Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 48, No. 2, Summer 2025, p. 21-36

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Various Additives on the Improvement of Physical Dispersive and Load Bearing Capacity of Non-Cohesive Soils

S. Farkhondeh[1], H. Bahrami[2*] and J. Ahadiyan[3]

1- Master of Engineering in Coastal and Marine Industries.
2- Corresponding Author, Assistant Professor of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Marine Science and Technology University of Khorramshahr (hossein_bahrami1979@kmsu.ac.ir).*
2- Professor, Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 17 July 2019
Revised: 14 October 2021
Accepted: 16 October 2021

Keywords:
Non-Sticky Soils, Pinhole tes, Nano Clay, Cement.

TO CITE THIS ARTICLE:

Farkhondeh, S., Bahrami, H., Ahadiyan, J. (2025). 'Investigating the Effect of Various Additives on the Improvement of Physical Dispersive and Load Bearing Capacity of Non-Sticky Soils', *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(2), pp. 21-33. doi: 10.22055/jise.2021.28293.1824.

Introduction

Soil mechanical properties change with increasing humidity and saturation. In some soils, due to increased humidity, certain phenomena sometimes lead to damages in construction projects. These soils are called water-sensitive soils (Askari & Fakher, 1995). One type of these soils is dispersive soil. Dispersive means the separation of fine particles from each other, which leads to soil erosion. Divergence is a phenomenon in which soil particles float due to contact with water and exit the ambiance because of the force generated by water flow. It can be physical-chemical (clay) or physical (fine sand and non-cohesive silt). The erosion of clay particles mainly triggers to overcome repulsive forces between particles. In contrast, the transfer of particles in fine-grained sand is due to their lack of adhesion and small size. This action causes internal erosion in the soil (Rahimi et al., 2004). As a result, a divergence is a progressive event that begins with water flow from one point and gradually expands. Recent experiences have shown that insufficient attention to this phenomenon has caused adverse effects. The scouring of many earth dams, the walls of canals, and even the possible failure of structures, especially in the vicinity of areas bordering water, are examples of such problems (Sarshar, 1992). So far, extensive research has been carried out on the chemical divergence of soils, and therefore, numerous chemical and physical methods have been proposed for their determination. Although most scientists who have studied divergent soils have pointed to the physical divergence of soil, a comprehensive study on how and why divergence of these soils occurs and a basis for their identification and classification have yet to be addressed appropriately.

Methodology

The studied soil samples were collected from sandy banks of Karoon River and classified according to ASTM D 422-87 standard. For further identification, soil density test (ASTM D 854-87), soil moisture test (ASTM D 2216-90), standard density test (ASTM D 698-78), and Atterberg limits test (ASTM D4318-87) have been carried out. Montmorillonite nano-clay was mixed with 1% and 2% of the soil sample. Moreover, the cement and bedding clay were also mixed in a certain percentage with sandy riverbank soils for comparison. The purpose of this soil selection was to compare the effect of clay and nanoparticles. The Crumb test (ASTM-D6572), double hydrometric

(ASTM D4221), Pinhole test (ASTM D4647), and water absorption coefficient test (ASTM C128-97) were performed for each mixture of samples. Also, the California bearing capability (CBR) was used to determine the capacity of loaded soil, according to ASTM D1883-87 standard.

Results and Discussion

The results show the positive effects of all three additives on the reduction of dispersion potential. In the design of mixing 2% nano-clay and 7% cement, the soil samples became non-dispersive. The results of the dispersive percentages chart indicate a positive trend in reducing about 10% of this index in the 7% cement mix design (Fig. 1).

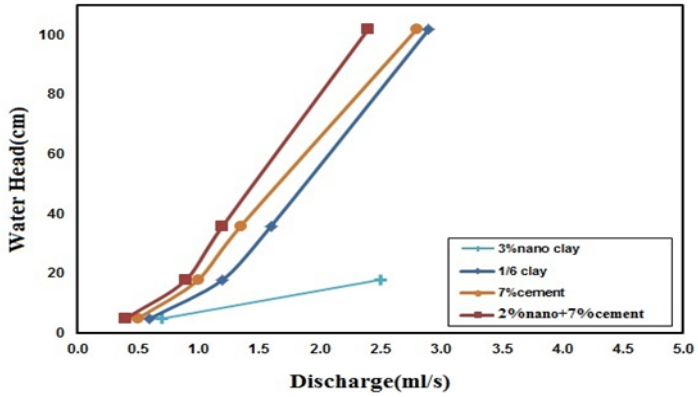


Fig. 1- Comparison of the performance of fixed samples in pinhole test

In Pinhole experiments on soil dispersive correction, the proper performance of all three materials has been shown. The use of nano-clay with 2%, cement with 7%, and clay with a ratio of 1.6 would modify the physical divergence in sandy soils. The factor that stabilizes the sand samples is the bonding of sand particles with sticky materials. Naturally, the specification and amount of fine-grained material will have a definite effect on adhesion and divergence. Based on the plotted diagrams, in nano-clay, water absorption with increasing mixing ratio first decreased and then increased. This factor is reduced for cement, thus would reduce the water absorption by increasing the amount of cement in the soil. In addition, incorporating a higher amount of sticky clay in the soil sample leads to enhancement of water absorption. Maximum water absorption was obtained for 1/3 bedding clay and minimum water absorption for 7% of cement (Fig. 2).

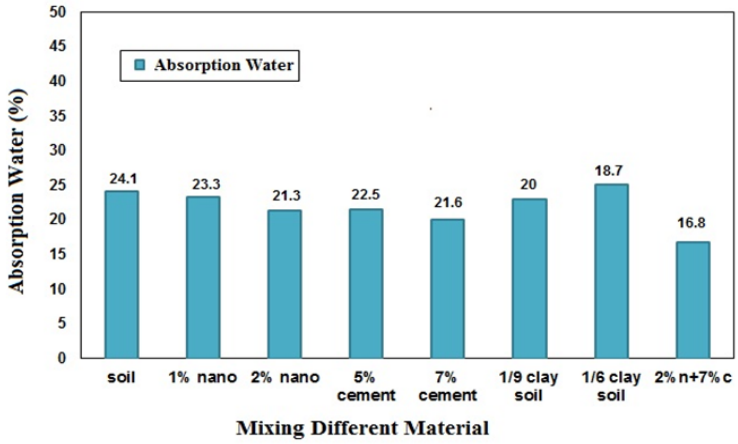


Fig. 2- The Absorption Water in mixing different materials

The results also showed that the range of bearing capacity changes in cement is more than nano-clay. The highest amount of CBR for the 2% nano-clay with 7% cement, while the smallest amount is related to the mixing ratio of 1.6 clay.

Acknowledgment

Thanks to all the dear friends in Khorramshahr University of Marine Sciences and Shahid Chamran University of Ahvaz and other friends in the soil mechanics laboratories of Mashhad and Ahvaz who helped us to prepare this article.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Soroush Farkhondeh, Data analysis, initial draft writing.
Second Author: Hossein Bahrami, Data review and extraction of results, review and analysis of results and discussion.
Third Author: Javad Ahadiyan, Development of the methodology plan, design of the geotechnical testing program, grammatical revision of the article, review and analysis of results and discussion.

References

1- Askari, F. and Fakher,A.,1995. *Inflation and Dispersive of Soils in Geotechnical Engineering*. Academic center of education culture and research.

2- ASTM, Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the Crumb test, *ASTM Designation: D6572-00.*

3- ASTM, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay by the Pinhole Test, *ASTM Designation: D4647.*

4- Rahimi. H, Davarzani.H, and Abbasi.N, 2004. Physical Dispersivity Phenomenon and its Evaluation Criteria in Cohesionless Soils. *Iranian Journal of Agricultural Science. Vol. 35, No. 3.* (In Persian)**.**

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۸، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۴، مقاله پژوهشی، ص. ۳۶-۲۱

بررسی تأثیرافزودنی‌های مختلف روی‌کاهش واگرایی فیزیکی وبهبود ظرفیت باربری خاک غیرچسبنده

سروش فرخنده[۱]، حسین بهرامی[۲*] و جواد احدیان

۱- کارشناس ارشد مهندسی سواحل وسازه های دریایی .دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر.

