Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Evaluation of cement performance in stabilizing saline soils from the Urmia lake basin

Solmaz Darsanj[1], Mehrdad Emami Tabrizi[2]✉, Hassan Afshin[3]

1. Ph.D. Student, Civil Engineering Faculty, Sahand Earthquake Research Center (SERC), Sahand University of Technology (SUT), Tabriz, East. Azerbaijan, Iran. E-mail: s_darsanj@sut.ac.ir
2. Associate Professor, Civil Engineering Faculty, Sahand Earthquake Research Center (SERC), Sahand University of Technology (SUT), Tabriz, East. Azerbaijan, Iran. E-mail: m.emami@sut.ac.ir, Corresponding author
3. Professor, Civil Engineering Faculty, Sahand Earthquake Research Center (SERC), Sahand University of Technology (SUT), Tabriz, East. Azerbaijan, Iran. E-mail: hafshin@sut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 July 2025
Accepted 7 December 2025

Keywords:
Lake Urmia, aeolian sand, stabilization, cement, salt.

ABSTRACT

Aeolian sands in arid and semi-arid regions are considered problematic due to their loose structure, low bearing capacity and difficulty in compacting them. Iran's dry climate and phenomena such as the desiccation of Lake Urmia have exacerbated the dispersion of saline sands. One common approach to mitigating these issues is chemical stabilization using additives such as cement. This study investigates the effect of stabilizing saline aeolian sands collected from the Lake Urmia basin using Type I Portland cement. Stabilized soil specimens with varying levels of salinity and cement content were prepared and subjected to unconfined compressive strength testing after a 7-day curing period. The results showed that increasing the cement content significantly improves compressive strength. Furthermore, the presence of salt in the soil samples did not hinder the stabilization process, but instead contributed to improved strength in the short term. These findings highlight the importance of considering the type and concentration of salts when designing stabilization treatments for saline granular soils in arid and semi-arid climates.

Introduction

Aeolian sands are problematic soils that are commonly found in arid and semi-arid regions. They are problematic due to their loose structure, low bearing capacity and difficulty in compaction. In Iran, the desiccation of Lake Urmia and the widespread arid conditions have accelerated the spread of saline sands and dust storms, creating environmental and geotechnical challenges. One common approach to improving such soils is to use chemical additives that create bonds between soil particles, transforming the loose material into hard soil or weak rock. However, the performance and durability of cement-stabilized soils can deteriorate over time due to environmental or operational influences. Among these factors, the interference of salts with pozzolanic reactions is particularly significant.Previous studies have shown that sulfate ions can hinder cement hydration, resulting in harmful swelling and reduced mechanical strength, particularly in fine-grained soils. While some research has examined the impact of other salts, such as chlorides, nitrates and phosphates, their effects are complex and depend on factors including salt concentration, soil texture, cement type and curing conditions. Despite these findings, little attention has been given to stabilizing saline aeolian sands for use in controlling wind erosion or as a construction foundation, particularly in conditions of high salinity where multiple soluble salts may interact with cement.This study investigates the effect of Portland cement stabilization on the unconfined compressive strength (UCS) of saline aeolian sands collected from the Urmia Lake basin. Understanding the mechanical behaviour of these soils under cement stabilization is of

Cite this article: Darsanj, S., Emami Tabrizi, M., Afshin, H. (2025). Evaluation of cement performance in stabilizing saline soils from the Urmia lake basin. Journal of Engineering Geology, 19 (4), 518-533. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1013843

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1013843

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

particular importance given the high salinity of the soils in this region and the potential presence of soluble compounds such as chlorides and sulfates, which may interfere with cement hydration processes. To this end, specimens with varying salinity levels were prepared and stabilised using different Portland cement contents (1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 7% by dry weight). After seven days of curing, unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted and the results analyzed to assess the influence of salinity and cement content on the performance of the stabilized soil.Additionally, the microstructural analysis was also performed using scanning electron microscopy (SEM). This investigation provides valuable insight into the behavior of stabilized saline granular soils and supports the selection of appropriate stabilization plans for arid and semi-arid regions.

Materials and Methods

Soil

The soil used in this research was poorly graded sand collected from the western shore of Urmia Lake, near Jabal Kandi village. This area is highly susceptible to wind erosion due to the lake's receding water levels. Based on electrical conductivity, this soil is classified as saline. Chemical analysis revealed high concentrations of chloride, bicarbonate, and sulfate, as well as calcium, sodium, and potassium. Microscopic examination showed that the soil particles were predominantly rounded, spherical, and rod-like in shape.

Cement

Type 425-1 Portland cement, supplied by the Sufian Cement Factory, was used for specimen preparation.

