



## Laboratory investigation of the use of natural and artificial additives on the mechanical properties of soil (a case study of Ramhormoz city)

Morteza Bakhtiari <sup>1\*</sup>, Majid Heidari <sup>2</sup>, Javad Zahiri <sup>3</sup>

1. Department of Marine Structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran.

2. Research Institute of Marine Sciences, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technologies, Khorramshahr, Iran.

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Bavi, Iran.

\* Corresponding Author Email: [bakhtiari@kmsu.ac.ir](mailto:bakhtiari@kmsu.ac.ir)

Received: 28 November 2023

Revise Date: 10 April 2023

Accepted: 7 July 2024

### ABSTRACT

In the design and construction of structures, especially water structures, and contact with any problematic soils, many issues and problems may arise during construction or operation, which will eventually lead to local destruction or destruction of the structure. Iran is one of the countries that, due to its special arid and semi-arid climatic conditions as well as its geology, many types of problematic soils are found in it, so the existence of this category of soils has been the source of many destructions and damages caused in There have been all kinds of structures, especially water structures in the country. To achieve the goals of the present research, tests were conducted on the soils of the construction site of Ramhormoz canals in three sections to identify the mineral type and morphology of the tested samples and to investigate the effect of different additives on the mechanical properties of the soil samples. The results of the research show that there are changes in the paste limit for all related samples, the lowest value for the sample with 5% lime is an increase of 3.58 and the highest value for the sample with 7% cement is an increase of 9.65. The changes in internal friction angle for all samples show that the lowest value related to the sample with 7% cement is equal to 0.1% increase and the highest value related to the sample with 7% cement is equal to 24.9% increase.

**KeyWords:** Problematic soils. Stabilize, dissolvability, mineral, limit of elasticity

### 1. INTRODUCTION

In the design and construction of structures, especially water structures, and contact with any problematic soils, many issues and problems may arise during construction or operation, which will eventually lead to local destruction or destruction of the structure. Iran is one of the countries that, due to its special arid and semi-arid climatic conditions as well as its geology, many types of problematic soils are found in it, so the existence of this category of soils has been the source of many destructions and damages caused in There have been all kinds of structures, especially water structures in the country.

#### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted Journal of Marine Science and Technology. 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.



## **2. MATERIAL AND METHOD**

To achieve the objectives of the present research, after studying the previous research, field sampling was done, and then by transferring the prepared samples to the laboratory, relevant laboratory studies were carried out. Laboratory studies of the current research in three sections: mineralogy of samples with XRD device, morphology of samples with SEM device; and Granulation of the samples was done by LPSA method. For sampling for the present research, data collection was done from the Ramhormoz region located in Khuzestan province, which has chalk soils and is the place of implementation of various water transfer structures. In this research, manual boreholes were dug from a depth of -30 (minus 30 cm) from the base level to a depth of -60 (minus 60 cm) and the information about the state of the soil layer was obtained by sampling the mentioned boreholes by performing the necessary tests. From the soil composition that was sampled from the mentioned places with 3 types of solid materials including: a- The combination of soil with type 2 cement with a combination of 2, 5%, and 7% by volume. b- Mixing the soil with slaked lime with a combination of 5% and 7% by volume. C - Mixing the soil with slag with 3 with a combination of 5% and 7% by volume.

## **3. RESULT**

The results of this research show that the changes in the paste limit for all the samples show that the lowest value for the sample with 5% lime is a 3.58% increase and the highest value for the sample with 8% cement is a 9.65% increase. Also, the changes in the dry density of compaction show that the lowest value of the sample with 7% cement is equal to a 22% decrease and the highest value of the sample with 7% slag is equal to a 6% increase. The changes in adhesion coefficient show that the lowest value of the sample with 5% cement is a 15.4% decrease and the highest value of the sample with 5% slag is a 450% increase. The changes in the internal friction angle show that the lowest value corresponding to the sample with 5% and 7% lime, 5% and 7% slag, and the highest value corresponding to the sample with 5% cement is equal to a 5.8% increase.

## **4. DISCUSSION AND CONCLUSION**

In general, the most important reactions of lime with soil can be divided into four categories: a) flocculation, b) carbonation, 3) ion exchange, and d) pozzolanic reactions and each of these changes can be Even in a short period observed in the soil. In the event of any of the presented reactions, changes can be observed in the optimum moisture content, specific weight, reduction in plasticity indices, and increase in unconfined compressive strength. The mixture of lime and clay with the cation exchange reaction of clay minerals and as a result, coagulation of its fine particles, provides suitable conditions by which the flocculated clay particles together cause the formation of larger particles. This process involves the hydration reaction of quicklime. After this initial rapid reaction, more permanent reactions begin, such as the pozzolanic reaction in which materials impregnated with cement are used, the best performance of the samples is expected in a longer time. Hydration reactions are effective at temperatures above 20 degrees Celsius, at higher stages this reaction causes an increase in resistance through the formation of hydrated calcium silicate and hydrated calcium aluminate silicate from hydration and pozzolanic reactions. The formation of these compounds increases resistance. Considering that the soil of the study area is gypsum, therefore, among the mechanical parameters of the soil, the coefficient of adhesion can be considered as the most important parameter. Therefore, based on the above explanation and based on the results obtained, mineral slag is added to the soil of the study area. It can be a suitable solution to solve the mentioned soil problem.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

The authors of the article express their gratitude to Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology and Khuzestan Water and Power Organization for their financial and spiritual support of this research.



مقاله پژوهشی

Available Online: <http://jmst.kmsu.ac.ir>



## بررسی آزمایشگاهی استفاده از افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی بر خصوصیات مکانیکی خاک (مطالعه موردی شهرستان رامهرمز)

مرتضی بختیاری<sup>۱\*</sup>، مجید حیدری<sup>۲</sup>، جواد ظهیری<sup>۳</sup>

۱. گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.
۲. پژوهشکده علوم دریایی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، باوی، ایران.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: [bakhtiari@kmsu.ac.ir](mailto:bakhtiari@kmsu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

### چکیده

در طراحی و احداث سازه‌ها به‌ویژه سازه‌های آبی و در تماس با هر یک از خاک‌های مسئله‌دار ممکن است مسائل و مشکلات متعددی در حین ساخت و یا دوران بهره‌برداری حاصل شود که در نهایت منجر به تخریب موضعی و یا از بین رفتن کامل سازه گردد. کشور ایران از جمله کشورهایی است که بنا به شرایط ویژه اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و همچنین زمین‌شناسی خود، انواع خاک‌های مشکل‌آفرین در آن به وفور یافت می‌شود به طوری که وجود این دسته از خاک‌ها تاکنون منشاء بسیاری از تخریب‌ها و خسارت‌های ایجاد شده در انواع سازه‌ها به ویژه سازه‌های آبی در کشور بوده است. در تحقیق حاضر هدف استفاده از افزودنی‌هایی به خاک جهت تثبیت آن می‌باشد. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر آزمایش‌هایی بر روی خاک‌های محل احداث کانال‌های رامهرمز در سه بخش شناسایی نوع کانی و ریخت‌شناسی نمونه‌های مورد آزمایش، بررسی تأثیر مواد افزودنی‌های مختلف بر روی خصوصیات مکانیک خاک نمونه‌ها انجام پذیرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد تغییرات حد خمیری برای کلیه نمونه‌های مربوط نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ آهک برابر ۳/۵۸ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۹/۶۵ افزایش می‌باشد. تغییرات زاویه اصطحکاک داخلی برای کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۰/۱٪ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۲۴/۹٪ افزایش می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** خاک‌های مسئله‌دار، تثبیت، انحلال پذیری، کانی‌شناسی، حد خمیری

