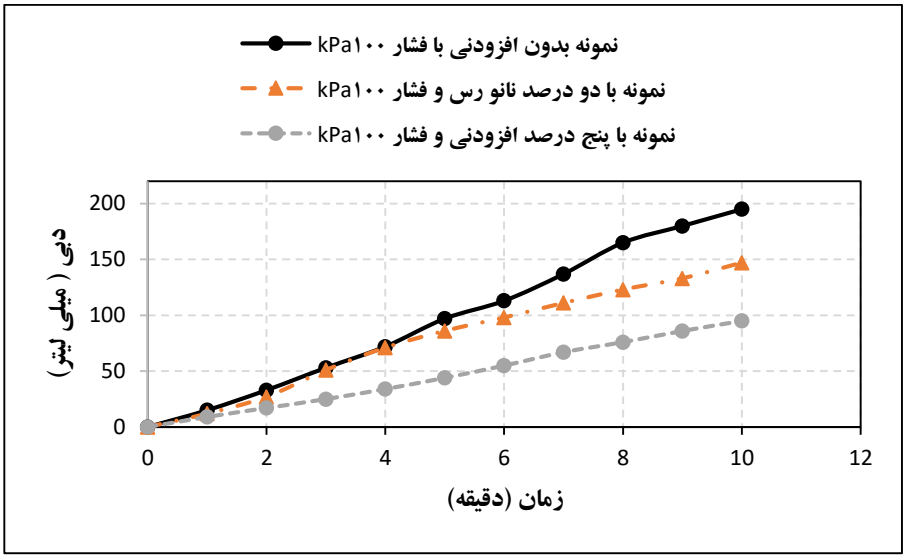
Fig. 5. The effect of nanoclay additive on crack repair 1 mm at 1 hour after crack creation in 100 kPa pressure

دبی عبوری تا ۵۰ درصد شده است.

در شکل ۶ تأثیر افزودنی‌های روی ترک ۰/۵ میلی‌متری در شرایط اعمال فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. طی ۱۰ دقیقه زمان آزمایش دبی عبوری از نمونه بدون افزودنی و ترک ۰/۵ میلی‌متری ۲۰۰ میلی‌لیتر می‌باشد؛ ولی زمانی که نمونه با ۵ درصد نانورُس تحت همین شرایط مورد بررسی قرار گرفته است، دبی خروجی از آن به کمتر از ۹۵ میلی‌لیتر کاهش یافته است.

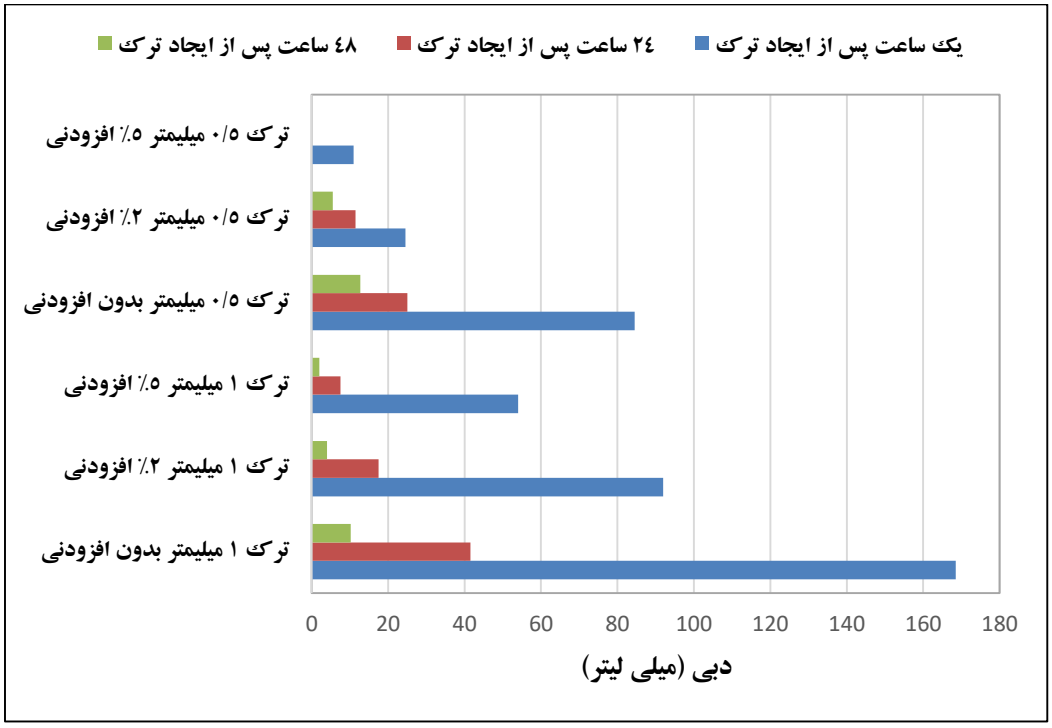
۲-۴- بررسی تأثیر زمان بر خاصیت خود ترمیمی خاک رُس