۲*- نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر (hossein_bahrami1979@kmsu.ac.ir).

۳- استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۲۲ پذیرش:۱۴۰۰/۰۷/۲۴

چکیده

در دو دهه اخیر، مسئله واگرایی خاک، در جریان اجرای تعداد قابل ملاحظه‌ای از پروژه‌های عمرانی مخصوصاً پروژه‌های نزدیک به ساحل، رودخانه و کانال‌های انتقال آب مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌های واگرا، خاک‌هایی هستند که در تماس با آب جاری به‌صورت کلوئیدی در آن پراکنده شده و به‌سرعت شسته می‌شوند. خطر این پدیده برای پروژه‌هایی که معمولاً در معرض آب هستند به اندازه‌ای مهم است که ناگزیر باید از ابتدا این مساله بررسی و چاره اندیشی شود. در این پژوهش به بررسی خاک غیرچسبنده با پتانسیل واگرایی فیزیکی در حالت تنها و هم‌چنین در ترکیب با نانو رس، سیمان و خاک رسی چسبنده پرداخته شده است. آزمایش‌های شناسایی خاک شامل دانه‌بندی خاک، اتربرگ، تراکم و آزمایش‌های ارزیابی واگرایی شامل کرامپ، هیدرومتری مضاعف و پین‌هول انجام پذیرفت. در انتها خاصیت جذب آب و ظرفیت باربری این خاک نیز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده تأثیرهای مثبت هر سه ماده از یک درصد مشخص به بعد در جهت اصلاح واگرایی به‌طوری‌که در طرح اختلاط دو درصد نانو رس و هم‌چنین پنج درصد سیمان به بعد کاهش پتانسیل واگرایی انجام پذیرفته است. هم‌چنین میزان ظرفیت باربری در طرح اختلاط دو درصد نانو رس از ۱۹/۷ به ۳۳/۸ کیلوگرم برسانتی‌مترمکعب و در طرح اختلاط ترکیبی دو درصد نانو رس و پنج درصد سیمان به ۶۳/۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش می‌یابد. میزان جذب آب در طرح اختلاط ۱/۳رس چسبنده به میزان ۳/۹ درصد افزایش یافته و در حالت طرح اختلاط هفت درصد سیمان به میزان ۲/۵ درصد کاهش می یابد.

کلید واژه‌ها: خاک غیرچسبنده، آزمایش پین هول، نانو رس، سیمان.

مقدمه

خواص مکانیکی خاک‌ها با افزایش رطوبت و اشباع شدن تغییر می‌کند. در برخی از خاک‌ها بر اثر افزایش رطوبت پدیده‌های خاصی بروز می‌کند که بعضاً به خسارت‌های عمده‌ای درطرح‌های عمرانی منجر می‌گردد. این نمونه، خاک‌های حساس در برابر آب نامیده می‌شود (Askari and Fakher,1993). یکی از انواع این نوع خاک‌ها، خاک‌های واگراهستند. واگرایی، به معنای جداشدن ذرات خاک ریزدانه از یکدیگر بوده و نتیجه عملکرد این پدیده فرسایش خاک است. در واقع واگرایی پدیده‌ای است که طی آن خاک در اثر تماس با آب به‌صورت شناور درآن درآمده و توسط نیروی حاصل از جریان آب از محیط خارج می‌گردد. این پدیده می‌تواند ماهیت فیزیکی- شیمیایی (خاک رس) و یا ماهیت فیزیکی (ماسه ریز و سیلت درشت غیر چسبنده) داشته باشد. فرسایش ذرات رسی، بر اثر پدیده واگرایی ناشی از افزایش نیروهای دافعه بین ذرات بر نیروی جاذبه آن‌ها می‌باشد و انتقال ذرات در ماسه‌های ریزدانه بر اثر عدم چسبندگی و ریز بودن آن‌ها صورت می‌گیرد. این عمل باعث ایجاد فرسایش درونی در خاک می‌گردد (Rahimi et al.,2004). شسته شدن خاک‌های واگرا با جریان یافتن آب در ترک‌های انقباضی خاک آغاز می‌شود. آب جاری در خاک‌های واگرا تدریجاً گل‌آلود شده و بر سرعت فرسایش خاک نیز افزوده می‌شود. بدین ترتیب واگرایی یک پدیده پیش‌رونده است که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع شده و به تدریج گسترش می‌یابد. تجربه‌های اخیر نشان داده است که عدم توجه کافی به این امر عوارض نامطلوبی را به بارآورده است، آبشستگی بسیاری از خاک‌ریزها، سدهای‌خاکی و دیواره‌های کانال‌های خاکی و حتی درمواردی خرابی سازه‌ها به‌خصوص در مجاورت مناطق آبی مانند سواحل و بنادر از جمله این عوارض محسوب می‌شوند (Sarshar, 1992). در مطالعه‌های اولیه، این باور وجود داشت که خاک‌های واگرا صرفاً ویژه مناطق با آب و هوای خشک و نیمه خشک و مناطق با خاک‌های قلیایی است. در مطالعه‌های اخیر ثابت شده است که این نوع خاک‌ها و مسایل فرسایش سطحی، در مناطق مختلف با آب و هوای مرطوب نیز وجود دارند. رنگ خاک‌های واگرا ممکن است قرمز، قهوه‌ای، خاکستری و زرد بوده و یا ترکیبی از این رنگ‌ها باشد. در مقابل، خاک‌های سیاه رنگ حاوی مقدار زیادی از مواد آلی بوده و اصلاً واگرا نیستند (Baibordy, 1994). در مورد واگرایی شیمیایی خاک‌ها تا کنون تحقیقات وسیعی در سطح جهان صورت گرفته و روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای شناسایی آن‌ها ابداع

گردیده است. با اینکه اکثر دانشمندانی که در مورد خاک‌های واگرا تحقیق نموده‌اند به مورد فیزیکی و مکانیکی واگرایی خاک (واگرایی فیزیکی) اشاره داشته‌اند ولی متأسفانه تاکنون مطالعه جامعی در مورد چگونگی و علت واگرایی این خاک‌ها، نحوه طبقه بندی و ارائه معیار مناسب برای شناسایی آن‌ها انجام نشده است (Rahimi et al., 2004). شناسایی کامل و دقیق خاک‌های واگرا در محل و بدون انجام رساندن روش‌های آزمایشگاهی مخصوص عملاً مشکل و تقریباً غیرممکن است. به‌همین دلیل بسیاری از محققان تلاش نموده‌اند تا آزمایش‌های مختلفی را به این منظور ابداع نمایند (Sherard et al., 1976). در شکل (۱) نمونه‌ای از آب‌شستگی سطحی دراثر جریان آب در نمونه خاک واگرا نشان داده شده است.خاک‌های واگرا اولین‌بار توسط کشاورزان در بیش از ۱۰۰ سال پیش شناسایی شدند. آن‌ها متوجه شده بودند که در بعضی موارد پس از عملیات آبیاری، خاک دچار فرسایش شدید شده و یا در آن ترک‌های عمیق و گسترده‌ای ایجاد می‌گردد. اولین بار میدلتون درسال ۱۹۹۳ پدیده واگرایی را یکی از عوامل مؤثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی کرد (Askari and Fakher, 1993). Volk (1935) تا (1938) نیز واگرایی خاک‌ها را دلیل اصلی بسیاری از خرابی‌ها دانست که در سدهای خاکی کوچک و بندها و خاک‌ریزهای طراحی شده در سازمان حفاظت خاک آمریکا مشاهده شده است. این سدها عموماً پس از اولین آبگیری خراب شده بودند (Askari and Fakher, 1993). معمولاً یکی از راه‌های تشخیص این نوع خاک‌ها بررسی خصوصیات تحکیمی و یا تشخیص رفتار مکانیکی در منطقه مورد نظر دارد. برای این منظور محققین مختلفی روابط تجربی و فعالیت‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تعیین رفتار مکانیکی این خاک‌ها در مناطق مختلف پیشنهاد داده‌اند.