### ۱. مقدمه

محدودیت فضا با مشکلات دیگری نظیر خصوصیات ژئوتکنیکی ضعیف نظیر خاک نرم، ریزشی و ... خصوصاً در زمین‌های استحصال شده (طبیعی یا مصنوعی) از دریا روبرو شده است (Ajami et al., 2014).

یکی از متداول‌ترین راه‌های استحصال اراضی روش تثبیت است. این روش در بیشتر موارد در پروژه‌های راهسازی به منظور اصلاح خاک نرم و کم مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک و مصالح شنی، ایجاد لایه‌های اساس و زیر اساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود و کاهش گردوخاک و یا کاهش رطوبت مورد استفاده قرار گرفته

افزایش روز افزون جمعیت، پیشرفت تکنولوژی، توسعه و تحول شبکه ترانزیت و حمل و نقل کالا در دهه‌های اخیر نرخ تقاضا برای در اختیار گرفتن زمین‌های مناسب به منظور تسهیل، تسریع و گسترش هرچه بیشتر فعالیت‌های بشری را افزایش داده است. در این میان عرصه‌های ساحلی به دلایل متعددی چون تنوع اقلیمی، دسترسی‌ها و کاربری‌های قابل تعریف چندگانه و دیگر عوامل (سهولت و حجم حمل و نقل کالا، گردشگری، اقتصادی و ...) مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، بشر در استفاده و ساخت و ساز در زمینه‌های ساحلی علاوه بر

شده از سیمان و آلومینات و سیلیکات‌های خاک رس رخ داده که باعث کاهش حد روانی، دامنه خمیری و تورم شده و مقاومت را افزایش می‌دهد. سیمان دارای مواد پوزولانی بوده و در کنار آب تبدیل به ماده چسباننده‌ای شده و دانه‌های خاک را به همدیگر پیوند می‌دهد. سنتونی و همکاران به منظور بررسی تأثیر محدوده وسیعی از تثبیت‌کننده‌ها روی ویژگی‌های یک خاک ماسه لای‌دار از ۳ تثبیت‌کننده متعارف شامل آهک، سیمان و قیر امولسیون و ۱۳ تثبیت‌کننده نامتعارف از قبیل صمغ، سولفونیت، آنزیم، پلیمر امولسیون‌های نفتی و ترکیبات چسبی درختی استفاده نمودند (Santoni et al., 2005; Santoni et al., 2002). نتایج نشان دادند که همه این مواد دارای اثر مثبت روی مقاومت ۲۸ روزه خاک بوده ولی آثار آن‌ها متفاوت است (Taherkhani, 2016). تحقیقات انجام شده بر روی تثبیت خاک با آهک نشان می‌دهد که افزایش ۲ تا ۸٪ آهک باعث کاهش حد روانی، شاخص خمیری، حداکثر وزن مخصوص خشک و تورم شده و رطوبت بهینه تراکم خاک و مقاومت را افزایش می‌دهد. اثر آهک را بر روی خصوصیات تراکمی و مقاومتی سه نوع کانی رسی شامل کائولینیت، مونت موریلونیت و کوآرتز بررسی کرد. نتایج او نشان دهنده اثر آهک در کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و افزایش رطوبت بهینه، نسبت باربری کالیفرنیا و مدول الاستیسیته هر سه نوع خاک رس است. ترکیب خاکستر بادی و آهک نیز برای تثبیت خاک‌هایی با رس کم و بافت درشت‌تر اثر مناسبی را خواهد داشت (Taherkhani and Salami, 2013). پژوهشگران مختلف از جمله Estabragh et al. (2010) با انجام آزمایش‌های مختلف دریافته‌اند که افزودنی‌های شیمیایی مانند سیمان، آهنگ، چسب اپوکسی، CBRPLUS و اکریلیک رزین به خاک رس موجب افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش پتانسیل تورمی و بهبود خواص مکانیکی آن خصوصاً مقاومت می‌گردد (Ghassemi et al., 2016). آهک راه مقرون به صرفه تثبیت خاک را فراهم می‌کند. اصلاح با آهک افزایش مقاومت ایجاد شده توسط ظرفیت تبادل کاتیونی به جای اثر پیوستن ایجاد شده توسط واکنش پوزولانی را شرح می‌دهد. خاک‌های رسی خشک‌تر و به تغییرات آب کمتر حساس می‌شوند. تثبیت با آهک ممکن است به واکنش پوزولانی که در آن مواد پوزولان با آهک در حضور آب برای تولید ترکیبات سیمانی واکنش نشان می‌دهند، منتسب شود (Sherwood, 1993). اثر تثبیت می‌تواند توسط آهک زنده CaO یا آهک هیدراته  $\text{Ca(OH)}_2$  ایجاد شود. آهک دوغاب همچنین می‌تواند در شرایط خاک‌های خشک که در آن آب ممکن است برای رسیدن به تراکم موثر لازم باشد، استفاده شود. آهک زنده رایج‌ترین آهک مورد استفاده می‌باشد؛ موارد زیر از مزایای استفاده از آهک زنده نسبت به آهک هیدراته است

خاکستر بادی خاکستر ته کوره خاکستر پوسته برنج و سرباره کوره آهن‌گدازی از جمله این پسماندها هستند به تنهایی و یا در ترکیب با ماده فعال کننده‌ای مانند سیمان و آهک در حضور آب