در کنار عوامل مهمی که بر بهبود وضعیت ترک ایجاد شده در خاک رُسی می‌تواند تأثیرگذار باشد می‌توان به گذشت زمان اشاره نمود. گذشت زمان باعث می‌شود محل ترک ایجاد شده ترمیم به وسیله ذرات ریز رُس و نانو رُس پوشیده و به مرور ترک بهبود یابد. در این قسمت تأثیر گذشت زمان بر رفتار نمونه‌های مختلف مورد بررسی واقع شده است. در شکل ۷ نمونه‌های با درصدهای مختلف افزودنی و طی زمان‌های مختلف در حالت بدون اعمال فشار مورد ارزیابی



شکل ۶. تأثیر افزودنی نانورُس بر ترمیم ترک ۵/۰ میلی‌متر یک ساعت بعد از ایجاد ترک در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 6. The effect of nanoclay additive on crack repair 0.5 mm at 1 hour after crack creation in 100 kPa pressure

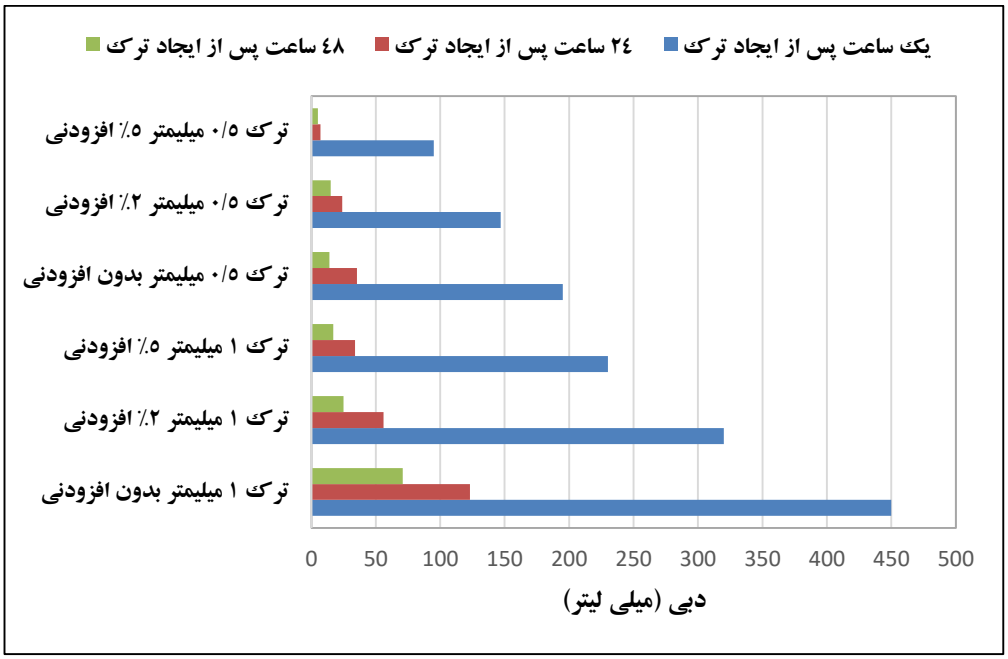


شکل ۷. بررسی تأثیر زمان بر بهبود وضعیت ترک در نمونه‌ها بدون اعمال فشار منفذی

Fig. 7. Examination the effect of time on crack recovery in samples without pore pressure