در چند تحقیق مجزا مشخص گردیده است که اصلاح خاک‌های مساله‌دار اعم از خاک‌های واگرا، تورم پذیر و انحلال پذیر با مواد افزودنی مختلفی نظیر ترمیم کننده میژه بتن، آهک و خاک–سیمان –بنتونیت امکان‌پذیر است ودر مجموع نتایج این تحقیقات نشان داده است که ماده ترمیم کننده ویژه با شرایط بهتری نسبت به آهک و یا سیمان–بنتونیت می‌تواند برای اصلاح خاک‌های واگرا مورد استفاده قرار گیرد (Ahadian et al.2008; Karimi et al. 2010; Daryaei et al. 2010; Ahadian et al. 2012; Ahadian and Behroozi, 2014, 2016; Behroozi and Ahadian 2014; Farzi and Ahadian, 2014).

Ingles Aitchison (1967) نتایج بررسی‌های خود را در زمینه نحوه تأثیر شیمی آب و خاک در پدیده واگرایی و هم‌چنین تأثیر درزها و ترک‌ها در آبشستگی‌های داخلی عرضه کردند و با توجه به این نتایج، حدود مقدار سدیم تبادلی را در خاک‌های واگرا تعیین نمودند. Sherard (1972) با تعیین میزان املاح موجود در خاک (به‌خصوص درصد سدیم) ، تلاش نمودند تا نتایج این آزمایش‌ها را با خرابی‌های مشاهده شده ارتباط دهند. آن‌ها نحوه تأثیر درزها و ترک‌ها را نیز در خرابی‌های مشاهده شده بررسی کرده و نتایج تحقیقات خود را در دو مقاله منتشر نمودند. Shah و Omar (1998)، واگرایی خاک یک پروژه واقع در کاسیمپور هندوستان را بررسی کردند. پس از انجام آزمایش‌های کرامپ و پین‌هول روی این خاک، میزان واگرایی آن شدید تشخیص داده شد. در ادامه این مطالعه‌ها، خاک مذکور به وسیله آهک (با درصدهای یک، ۱/۵، ۲/۵ وسه) تثبیت شد. آزمایش‌های انجام گرفته روی نمونه‌های تثبیت شده نشان دادند که خاک مذکور با افزودن ۲/۵ درصد آهک به خاک غیر واگرا تبدیل می‌شود. Bayer و Abden-Nabi (1993)، روی خاک‌های واگرای چند منطقه مختلف اردن مطالعه‌هایی را انجام دادند. در این تحقیق با استفاده از آزمایش پین هول، تأثیر دانسیته و رطوبت بر رفتار خاک مذکور بررسی شد. این خاک از لحاظ واگرایی در محدوده نیمه واگرا طبقه‌بندی می‌شد و در انتها با افزودن دو درصد آهک، تثبیت و واگرایی آن اصلاح شد. Poursaki et al. (2015) و Ahadiyan et al (2017) نسبت به بررسی تحلیلی و ریاضی تحکیم سه بعدی خاک‌های مساله دار پرداختند و یک روش نوینی با استفاده از تحلیل تابع بسل برای تحلیل میزان نشست پذیری خاک‌ها ارائه دادند. در واقع در تحلیل آن‌ها یک روش نوینی علاوه بر سری فوریه استفاده گردید که برای حل معادلات ریاضی بسیار پیچیده به کار گرفته می‌شود. Toktaş (2001) استفاده از خاکستر بادی نوع c را در تثبیت واگرایی مورد بررسی قرار داد. خاک مورد مطالعه از محل قرضه یک سد واقع در آنکارا تهیه شد و برای تعیین میزان واگرایی آن از آزمایش پین هول استفاده گردید. با انجام آزمایش‌های مذکور نشان داده شدکه می‌توان از این ماده در اصلاح خاک‌های واگرا استفاده کرد. Bolouri-Bazaz و Saghafy (2003)، تأثیر درصد اشباع خاک‌های واگرا را در میزان واگرایی آن‌ها مورد بررسی قرار دادند و مشخص شد که میزان رطوبت، تأثیری در میزان واگرایی خاک ندارد. در این تحقیق از ماده آلی پلیمری برای اصلاح واگرایی خاک استفاده شد و مشخص شد که افزودن این ماده تأثیر مثبت قابل توجهی بر خصوصیات خاک دارد. Rahimi (1989)، مشکل حادث شده در پروژه آبیاری گتوند را که ناشی از واگرایی بود مورد بررسی و مطالعه قرار داد. بررسی‌ها نشان داد که خاک منطقه از نوع رس سیلتی و سیلت رسی حاوی مقدار زیادی املاح به‌ویژه کلرور سدیم می‌باشد. آزمایش مورد استفاده در این تحقیق پین‌هول بوده و با افزودن سه درصد آهک و ۰/۶ درصد سولفات آلومینیوم، خاک به‌طور کامل اصلاح شده و به حالت غیر واگرا تبدیل شد. Rahimi و Fakur (1995) سیمان و امولسیون قیر را در تثبیت خاک‌های واگرا برای استفاده در پوشش کانال‌ها مقایسه کردند. نتایج تحقیق نشان داد که دوام و کیفیت فنی مخلوط سیمان در شرایط مختلف به مراتب بهتر از مخلوط‌های امولسیون قیر بوده و فرسایش پذیری آن‌ها در مقابل جریان آب در مخازن خاکی در حد قابل قبول است..Rahimi et al (2004) به بررسی پدیده واگرایی فیزیکی در خاک‌های غیرچسبنده و معیارهای ارزیابی آن پرداختند.

DOI: 10.22055/JISE.2021.28293.1824

بدین منظور برای انجام این تحقیق ابتدا نمونه‌های ماسه‌ای مختلفی تهیه شده و مشخصات فیزیکی و پتانسیل واگرایی آن‌ها تعیین گردیدند. این بررسی‌ها نشان داد که هر چه درصد وزنی و خمیرایی بخش ریزدانه خاک بیشتر باشد از درجه واگرایی فیزیکی کاسته می‌شود. بر اساس تأثیر متقابل این دو پارامتر نموداری برای ارزیابی پتانسیل واگرایی فیزیکی پیشنهاد گردید. Mazarei و Ahadiyan (2018) و همچنین Bakhtiar و Ahadiyan (2018) نسبت به اثرگذاری خاک‌های مساله‌دار بالاخص خاک‌های واگرا بر نوع تحلیل و گوه شکست در دیوارهای حائل پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها میزان واگرایی در توسعه گوه شکست برای خاک پشت دیوارهای حادل با استفاده از روش استوپلاستیک کاملا مشهود است. Bakhtiari et al. (2018) و Bakhtiari et al. (2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی نسبت به تثبیت خاک‌های واگرا به روش تراکم دینامیکی پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که برای کلیه شرایط مدل‌سازی با افزایش ارتفاع سقوط و همچنین افزایش وزن کوبه عمق تأثیر برای این نوع خاک‌ها افزایش می‌یابد. Sadeghi و Ahadiyan (2018) و همچنین Ahadiyan et al. (2018, 2022) نسبت به بررسی پایداری دایک‌های ساحلی که به لحاظ پایداری فونداسیون و جداره خاکی دچار اشکال هستند پرداختند. بر اساس بررسی این محققین وجود جریان‌های کم عمق روی خاک‌های مساله‌دار باعث فرسایش بیشتر و در نتیجه آن تخریب سریعتر می‌گردد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که میزان درصد سیلت موجود در خاک که باعث تغییر رفتار در خاک‌های رمبنده و مساله دار می‌شود نیز در رفتار پایداری این نوع خاک‌ریزها اثر مستقیم دارد. Haghdoost et al. (2023, 2024) نسبت به بررسی خاک واگرا در هسته سدهای خاکی اقدام نمودند. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی وجود مشکل در تأمین منابع قرضه مشهود بوده و از این رو استفاده از روش‌هایی که بتواند شرایط هیدرولیکی و هندسی هسته سد را بهبود ببخشد مدنظر است. در تحقیق آن‌ها مشخص گردید زاویه پرده آب‌بند، اثرگذاری بسیار زیادی در کنترل رفتار هیدرولیکی و مکانیکی این نوع خاک‌ها دارد. Memarian et al. (2023) رفتار مکانیکی خاک‌های ناپایدار موجود بر روی شیب‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین برای تثبیت این نوع خاک‌ها که شامل خاک‌های واگرا نیز می‌شود، استفاده از شمع و میکرو شمع بر روی شیب را پیشنهاد دادند. بر اساس نتایج این محققین طول و تعداد شمع‌ها تا عمق برابر با هر لایه مورد استفاده اثرگذاری کمی در افزایش پایداری شیب‌های مستقر روی خاک‌های ناپایدار دارد. Kiyani et al. (2024) در یک تحقیق آزمایشگاهی تثبیت خاک‌های مساله دار پشت دیوارهای حائل را با استفاده از تثبیت کننده ژئوتکستایل بررسی نمود. پارامترهای مورد بررسی در تحقیق آن‌ها شامل تعداد لایه ژئوتکستایل و فواصل بین لایه‌های آن بود. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود لایه‌های ژئوتکستایل، طول خط شکست را تا ۴۱ درصد کاهش داده است. همچنین مقدار زاویه شکست را بهبود بخشیده و تشکیل گوه شکست را در اعماق پایین‌تر تا حداکثر ۱۶ درصد کاهش داده است. حرکت انتقالی دیوار در حالت تحریک، تمایز بیشتری بین نقطه ثابت و ناحیه شکست دارد و لایه‌های تقویت‌کننده نیز در افزایش ظرفیت باربری و پایداری دیوار حائل مؤثر هستند.