است. انتخاب نوع ماده تثبیت‌کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان آمدوشد، هدف از انجام تثبیت خاک و هزینه عملیات بستگی دارد. با توجه به این موارد، انجام آزمایش‌ها و بررسی‌های دقیق خاک منطقه مورد نظر ضروری می‌باشد. در بسیاری از موارد انتخاب نادرست روش تثبیت نتایج نامناسب و افزایش هزینه‌های بلندمدت روسازی را در بر داشته است (Moghadassnejad, and Modarres, 2010). تثبیت خاک‌ها به طرق گوناگون نظیر روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیک (روبانند گیاه) و... امکان‌پذیر است. برخی از خاک‌ها به علت مشخصات فنی نامطلوب نیازمند اعمال مراحل بهبود و تثبیت هستند. راه‌حل متعارف برای حل این مشکل، جایگزین خاک سست با خاک مناسب از محل قرضه است. این عمل طبیعتاً بسیار هزینه‌بر است و تابع شرایط محیطی می‌باشد. پیش‌بارگذاری ساده و بار زنده اضافی به عنوان یک راه حل جایگزین برای کاهش نشست‌های بعد از ساخت مطرح هستند (Nikookar, 2013). مقاومت خاک را در دو مقیاس کوچک و بزرگ می‌توان بهبود داد. در مقیاس‌های کوچک مقاومت را باید از طریق ایجاد عاملی برای پیوند بین ذرات بالابرد این روش‌ها تحت عنوان تثبیت خاک معرفی می‌شوند. در مقیاس بزرگ با استفاده از لوازم و تجهیزاتی باید پیوند بین ذرات را استحکام بخشید که غالباً به این روش مسلح‌سازی خاک گفته می‌شود. از جمله روش‌های دیگر که برای بالابردن مقاومت می‌توان استفاده کرد ترکیب دو روش تثبیت و تسلیح می‌باشد (Naderi et al., 2011). از نظر اثرگذاری بر خاک تثبیت‌کننده‌های متعارف و نامتعارف به دو دسته تقسیم می‌شوند که یک گروه از آن‌ها با کانی‌های خاک واکنش شیمیایی نشان داده و باعث تغییر در ساختار، و گروه دیگر بدون واکنش با ذرات خاک باعث چسبیدن آن‌ها همدیگر می‌شوند. مواد افزودنی استفاده شده باعث افزایش مقاومت تغییر در ویژگی‌های تراکم و حساسیت به رطوبت می‌شود. پژوهش‌های انجام شده روی تثبیت خاک با آهک عموماً نشان می‌دهند که افزایش ۲ تا ۸ درصد آهک باعث کاهش حد روانی، شاخص خمیری، حداکثر وزن مخصوص خشک و تورم شده و رطوبت بهینه تراکم خاک و مقاومت را افزایش می‌دهد. بل در تحقیق خود اثر آهک را روی خصوصیات تراکمی و مقاومتی سه نوع کانی رسی شامل کائولینیت، مونت موریلونیت و کوآرتز بررسی نمود. نتایج او نشان دهنده اثر آهک در کاهش بیشینه وزن مخصوص خشک و افزایش رطوبت بهینه نسبت باربری کالیفرنیا و مدول الاستیسیته هر سه نوع خاک رس بوده است. همچنین بهبود مقاومت به مقدار زیاد متأثر از زمان و دما عمل‌آوری است. برخی از خاک‌ها با آهک واکنش نشان نمی‌دهند که به دلیل فقدان سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها در خاک است. در این موارد می‌توان از ترکیب آهک با یک یا چند ماده پوزولانی مثل خاکستر بادی و یا میکروسیلیس استفاده نمود (Mishra, 2012). در خاک‌های ریزدانه رسی یک واکنش پوزولانی بین هیدروکسید کلسیم آزاد

استفاده از مواد زائد مانند خاکستر پوسته برنج از جمله روش های مقرون به صرفه اقتصادی و پایدار جهت تثبیت خاک می باشد که در تحقیقات (Abhishek et al, 2024) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که ادغام تقریباً ۴-۱۲٪ از خاکستر پوسته برنج به طور قابل ملاحظه ای ویژگی های مهندسی کوتاه مدت و بلند مدت خاک را افزایش می دهد.

مروری بر تحقیقات داخلی و خارجی نشان می دهد که عمده تحقیقات صورت گرفته در خصوص تثبیت خاک دو کمبود اساسی داشته است؛ اول اینکه تحقیقات صورت گرفته تاکنون اکثراً بر روی سایر انواع خاک های مسئله دار بوده است و کمتر به خاک های انحلال پذیر پرداخته شده است، دوم اینکه در تحقیقات صورت گرفته به نوع کانی و ریخت شناسی نمونه های خاک مورد تحقیق کمتر پرداخته شده است. لذا در تحقیق حاضر تلاش شده است ضمن تحقیق در خصوص خاک های انحلال پذیر با درصد گچ بالا، انواع کانی های تشکیل دهنده خاک و ریخت شناسی نمونه در تهیه و انتخاب نوع افزودنی توجه گردد.

## ۲. مواد و روش ها

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق حاضر پس از مطالعه تحقیقات پیشین صورت گرفته، اقدام به نمونه برداری میدانی گردید. سپس با انتقال نمونه های تهیه شده به آزمایشگاه مطالعات آزمایشگاهی مربوطه صورت پذیرفت.

پس از تکمیل بانک اطلاعاتی مورد نیاز، در مرحله دوم، پژوهش وارد باب تازه ای مشتمل بر انجام پایش های میدانی جهت انجام نمونه برداری در محدوده کانال های آبیاری رامهرمز و دشت آزادگان گردید. نکته مهم در این مورد اینکه، در انجام نمونه برداری بدین مهم توجه گردید که بانک نمونه کاملی جهت انجام مطالعات مختلف نظیر بررسی های زمین شیمی، کانی شناسی، ریخت شناسی و... تهیه گردد. افزون بر این، یادآوری این نکته نیز ضروری است که نمونه ها جهت بررسی شاخص های فیزیکوشیمیایی و سایر شاخصه ها، از خاک های این مناطق صورت پذیرفت. با توجه به گستردگی مباحث مدنظر در انجام پژوهش کنونی، نمونه برداری باید به منظور بررسی های ریخت شناسی - کانی شناسی و پایش های فیزیکوشیمیایی - دانه بندی انجام پذیرفت.

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در سه بخش کانی شناسی نمونه ها با دستگاه XRD، ریخت شناسی نمونه ها با دستگاه SEM؛ بررسی دانه بندی نمونه ها با روش LPSA انجام پذیرفت. مهم ترین روش های آنالیزی مدنظر در این رابطه عبارتند از:

پراش (تفریق) اشعه ای ایکس روشی برای مطالعه ساختار مواد بلوری است که در سال ۱۹۱۲ میلادی توسط فون لاهو کشف شد و توسط ویلیام هنری براگ و ویلیام لورنس براگ برای بررسی بلورها به کار گرفته شد. امروزه از این روش به طور گسترده برای تعیین کانی شناسی همه ی فازهای موجود در نمونه ی مورد

می توانند به وجود آمدن واکنش های پوزولانی و در نتیجه افزایش مقاومت در خواب شود سیلیکات کلسیم و هیدرو آلومینات کلسیم محصول این واکنش ها هستند که بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک می شود (Kalkan, 2009).