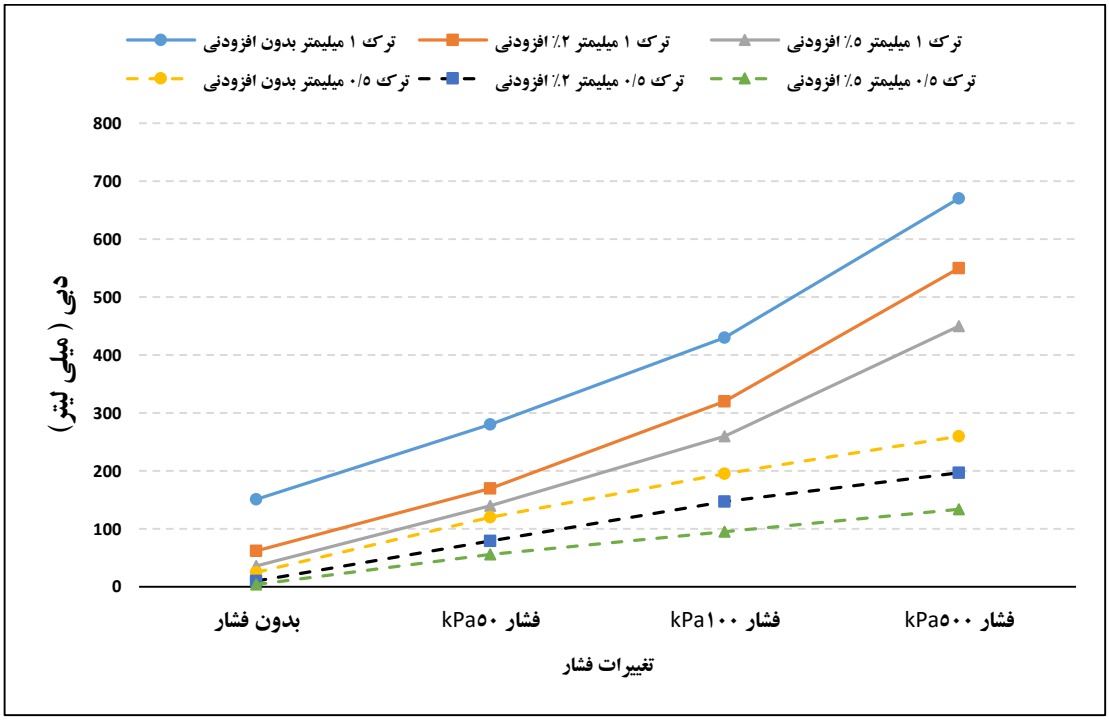
قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است در نمونه با ترک ۰/۵ میلی‌متر و بدون افزودنی در یک ساعت پس از ایجاد ترک دبی عبوری حدود ۸۵ میلی‌لیتر می‌باشد؛ ولی با گذشت یک روز از ایجاد ترک دبی عبوری به ۲۵ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر گذشت زمان یک روزه از ایجاد ترک تأثیری مانند نمونه حاوی دو درصد افزودنی را دارد. تأثیر گذشت زمان در نمونه‌های ترک ۱ میلی‌متری نیز به وضوح در شکل ۷ قابل رویت می‌باشد.

در شکل ۸ تأثیر گذشت زمان بر ترمیم ترک ایجاد شده تحت



شکل ۸. بررسی تأثیر زمان بر بهبود وضعیت ترک در نمونه‌ها بدون اعمال فشار منفذی در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 8. Examination the effect of time on crack recovery in samples without pore pressure in 100 kPa Pressure



شکل ۹. بررسی تأثیر فشار منفذی بر تغییر میزان دبی عبوری از ترک با درصدهای مختلف افزودنی