با توجه به آنچه که به‌طور مفصل در بخش مقدمه و مروری بر منابع گذشت، در اکثر فعالیت‌های عمرانی و پروژهای وسیع، مشکل خاک مساله‌دار، یک معضل جدی بوده و نیاز است که با توجه به ماهیت رفتار مکانیکی آن‌ها اقدام به اصلاح و یا تثبیت این نوع خاک‌ها نمود. لذا از اهداف این تحقیق، اصلاح واگرایی فیزیکی خاک‌های غیرچسبنده از طریق اضافه نمودن برخی مواد و مقایسه تأثیر آن‌ها و نیز بررسی تغییر مقاومت باربری خاک نیز پس از طرح اختلاط بوده که در ادامه به شرح روش تحقیق و نتایج آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه خاک مورد مطالعه از سواحل رودخانه کارون در اطراف پل هفتم شهر اهواز تهیه شده و پس از انتقال به آزمایشگاه براساس استاندارد ASTM D 422-87 و به‌منظور تعیین طبقه‌بندی خاک مورد آزمایش دانه‌بندی قرار گرفت. همچنین برای بررسی بخش ریزدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰) آزمایش هیدرومتری براساس استاندارد ASTM D 421-58 انجام پذیرفت. با توجه به نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی با الک و هیدرومتری منحنی دانه‌بندی مطابق شکل (۲) رسم گردید.

از روی مقادیر به‌دست آمده برای نمونه خاک و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد این خاک در طبقه ماسه لای‌دار (SM) قرار گرفت. به‌منظور شناسایی بیشتر مشخصات خاک آزمایش چگالی خاک براساس استانداردASTM D 854-87 و هم‌چنین آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک براساس استاندارد ASTM D 2216-90 و آزمایش تراکم استاندارد براساس استاندارد ASTM D 698-78 و آزمایش اتربرگ براساس استاندارد ASTM D4318-87 انجام گرفت. نتایج نهایی آزمایش‌های صورت گرفته روی نمونه خاک در جدول (۱) نشان داده شده است.



Fig. 1- Soil surface erosion due to the water flow in the dispersive soils
شکل۱- آب‌شستگی خاک در سطح بر اثر جریان آب در خاک واگرا

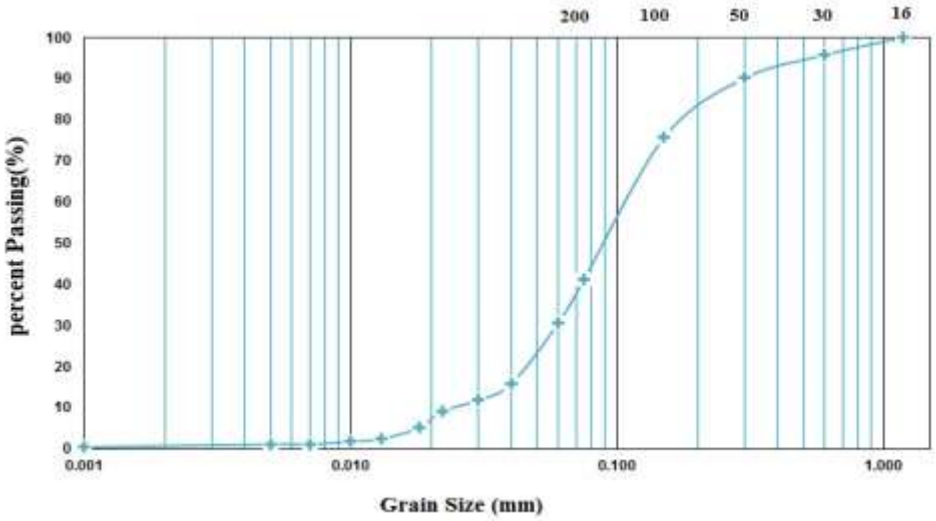


Fig. 2-Grading Diagram of Tested Soil
شکل۲- منحنی دانه‌بندی نمونه خاک مورد آزمایش

جدول۱- مشخصات خاک مورد آزمایش
Table 1- Specifications of Tested Soil

Soil Classification	Moisture Content (%)	Density (Gs)	Plasticity Index (%)	Dry Density ($\frac{gr}{cm^3}$)
SM	11.06	2.6	NP	1.82

نانو رس مورد استفاده در این پروژه از جنس مونت مویلونیت بوده و با درصد اختلاط های یک و دو درصد با نمونه خاک مخلوط گردید. مشخصات این ماده در جدول (۲) نشان داده شده است.

هم‌چنین به‌منظور مقایسه تأثیرات نانو رس، طرح اختلاط سیمان و خاک رس چسبنده نیز در درصدهای مشخص با خاک غیرچسبنده مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از انتخاب این خاک مقایسه‌ای بین میزان تأثیرگذاری رس و نانو رس است. نتایج آزمایش‌ها به‌منظور شناسایی اولیه خاک رسی در جدول (۳) نشان داده شده است.

هم‌چنین خاک رسی در نسبت‌های ۱/۹و ۱/۶ در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفت.

هم‌چنین سیمان تیپ دو پوزولانی با توجه به ضد کلر و ضدسولفات بودن و هم‌چنین کارایی مناسب این سیمان در مناطق گرم، به‌عنوان گزینه مورد استفاده در طرح اختلاط در درصدهای پنج وهفت مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور بررسی تأثیر ترکیبی مواد در بهبود خواص خاک غیرچسبنده طرح اختلاط ترکیبی نانو- سیمان (با نسبت دو درصد نانو و هفت درصد سیمان) انتخاب

DOI: 10.22055/JISE.2021.28293.1824

و مورد آزمایش قرار گرفت. لازم به ذکر است تمامی نسبت‌های انتخابی با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های اولیه شناسایی و هم‌چنین نتایج تحقیقات گذشته مشخص گردیده است. در ادامه به آزمایش‌های انجام شده به‌منظور ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک پرداخته شده است. آزمایش کرامپ (Crumb Test) براساس استاندارد ASTM-D6572 انجام گرفت بدین منظور ابتدا قسمت کوچکی از خاک، در داخل ظرفی حاوی ۱۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر قرار گرفت و پس از گذشت پنج تا ۱۰ دقیقه از انجام آزمایش میزان جدا شدن ذرات خاک از نمونه و تشکیل محلول کلوئیدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. طبق شکل (۳) واکنش ذرات خاک در مقابل آب به یکی از صورت‌های زیر می‌باشد. هم‌چنین نحوه طبقه‌بندی توصیفی خاک در این آزمایش در جدول (۴) نشان داده شده است. در نهایت وضعیت نمونه خاک در آزمایش کرامپ در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول۲- مشخصات نانو رس مورد استفاده

Table 2- Specifications of Nano clay

Particle size	Specific surface area	The Empty Space between particles	Color	Moisture Content
1-2 nm	220-270(m^2/gr)	60A.	light yellow	1-2%

