

EXTENDED ABSTRACT

Experimental analysis of the effect of adding montmorillonite nanomaterials on increasing the strength of inclined surfaces in earth Dams and the time of destruction

B. Ghahraman^{1*}, I. Kahkesh² and Kazem Esmaili³

1-Corresponding Author, Professor, Department of water engineering, Ferdowsi University of Mashhad (bijangh@um.ac.ir).*

2- Phd candidate of water structure, Ferdowsi University of Mashhad.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 November 2018

Revised: 2 August 2019

Accepted: 6 August 2019

Keywords:

Embankment, Earth dam, Shear stress, Destruction, Nano material.

TO CITE THIS ARTICLE :

Ghahraman, B., Kahkesh, I., Esmaili, K. (2021). 'Experimental analysis of the effect of adding montmorillonite nanomaterials on increasing the strength of inclined surfaces in earth Dams and the time of destruction', *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(1), pp. 47-60. doi: 10.22055/jise.2019.27587.1805.

Introduction

Soil structures, despite their advantages over concrete structures, are considered as high risk structures. These structures face irreparable cultural, social and economic losses against conditions such as floods. The most common cause of earthen dam damage is the overflow phenomenon, which accounts for 59% of failures (Schmocker and Hager, 2010). One of the ways to increase soil resistance is to add mixed materials with high shear strength to the soil. In this research, nano materials were mixed at five levels with the soil used in the earth dam, and an increase of about 70% of the shear strength of the soil was observed as a result of adding 5% nanoparticles to the soil. Furthermore, other soil properties from the perspective of geotechnical science and soil behavior, when mixed with nanomaterials, were investigated. Hui and Yan(2013) In their research investigated the role of particle size in the destruction of earth structures. By examining non-cohesive soils with average particle diameters of 0.33, 0.4 and 0.62, they concluded that particle size, flow rate and water height behind the embankment have a direct effect on the demolition process of earth dams.

Methodology

The flume made in the laboratory is 5 meters long, 50 cm wide and 60 cm high. In order to carry out the experiments, several models, as shown in Table (1), were developed. It should be noted that each model is made with two types of granulation. The soil characteristics used in the study are presented in Table (2).

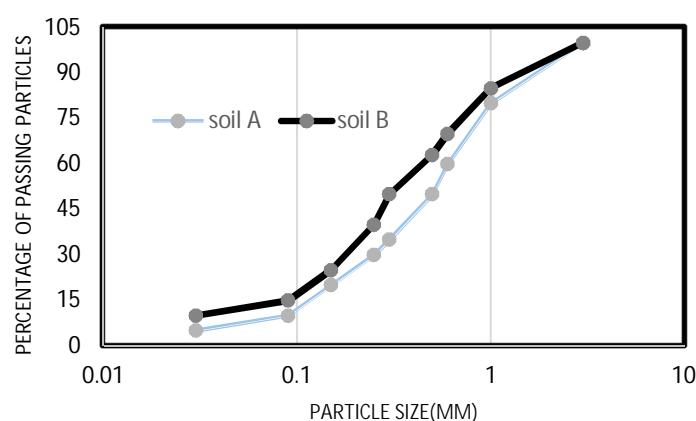
Table 1- Details of models

	Length of dam(cm)	Length of crown(cm)	Width (cm)	Height (cm)	Z	Vol (m ³)
Model no. 1	220	60	20	50	1:2	0.36
Model no. 2	320	60	20	50	1:3	0.51

Table 2- Details of soils

	Dimension of Particles (mm)	Internal friction Angle	Density (%)	Cohesion (KN/m ²)	ρ (gr/cm ³)
Soil A	0.4	17	95%	39	1.9
Soil B	0.8	25	93%	33	2.1

To obtain optimum moisture content, specific gravity and ideal density for the construction of earth dam models, a standard test of the protractor was conducted with the ASTM D698 standard. It should be noted that, theoretically, the specific gravity and dimensions of laboratory models can be used to determine the weight of soil used in each model. Now, considering that all of these values are estimated, if, during the construction of laboratory models, the soil weight used is equal to the values predicted by theoretical relations, it can be claimed that the amount of density applied when constructing a model will be close to the density applied when real samples are executed. In the manufacture of laboratory models, the maximum grain weight is equal to 1.2 for coarse grains. Also, considering the size of the 1: 2 model, which is 0.33 m³, the soil weight used during construction should be a value of approximately 756 Kg, which is practically equivalent to 740 Kg, and by putting this in the theoretical relationship, the density measured during the construction of the experimental model is estimated at 95%. This is also true for the 1: 3 model. In Fig. (1), the gradient plot of the used soils is given.

**Fig 1- Gradient chart**

Conclusion

Shear stress and resistance of soil samples during direct and single-shear tests, shear stress data and shear strength were measured for mixed soil samples with nanoparticles.

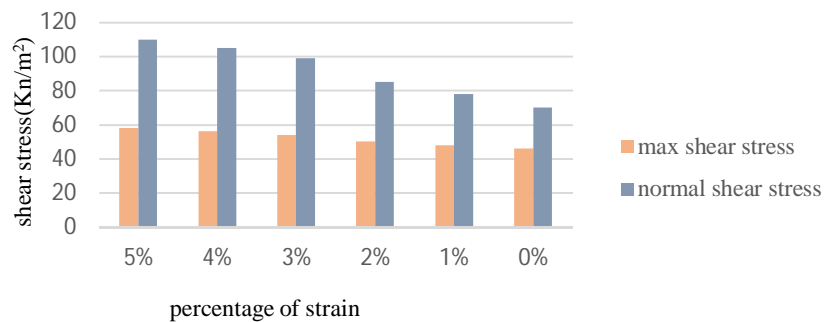


Fig. 2- Max and normal shear stress of models

In the process of conducting the experiments, glass diffuser was inserted into the bottom of the structure and the exhaust port, and the output of different discharge rates was measured. Also, the rate of discharge was calculated by Eq. 2, which is shown in Fig. 3 for both of these values and the obtained data. In this section, by presenting a bar diagram that contains the maximum shear stress and normal shear stress, An attempt has been made to reach a criterion that can show the difference in stress in different samples. According to Columbus' theory, shear stress was directly related to shear strength And it can be inferred that in Figure (2) the maximum shear stress, which belongs to the 5% state, also has the highest shear strength. It is worth noting that the theoretical and practical values of the output hydrograph are consistent. Also, the theoretical values are about 5 to 10% higher than the values obtained during the experiments. This is due to the direct relationship between the water level behind the dam and the outlet flow. Because data collection in the lake behind the dam is very difficult and the water level is turbulent Therefore, it makes data collection difficult. But the correspondence between theoretical and practical data shows that the computational and computational data are correct

But the matching of theoretical and practical data indicates the accuracy of computational data.

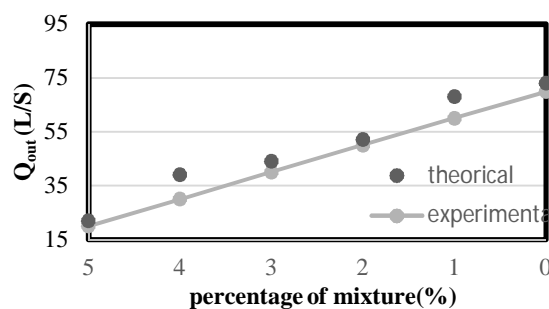


Fig. 3- Comparison of the output discharge of the structure in theory and practice

Findings

. Among the various percentages of nanoparticles added to the soil used in the earth dam, the 3% state has the best performance due to the increased time of destruction and has the greatest difference with its previous state.