امروزه میکروسیلیس به عنوان ماده ای نوین در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مدل آن بسیار قوی است که به عنوان محصول جانبی در کارخانه های آلیاژ فروسیلیسیم تولید می شود. دهه هفتاد میلادی به صورت غبار وارد اتمسفر می شد. میکروسیلیس ماده ای سرطان زاست و برای سلامت انسان و محیط زیست بسیار خطرناک است و از این رو از اوایل دهه هفتاد میلادی کارخانه های تولیدکننده مرسوم به جمع آوری و دفن آن شده اند. استفاده از روباره کوره سیمان (CKD) در بهبود خصوصیات مخلوط شن و ماسه ضعیف در حالت استفاده از آب شور، نشان می دهد که خصوصیات مکانیکی خاک مورد مطالعه در نسبت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد روباره کوره سیمان جهت استفاده از در راه سازی بسیار موثر بوده است (Latifi et al., 2017).

استفاده از آهک به منظور کاهش شکاف ترک های در دیوارهای خاکی نشان می دهد افزودن حدود ۲۰ درصد آهک به خاک میزان ترک ۹۷/۱۳ درصد، درصد چسبندگی ۲۰/۲۷ درصد و زاویه اصطکاک داخلی ۱۱/۲۷ درصد کاهش یافته است (Yue et al., 2022).

اثر خاکستر چوب (WA) بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس نشان می دهد برای نسبت های مختلف خاکستر چوب (۰، ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲ درصد) شاخص پلاستیسیته، انقباض خطی، وزن مخصوص، تورم آزاد، شاخص تراکم و هدایت هیدرولیکی با افزایش محتوای خاکستر چوب تا ۳۲ درصد افزایش یافته است (Blayi et al., 2024).

مواد نانو نوع جدیدی از افزودنی هستند که می توانند عملکرد خاک را افزایش دهند. آزمایشات آزمایشگاهی برای بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک رس مخلوط با نانو خاکستر بادی انجام گرفته است. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، اشعه ایکس (XRF) و پراش پودر اشعه ایکس (XRD) برای تجزیه و تحلیل ماهیت و تغییرات ذرات قبل و بعد از فرآیند آسیاب استفاده گردید. همچنین تأثیر زمان و دوزهای مختلف نانو خاکستر بادی (۳، ۵ و ۷ درصد) بر رفتار پخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که مقدار بهینه نانو خاکستر بادی و خاکستر بادی اضافه شده به خاک ۷ درصد وزنی خاک پس از ۲۸ روز بود. این امر استحکام فشاری نامحدود خاک رس را از ۵۰ کیلو پاسکال به ۴۱۰ کیلو پاسکال (۸،۲ برابر) و مقاومت سه محوری خاک رس را از ۶۵، ۸۰ و ۹۰ کیلو پاسکال به ترتیب به ۶۴۰، ۵۲۰ و ۷۲۰ کیلو پاسکال (۸ برابر) افزایش داد (Zeynali et al., 2023).

۲- آزمایش تحکیم بر اساس استاندارد ASTM D2435 جهت حصول به نتایج ضریب تحکیم و شاخص پوکی به هنگام بارگذاری و باربرداری ۱۰۰ درصد کوبیده شده در قالب مربوطه بر اساس نتایج تراکم اصلاح شده.

۳- آزمایش تک محوری خاک بر اساس استاندارد ASTM D1266 جهت حصول به نتایج مقاومت فشاری ۱۰۰ درصد کوبیده شده در قالب مربوطه بر اساس نتایج تراکم اصلاح شده.

۴- آزمایش سه محوری UU (اشباع نشده و تحکیم نیافته) بر اساس استاندارد ASTM D2850 جهت حصول به نتایج چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ناشی از مقاومت برشی خاک با اعمال فشار جانبی توسط مایع آب در سلول سه محوری خاک و ۱۰۰ درصد کوبیده شده در قالب مربوطه بر اساس نتایج تراکم اصلاح شده.

به منظور تعیین نوع و ضخامت لایه‌های خاک، حفاری گمانه‌ها به روش دستی انجام شد. با توجه به نوع خاک، نمونه‌گیری به صورت دست خورده بوده و در حین عملیات حفاری به منظور دستیابی دانسیته طبیعی خاک محل و درصد رطوبت آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل به روش مخروط ماسه‌ای مطابق استاندارد ASTM D1556 و از لحاظ رسیدن به سطح آب زیرزمینی در زمان نمونه‌برداری مورد بررسی قرار گرفت.

جهت تهیه نمونه‌ها با ترکیبات متفاوت ابتدا حجم کل نمونه مورد نیاز، که بستگی به حجم قالب‌های ریمولد نمونه و تعداد نمونه‌ی مورد نیاز دارد، حساب شد. پس از مشخص شدن حجم کل نمونه‌ها، لازم است بر اساس درصد وزنی که جهت لیاف پروپیلن و درصد‌های حجمی که جهت سیمان - آهک - پودر میکروسیلیس مد نظر است؛ به نمونه خشک اضافه گردد. جهت تراکم اصلاح شده به دلیل اینکه خاک ریز دانه بود، سیلندر ۴ اینچ با مقدار نمونه خشک ۴۰۰ گرم مورد نیاز بود.

نکته حائز اهمیت این است که به هنگام اختلاط سیمان و خاک به علت اینکه گیرش سیمان در مدت یک تا ۲ ساعت حاصل می‌شود، خاک را به سمت خاک با چسبندگی کم سوق می‌دهد. بنابراین لازم است طی مدت زمان مذکور آزمایش تراکم صورت پذیرد و به هنگام انجام آزمایشات دیگر من جمله تحکیم- تک محوری- سه محوری به مقدار لازم به نمونه‌ی حاوی سیمان که رطوبت زده شده است، استفاده گردد.

به هنگام اعمال رطوبت به نمونه‌های مذکور لازم است از نایلون پلاستیکی ضخیم استفاده شود و ابتدا نمونه خشک در نایلون ریخته شده سپس رطوبت تدریجاً اعمال گردد.

مطالعه استفاده می‌شود. اساس این روش بر مبنای خصوصیات طیف نگاری اشعه ی X استوار هست. بدین صورت، به این دلیل که ناحیه‌ی پرتو X در طیف الکترومغناطیس در محدوده ی بین پرتو  $\gamma$  و پرتو فرابنفش قرار دارد، لذا با استفاده از این ناحیه ی طیفی، می‌توان اطلاعاتی در خصوص ساختار، جنس ماده و نیز تعیین مقادیر عناصر به‌دست آورد (Braun, 1987). در این راستا، اگر یک دسته الکترون سریع و پر انرژی به یک هدف فلزی در یک لوله‌ی تخلیه برخورد کند، الکترون‌ها در این برخورد سرعت خود را از دست داده و قسمتی از انرژی جنبشی آن‌ها به پرتو تبدیل می‌گردد.