جدول۳- نتایج آزمایشات اولیه روی خاک رس

Table 3- The results of preliminary experiments on clay

Soil Classification	Moisture Content (%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	Dry Density ($\frac{gr}{cm^3}$)
CL	31	44	26	18	**1.75**

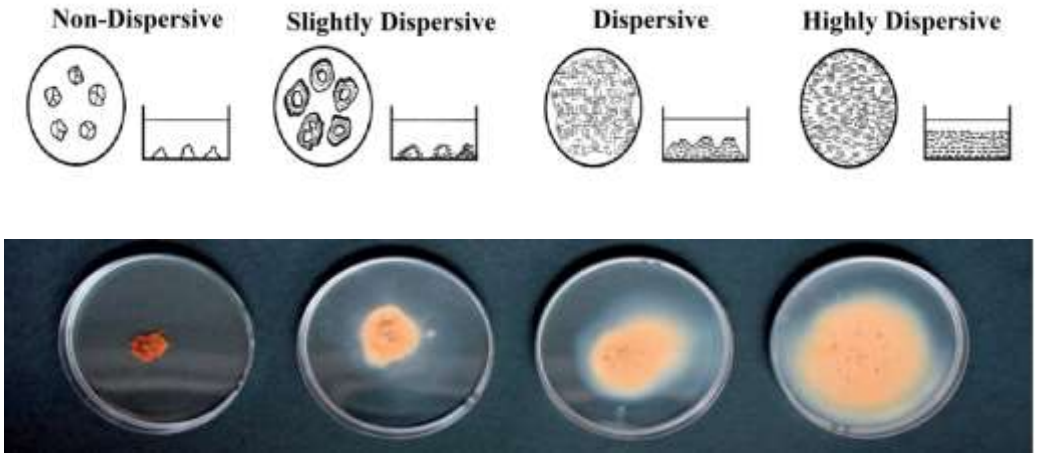


Fig. 3- Interaction of soil particles and water content at crumb test

شکل۳- واکنش ذرات خاک در مقابل آب در آزمایش کرامپ

جدول٤- طبقه‌بندی خاک براساس آزمایش کرامپ

Table 4- Classification of soils based on crumb test

Reaction	Descriptions
No Dispersive	Crumbs may slake, but no sign of cloudiness caused by colloids in suspension
Slight Dispersive	A bare hint of cloudiness in the water at the surface of the crumb.
Moderate Dispersive	Easily recognisable cloud of colloids in suspension, usually spreading out in thin streaks on the bottom of the beaker.
Strong Dispersive	Colloid cloud covers nearly the whole bottom of the beaker, usually as a thick skin.



Fig. 4- The picture of the Crumb test on Dispersive soil
شکل٤- تصویر آزمایش کرامپ برروی نمونه خاک واگرا

جدول٥- طبقه بندی خاک‌های واگرا براساس درصد واگرایی
Table 5- Classification of Dispersive Soils Based on dispersive Percent

Classification	dispersive Percent
No Dispersive	Less 30%
Slight Dispersive	30% -50%
Moderate Dispersive	50% -75%
Strong Dispersive	More 75%



Fig. 5- Double hydrometer test
شکل٥- آزمایش هیدرومتری دوگانه

هم‌چنین آزمایش هیدرومتری مضاعف (Double Hydrometer Test) بر اساس استاندارد ASTM D4221 انجام گرفت. در این آزمایش ابتدا دانه‌بندی خاک به روش استاندارد آزمایش هیدرومتری یعنی با استفاده از همزن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده‌ساز تعیین گردید، سپس روی نمونه دیگری از همان خاک آزمایش هیدرومتری بدون استفاده از همزن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده‌ساز انجام گرفت. درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر در هر دو آزمایش تعیین و سپس درصد واگرایی که برابر است با نسبت درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش دوم به درصد همین ذرات در آزمایش اول، محاسبه گردید.

سازمان حفاظت خاک آمریکا نیز بر اساس نتایج تحقیقات Sherard et al. (1976)، معیارهایی را برای طبقه‌بندی خاک‌های واگرا براساس مقدار درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه مطابق جدول (۵) ارائه نموده است (Askari and Fakher,1993). درادامه نحوه این آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است.

در آزمایش پین هول (Pinhole Test) که به آزمایش شرارد نیز معروف است و براساس استاندارد ASTM D4647 انجام می‌پذیرد، میزان واگرایی خاک‌های ریزدانه مستقیماً با عبور دادن آب از داخل سوراخی که در نمونه خاک ایجاد می‌گردد اندازه‌گیری می‌شود. آبی که از داخل نمونه‌های خاک‌های واگرا خارج می‌شود کدر و دارای ذرات معلق کلوئیدی است اما در نمونه‌های غیر واگرا آب مذکور زلال و شفاف است مبنای قضاوت در این آزمایش، محلول خارج شده از نمونه، دبی جریان و قطر نهایی سوراخ است. نحوه طبقه‌بندی توصیفی خاک براساس آزمایش پین هول در جدول (۶) نشان داده شده است.

در ادامه شکل کلی دستگاه پین هول به همراه بخش‌های تشکیل دهنده در شکل(۶) و همچنین ابعاد مورد آزمایش به همراه ابعاد مرزی در شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول ٦- طبقه بندی خاک براساس آزمایش پین هول
Table 4- Classification of soils based on pinhole test

Classification	Descriptions
Dispersive	It is easy to wash 50 mm with a water bar and remove the colloidal solution
Moderate Dispersive	With a water bar between 50 and 180 mm, it is washed slowly and going out
Non- Dispersive	Water is not washed out by more than 380 to 1020 mm, the water is clear

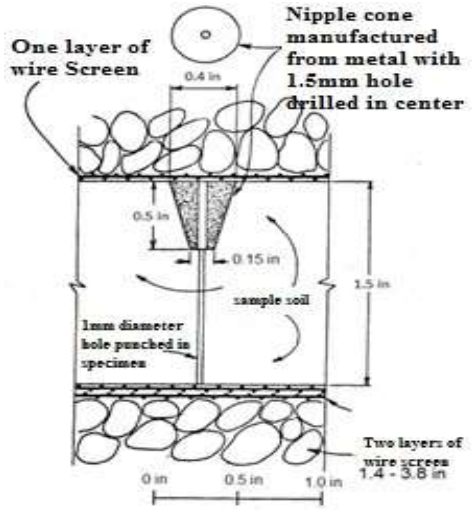


Fig. 7- Dimensions tested on pin hole device
شکل ۷- ابعاد مورد آزمایش در دستگاه پین هول

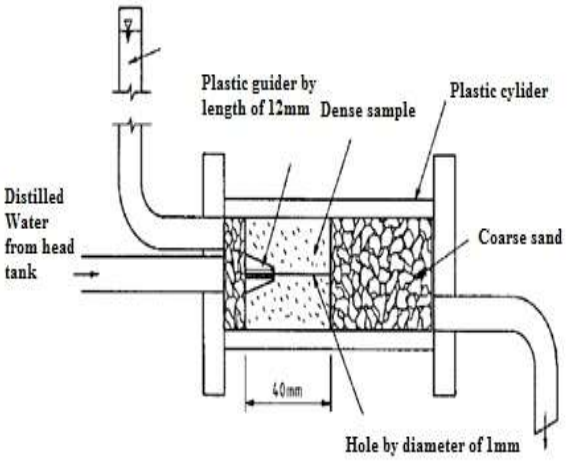


Fig. 6- A schematic picture of the pinhole apparatus
شکل٦- شکل کلی دستگاه پین هول

کنترل قطر نهایی سوراخ در آزمایش پین هول به‌دلیل تخریب کامل نمونه‌ها غیر ممکن می‌نمود و دبی خروجی نیز به‌دلیل اینکه آب خروجی فقط از سوراخ وسط نمونه عبور نمی‌کرد نمی‌توانست معیار مناسبی برای ارزشیابی شدت واگرائی باشد. لذا در این تحقیق، آبشستگی شدید و تخریب کامل نمونه به‌عنوان معیار ارزیابی واگرایی، مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین در انجام آزمایش روی کلیه نمونه‌ها، تنها با مشاهده تغییرات ناگهانی دبی خروجی و شاهده عینی حرکت ذرات درون قالب دستگاه پین هول و نیز مشاهده تخریب نمونه، شدت واگرایی فیزیکی نمونه‌های خاک غیرچسبنده ارزیابی گردید. برای تعیین میزان جذب آب آزمایش ضریب جذب آب براساس استاندارد ASTM C128-97 برای هر یک از طرح اختلاط‌ها انجام گرفت. ضریب جذب آب با تقسیم وزن آب جذب شده بر وزن خشک نمونه محاسبه گردید. و به‌منظور تعیین ظرفیت باربری خاک متراکم شده آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) براساس استاندارد ASTM D1883-87 انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش کرامپ در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج این آزمایش نشان دهنده اثرات مثبت هر سه ماده روی کاهش پتانسیل واگرایی می‌باشد. در طرح اختلاط نانو رس با دو درصد از این ماده نمونه خاک ما غیر واگرا می‌شود هم‌چنین با اضافه کردن پنج درصد از سیمان نمونه خاک به حالت غیر واگرا در آمده است روند تأثیر در طرح اختلاط رس چسبنده نسبت به دو ماده دیگر کمتر بوده است.