. The lowest percentage of destruction occurred in the 5% state, but in order to justify the plan, the combined level of 3%, which has the greatest difference with its predecessor, is proposed.

. The addition of nanoscale materials does not have much effect on the degree of internal friction of the soil sample, but the nano-materials of the montmorillonite mixed with soil has a significant effect on adhesion, so that by increasing the percentage of nanoparticles, about 24% of increase is observed in the soil mass adhesion.

. Finally, in the 3% state, it is observed that the adhesion parameter is about 28% higher than that of the pre-self, which is among the different mixing ratios. This percentage has the greatest difference with its predecessor.

Acknowledgments

Thanks to the Department of Water Engineering and Management of the Hydraulic Laboratory of Ferdowsi University of Mashhad, who cooperated in various stages of preparing this research.

References

- 1- Hui, M.Y. and Yan, H.W., 2013. Investigation of Non- Cohesive Breach by Overtopping Flow. *Journal of Hydrodynamics*, pp. 572-579.
- 2- Schmocker, L. and Hager, H.M., 2010. Overtopping and Breaching of Dike Breach Profile and Breach Flow. *River Flow*, ISBN 978-3-939230-00-7.PP.515-522.



© 2021 Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

تحلیل آزمایشگاهی تأثیر افزودن نانو مواد مونت‌موریلونیت بر افزایش مقاومت سطوح شیروانی سد خاکی و زمان تخریب سازه

بیژن قهرمان^{1*}، اسماعیل کاهکش² و کاظم اسماعیلی³

¹ - نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد. (bijangh@um.ac.ir)

² - دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد.

³ - دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

پذیرش: 1398/5/15

بازنگری: 1398/5/11

دریافت: 1397/8/29

چکیده

سازه‌های خاکی علی‌رغم مزایایی که نسبت به سازه‌ی بتنی دارند، در زمره‌ی سازه‌های پرخطر محسوب می‌شوند. این سازه‌ها در برابر عواملی نظیر سیلاب، با خسارات جبران‌ناپذیر فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی مواجه می‌شوند. یکی از راه‌کارهای افزایش مقاومت خاک، افزودن موادی ترکیبی به خاک، با مقاومت برشی بالا می‌باشد. تا کنون موادی نظیر بنتونیت، مواد پلیمری و شیمیایی، الیاف گیاهی و ... مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با به‌کارگیری مواد نانوی موسوم به مونت‌موریلونیت، ضمن ترکیب علم میان رشته‌ای نانو با علم ژئوتکنیک، اثرات این مواد بر خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفته شود. به این منظور مواد نانو در پنج سطح ترکیبی با خاک مورد استفاده در سد خاکی مخلوط شده و افزایش حدود 70 درصدی مقاومت برشی خاک به‌زای افزودن پنج درصد نانو ذرات به خاک مشاهده شد. در ادامه، باقی خصوصیات خاک از منظر علم ژئوتکنیک و رفتار خاک در هنگام اختلاط با نانو مواد مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: ژئوتکنیک، نانو تکنولوژی، مقاومت برشی خاک، تخریب سازه‌های خاکی، روگذری جریان.

مقدمه

سازه‌های خاکی مانند سدها و کانال‌های انتقال آب باوجود آن‌که دارای هزینه‌ی ساخت نسبتاً کوتاه‌تری در قیاس با سازه‌های بتنی می‌باشند، دارای عیب‌هایی هستند که در صورت عدم کنترل، قادر به اعمال خسارات جبران‌ناپذیری در زمینه‌های مالی، جانی، فرهنگی و اجتماعی هستند. عوامل متعددی باعث تخریب سازه‌ی سد خاکی می‌گردد که می‌توان به مسئله‌ی لغزش فونداسیون، فرسایش درونی، پاپینگ و رگاب اشاره نمود. اما بیشترین عامل تخریب سدهای خاکی پدیده‌ی روگذری جریان می‌باشد که 59 درصد خرابی‌ها را شامل می‌شود (Schmocker and Hager, 2010).

برای مقابله با این پدیده، مهندسين طراحی ملزم به طراحی سازه با در نظر گرفتن بیشترین سیلاب محتمل هستند که دوره‌ی بازگشت این سیلاب ارتباط مستقیمی با میزان اهمیت سازه دارد. عوامل تخریب سدهای خاکی را می‌توان در دو دسته‌ی سازه‌ای و هیدرولیکی تقسیم‌بندی نمود. هرچند در بیشتر موارد، خرابی‌های هیدرولیکی قابل پیش‌بینی هستند اما در حالت کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که پدیده‌ی روگذری جریان امری اجتناب‌ناپذیر است (Danka and Zhang, 2015). با توجه به توضیحات بیان‌شده، باید به دنبال راه‌کارهایی بود تا در مواقعی که جریان به‌صورت روگذر از روی سازه عبور می‌کند، بتوان میزان فرسایش در شیب پایین‌دست را به حداقل رساند که به تبع آن زمان تخریب سازه هم افزایش پیدا

خواهد کرد. تاکنون مواد مختلفی جهت افزایش مقاومت خاک مصرف‌شده در سازه‌های خاکی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به مواد پلیمری، بنتونیت، آسفالت، الیاف گیاهی و ... اشاره نمود که هر کدام دارای معایبی هستند. در مورد مواد شیمیایی مهم‌ترین مسئله خسارت‌های زیست‌محیطی است که در هنگام تخریب سازه، متوجه پایین‌دست سدهای خاکی می‌شود. در تحقیق حاضر تلاش شده است تا با به‌کارگیری نانو مواد موسوم به مونت‌موریلونیت، تأثیر این مواد بر مقاومت سازه‌های خاکی بررسی شود. با توجه به اینکه نانو مواد با پیشرفت چشمگیر در سایر علوم، ورود قابل توجهی در مباحث مرتبط با علوم ژئوتکنیک نداشته‌اند، احساس نیاز در این زمینه بیش از پیش احساس می‌شود. به منظور انجام آزمایش‌های مربوط، نانو مواد مورد استفاده، در درصدهای مختلف یک تا پنج درصد با خاک مورد استفاده در ساخت مدل فیزیکی سد خاکی مخلوط شده‌اند. در گام بعدی آزمایش، جریان روگذر از روی سازه شبیه‌سازی شده و تغییر رفتار سازه در حالت مشابه (که آزمایش‌ها بدون حضور مواد نانو صورت گرفته است) مشاهده شد. نمونه‌ی نانورس مونت‌موریلونیت دارای ساختار لایه‌ای می‌باشد. طبق مشاهدات تصاویر دستگاه میکروسکوپ الکترونی روشی به وضوح قابل رویت است که خلوص قابل توجه و همگنی مناسب در نمونه‌ی نانورس مورد مطالعه و سطح مخصوص بالای نمونه، تأثیر به‌سزایی در قابلیت جذب ذرات خاک به یکدیگر و افزایش