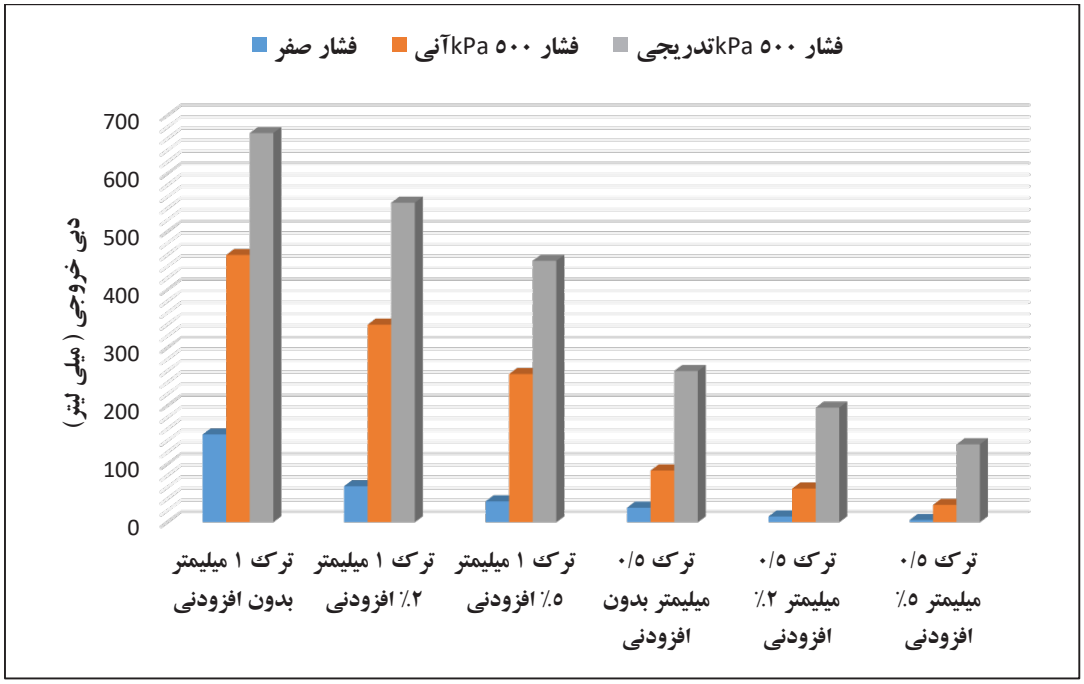
Fig. 9. The effect of pore pressure on the flow rate through the cracks with different percentages of additives

فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی واقع شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، در نمونه حاوی ۵ درصد نانورُس زمانی که ترک ۱ میلی‌متری ایجاد می‌گردد در یک ساعت پس از ایجاد ترک و در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال دبی عبوری در ۲۳۰ میلی‌لیتر می‌باشد؛ ولی با گذشت دو روز از ایجاد ترک دبی عبور به ۱۷ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد. بررسی شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهد در نمونه‌های حاوی نانورُس گذشت زمان تأثیر بهتری بر بهبود وضعیت ترک داشته است و نمونه‌های حاوی افزودنی با سرعت بیشتری بهبود یافته‌اند. در نمونه بدون افزودنی پس از یک روز دبی عبوری به حدود ۰/۲۷ دبی روز اول رسیده است. این در حالی است که در نمونه حاوی ۵ درصد نانورُس پس از یک روز دبی عبوری به ۰/۱۳ دبی روز اول رسیده است. این موضوع تأثیر مثبت دو عامل زمان و افزودنی نانورُس بر بهبود وضعیت ترک را تصدیق می‌کند.