نتایج نمودار درصد واگرایی درآزمایش هیدرومتری مضاعف در شکل (۸) نشان داده شده است. این نتایج نشان دهنده روند مثبت کاهش درصد واگرایی در طرح اختلاط‌های سیمان می باشد به‌طوری که این روند با اضافه کردن هفت درصد سیمان از ۲۹ درصد درحالت خاک غیرچسبنده (نمونه شاهد) به ۱۹ درصد کاهش یافته است.

جدول۷- نتایج آزمایش کرامپ

Table 7- crumb test result

Mixing different materials	Crumb test
Non-Sticky Soil	Dispersive
1% Nano clay	Slight Dispersive
2% Nano clay	No Dispersive
5% Cement	No Dispersive
7% Cement	No Dispersive
1/9 clay soil	Slight Dispersive
1/6 clay soil	Slight Dispersive
7% Cement+2% Nano clay	No Dispersive

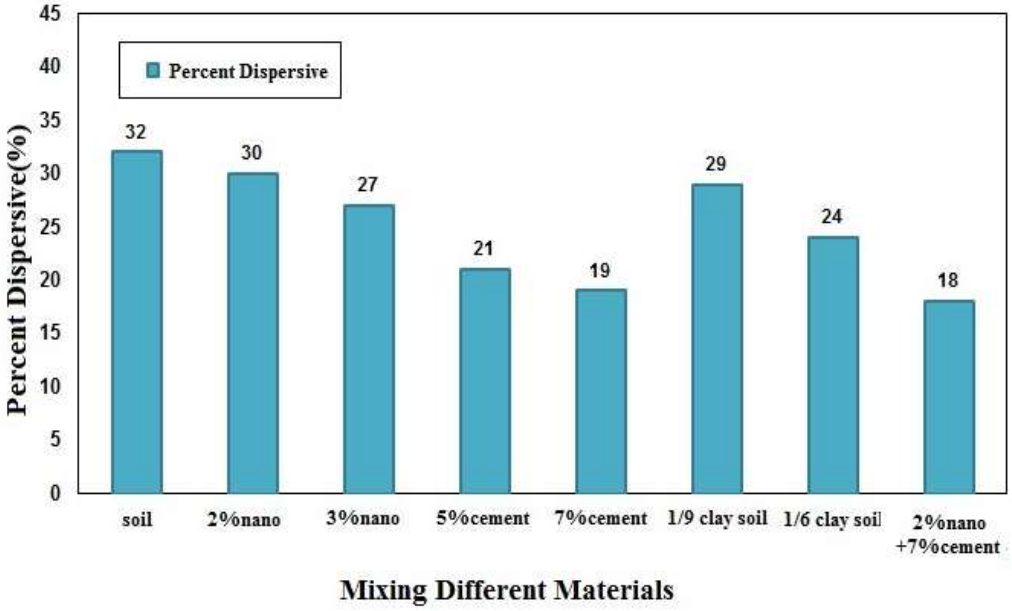


Fig. 8- Diagram of the percent dispersive in the double hydrometer test

شکل۸- نمودار درصد واگرایی آزمایش هیدرومتری مضاعف

هم‌چنین نتایج توصیفی آزمایش هیدرومتری مضاعف در جدول (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده تأثیر دو درصدی طرح اختلاط نانو رس و تأثیر پنج درصدی سیمان به بعد در غیرواگرا کردن نمونه خاک بوده است.

نمودار تغییرات دبی خروجی از پین هول در بارهای آبی مختلف و برای درصدهای مختلف هر یک از افزودنی‌ها در شکل (۹) و هم‌چنین نتایج توصیفی این آزمایش در جدول (۹) نشان داده شده است. در آزمایش پین هول درمورد اصلاح واگرایی خاک نیز عملکرد مناسب هر سه ماده نشان داده شده است به طوری که در نانو رس با دو درصد و در سیمان با پنج درصد و با خاک رس چسبنده با نسبت ۱/۶ اصلاح واگرایی فیزیکی در خاک غیر چسبنده مشاهده شد. عاملی که باعث تثبیت نمونه‌های خاک غیرچسبنده خواهد شد، ایجاد چسبندگی بین ذرات درخاک ماسه‌ای در اثر اضافه شدن بخش ریزدانه چسبنده می‌باشد و طبیعتاً مشخصات و مقدار بخش ریزدانه بر میزان چسبندگی حاصله و چگونگی مقاومت به واگرایی دارای اثر تعیین کننده خواهد بود.

نتایج آزمایش ضریب جذب آب در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ضریب جذب آب به‌طور مستقیم با حجم خلل و فرج نفوذپذیر ارتباط پیدا می‌کند. با افزایش درصد نانو رس و سیمان ابتدا مقدار نفوذپذیری به‌دلیل کاهش خلل و فرج کاهش و بعد از آن روند افزایشی داردکه آن را می‌توان جذب سطحی بالای نانو رس و سیمان نسبت به خاک غیرچسبنده مرتبط دانست. برای طرح اختلاط رس چسبنده به‌دلیل جذب آب بالای خود خاک رسی افزایش جذب آب را از همان ابتدا شاهد هستیم. لازم به ذکر است در طرح اختلاط ۱/۹ ما شاهد کاهش جذب آب هستیم که به‌دلیل کاهش حجم خلل و فرج می‌باشد. هم‌چنین جذب آب برای طرح اختلاط ترکیبی هفت درصد سیمان و دو درصد نانو رس مورد بررسی قرار گرفت، که مقدار جذب آب در این طرح اختلاط ۱۶/۸ درصد حاصل شد.

جدول ۸- نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف

Table 8- Double hydrometer test Results

Mixing different materials	Crumb test
Non-Sticky Soil	Moderate Dispersive
1% Nano clay	Moderate Dispersive
2% Nano clay	No Dispersive
5% Cement	No Dispersive
7% Cement	No Dispersive
1/9 clay soil	Moderate Dispersive
1/6 clay soil	No Dispersive
7% Cement+2% Nano clay	No Dispersive

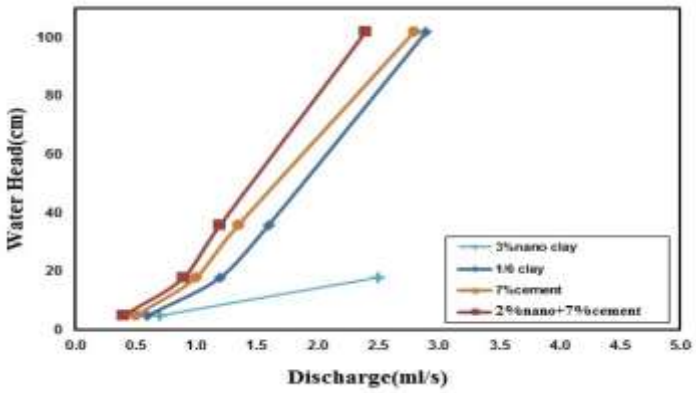


Fig. 9- Comparison of the performance of fixed samples in pinhole test

شکل۹- مقایسه عملکرد نمونه‌های تثبیت شده در آزمایش پین هول.

جدول ۹- نتایج نهایی واگرایی در آزمایش پین هول.