دوسالانه‌ی ژئوتکنیک (2008) به خلاصه‌سازی بیش از 726 آزمایش انجام شده روی فرایند تخریب سدهای خاکی، گوره‌ها و دایک‌های دریایی از سال 1960 پرداخته است. بیشتر این آزمایش‌ها شامل خاک‌ریزهای کوچک مقیاس، غیرچسبیده و همگن با روگذری به‌عنوان مکانیسم خرابی بودند. Bucker (1998) به تحلیل شکل نهایی شکافتن 133 سد خاکی و خاکریز ناشی از روگذری پرداخت و بیان کرد که شیب جانبی شکاف به‌طور متوسط 35 درجه می‌باشد. Schmocker و Hager (2009) به انجام یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی روی تخریب خاک‌ریز غیرچسبیده برای تعیین محدودیت‌های مدل در ارتباط با تکرارپذیری، اثرات دیواره و اثرات مقیاس پرداختند. لازم به ذکر است مدل‌های ساخته‌شده برای انجام آزمایش‌ها، از نوع همگن و فاقد هسته بوده‌اند. بعد از شبیه‌سازی جریان روگذر شده از روی سازه، شکافی در شیب پایین‌دست ایجاد شد. عمق و عرض این شیار ایجاد شده به‌عنوان پارامترهای تخریب در نظر گرفته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که در شیب و دانه‌بندی‌های متفاوت، اختلاف معناداری در شکل ظاهری تخریب قابل مشاهده است. در تحقیق صورت‌گرفته که جزء معدود پژوهش‌های انجام‌شده در محبت ادغام علم نانو مواد با علوم مهندسی آب و خاک و هیدرولیک می‌باشد، چنانچه با درصد‌های پیشنهادی در قسمت نتایج، اقدام به استفاده از مواد مذکور گردد، می‌توان ادعا نمود که نسبت به سایر موادی که تا کنون با مصالح مصرفی در ساخت سد خاکی ترکیب شده‌اند، نانو مواد مونت موریلونیت علاوه بر اینکه هیچگونه تحدیدی برای محیط‌زیست تلقی نمی‌شود، به مراتب استحکام بیشتری به سازه می‌دهد و در زمان روگذری جریان سبب افزایش زمان تخریب سازه در حد قابل قبولی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

فلومی که در آزمایشگاه ساخته شده است دارای طول پنج متر، عرض 50 سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های طراحی‌شده، مدل‌هایی ساخته شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (1) قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که هر مدل با دو نوع دانه‌بندی ساخته شده است. مشخصات خاک‌های مورد استفاده در جدول (2) گردآوری شده است. در تحقیق صورت‌گرفته، فرایند دانه‌بندی خاک طبق سامانه‌ی دسته‌بندی ASHTO انجام شده و با توجه به شکل (1) که نمودار دانه‌بندی را ارایه داده و بررسی ضرایب یکنواختی و انحنای C_u و C_c می‌توان بیان نمود که هر دو نمونه‌ی خاک در دسته‌ی خاک‌های خوب دانه‌بندی شده هستند و مناسب برای انجام آزمایش‌ها می‌باشند. برای ساده‌سازی روابط از این پس خاک ریزدانه خاک A و خاک درشت‌دانه خاک B نامیده می‌شود. به‌منظور تحلیل نتایج حاصل از ایجاد شکاف در شیب پایین‌دست، لازم است تا ابعاد شکاف ایجادشده در دو محور افقی و عمودی بررسی گردد. به همین دلیل شیب پایین‌دست، تاج سد و

همبستگی بین ذرات را دارد که این امر منجر به افزایش مقاومت خاک می‌گردد (Motamedi and Moazed, 2015). مونت موریلونیت از ذرات میکرونی تشکیل شده است و این ذرات از روی هم قرار گرفتن چندین لایه‌ی بلور با ضخامت 26 درصد نانومتر و قطر 100 تا 200 نانومتر تشکیل شده‌اند. این ماده به‌عنوان یک جاذب مؤثر و مقرون به‌صرفه برای حذف فلزاتی چون باریم دو بار مثبت، سرب دو بار مثبت، کادمیوم دو بار مثبت، کروم سه بار مثبت، مس دو بار مثبت، نیکل دو بار مثبت، روی با یک بار مثبت و جیوه‌ی دو بار مثبت توجه زیادی را به خود جلب کرد است (Li et al., 2012). با افزایش درصد نانو در خاک‌های رسی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی دستخوش تغییرات محسوس نمی‌شود. پس عامل افزایش مقدار مقاومت برشی، افزایش در زاویه‌ی اصطکاک خاک نیست. در نتیجه تنها عامل باقی‌مانده، افزایش میزان چسبندگی در این خاک‌ها می‌باشد. با افزایش درصد نانو، عرض از مبدا نمودار افزایش می‌یابد که این مسئله مبین افزایش چسبندگی می‌باشد. با توجه به سطح ویژه‌ی بسیار بالای نانو رس، افزایش در چسبندگی خاک‌های رسی مشاهده می‌شود (Khosravani moghadam and Asef, 2013). Yan و Hui (2013) در تحقیق خود به نقش اندازه‌ی ذرات در تخریب سازه‌های خاکی پرداخته است. وی با بررسی خاک‌های غیر چسبیده با قطر متوسط ذرات 0/33، 0/4 و 0/62 به این نتیجه رسید که اندازه‌ی ذرات، دبی جریان و ارتفاع آب پشت خاک‌ریز تأثیری مستقیم بر روند تخریب سدهای خاکی ایفا می‌کنند. Hanson et al. (2005) با انجام آزمایش‌هایی به تأثیر عرض شکاف ایجاد شده در هنگام روگذری و ارتباط آن با اندازه‌ی ذرات مصالح به‌کار رفته در ساخت سدهای خاکی پرداخته‌اند. Asghari Tabrizi et al. (2017) طی بررسی‌هایی تأثیر تراکم مصالح خاک‌ریز روی تخریب عمودی ناشی از روگذری را مورد مطالعه قرار دادند و دو فرمول بی‌بعد برای تغییرات ارتفاع تاج و طول کف خاک‌ریز با زمان ارائه دادند. Al-Riffai (2014) مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی بر روی مکانیسم شکافتن در خاک‌ریزهای ماسه‌ای روگذر شده را انجام داد. وی با استفاده از دو مدل عددی NWS-BREACH و HR-BREACH و انجام آزمایش‌های با تراکم و زهکشی گوناگون به بررسی مشخصات شکاف خاک‌ریز از قبیل زمان تاخیر، زمان اوج جریان خروجی، اوج دبی خروجی و زمان تخریب پرداخت. Fread (1988) از مدل ریاضی BREACH برای پیش‌بینی پارامترهای مربوط به روگذری جریان از سدهای خاکی استفاده کرد. Chinnarasri et al. (2004) به بررسی تکامل تدریجی شکاف در بدنه‌ی خاک‌ریز روگذر شده تحت شرایط هدافتان مخزن پرداختند و مشاهده شد که مقطع شکاف در ابتدا به‌صورت عمودی و سپس به‌طور عرضی توسعه می‌یابد. Coleman et al. (2002) شکل نهایی شکاف را متأثر از تراز آب مخزن در حین تخریب خاکریز بیان کردند. مجله‌ی ASCE در کنفرانس

اولیهی آب پشت خاکریز، H_t : عمق آب در بالادست خاکریز در زمان t ، t_b : زمان شکست و t : زمان می باشد. طی تحقیقات صورت گرفته، ارتباط دانه بندی ذرات با جریان روگذر از روی سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده گویای این مطلب است که افزایش درصد خاک ریز دانه باعث بالارفتن زمان تخریب سازه می شود. هم چنین دبی عبوری از شیار ایجاد شده توسط رابطه ی (2) قابل اندازه گیری است (Cestero et al., 2014).

$$Q_b = Q_{in} - A_s \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

در این رابطه، A_s : مساحت سطح آب پشت خاکریز، ΔH : تغییرات تراز سطح آب و Δt : بازه ی زمانی می باشد. در پژوهش صورت گرفته از میان پنج روش موجود برای تحلیل، روش باکینگهام مورد استفاده قرار گرفته که نتایج این تحلیل در رابطه ی (3) مشاهده می شود.

$$f\left(\frac{w_t}{d_{50}} \cdot \frac{h}{d_{50}} \cdot \frac{w_t}{h} \cdot \frac{\rho g d_{50}}{q_u} \cdot \frac{Q_{in}}{Q_b} \cdot \frac{t}{t_b} \cdot \frac{Q_b}{\sqrt{g H t w_t}} \cdot D_r \cdot \frac{H_0}{h} \cdot \frac{h}{L} \cdot \theta \cdot \varphi\right) = 0 \quad (3)$$

حدود بیست درصد از قسمت فوقانی شیب بالادست به صورت شبکه ای به ابعاد یک سانتی متر در نظر گرفته شده است. در این صورت امکان ثبت مقادیر در هر نقطه ای با مختصات مشخص فراهم گردیده است. جهت برداشت داده از دو دستگاه متر لیزی با دقت $\pm 1mm$ و پوینت گیج با دقت $\pm 5mm$ استفاده شد.