۳ –۴- بررسی تأثیر فشار بر خاصیت خود ترمیمی خاک رُس

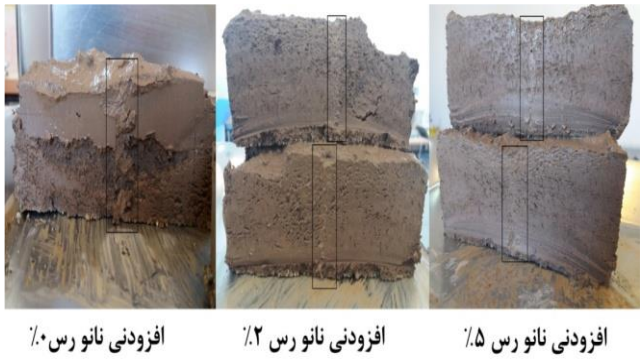
در کنار عوامل مانند نانورُس و گذشت زمان که می‌تواند در بهبود وضعیت ترک تأثیر مثبت داشته باشد، عوامل دیگری نیز وجود دارد که حضور و یا تغییر آنها می‌تواند بر وضعیت ترک تأثیرگذار باشد. از جمله این عوامل میتواند بر فشار وارد بر نمونه اشاره نمود. نمونه تحت تأثیر فشار میتواند رفتار متفاوتی از خود نشان دهد. این موضوع در دو مورد بررسی قرار گرفته است. حالت اول زمانی است که فشار به صورت تدریجی افزایش مییابد و حالت دوم زمانی است که نمونه به یکباره تحت تأثیر فشار حداکثر قرار داده میشود. در زمانی که فشار به صورت مرحله‌ای افزایش مییابد، دبی خروجی از ترک نیز با افزایش فشار افزایش مییابد. این موضوع برای ترک‌های مختلف با درصدهای متفاوت افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردیده است. در شکل ۹ تغییرات افزایش فشار بر میزان دبی عبوری از ترک برای نمونه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است افزایش تدریجی فشار تا ۵۰۰ کیلوپاسکال طی ۱۰ دقیقه دبی عبوری از نمونه را در اکثر نمونه‌ها تا حدود ۱۰ برابر افزایش می‌دهد. در نمونه‌هایی که ترک ۱ میلی‌متری دارند افزایش دبی در طی افزایش فشار با سرعت بالاتری نسبت به نمونه‌های با ترک ۰/۵ میلی‌متری رخ داده است.

یکی از قسمت‌های مهم و قابل بحث در این مقاله در شکل ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که گفته شد، افزایش فشار وارد بر نمونه در دو حالت اتفاق افتاد. حالت اول افزایش تدریجی فشار از ۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال بود که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شد و حالت دوم افزایش آنی فشار از ۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال است که میزان دبی عبوری



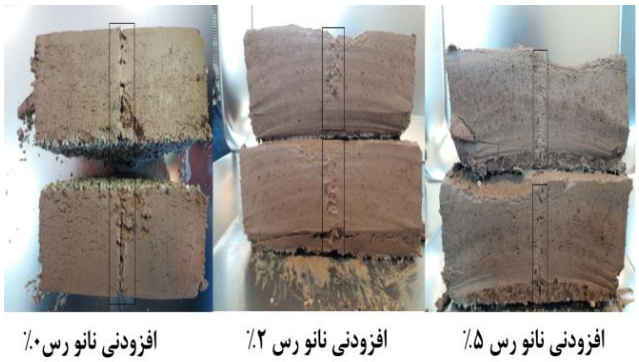
شکل۱۰. مقایسه تأثیر تغییر آنی و تدریجی فشار بر دبی عبوری از ترک

Fig. 10. Comparison of the effect of the immediate and gradual pressure change on the flow rate through the cracks



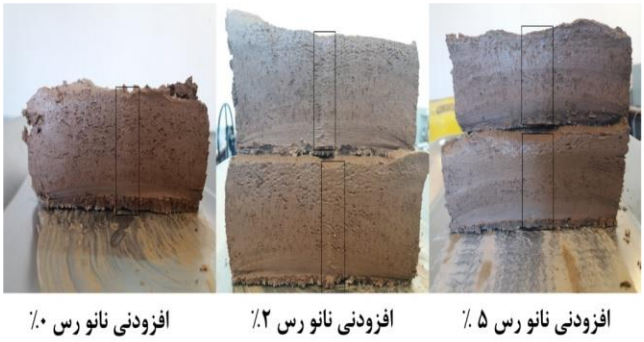
شکل ۱۲. تصاویر نمونه‌ها برای ترک ۱ میلی‌متری یک روز پس از ایجاد ترک.