Table 9- pinhole test Results

Mixing different materials	Crumb test
Non-Sticky Soil	Dispersive
2% Nano clay	Moderate Dispersive
5% Cement	No Dispersive
1/9 clay soil	No Dispersive
7% Cement+2% Nano clay	No Dispersive

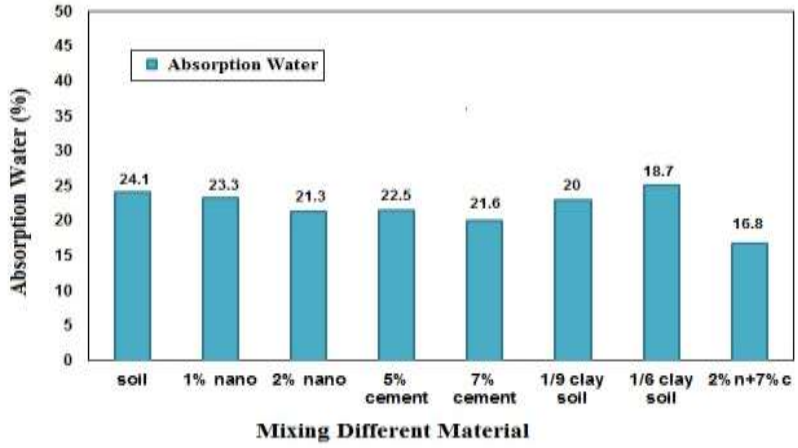


Fig. 10- The Absorption Water

شکل ۱۰- نمودار تغییرات جذب آب

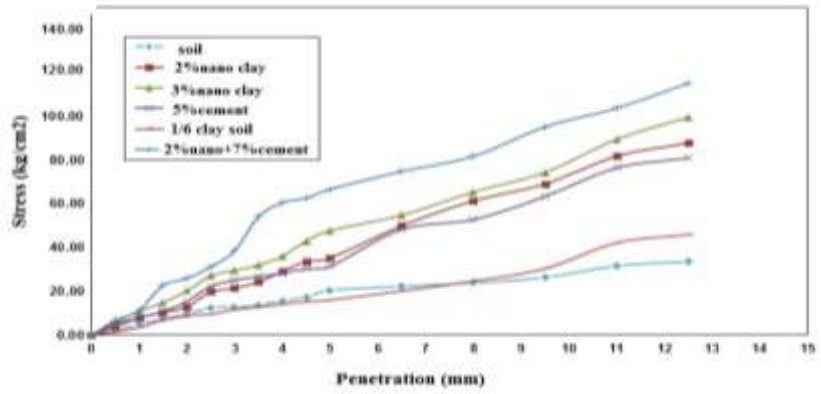


Fig. 11- The California Bearing Ratio test
شکل۱۱- نمودار آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا

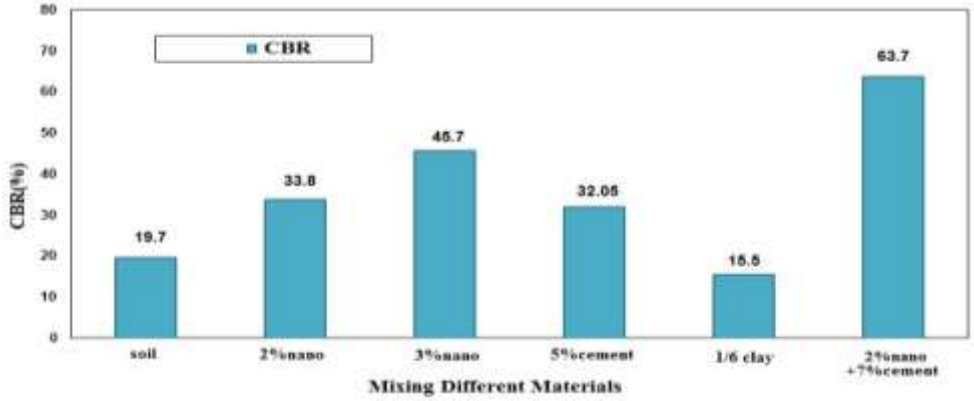


Fig. 12- The California Bearing Ratio change
شکل ۱۲- نمودار تغییراتCBR

نتایج آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. براساس شکل با افزایش درصد اختلاط نانو رس و سیمان در خاک روند تغییرات نمودار تنش فشاری برحسب نفوذ افزایش می‌یابد و به تبع آن شاهد افزایش ظرفیت باربری در خاک هستیم. هم‌چنین روند تغییرات مقاومت فشاری برحسب نفوذ برای طرح اختلاط‌های مختلف خاک رسی چسبنده نسبت به روند تغییرات طرح اختلاط‌های نانو رس و سیمان کمتر است، بنابراین ظرفیت باربری کمتری را نشان می‌دهد. به‌طورکلی نتایج آزمایش روی طرح اختلاط‌های مختلف نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری خاک در طرح اختلاط‌های سیمان و نانو رس و کاهش ظرفیت باربری در طرح اختلاط خاک رسی چسبنده با افزایش مقدار ماده اختلاط می‌باشد. بیشترین مقدار CBR مربوط به ترکیب دو درصد نانو با پنج درصد سیمان و کمترین مقدار مربوط به ۱/۶ خاک رسی چسبنده می‌باشد.

همان‌طور که در نتایج آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در شکل (۱۲) مشخص است، بین عدد ظرفیت باربری و درصد رس چسبنده موجود در مخلوط، رابطه‌ای غیرخطی معکوس دیده می‌شود به‌طوری که افزایش درصد رس چسبنده و به دنبال آن افزایش شاخص خمیری، مقاومت خاک در برابر نفوذ سنبه کم‌تر و نفوذ آن به درون خاک راحت‌تر می‌شود. بدین ترتیب، عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا به‌دست آمده کوچک‌تر می‌شود. هم‌چنین با افزایش درصد سیمان در خاک و انجام هیدراتاسیون شاهد کاهش شاخص خمیرایی و افزایش مقاومت فشاری نفوذ سنبه هستیم، بنابراین ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج ظرفیت باربری به‌دست آمده با جدول رده‌بندی خاک، مشخص می‌شود دامنه تغییرات کیفیت در طرح اختلاط‌های سیمان و نانورس در رده خوب و برای طرح اختلاط خاک رسی چسبنده در رده نسبتاً خوب قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که با افزایش درصد طرح اختلاط در همه افزودنی‌های مورد استفاده، شدت واگرایی کم یا خاک کاملاً غیرواگرا می‌شود. ضمناً راندمان اصلاح واگرایی در درصدهای کمتر افزودنی‌ها بیشتر بوده و با زیاد شدن مقدار ماده افزودنی، مقدار واگرایی بایک شدت ثابت اصلاح نمی‌شود. در آزمایش ظرفیت باربری، ترکیب سیمان و نانو رس باعث افزایش بسیار زیاد ظرفیت باربری (تا حدود ۶۴ درصد) و رس چسبنده باعث کاهش ظرفیت باربری می‌گردد. بیشترین سهم افزایش مقاومت در این آزمایش مربوط به دو درصد نانو همراه با پنج درصد سیمان می‌باشد.

سپاسگزاری

در انجام مراحل این تحقیق با توجه به انجام فعالیت‌های تحقیقاتی آزمایشگاهی و میدانی از امکانات آزمایشگاه مکانیک خاک و ژئوتکنیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز بهره گرفته شد که بدینوسیله نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه‌های علوم و فنون دریایی خرمشهر و دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر می‌نمایند. همچنین از مهندسین و متصدیان عزیز آزمایشگاه‌های مکانیک خاک وزارت راه و ترابری مشهد و اهواز نیز تشکر می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: سروش فرخند، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش اولیه.

نویسنده دوم: حسین بهرامی، بررسی داده ها و استخراج نتایج، بررسی و تحلیل نتایج و بحث.

نویسنده سوم: جواد احدیان، تدوین برنامه روش کار، تدوین برنامه انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی، اصلاح نگارشی مقاله، بررسی و تحلیل نتایج و بحث.