تحلیل ابعادی

برای تحلیل نتایج مربوط به اثر افزودن نانو مواد به خاک مورد استفاده در ساخت سازه، به پارامترهایی نیاز هست تا با ملاک قرار دادن آن ها به عنوان پارامترهای تخریب، نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. این عوامل را می توان به صورت رابطه ی (1) بیان نمود:

$$f(t, t_b, H_t, H_0, w_t, Q_b, Q_{in}, \theta, L, h, g, \phi, q_u, D_r, \rho, d_{50}) = 0 \quad (1)$$

d_{50} : قطر متوسط ذرات، ρ : چگالی ذرات، D_r : درصد تراکم، q_u : مقاومت فشاری خاک، φ : زاویه ی اصطکاک داخلی خاک، g : شتاب ثقل، h : ارتفاع خاکریز، L : طول کف خاکریز، θ : زاویه ی شیب بدنه ی خاکریز، Q_{in} : دبی جریان ورودی به پشت خاکریز، Q_b : دبی عبوری از شکاف، w_t : عرض شکاف ایجاد شده، H_0 : عمق

جدول 1- مشخصات مدل های ساخته شده

Table 1- The details of made models

	Length of dam(cm)	Length of crown(cm)	width (cm)	Height (cm)	Z	Vol (m ³)
Model no. 1	220	60	20	50	1:2	0.36
Model no. 2	320	60	20	50	1:3	0.51

جدول 2- مشخصات خاک های مورد استفاده

Table 2- The Properties of used Soils

	Dimension of particles(mm)	Internal friction Angle	Density (%)	Cohesion (KN/m ²)	ρ (gr/cm ³)
Soil A	0.4	17	95%	39	1.9
Soil B	0.8	25	93%	33	2.1

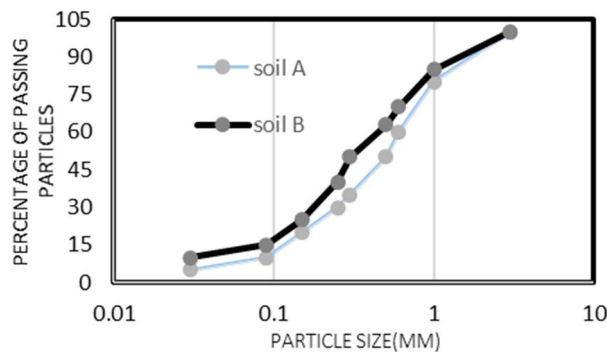


Fig .1- Gradient chart

شکل 1- نمودار دانه بندی

می‌توان ادعا نمود که میزان تراکم اعمال شده در هنگام ساخت مدل، نزدیک به تراکم اعمال شده در هنگام اجرای نمونه‌های واقعی است.

در ساخت مدل‌های آزمایشگاهی برای خاک درشت‌دانه میزان وزن مخصوص حداکثر برابر با $2/1$ بود. همچنین با توجه به حجم مدل $1:2$ که برابر با $0/36 \text{ m}^3$ می‌باشد، وزن خاک مورد استفاده در هنگام ساخت باید حدود 756 Kg باشد. که این مقدار در عمل برابر با 740 Kg اندازه‌گیری شده و با قرار دادن این مقدار در روابط تنوری میزان تراکم اعمال شده هنگام ساخت مدل آزمایشگاهی حدود 95 درصد برآورد شده. این میزان برای مدل $1:3$ هم صادق است و در محدوده‌ی تراکم قابل قبول برای ساخت سدهای خاکی قرار دارد. با توجه به ساخت مدل‌های واقعی که خاک را لایه‌لایه پخش کرده و سپس عمل تراکم را انجام می‌دهند، تلاش شد تا شبیه‌سازی کامل صورت گیرد و لایه‌های خاک به ضخامت سه تا چهار سانتی‌متر در محل اجرا پخش شده و سپس به تراکم مورد نظر رسانده شود و این روند برای سایر لایه‌ها تا ساخت کامل مدل ادامه یافت. در مرحله‌ی بعد، دبی مورد نظر در دریاچه‌ی پشت سد اعمال شد. دبی مورد نیاز توسط آنالیز ابعادی حاصل شده. برای این منظور بیشترین آورد رودخانه‌ی کارون که بزرگترین و پرآب‌ترین رود کشور ایران است طی سال‌های اخیر در نظر گرفته شده. میزان گزارش شده برای دبی در بزرگترین سیلاب سال‌های اخیر رود کارون برابر با $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ است. هم‌چنین با توجه به ابعاد سد و رابطه‌ی (5) میزان دبی اعمال شده در مدل سد آزمایشگاهی باید مقداری برابر با $0/06 \text{ L/s}$ را دارا باشد که این دبی در تمام مدت آزمایش در دریاچه‌ی پشت سد جاری بوده.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = L_r^{2.5} \quad (5)$$

با توجه به این‌که روند برداشت داده در آزمایش‌های صورت گرفته به صورت دبی منقطع بوده، نیاز به بازه‌های زمانی منظم می‌باشد تا در پایان هر بازه‌ی زمانی دبی موقتاً قطع شده و بلافاصله داده‌برداری صورت گیرد و مجدداً دبی اعمال شود. در هر آزمایش دقیقاً پس از شروع روگذری جریان، حدود 20 ثانیه زمان نیاز است تا آب به پایین‌ترین نقطه‌ی سد برسد، اما با توجه به اینکه در این زمان عملاً فرسایش قابل مشاهده‌ای ثبت نشده است، بازه‌های زمانی 40 ثانیه‌ای در نظر گرفته شده و در این زمان‌ها تصاویر ثبت شد. با توجه به این موضوع که زمان تخریب حدودی برای تمامی آزمایش‌ها 200 ثانیه برآورد شده، بنابراین برای هر آزمایش تعداد پنج تصویر ثبت شده. هم‌چنین به دلیل بالا بودن تعداد تصاویر، تنها به عکس‌های مربوط به سری زمانی 160 تا 200 ثانیه که آخرین مرحله‌ی تخریب است اکتفا شده. در شکل (2) مراحل تخریب برای دو نمونه خاک در دو شیب مورد نظر نمایش داده شده.