Fig. 12. Sample images for 1 mm cracks at one day after cracking



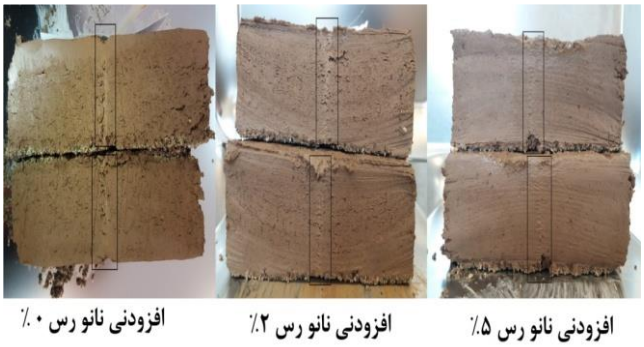
شکل ۱۱. تصاویر نمونه‌ها برای ترک ۱ میلی‌متری یک ساعت پس از ایجاد ترک.

Fig. 11. Sample images for 1 mm cracks at one hour after cracking



شکل ۱۴. تصاویر نمونه‌ها برای ترک ۵/۰ میلی‌متری یک روز پس از ایجاد ترک.

Fig. 14. Sample images for 0.5 mm cracks at one day after cracking



شکل ۱۳. تصاویر نمونه‌ها برای ترک ۵/۰ میلی‌متری یک ساعت پس از ایجاد ترک.

Fig. 13. Sample images for 0.5 mm cracks at one hour after cracking

از ترک در مقایسه با حالت افزایش فشار تدریجی و بدون فشار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، دبی عبوری از ترک زمانی که فشار به صورت آنی افزایش می‌یابد کمتر از حالتی است که فشار در نمونه به صورت تدریجی زیاد شده تا به ۵۰۰ کیلوپاسکال می‌رسد.

یعنی می‌توان بیان نمود افزایش فشار تدریجی در نمونه سبب تخریب و آبشستگی اطراف ترک می‌گردد و با افزایش فشار این آبشستگی‌ها افزایش یافته و دبی عبوری از ترک بیشتر میگردد. اما زمانی که فشار به صورت آنی در نمونه افزایش می‌یابد، افزایش فشار سبب جمع‌شدگی اطراف دهانه ترک و کاهش دبی عبوری میگردد. این درحالی است که چون فشار به صورت آنی افزایش یافته است، آبشستگی در اطراف دهانه ترک رخ نداده است.

۴-۴- بررسی تصویری تأثیر نانورُس بر ترمیم ترک

با دقت بر وضعیت ترک در نمونه‌های ساخته شده به خوبی دیده می‌شود که نانورُس تأثیر چشم‌گیری بر ترمیم ترک دارد. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ رفتار نمونه‌های حاوی نانورُس و بدون افزودنی به خوبی دیده می‌شود. در نمونه‌های حاوی ۲ و ۵ درصد نانورُس، ترک به مقدار

زیادی بهبود یافته و اثری از آن باقی نمانده است. در شکل ۱۱ ترک ۱ میلی‌متری به وضوح در هر سه نمونه بدون افزودنی و با افزودنی ۲ و ۵ درصد قابل رؤیت است. اما هنگامی که یک روز از ایجاد ترک بگذرد ترک تا حد زیادی بهبود یافته که نتایج آن در شکل ۱۲ قابل رؤیت می‌باشد. این تغییرات در ترک ۰/۵ میلی‌متری با گذشت یک روز محسوس‌تر بوده است؛ به صورتی که ترک ۰/۵ میلی‌متری با گذشت یک روز و در حضور ۵ درصد افزودنی تقریباً بهبود یافته است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی تأثیر سه عامل افزودنی نانورُس، زمان و فشار بر تغییر وضعیت ترک ایجاد شده در خاک رُس پرداخته شد که نتایج زیر به دست آمد:

-افزودنی نانورُس سبب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه خاک می‌گردد.

-افزودنی نانورُس سبب بهبود وضعیت ترک می‌شود؛ به طوری که در نمونه حاوی ۵ درصد نانورُس و با گذشت یک ساعت از ایجاد ترک ۱ میلی‌متری در خاک، میزان دبی عبوری از ۱۶۸ به ۵۵ میلی‌لیتر کاهش می‌یابد. ولی نکته قابل توجه قیمت افزودنی نانورُس می‌باشد که باید به آن توجه شود.