References

1- Ahadian, J., Jalal, R. E., and Mahmoud, S. B. 2008. Determination of soil compression index, Cc, in Ahvaz region. *Journal of Faculty Engineering, 35 (3-51): 75–80.* (In Persian).

2- Ahadian, J., Salemnia, A., Karimi, M. 2012. Effect of compaction test component on development of stress-strain in the clay soil in comparison with sandy-clay soil, *Journal of Water and Soil Resources Conservation, 1(2), 29.* DOR: 20.1001.1.22517480.1390.1.2.3.3 .(In Persian).

3- Ahadian, J., Behroozi, F. 2014. 'Estimate the Compression index, Swelling and Preloading Coefficient in the Presence of Special Restorative of Clay-Gypsum soils, *Advanced Applied Geology*, 4(1), pp. 10-17. (In Persian).

4- Ahadiyan, J. and Behroozi. F. 2016. Application of ANFIS Adaptive System to Estimate the Potential Consolidation of Clay Soils, *Journal of Modeling in Engineering*, 14(45), pp. 17-31. doi: 10.22075/jme.2017.1760. (In Persian).

5- Ahadiyan, J., Poursaki, R., Seraj, M. 2017. Analytical Investigation of Effect of Vertical Drains to Consolidation Settlement Process in Isotropic Soils, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1-1), pp. 61-72. doi: 10.22055/jise.2017.12957 (In Persian).

6- Ahadiyan, J., Adeli, A., Bahmanpouri, F., & Gualtieri, C. 2018. Numerical Simulation of Flow and Scour in a Laboratory Junction. *Geosciences*, 8(5), 162. https://doi.org/10.3390/geosciences8050162.

7- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A. Galtieri, C., Khoshkonesh, A. 2022. Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Non-cohesive Protective Levees. *Water Resources Management journal*, 36, 625–639 (2022). https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6.

8- Askari,F. and Fakher,A.,1993. Inflation and Dispersive of Soils in Geotechnical Engineering. *Isfahan University Technology Branch Press and Publishing* (In Persian).

9- ASTM, Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the Crumb test, *ASTM Designation: D6572-00*, Last updated: May 27, 2021.

10- ASTM, Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay by the Pinhole Test, *ASTM Designation: D4647*, Last Updated: Feb 26, 2020.

11- Baibordy, M., 1994. Soil physics. *Tehran University Press and Publishing* (In Persian).
12- Bakhtiar, M., Ahadiyan, J. 2018. Estimation of Lateral Forces on Retaining Walls Adjacent to Layered Embankments in Saturated and non-Saturated Conditions, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(1), pp. 19-30. doi: 10.22060/ceej.2017.11859.5090. (In Persian).

13- Bakhtiari, M., Kamal Pour, A.E., Ahadiyan, J. 2018. Numerical Modeling of soil dynamic compaction using Finite Difference method, *Advanced Applied Geology*, 8(1), pp. 60-68. doi: 10.22055/aag.2018.23603.1769. (In Persian).

14- Bakhtiari, M., Kamal pour asl, E., Ahadiyan, J. 2020. Investigation of the effect of Hammer radius parameters and number of impact on soil improvement by dynamic density method In line with the construction of offshore structures, *Journal of Marine Science and Technology*, 18(4), pp. 75-90. doi: 10.22113/jmst.2018.100314.2060. (In Persian).

15- Bayer, H., Abden-Nabi, H., 1993, Analysis of dispersive phenomenon of some Jordanian soils, *M. S. thesis.*

16- Behroozi, F., Ahadian, J. 2014. 'Effect of Adding Lime to the Consolidation Properties of Clay–Gypsum Soils', *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), pp. 61-70. Doi: 20.1001.1.25885952.1393.37.2.6.6.

17- Bolouri-Bazaz, J., Saghafy, H. R., 2003, Properties and behavior of dispersive clayey soil treated by PVA, *International Conference on Geotechnical Engineering, Beirut.*

18- Daryaei, M.; Kashefipour, S.M.; Ahadian, J.; Ghobadian, R. 2010. Modeling the compression index of fine soils using an artificial neural network and comparison with other empirical equations. *Journal of Water and Soil. 2010, 5, 312–333.* https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.3885.

19- Farzi, M., and Ahadian, J. 2014. The Effect of Mixing Method on the Permeability Changes of Cement-Bentonite. *European Online Journal of Natural and Social Sciences,* 3(3), pp. 8-16.

20- Haghdoost, M., Lakzian, E., Norouzi, R., Abraham, J., Sajjadi, S. and Ahadiyan, J., 2023. Numerical simulation using the finite element method to investigate the effect of internal cutoff walls on seepage and hydraulic gradients in homogeneous earth dams. *Modeling Earth Systems and Environment*, *9*(4), pp.3851-3864.https://doi.org/10.1007/s40808-023-01755-w.

21- Haghdoost, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Norouzi, R., & Abraham, J. 2024. The effect of sheet piles' inclination angle, number, and distance on seepage through an earth-fill dam. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), 103056. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103056.

22- Ingles O. G. & G. D. Aitchison. 1967. Soil- Water Disequilibrium as a Cause of Subsidence in Natural Soils and Earth Embankments. *International Symposium on Land Subsidence, Tokyo, AIHS Publication NO.89, VOL.2.*

23- Karimi, M., Salemnia, A. and Ahadiyan, J., 2010. Evaluation of strength parameters of stress-strain development in clay soil and clay-sand soil. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, *1*(3), pp.644-660.

24- Kiyani A, Zeinivand M, Ahadiyan J, Falorca I. 2024. Experimental Investigation of Embankment Wedge Failure's Stability under the Effect of the Number and Spacing of Geotextile Layers in the Reinforced Retaining Wall. *Journal of water and soil science,* 2024; 28 (2) :177-194. Doi: 10.47176/jwss.28.2.51162.

25- Mazarei, H., Ahadiyan, J. 2018. Effect of unsaturated soil texture and compaction in experimental Analysis and River retaining wall failure wedge elasto-plasticity, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(4), pp. 197-212. doi: 10.22055/jise.2018.13431. (In Persian).

26- Memarian, S., Ahadiyan, J., & Reza Karimi, H. 2023. Assessment of vertical pile reinforcement effect on behavior of foundations placed on Slopes: An experimental and numerical study. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(12), 102233. https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102233.

27- Poursaki, R., Ahadian, J., Seraj, M. 2015. 'A 3-D Mathematical Modeling in Solving Analytical Consolidation Equation in a Homogeneous Saturated Soil', *Journal of Advanced Mathematical Modeling*, 5(1), pp. 59-74. doi: 10.22055/jamm.2015.11487. (In Persian).

28- Rahimi.H, Davarzani.H, and Abbasi.N, 2004. Physical Dispersivity Phenomenon and its Evaluation Criteria in Cohesionless Soils. *Iranian Journal of Agricultural Science. Vol. 35, No. 3.* (In Persian).

29- Rahimi H. and Fakour, K., 1995, Comparison of portland cement and asphalt emulsion for stabilization of Dispersive soils, *Iranian Journal of Agricultural Science*.(26)4. (In Persian)**.**

30- Rahimi, H., 1989, "Problems of Water Structures in Salt and Gypsiferous Soils", *The First Geotechnical Assembly in Dam Construction and Water Resources,* (In Persian)**.**

31- Sadeghi H. E., Ahadiyan, J. 2018. Hydraulically Failure Mechanism of non-Cohesive Homogenous Protective Embankments by Overtopping, *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(1), pp. 115-131. doi: 10.22055/jise.2018.13575. (In Persian).

32- Shah, S. S. and Omar, H., 1998, A case study of stabilization of dispersive soil using lime, *International symposium of Problematic Soils, Balkema.*

33- Sarshar, P., 1992. Investigation of the Divergence of Clay Soils in Hydraulic Structures. *Iran University of Science & Technology* (In Persian).

34- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R.S., 1976. Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, *102*(4), pp.287-301. Doi: 10.1061/AJGEB6.0000256.

35- Sherard, J.L., 1972. Hydraulic fracturing in low dams of dispersive clay. In *Proc. of Specialty Conference on Earth and Earth-Supported Structures, 1972* (pp. 653-689). ASCE.

36- Toktaş, F., 2001. Behavior and stabilization of dispersive soils with C-type fly ash (Master's thesis, Middle East Technical University).