یکی از روش‌های مرسوم و بسیار متداول در تعیین اندازه ذرات خاک علاوه بر استفاده از فیلترهای گوناگون استفاده از روش SEM است. اندازه ذرات در نمونه‌های برداشته شده بسیار متنوع است و اطلاع از درصد واقعی و نسبت‌های مختلف این ذرات به یکدیگر می‌تواند راهگشای بسیاری از مباحث علمی مربوط به این موضوع شود. لذا نمونه‌هایی از اندازه‌های گوناگون TSP جهت بررسی وضعیت مورفولوژیکی شامل، شکل، اندازه و نحوه تجمع ذرات در آزمایشگاه توسط دستگاه SEM مورد بررسی قرار گرفتند و تصاویر متنوعی با ذکر بزرگ‌نمایی، اندازه و قطر ذرات بر روی تصویر تهیه گردید. به منظور نمونه‌برداری‌های تحقیق حاضر، از منطقه راه‌مرز واقع در استان خوزستان که دارای خاک‌های گچی بوده و محل اجرای سازه‌های مختلف انتقال آب می‌باشد داده‌برداری به عمل آمد. در این تحقیق حفر گمانه دستی از عمق ۳۰- (منه‌ای ۳۰ سانتی متر) از تراز مبنا تا عمق ۶۰- (منه‌ای ۶۰ سانتی متر) انجام پذیرفته و اطلاعات مربوط به وضعیت لایه خاک در نمونه‌برداری از گمانه‌های مذکور با انجام آزمایشات لازم انجام شده است (شکل ۱).

از ترکیب خاک که از مکان‌های یاد شده نمونه‌برداری شده است با ۳ نوع مواد ترکیبی جامد شامل:

الف- ترکیب خاک با سیمان تیپ ۲ با ترکیب ۲ و ۵ درصد و ۷ درصد به صورت حجمی.

ب- ترکیب خاک با آهک شکفته با ترکیب ۵ درصد و ۷ درصد به صورت حجمی.

ج- ترکیب خاک با سرباره با ۳ با ترکیب ۵ درصد و ۷ درصد به صورت حجمی

که جمعاً با نمونه اصلی تهیه شده تعداد ۲۰۰ نمونه آزمایشات زیر انجام گرفته است:

۱- آزمایش تراکم اصلاح شده (تراکم سنگین) بر اساس استاندارد ASTM D 1557 جهت حصول به نتایج حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه (شکل های ۲ و ۳).



شکل ۱- نمونه برداری از منطقه مورد مطالعه

**Fig. 1- Sampling of the study area**



شکل ۲- انتقال نمونه ها به آزمایشگاه

**Fig. 2- Transferring samples to the laboratory**



شکل ۳- انجام آزمایش تراکم

**Fig. 3- Perform of compression test**

نمونه‌گیری ریخته و برای آماده‌سازی و انجام آزمایش به آزمایشگاه‌های کاوش تراز نیرو و مرکز خدمات تخصصی شیمی پژوهشکده تولید جهاد دانشگاهی خوزستان منتقل گردید. بعد از انجام آزمایشات زمین‌شناسی و مشخص شدن بافت، نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده خاک منطقه و مشابهت آن‌ها و همچنین هزینه بالای انجام آزمایشات تصمیم گرفته شد که آزمایشات مربوط به پارامترهای مهندسی و تعیین مقاومت برشی و فشاری بر روی کلیه نمونه‌ها انجام گردد. بعد از مشخص شدن محل نمونه‌گیری و حاضر شدن در محل، در مرحله نخست محلی را به ابعاد ۱ متر در ۱ متر مشخص و تا عمق ۳۰ سانتی متری خاک آن را برداشته در مرحله دوم بعد از صاف کردن سطح برداشت شده به جهت مشخص شدن وزن مخصوص خاک در محل آزمایش تعیین دانسیته در محل انجام گردید و در مرحله سوم به جهت انجام آزمایشات مربوطه از عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی متری نمونه‌گیری انجام گردید و روی هر نمونه محل نمونه‌گیری، شماره گمانه و عمق گمانه قید می‌گردد.

پس از اعمال رطوبت بهینه در آزمایشات، از اطراف نمونه که با نایلون احاطه شده است خاک کاملاً ورز داده شود تا از پرت رطوبت جلوگیری شود. پس از اعمال رطوبت در جای خنک به مدت ۲۴ ساعت استفاده شود؛ به جز نمونه حاوی سیمان که در فرجه زمانی حداکثر ۲ ساعت استفاده گردند.

لازم به ذکر است که نتایج حاصل از تک محوری خاک با آهک و سیمان و سرباره پس از اعمال رطوبت در نایلون پلاستیکی ضخیم جهت نفوذ یکنواخت رطوبت پس از مدت ۲۴ ساعت انجام پذیرفت و در ترکیب سیمان با خاک و اعمال رطوبت آزمایشات مورد نظر پس از مدت ۲۸ روز انجام گرفته است. بعد از مشخص شدن محل نمونه‌گیری و با توجه به نامناسب بودن خاک سطحی از عمق‌های ۳۰ سانتی متری و ۶۰ سانتی متری هر کدام یک نمونه به وزن حدوداً ۵ تا ۷ کیلوگرم درون یک کیسه پلاستیکی که روی آن شماره گمانه و عمق گمانه قید شده ریخته شد. این عمل برای هر ۱۰ نقطه موردنظر انجام گردید و نمونه‌های برداشت شده را در نایلون‌های دارای برچسب محل



شکل ۴- فرایند عصاره‌گیری پس از ۴۰ دقیقه اشباع

Fig. 4- Extraction process after 40 minutes of saturation



شکل ۵- انجام فرایند عصاره‌گیری

Fig. 5- Perform of extraction process



شکل ۶- انجام آزمایش‌های آنالیز تعیین یون‌های محلول

Fig. 6- Perform of analysis tests to determine dissolved ions

۲۰۰۰ قرار داده و سپس محلول روی آن را تخلیه کرده و روی رسوب ته‌نشین شده در لوله آزمایش ۴۰ سی‌سی آب مقطر اضافه می‌شود و به‌وسیله میله شیشه‌ای به مدت یک تا دو دقیقه به هم زده شده تا رسوب کاملاً در آب حل شود در پایان محلول قرائت می‌گردد و در رابطه (۱) قرار داده می‌شود. در رابطه (۱)  $EC(1)$  بر حسب میلی‌موس محاسبه می‌گردد.  $EC$  آب مقطر مورد استفاده را گرفته از  $EC$  به‌دست آمده از نمونه کم و سپس در فرمول قرار داده می‌شود.

$$\text{درصد گچ} = \left( \frac{EC \cdot 20 \cdot 12.5 \cdot 0.0861}{1000} \right)$$

ترکیبات کانیایی آلپیت و موسکوویت-اِلیت نیز در ۹۰٪ نمونه‌های مورد آزمایش به عنوان فاز کانیایی اصلی قابل مشاهده هستند.

در شکل (۷) فراونی وقوع کانی‌شناسی فازهای اصلی، فرعی و کمیاب در رامهرمز نشان داده شده است.