-گذشت زمان یکی از عوامل مؤثری بود که بر بهبود وضعیت ترک‌های ایجاد شده تأثیرگذار می‌باشد. در این تحقیق زمان یک روز و دو روز پس از ایجاد ترک مورد بررسی واقع شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد گذشت زمان در بهبود وضعیت ترک در خاک‌های ریزدانه بسیار مؤثر می‌باشد و همان تأثیری که ۵ درصد افزودنی نانورُس می‌تواند بر رفتار نمونه داشته باشد، با گذشت یک روز می‌توان در نمونه ایجاد نمود.

-در کنار عواملی چون وجود افزودنی و گذشت زمان، تغییر فشار نیز می‌تواند بر وضعیت ترک تأثیرگذار باشد. افزایش تدریجی فشار سبب افزایش دبی عبور از ترک می‌گردد. این افزایش فشار تا ۵۰۰ کیلوپاسکال می‌تواند دبی عبور را تا ده برابر افزایش دهد. نکته مهم این است که در حالتی فشار آنی از صفر تا ۵۰۰ کیلوپاسکال و در یک مدت زمان برابر، دبی عبوری از ترک کمتر از زمانی است که فشار به صورت تدریجی به ۵۰۰ کیلوپاسکال می‌رسد.

مراجع

[1] G.T. Dounias, D.M. Potts, P.R. Vaughan, Analysis of progressive failure and cracking in old British dams, Geotechnique 46 (4) (1996) 621–640.

[2] R. Fell, P. Macgregor, D. Stapledon, G. Bell, Geotechnical engineering of dams, Publishd By: A.A. Balkema Publishers Leiden, The Netherland, A Member of Taylor & Francis Group Plc (2003) 912.

[3] D. Rodriguez, V. Ogunro, An effective approach to prevent piping in older dams using cutoff walls construction design, International conference on energy, environmental and disasters-indeed, (2005).

[4] M.A. Foster, R. Fell, M. Spannagle, The statistics of embankment dam failures an accidents, Canadian Geotechnical Journal , 37~51 (2000) 1000-1024.

[5] S.M. Zomorodian, H.R. Koohpeyma, Investigation of effectiveness of modern chemical stabilizers on internal erosion in embankment dams, Sharif Journal of Civil Engineering, 30(2) (2015) 73-78.

[6] M. Zhang, M. Takahashi, H.R. Morin, H. Endo, T. Esaki, Determining the hydraulic properties of saturated, low-permeability geological materials in the laboratory, Advanced in theory and practice, Evaluation and remediation of low permeability, ASTM (2002).

[7] Z.H. Majeed, M.R. Taha, A Review of Stabilization of Soils by using Nano-material, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(2) (2013) 576-581.

[8] M. Kadivar, K. Barkhordari, M. Kadivar, Nanotechnology in Geotechnical Engineering, Advanced Materials Research 261 (2010) 524-528.

[9] J.K. Mitchel, K. Soga, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons, Third edition (2013).

[10] B. Iranpour, A.Hadad, The influence of Nano-materials on collapsible soil treatment, Engineering Geology (2016).

[11] M. Zomorodian, Sh. Moghispour, A. Soleymani, C. Brendan, Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and

nanosilica as additives, Applied Clay Science 140 (2017) 140–147

[12] K.D. Eigenbrod, Self-healing in fractured fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal 40 (2003) 435–449.

[13] L.N. Reddi, I.M. Lee, M.V.S Bonala, Comparison of internal and surface erosion using flow pump tests on a sand-kaolinite mixture, Geotechnical Testing Journal, 23 (2000)116–122.

[14] S. Kakuturu, L.N. Reddi, Evaluation of the parameters influencing self-healing in earth dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (2006) 879–889.

[15] J.J. Wang, H.P. Zhang, L. Zhang, Y. Liang, Experimental study on self-healing of crack in clay seepage barrier, Engineering Geology 159 (2013) 31–35.

[16] A. Kalhor, M. Ghazavi, M. Roustaei, Influence of nano-SiO2 on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles, Cold Regions Science and Technology, (2019).

[17] S. Kazemian, B. B. Huat, Assessment of stabilization methods for soft soils by admixtures, In Science and Social Research (CSSR), International Conference, (2010) 118-121.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Mazaheri, (2021). Evaluation of the Effect of Nano-Clay and Pressure Change on the Self-Healing Properties of Clay Soils. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5): 1821-1834.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17161.6481