با توجه به این‌که مدل‌های ساخته شده دارای شیب یکسان در بالا و پایین دست سازه هستند، می‌توان از پارامتر θ صرف‌نظر نمود. لازم به ذکر است که در این مدل‌ها ارتفاع خاک‌ریز، تر از آب بالادست و طول کف سازه ثابت هستند، بنابراین می‌توان از اعداد بدون بعد h/L و H_0/h صرف‌نظر کرد. حال با حذف پارامترهای بیان‌شده و قراردادن پارامترهای وابسته در طرف راست معادله، می‌توان پارامترهای تخریب را به صورت رابطه‌ی (4) بیان کرد.

$$\frac{w_t}{d_{50}} \cdot \frac{w_t}{h} \cdot \frac{xh_{t0}}{L} \cdot \frac{xh_t}{H_t} \cdot \frac{t}{t_b} \cdot \frac{Q_b}{\sqrt{g}H(t)W(t)} = f\left(D_r, \frac{\rho g d_{50}}{q_u}, \varphi, \frac{h}{d_{50}}, Q\right) \quad (4)$$

نانو مواد

در تحقیق صورت گرفته از مواد نانویی موسوم به رس مونت‌موریلونیت که دارای قابلیت جذب آب به میزان بالا هستند استفاده شده است. مقدار قابل توجهی از رس‌های مونت‌موریلونیت، حاصل فرسایش و تخریب سنگ‌های آتشفشانی و یا آتشفشانی آواری مانند ریبولیت‌ها، تراکیت‌ها، داسیت‌ها، آندسیت‌ها، بازالت‌ها و لپپاریت‌ها هستند. در جدول (3) ساختار شیمیایی و فیزیکی مواد استفاده‌شده، قابل مشاهده است.

یکی از خصوصیات مونت‌موریلونیت تورم توده‌ی خاک در هنگام اختلاط با این ماده می‌باشد. هم‌چنین توده‌ی خاک دچار نوعی چرب‌شدگی می‌شود. باید توجه داشت که تنها با پرتوی ایکس می‌توان وجود این کانی را در خاک تشخیص داد. یکی از عواملی که نقش مهمی در کاهش فرسایش و افزایش مقاومت برشی خاک در هنگام اختلاط با نانو مواد دارد، کوچکی بیش از حد ذرات نانو مواد و تورم آن در هنگام اختلاط با خاک است.

فرمول کلی مونت‌موریلونیت به صورت $X_2Y_4O_{10}(OH)_2$ می‌باشد. و در آن "X" نماد کاتیون‌های سه ظرفیتی آلومینیوم، منیزیم‌های دو ظرفیتی جانشین شده و کاتیون‌های یک یا دو ظرفیتی که جهت کمبود بار حاصل از جابه‌جایی اضافه شده‌اند می‌باشد، هم‌چنین "Y" نماد کاتیون‌های چهار ظرفیتی سیلیس و کاتیون‌های سه ظرفیتی آلومینیوم جانشین شده است.

مراحل انجام آزمایش‌ها

برای تعیین رطوبت بهینه، حداکثر وزن مخصوص و میزان تراکم ایده‌آل برای ساخت مدل‌های سد خاکی، آزمایش استاندارد پراکتور با معیار ASTM D698 صورت گرفت. باید توجه داشت که از نظر تنوری، با معین بودن وزن مخصوص حداکثر و ابعاد مدل‌های آزمایشگاهی، می‌توان وزن خاک مصرف‌شده در هر مدل را مشخص نمود. حال با در نظر گرفتن این نکته که مقادیر مذکور همگی برآورد شده‌اند، چنان‌چه در هنگام ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، وزن خاک مصرف‌شده برابر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط تنوری باشد،

جدول 3- مشخصات شیمیایی و فیزیکی نانو مواد مونت موریلونیت
Table 3- The chemical and physical details of montmorillonit

Chemical detail				
(Na,Ca).(Al,Mg) ₆ (Si ₄ O ₁₀) ₃ (OH) ₆ .n(H ₂ O)				Chemical formula
Chemical mixture(%)				
SiO ₂	H ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO
43.77	36.19	18.57	1.12	1.13
Physical detail				
ρ		Special surface area		Particle size
2.35 g/cm ³		751 m ² /g		11 nm

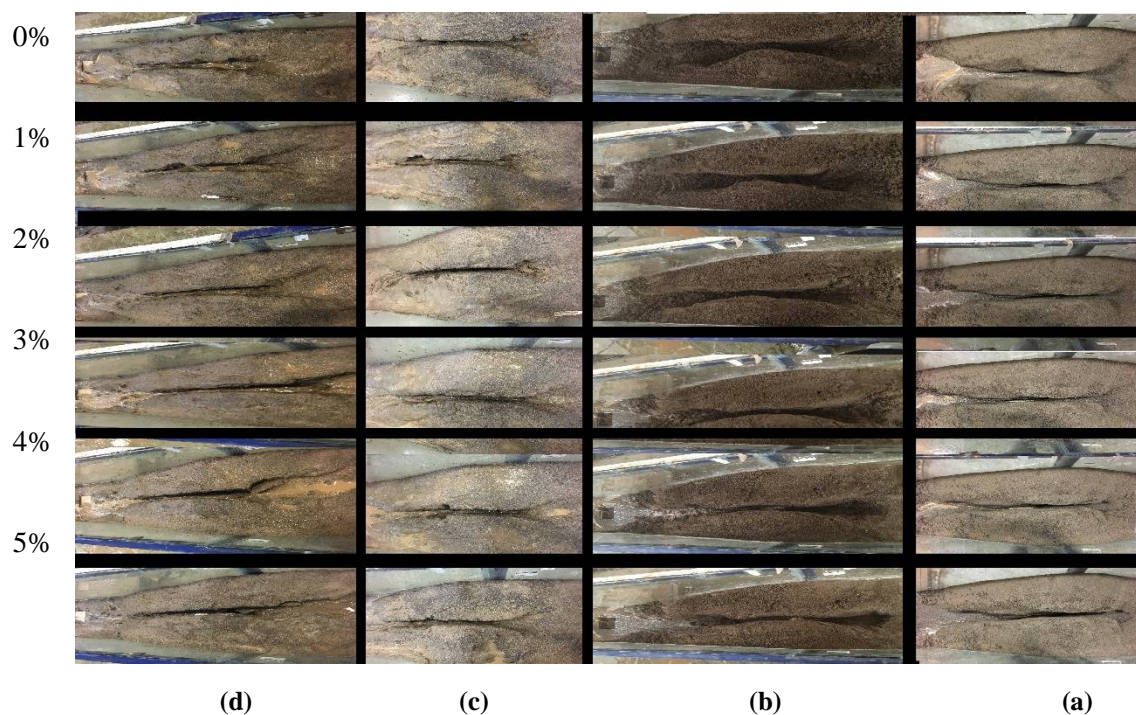


Fig. 2-Embankment steps in variety of tested models in various nano scale material
 (a: soil B. 1:2- b: soil B. 1:3- c: soil A 1:2- d: soil A. 1:3)

شکل 2- مراحل تخریب در انواع مدل‌های مورد آزمایش در درصدهای مختلف نانو مواد
 (a: خاک-B-شیب 1/2، ب: خاک-B-شیب 1/3، ج: خاک-A-شیب 1/2، د: خاک-A-شیب 1/3)

نتایج و بحث

نرخ آبشستگی شیب پایین دست

پس از شبیه‌سازی جریان روگذر و ثبت تصاویر مربوط به تخریب در سری‌های زمانی مختلف، مشخص شد که شیار ایجاد شده در نمونه‌ی ریزدانه در آغاز روند تخریب به صورت عمقی پیشرفته است و با گذشت زمان روند تخریب از حالت عمقی به عرضی تغییر رویه داده است. در نمونه‌ی ریزدانه به دلیل کمتر بودن زاویه‌ی ایستایی نسبت به خاک درشت‌دانه، مقاومت برشی کمتر مشاهده شده که این امر سبب پدید آمدن آبشستگی موضعی در طول شیب پایین دست گردید. این آبشستگی موضعی سبب پدید آمدن پُرش هیدرولیکی با طول غلظابه‌های کوتاه شده و در گام‌های زمانی بالاتر منتج به ایجاد آبشارهایی در مسیر شکاف شده. آبشارهای پدید آمده در محلی که سقوط آب رخ می‌دهد، به علت اعمال تنش عمودی سیال و کاهش مقاومت برشی خاک و از هم گسیختگی ذرات خاک، سبب ایجاد گودال‌هایی می‌شوند. با پیشرفت زمان، گودال‌های به وجود آمده باعث ریزش ناگهانی توده‌های بالایی خاک شده است (لغزش توده‌ای). لغزش توده‌ای از جمله پدیده‌هایی است که در هنگام روگذری جریان روند تخریب را سرعت می‌بخشد.