به منظور تعیین درصد گچ در نمونه خاک به صورت زیر عمل می‌شود: ابتدا خاک مورد آزمایش در هوای آزاد آزمایشگاه خشک می‌گردد. به‌وسیله کوبیدن و مخلوط کردن خاک را به حالت همگن و یکنواخت در آورده در مرحله بعدی نمونه را از الک شماره ۱۰ عبور داده و یک گرم از آن را در ارلن ۲۵۰ سی‌سی ریخته و ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر به آن اضافه می‌گردد و به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه همزن گذاشته و آن به هم زده می‌شود، سپس نمونه را از کاغذ صافی عبور داده و ۲۰ سی‌سی از نمونه به دست آمده را در لوله آزمایش ریخته و ۲۰ سی‌سی استن خالص به آن اضافه و به هم زده بعد آن را در دستگاه سانتریفیوژ به مدت ۵ دقیقه با دور رابطه (۱)

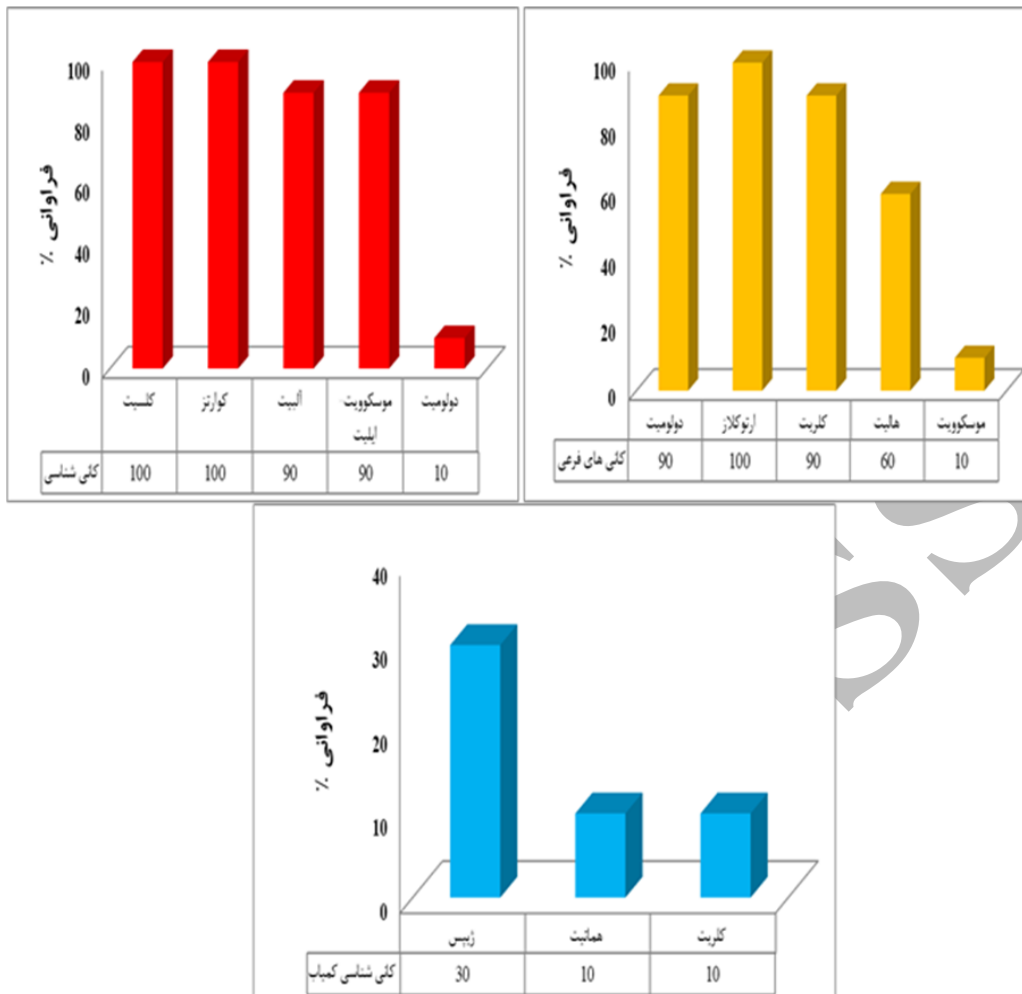
### ۳. نتایج

نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی نمونه‌های برداشتی در جدول (۱) آورده شده است. داده‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که کانی‌های نظیر کلسیت و کوارتز در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش به عنوان اجزا کانیایی اصلی حضور دارند. افزون بر این

جدول ۱- کانی‌شناسی نمونه‌های برداشت شده

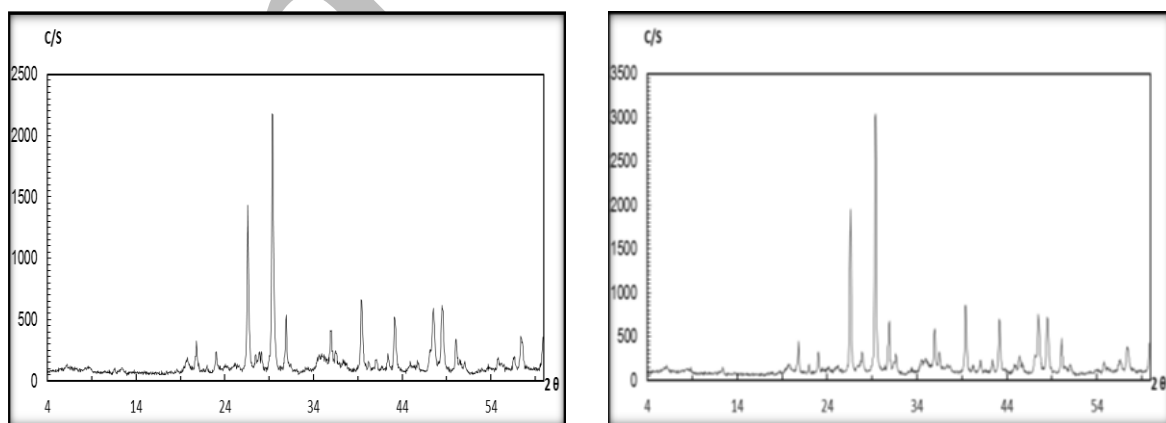
Table 1- Mineralogy of the collected samples

Trace Phase(s)	Minor Phase(s)	Major Phase(s)
Gypsum	Dolomite, Chlorite, Orthoclase	Calcite, Quartz, Albite, Muscovite, Illite
Gypsum & Hematite	Dolomite, Chlorite, Orthoclase	Calcite, Quartz, Albite, Muscovite, Illite
Gypsum	Dolomite, Chlorite, Orthoclase, Halite	Calcite, Quartz, Albite, Muscovite, Illite
Gypsum	Albite, Dolomite, Chlorite, Orthoclase	Calcite, Quartz, Muscovite, Illite



شکل ۷- کانی شناسی نمونه‌های برداشت شده

Fig. 7- Mineralogy of the collected samples



شکل ۸- الگوی پراش پرتو ایکس با فرآوانی بالای کانی های کلسیت و کوارتز

Fig. 8- X-ray diffraction pattern with high frequency of quartz and calcite minerals

در جدول (۴) تغییرات ضریب چسبندگی برای کلیه نمونه‌های مربوط به رامهرمز (شامل نمونه اصلی و نمونه به‌همراه موادافزودنی مختلف) آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش مواد افزودنی به نمونه اصلی ضریب چسبندگی برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با توجه به اینکه ضریب چسبندگی نمونه اصلی ۰/۰۷ می‌باشد کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۱۵/۴٪ کاهش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۵ درصد سرباره برابر ۴۵۰٪ افزایش می‌باشد.

در جدول (۵) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی برای کلیه نمونه‌های مربوط به رامهرمز (شامل نمونه اصلی و نمونه به‌همراه مواد افزودنی مختلف) آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش مواد افزودنی به نمونه اصلی زاویه اصطکاک داخلی برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی نمونه اصلی ۲۱ می‌باشد کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ و ۷٪ آهک، ۵٪ و ۷٪ سرباره و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۵/۸٪ افزایش می‌باشد.

در شکل (۸)، الگوی الگوی پراش پرتو ایکس با فراوانی بالای کانی‌های کلسیت و کوارتز نشان داده شده است.

در جدول (۲) تغییرات حد خمیری برای کلیه نمونه‌های مربوط به رامهرمز (شامل نمونه اصلی و نمونه به‌همراه موادافزودنی مختلف) آورده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش موادافزودنی به نمونه اصلی حد خمیری برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. و همچنین می‌توان مشاهده نمود که با توجه به اینکه حد خمیری نمونه اصلی کم می‌باشد کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ آهک برابر ۳/۵۸٪ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۸٪ سیمان برابر ۹/۶۵٪ افزایش می‌باشد.

در جدول (۳) تغییرات دانسیته خشک تراکم برای کلیه نمونه‌های مربوط به رامهرمز (شامل نمونه اصلی و نمونه به‌همراه موادافزودنی مختلف) آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش مواد افزودنی به نمونه اصلی دانسیته خشک تحکیم برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. و همچنین می‌توان مشاهده کرد که با توجه به اینکه دانسیته خشک تحکیم نمونه اصلی ۱/۷۱ می‌باشد کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۲۲٪ کاهش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سرباره برابر ۶٪ افزایش می‌باشد.

جدول ۲- درصد تغییرات حدود اتربرگ

Table 2 - percentage changes of Atterberg limits

Sample	Cement 5%	Cement 7%	Lime 5%	Lime 7%	Slag 5%	Slag 7%
Atterberg limits	6.55	9.65	3.58	4.97	8.04	8.56

جدول ۳ - درصد تغییرات دانسیته خشک تراکم

Table 3 - Percentage changes of compression dry density

Sample	%5 Cement	%7 Cement	%5 Lime	7%Lime	%5 Slag	%7 Slag
compression dry density	-18	-22	2	4	3	6

جدول ۴- درصد تغییرات ضریب چسبندگی

Table 4 - Percentage changes of cohesion coefficient

Sample	%5 Cement	%7 Cement	%5 Lime	7%Lime	%5 Slag	%7 Slag
cohesion coefficient	-15.4	58.2	424.9	388.7	313.3	259.1

جدول ۵- درصد تغییرات زاویه اصطکاک داخلی

Table 5- Percentage changes of internal friction angle

Sample	%5 Cement	%7 Cement	%5 Lime	7% Lime	%5 Slag	%7 Slag
Internal friction angle	5.8	0.1	24.9	-24.9	-24.8	-24.8

جدول ۶- درصد تغییرات مقاومت فشاری

Table 6- Percentage changes of compressive strength

Sample	%5 Cement	%7 Cement	%5 Lime	%7% Lime	%5 Slag	%7 Slag
compressive strength	80.5	98	109.9	130.5	95.2	101

پختن سنگ آهک به دست می‌آید و به دو حالت آهک زنده  $\text{CaO}$  و دوغاب آهک (آهک شکفته)  $(\text{Ca}[\text{OH}]_2)$  وجود دارد. در واقع مطابق واکنش زیر آهک زنده با آب باعث تولید آهک شکفته می‌شود.

این واکنش باعث تولید گرما (گرمازا) و بالا رفتن pH تا حدود ۱۲ می‌شود، که از جمله شرایط مناسب برای انجام واکنش‌های پوزولانی می‌باشند. واکنش‌های پوزولانی بین سیلیکا  $(\text{SiO}_2)$  و آلومینا  $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  در ساختار رس با آهک و آب منجر به تشکیل ژل‌های کلسیم-سیلیکا-هیدرات (C-S-H) و هیدرات کلسیم آلومینات (C-A-H) می‌شود. این ترکیبات در نهایت پس از تبلور مجدد بلوری شده و منجر به چسبندگی بیشتر ساختارها به یکدیگر و در نهایت افزایش مقاومت خاک تثبیت شده می‌شوند.

به طور کلی مهم‌ترین واکنش‌های آهک با خاک را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی نمود: الف) فولکوله شدن، ب) کربناته شدن، ج) تبادل یونی و د) واکنش‌های پوزولانی. هر کدام از این تغییرات را می‌توان حتی در مدت زمان کوتاهی در خاک مشاهده کرد. در صورت وقوع هر یک از واکنش‌های ارائه شده می‌تواند تغییراتی در مقدار رطوبت بهینه، وزن مخصوص، کاهش شاخص-های پلاستیسیته، افزایش مقاومت فشاری محصور نشده، مشاهده نمود، مخلوط آهک و رس با واکنش تبادل کاتیونی مواد معدنی خاک رس و در نتیجه لخته‌سازی ذرات ریز آن، شرایط مناسبی را مهیا می‌کند که به وسیله آن ذرات خاک رس فولکوله شده با هم باعث تشکیل ذرات بزرگ‌تر می‌شوند. این فرآیند شامل واکنش هیدراتاسیون آهک خام است. بعد از این واکنش سریع اولیه، واکنش‌های ماندگارتر آغاز می‌شود، مانند واکنش پوزولانی که در آن از مواد آغشته به سیمان استفاده می‌شود که بهترین عملکرد از نمونه‌های عمل آورده در زمان طولانی‌تر انتظار می‌رود. واکنش-های هیدراتاسیون در دمای بالاتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد مؤثر

در جدول (۶) تغییرات مقاومت فشاری برای کلیه نمونه‌های مربوط به رامهرمز (شامل نمونه اصلی و نمونه به‌همراه مواد افزودنی مختلف) آورده شده است. باتوجه به جدول مشاهده می‌گردد که با افزایش مواد افزودنی به نمونه اصلی مقاومت فشاری برای کلیه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با توجه به اینکه مقاومت فشاری نمونه اصلی ۳۴/است، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر با ۸۰/۵٪ افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ آهک است که برابر با ۱۳۰/۵٪ افزایش می‌باشد.