نسبت هیدروگراف خروجی به درصد تخریب

یکی از پارامترهایی که می‌توان از آن به عنوان ابزاری برای واسنجی میزان تخریب استفاده نمود، هیدروگراف خروجی از سازه می‌باشد. در این قسمت با ترسیم گراف‌هایی موضوع تخریب سازه‌ی سد خاکی از منظری دیگر بررسی گردید. با بررسی شکل (3) می‌توان این گونه نتیجه گرفت که با توجه به شکل گراف که تقریباً حالت خطی دارد، در روند شکست سازه‌ی سد خاکی در تمامی شیب‌ها و خاک‌ها، هم‌زمان با افزایش دبی خروجی از سازه، درصد تخریب زیاد شده است. در خاک درشت‌دانه بعد از 50 درصد تخریب و در خاک ریزدانه بعد از 40 درصد، مشاهده می‌شود که نمودار با شیبی نسبتاً ثابت امتداد پیدا کرده است.

این موضوع را می‌توان این گونه تحلیل نمود که بعد از 40 تا 50 درصد تخریب، عملاً سازه در سرازیری تخریب قرار گرفته و آن‌طور که از نتایج استنباط می‌شود، از این مرحله به بعد، تخریب با شدت بیشتری پیشرفت می‌کند و نرخ تخریب فزاینده می‌گردد. لازم به ذکر است نمودارهای شکل (4) همگی در درصد اختلاط سه درصد ترسیم شده‌اند. این درصد بهترین سطح اختلاط در تحقیق حاضر می‌باشد.

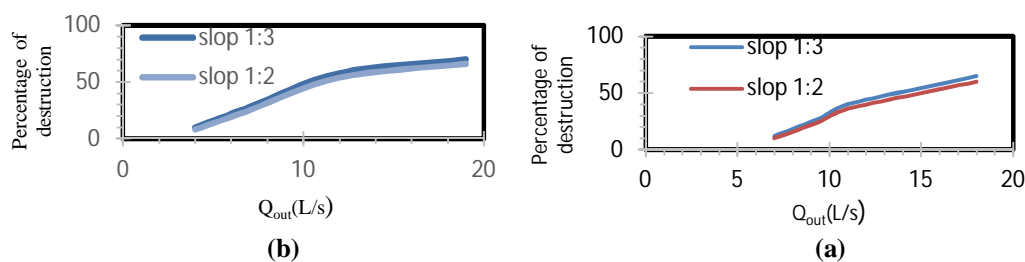


Fig. 3- Investigation of discharge outflow of structure to percent of structural damage (a: soil A. b: soil B)

شکل 3- بررسی دبی خروجی از سازه در برابر درصد تخریب سازه (a: خاک درشت‌دانه، b: خاک ریزدانه)

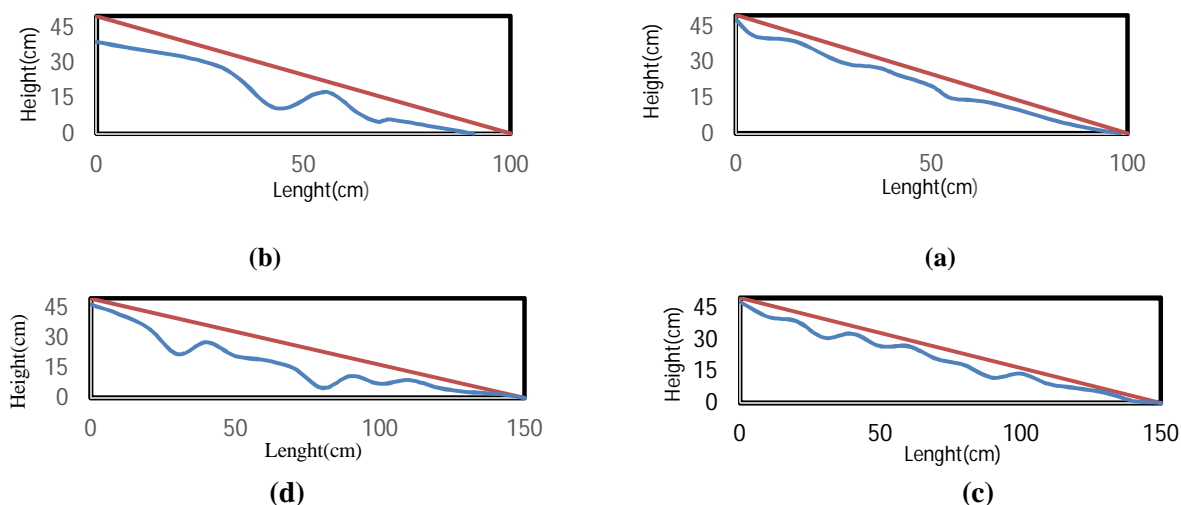


Fig. 4- Piping profile of structural of Earth dam (a: soil A 1:2. b: soil B. 1:2 c: soil A 1:3. d: soil B. 1:3)

شکل 4 - پروفیل آبشستگی سازه‌ی سد خاکی (a: خاک A شیب 1/2. b: خاک B شیب 1/2. c: خاک A شیب 1/3.

d: خاک B شیب 1/3)

پروفیل آب‌شستگی

در شکل (5) پروفیل‌های آب‌شستگی که در آخرین گام زمانی و برای درصد اختلاط سه درصد نانو مواد برداشت شده‌اند، به نمایش درآمده است. نکته‌ای که در نگاه اول به چشم می‌خورد، وجود آبشارهایی در بدنه‌ی سد می‌باشد که دارای جانمایی‌های متفاوتی هستند. این آبشارها که دارای یک هندسه‌ی نامنظم می‌باشند، بیش از هر چیز دیگر، تابع تراکم سازه که در حین اجرا اعمال شده است، می‌باشند. دقیقاً به فاصله‌ی کمی از حفره‌ی ایجاد شده یک فرو افتادگی ناگهانی مشاهده می‌شود که در گام‌های زمانی بالاتر هم‌زمان با افزایش دبی عبوری از روی شیب پایین دست سازه، این پدیده کمک می‌کند تا جریان روگذر با سرعتی مخرب در حفره‌ی ایجاد شده سقوط کرده و ضمن ایجاد جریان گردابه‌ای در محل سقوط جریان آب، روند تخریب را سرعت بخشد. شایان ذکر است به‌منظور خلاصه کردن نتایج پروفیل‌های آب‌شستگی تنها در گام زمانی آخر و برای سطح اختلاط سه درصد ترسیم شده‌اند.

تنش برشی و مقاومت نمونه خاک‌ها

طی آزمایش‌های برش مستقیم و تک محوری اقدام به برداشت داده‌های تنش برشی و مقاومت برشی نمونه خاک‌های مخلوط شده با نانو ذرات شده است. در این قسمت با ارایه‌ی نمودار میله‌ای که دربردارنده‌ی تنش برشی حداکثر و تنش برشی نرمال می‌باشد، تلاش شده تا به معیاری رسیده شود که بتوان اختلاف تنش در نمونه‌های مختلف را نمایش دهد. طبق نظریه‌ی کلمب، تنش برشی ارتباطی مستقیم با مقاومت برشی داشته و می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در شکل (5) بیشترین تنش برشی که متعلق به حالت پنج درصد می‌باشد، بیشترین مقاومت برشی را نیز در بردارد.