طبق بررسی‌های به عمل آمده برای نمونه‌های تحقیق حاضر، ذرات با کانی کربناتی دارای ضریب انحلال‌پذیری بیشتری نسبت به ذرات متشکل از کانی‌های سیلیکاته می‌باشند. همچنین مقدار این ضریب برای ذرات متشکل از کانی سیلیکاته بیشتر از ذرات با کانی رسی می‌باشد.

می‌دانیم که یکی از عوامل بسیار مهم در تعیین ضریب نفوذپذیری ذرات درشت دانه، عامل فاکتور شکل می‌باشد. با توجه به اینکه کانی‌های کربناته گروهی از کانی‌ها هستند که در آن‌ها، بنیان  $\text{CO}_3$ -2 وجود دارد. این بنیان به صورت مثلثی است که اکسیژن در گوشه‌ها و کربن در وسط آن قرار دارد. در ساختار کربنات‌ها، این مثلث‌ها به وسیله کاتیون‌ها در ارتباط می‌باشند.

بلورهای کانی‌های رسی به طور کلی به شکل شش وجهی-های پهن و نازک هستند. کوچک‌ترین واحد سازنده سیلیکات‌ها به شکل یک هرم چهار وجهی است که سطوح آن را مثلث‌های متساوی‌الاضلاع تشکیل می‌دهند. نحوه آرایش این چهار وجهی‌ها اساس تقسیم‌بندی سیلیکات‌ها هستند که باعث به‌وجود آمدن ساختمان‌های سیلیکاتی متفاوت در آن‌ها می‌شود.

بررسی نتایج به دست آمده نشان داده است که، افزودن آهک به خاک رس موجب افزایش مقاومت خاک شده است. آهک در اثر

تغییرات دانسیته خشک تراکم نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سیمان برابر ۲۲٪ کاهش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ سرباره برابر ۶٪ افزایش می‌باشد.

تغییرات ضریب چسبندگی نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۱۵/۴٪ کاهش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۵ درصد سرباره برابر ۴۵۰٪ افزایش می‌باشد.

تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ و ۷٪ آهک، ۵٪ و ۷٪ سرباره و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۵/۸٪ افزایش می‌باشد.

تغییرات مقاومت فشاری نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ سیمان برابر ۸۰/۵٪ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۷٪ آهک برابر ۱۳۰٪/۵٪ افزایش می‌باشد.

می‌باشند، در مراحل بالاتر این واکنش باعث افزایش مقاومت می‌شود که از طریق شکل‌گیری کلسیم سیلیکات هیدراته و کلسیم آلومینات سیلیکات هیدراته از واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی می‌باشد، که شکل‌گیری این ترکیبات باعث افزایش مقاومت می‌شود.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

تغییرات حد خمیری برای کلیه نمونه‌های نشان می‌دهد، کمترین مقدار مربوط به نمونه با ۵٪ آهک برابر ۳/۵۸٪ افزایش و بیشترین مقدار مربوط به نمونه با ۸٪ سیمان برابر ۹/۶۵٪ افزایش می‌باشد.

### References

- Abhishek, A., Guharay, A., Raghuram, A. S. and Hata, T., 2024. A State-of-the-Art Review on Suitability of Rice Husk Ash as a Sustainable Additive for Geotechnical Applications. *Indian Geotechnical Journal*, 54, pp.910-944. DOI: 10.1007/s40098-024-00905-w
- Ajami, M., Jabari Khamene, A., Ataei, S. and Khakpour, A. M., 2014. the application of the method of land extraction from the sea by embankment method and its improvement using the dynamic compaction method, *International Conference on Civil Architecture and Urban Planning at the beginning of the third millennium, Tehran*. (In Persian).
- Blayi, R. A., Omer, B., Sherwani, A. F., Hamadamin, R. M. and Muhammed, H. K., 2024. Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, p. 100726. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100726
- Braun, R. D., 1987. *Introduction to Instrumental Analysis*. McGraw-Hill, New York.
- Estabragh, A. R., Beytolahpour, I. and Javadi, A. A., 2010. Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), pp.969-976. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000252](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000252)
- Ghassemi, A., Soltani, A., Raeesi, A. and Omid, M.H., 2016. Statistical and experimental assessment of a clayey soil treated by chemical stabilization. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(1); pp. 119-128.
- <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.57984>. (In Persian).
- Kalkan, E., 2009. Effect of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), pp. 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.011>
- Latifi, N., Eisazadeh, A., Marto, A. and Meehan, C. L., 2017. Tropical residual soil stabilization: A powder form material for increasing soil strength. *Construction and Building Materials*, 147, pp. 827-836. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.115
- Mishra, E. N. K., 2012. Stength characteristics of clays subgrade soil stabilization with fly-ash and lime for roadworks. *Indian Geotechnical Journal*, 4(7), pp. 206-211. DOI: 10.1007/s40098-012-0015-5
- Moghadasnejad, F. and Modarres, A., 2010. Soil Stabilization with Waterproof Cement for Road Applications. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 42(1), pp. 55-63. (In Persian).doi: 10.22060/ceej.2010.155
- Naderi, S. M. B., Bazyar, M. H. and Roshan-Zamir, M. A., 2011. Investigating polymer fibers and adhesives on the mechanical properties of soil. *6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran*. (In Persian)
- Nikookar, M., 2013. Properties of vegetable soils and methods of its stabilization. *7th National Congress on Civil Engineering, Sistan O Baluchestan-Zahedan, Iran*. (In Persian)

- Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Webster, S. L., 2002. Stabilization of silty sand with nontraditional additives. *Transportation research record*, 1787(1), pp.61-70. <https://doi.org/10.3141/1787-07>.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S. and Nieves, M., 2005. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives. *Transportation research record*, 1936(1), pp.34-42. <https://doi.org/10.1177/0361198105193600105>
- Sherwood, P., 1993. *Soil Stabilization with Cement and Lime*. Her Majesty Stationary Office.
- Taherkhani, H. and Salami, H., 2013. Comparison of Lime, Cement and CBR PLUS Additives for Stabilizing Clay Soil. *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 5(2), pp. 263-274. Dor: 20.1001.1.20086598.1392 .5.2.8.8. (In Persian).
- Taherkhani, H., 2016. Investigation and Comparison of COMPRESSIVE Strength of clay soils Stabilized by CEMENT, LIME and CBR PLUS. *Modares Civil Engineering journal*, 16 (4), pp.161-174. URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-10431-fa.html> . (In Persian)
- Yue, J., Su, H., Song, X., Xu, X., Zhao, L., Zhao, G., Li, P. and Chen, Y., 2022. Experimental Study on the Cracking and Mechanical Properties of Lime Soil with Different Slaking Conditions of Newly Repaired Earthen City Walls. *Materials*, 15(12), p. 4151. doi: 10.3390/ma1512 4151.
- Zeynali, Y., Niroumand, H. and Ziaie Moayed, R., 2023. Stabilizing cohesive soils with Micro- and Nano- fly ash as Eco-friendly Materials: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 399, p. 132490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132490>