نسبت دبی خروجی برداشتی و تئوری

در روند آزمایش‌های صورت گرفته توسط مخزن شیشه‌ای که در پایین دست سازه و قسمت خروجی تعبیه شد، اقدام به برداشت رقوم مختلف دبی خروجی گردید. هم‌چنین میزان دبی توسط رابطه‌ی (2) هم محاسبه شد که در شکل (6) هر دوی این مقادیر و داده‌های برداشت شده نشان داده شده است. با توجه به شکل (6)، باید توجه داشت که علی‌رغم تطابق نسبی مقادیر تئوری و عملی هیدروگراف خروجی، مشاهده می‌شود که مقادیر تئوری حدود پنج تا 10 درصد بیش از مقادیر برداشت شده حین آزمایش‌ها می‌باشند. این امر ممکن است به دلیل ارتباط مستقیم دبی خروجی با ارتفاع آب پشت سازه باشد. زیرا برداشت رقوم آب در دریاچه‌ی پشت سد هنگام وقوع تخریب، به دلیل تلاطم ایجاد شده در دریاچه با خطای نسبتاً زیادی همراه است و برداشت داده را با مشکل مواجه می‌کند. اما تطابق داده‌های تئوری و عملی نشان از صحت داده‌های برداشتی و محاسباتی دارد.

تنش برشی خاک درشت دانه

به‌منظور بررسی میزان مقاومت برشی خاک‌های مورد استفاده در ساخت مدل‌های سد خاکی، آزمایش مقاومت فشاری با استاندارد ASTM-D-3080 و تک محوری، روی نمونه‌های خاک در حالت شاهد و در هنگام اختلاط با درصد‌های پنج‌گانه‌ی مواد نانو در شرایط رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر صورت گرفت. با توجه به شکل (7) می‌توان این‌گونه استنباط کرد که افزودن مواد نانو به خاک تاثیر چشم‌گیری بر پارامتر تنش برشی داشته و افزودن یک درصد نانو ذرات به خاک حدود 15 درصد تنش برشی و مقاومت برشی را افزایش می‌دهد.

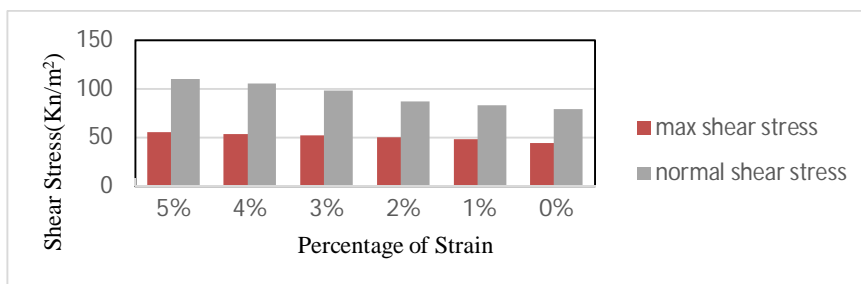


Fig 5. Max and normal shear stress of models

شکل 5- تنش برشی حداکثر و نرمال برای نمونه‌های مختلف خاک

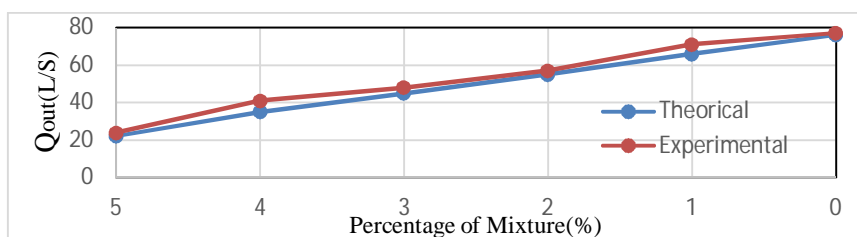


Fig. 6- Comparison of the output discharge of the structure in theory and practice

شکل 6- قیاس بین دبی خروجی از سازه در حالت تئوری و عمل

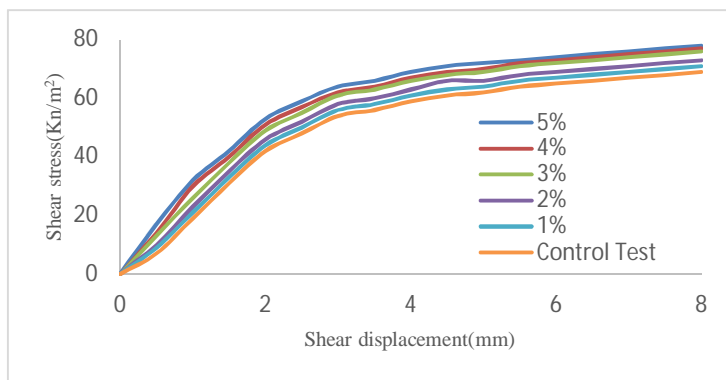


Fig.7- The result of unconfined compressive strength (soil A)

شکل 7- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، خاک نوع A

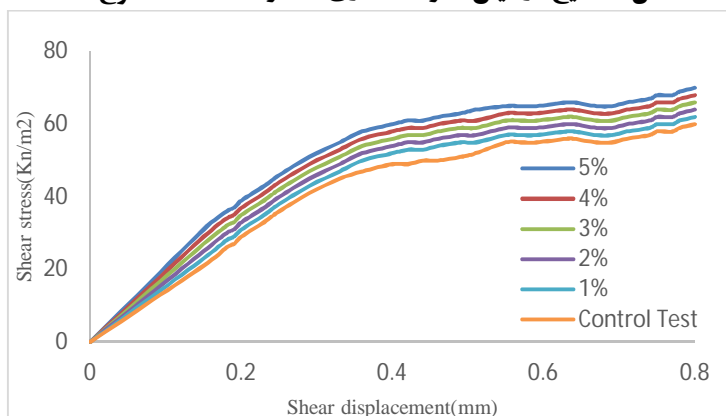


Fig.8- The result of unconfined compressive strength. Soil B

شکل 8- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، خاک نوع B

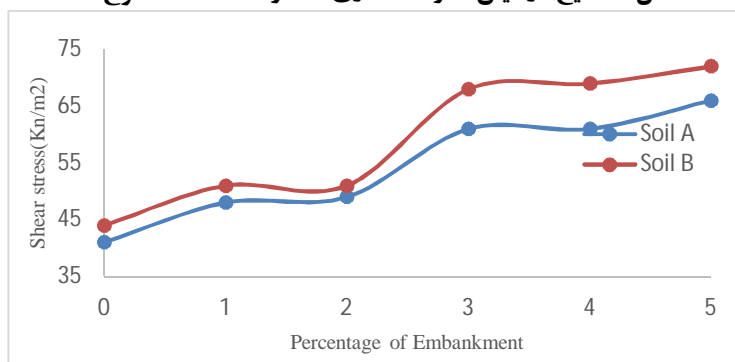


Fig.9- Shear stress diagram versus various percentages of nano

شکل 9- نمودار تنش برشی در مقابل درصدهای مختلف مواد نانو

شده، می‌توان نتیجه گرفت بهترین حالت اختلاط که بیشترین اختلاف را با حالت قبل از خود دارد، مربوط به حالت اختلاط سه درصد می‌باشد.

$$T = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (6)$$

با توجه به اینکه تنش برشی ارتباط مستقیم با مقاومت برشی خاک دارد، می‌توان نموداری ترسیم نمود که نتایج حاصل از تنش برشی را در برابر درصدهای مختلف اختلاط نانو ذرات با

تنش برشی در خاک ریزدانه

برای مقاومت سنجی نمونه‌ی خاک ریزدانه می‌توان از روش تنش کنترل شده یا روش کرنش کنترل شده توسط دستگاه تک محوری استفاده نمود. از آنجایی که روش تنش کنترل شده دارای دقت بالاتری می‌باشد از این شیوه استفاده شد که نتایج آن برای نمونه خاک شاهد و درصدهای پنج‌گانه‌ی مخلوط خاک و نانو مواد در شکل (8) قابل مشاهده می‌باشد. براساس نظریه‌ی موهر کلمب و رابطه‌ی (6)، مقاومت برشی تابع تنش برشی قائم است. برای درک بهتر مطلب شکل (9) ترسیم شده است که با توجه به نمودار ترسیم

داد اما برای توجیه اقتصادی طرح، سطح ترکیبی سه درصد که بیشترین اختلاف را با حالت قبل از خود دارد، پیشنهاد می‌شود. در شیب 1:3 به علت کاهش خاصیت ریزشی خاک نسبت به شیب 1:2، تخریب دیر هنگام در گام‌های زمانی بالاتر رخ می‌دهد. در خاک درشت‌دانه در حین مراحل تخریب، آبشارهایی در بدنه‌ی سد تشکیل می‌شود و در پای این آبشارها گودال‌هایی به وجود می‌آید که ارتباطی مستقیم با ارتفاع سقوط آب دارد و باعث تخریب ناگهانی در گام‌های زمانی بالا می‌شود. افزودن نانو مواد تاثیر چندانی بر میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ی خاک ندارد اما نانو مواد مونت موریلونیت در هنگام اختلاط با خاک، اثر چشم‌گیری بر میزان چسبندگی دارد، به گونه‌ای که با افزایش یک درصد نانو ذرات، حدود 24 درصد چسبندگی توده‌ی خاک اضافه می‌شود و در حالت سه درصد مشاهده شد که پارامتر چسبندگی تقریباً 28 درصد نسبت به حالت قبل از خود زیاد شده که در بین نسبت‌های مختلف اختلاط، این درصد بیشترین تفاوت را با حالت قبل از خود دارا می‌باشد. بعد از 50 درصد تخریب سازه، روند تخریب به صورت خطی جلو رفته و به نوعی در سرازیری قرار گرفته و اگر بخواهد اقدامی جهت به تاخیر انداختن شکست سازه صورت گیرد باید قبل از این مرحله انجام شود.

تقدیر و تشکر

با تشکر از گروه علوم مهندسی آب و مدیریت آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد که در مراحل مختلف تهیه‌ی این پژوهش کمال همکاری را مبذول فرمودند.

نمونه‌ی خاک نشان دهد (شکل 9). با بررسی نتایج حاصل از شکل‌های (7)، (8) و (9) می‌توان اذعان داشت که بیشترین مقاومت برشی از میان درصدهای پنج‌گانه‌ی اختلاط مواد نانو مربوط به حالت اختلاط سه درصد است، زیرا از نقطه نظر افزایش مقاومت برشی بیشترین اختلاف را با حالت قبل از خود دارد و به نوعی می‌توان بیان کرد که یک جهش از حالت دو درصد به سه درصد دیده می‌شود.

نتیجه گیری

در میان درصدهای مختلف نانو ذرات اضافه‌شده به خاک مورد استفاده در سازه‌ی سد خاکی، حالت سه درصد بهترین عملکرد را به لحاظ افزایش زمان تخریب داشته و بیشترین اختلاف را با حالت قبل از خود دارا می‌باشد. شکاف ایجادشده در خاک ریزدانه با توجه به نمودارهای تنش‌برشی و تأثیری که شیب پایین دست بر مقاومت ذرات خاک می‌گذارد، در هر دو شیب موجود به صورت سطحی بوده و توسعه‌ی شیار بیشتر در عرض مجرا گسترش پیدا می‌کند. این مورد در خاک درشت‌دانه به صورت عمقی است. نانو ذرات مونت‌موریلونیت به دلیل تأثیری که بر ذرات رس می‌گذارد، مقاومت خاک ریزدانه را بیش از خاک درشت‌دانه افزایش می‌دهد و در حالت خاک ریزدانه افزایش بیشتر زمان تخریب سازه مشهود است.

در میزان اختلاط سه درصد بیشترین مقدار تنش برشی روی می‌دهد و به علت رابطه‌ی مستقیم تنش برشی حداکثر، با مقاومت برشی خاک، بهترین عملکرد اختلاط مواد نانو در حالت سه درصد حاصل شد. کمترین میزان درصد تخریب در حالت پنج درصد رخ

References

- 1- Al-Riffai, M. 2014. Experimental study of breach mechanics in overtopped no cohesive earthen embankments, *Thesis University of Ottawa, Canada*.
- 2- Asghari Tabrizi, A., Elalfy, E., Elkholy, M., Chaudhry, M. H. and Imran, J. 2017. Effects of compaction on embankment breach due to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*, 55(2), pp. 236–247 (In Persian).
- 3- Bucker, M. 1998. Breaching of earth-fill dams: A review of historical dam failures and their dominant parameters. *Research Paper. Institute for Soil Mechanics and Rock Mechanics, Univ. of Karlsruhe, Germany*.
- 4- Cestero, F.A.J., Imran, j. and Chaudhry, H.M. 2014. Experimental Investigation of the Effects of Soil Properties on levee Breach by Overtopping. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. (14), pp. 04014085.
- 5- Chinnarasri, C., Jirakitlerd, S. and Wongwises, S. 2004. Embankment dam breach and its outflow characteristics. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 21(4), pp. 247–264.
- 6- Coleman, S.E., Andrews, D.P. and Webby, M.G. 2002. Overtopping breaching of no cohesive homogeneous embankments. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(9), pp. 829–838.
- 7- Danka, J. and Zhang, M.L., 2015. Dike Failure Mechanism and Breaching Parameters. *Journal of Geotech and Geoenviron. Engineering*, PP. 04015039(11).

- 8- Fread, D. 1988. Breach, an erosion model for earthen dam failures. *Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA*.
- 9- Hanson, G.J., Cook, K.R. and Hunt, S.L. 2005. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments. *American Society of Agriculture Engineering*, 48(5), pp. 1783–1794.
- 10-Hui, M.Y. and Yan, H.W., 2013. Investigation of Non- Cohesive Breach by Overtopping Flow. *Journal of Hydrodynamics*, pp. 572-579.
- 11-Khosravani moghadam, M. and Asef, H., 2013. Effect of Mont Morilonit nano clay additive on mechanical parameters of clay soils. *8th Conference of Engineering & Environmental Geological Society*. (In Persian).
- 12-Li, Y., Wang, J., Wang, X. and Wang, J., 2012. Adsorption–Desorption of Cd(II) and Pb(II) on CaMontmorillonite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry Research*. 51,pp. 6520–6528.
- 13-Motamedi, F and Moazed, H., 2015. Investigation of Retention Process of Cd(II) Contaminant Using Bentonite and Nanoclay Cloisite Na+. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*. 40(1), PP.51-62(In Persian).
- 14-Schmocker, L. and Hager, W.H. 2009. Modelling dike breaching due to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*. 47(5), pp. 585–597.
- 15-Schmocker, L. and Hager, H.M., 2010. Overtopping and Breaching of Dike Breach Profile and Breach Flow. *River Flow, ISBN 978-3-939230-00-7*.PP.515-522.
- 16- Torres R.L., 2008. Considerations for Detection of Internal Erosion in Embankment Dams. *ASCE Library*. Biennial Geotechnical Conference, [doi.org/10.1061/41006\(332\)7](https://doi.org/10.1061/41006(332)7).