Sample preparation

To ensure uniformity and microstructural control, the layered compaction method was selected after comparing various field stabilization techniques and laboratory procedures. Cement-stabilized specimens were prepared by mixing dry soil with specific cement contents, adding water at a W/C ratio of 1 plus 2% extra moisture, and compacting the mixture in four layers within Teflon molds (5 cm diameter × 10 cm height) using the under-compaction method. Specimens were demolded after 24 hours, cured in water for seven days, and oven-dried at 50°C for 24 hours prior testing. The target dry density was 1.62 g/cm³, corresponding to 70% relative density. Cylindrical specimens were made using both saline and desalinated soils; desalination was achieved by repeated washing with distilled water until the electrical conductivity of the 1:2 soil extract was below 250 µS/cm. Ultrasonic pulse velocity measurements were conducted prior to mechanical testing to assess internal homogeneity.

Results and Discussion

The experimental results demonstrated a clear increase in UCS with higher cement content, primarily due to the formation of more extensive and stronger interparticle cementation bonds. The morphology and distribution of these bonds—particularly planar bonds between elongated sand grains—played a critical role in load transfer and strength development. Ultrasonic testing, as a non-destructive method, showed that wave velocity increased with cement content and exhibited a strong power-law correlation with UCS, highlighting its potential for estimating mechanical strength in cemented soils. Additionally, soil salinity exerted a significant influence on strength development. Specimens with higher electrical conductivity exhibited greater UCS, likely due to the abundance of chloride ions. Chlorides enhanced early hydration reactions and formed Friedel’s salt through interactions with cement aluminates. This process contributed to strength gain and potentially mitigating deleterious ettringite formation by limiting sulfate access to C_3A.

Conclusions

This study examined the stabilization of saline aeolian sands from the Urmia Lake region using Type I Portland cement. Specimens with different cement contents and electrical conductivity levels were prepared and tested for ultimate compressive strength (UCS) after seven days of curing. The results showed that Portland cement effectively increases the strength of saline sandy soils, with UCS rising as the cement content increases. A strong power-law relationship was observed between UCS and cement content. Furthermore, the presence of salts, particularly chloride ions, was found to enhance early cement hydration and strength development. Specimens with higher salinity exhibited greater short-term strength than desalinated ones at the same cement content. These findings emphasise the importance of considering salt type and concentration when designing optimal chemical stabilization formulations for saline environments, and highlight the dual role of salinity and cementation in improving soil performance.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰
دانشگاه خوارزمی

ارزیابی عملکرد سیمان در تثبیت خاک‌های نمکی حوضه دریاچه ارومیه

سولماز دارسنج[۱]، مهرداد امامی تبریزی[۲]✉، حسن افشین[۳]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، تبریز، ایران. رایانامه: s_darsanj@sut.ac.ir
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز(سهند)، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول)، رایانامه: m.emami@sut.ac.ir
۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران ، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی تبریز(سهند)، تبریز ، ایران. رایانامه: hafshin@sut.ac.ir r

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

کلیدواژه‌ها:
دریاچه ارومیه، ماسه بادی، تثبیت، سیمان، نمک.

چکیده

ماسه‌های بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل سستی، ظرفیت باربری پایین و تراکم‌پذیری دشوار از جمله خاک‌های مسئله‌دار محسوب می‌شوند. شرایط اقلیمی خشک ایران و پدیده‌هایی مانند خشکی دریاچه ارومیه، پراکندگی ماسه‌های شور را تشدید کرده است. یکی از راهکارهای رایج مقابله با این خاک‌ها، تثبیت شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی نظیر سیمان است. در این پژوهش، به بررسی تأثیر بهسازی ماسه‌های بادی شور برداشت‌شده از حوضه دریاچه ارومیه با سیمان پرتلند نوع ۱ پرداخته شده است. نمونه‌های خاک بهسازی شده با مقادیر متفاوتی از شوری و درصدهای مختلف سیمان تهیه و پس از ۷ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش درصد سیمان موجب افزایش معنی‌دار مقاومت فشاری می‌شود. همچنین، حضور نمک در خاک مورد مطالعه نه‌تنها مانع فرآیند تثبیت نبوده، بلکه موجب بهبود مقاومت نمونه‌ها در کوتاه مدت شده است. این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن نوع و میزان نمک در طراحی بهسازی خاک‌های دانه‌ای شور در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک تأکید دارند.

مقدمه

ماسه‌های بادی یکی از انواع خاک‌های مسئله‌دار هستند که به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان پراکنده‌اند. سایز دانه‌های ریز و یکنواخت، وضعیت سست، عدم کفایت ظرفیت باربری و تراکم‌پذیری دشوار از جمله مشکلات مواجهه با این نوع خاک‌ها هستند (Elipe and López-Querol, 2014). فرسایش بادی نیز یکی دیگر از مسائل همراه با این خاک‌ها و از سویی یکی از مهم‌ترین مسائل محیطی در مناطق خشک، نیمه‌خشک جهان می‌باشد (Shi et al., 2004). ایران بر روی کمربند خشک قرار گرفته و شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بیش از نیمی از آن را پوشش داده است که این امر، استعداد بیابان‌زایی را در صورت سوء مدیریت در ایران افزایش می‌دهد (Keramat et al., 2011). در سال‌های اخیر دریاچه ارومیه با توجه به خشکسالی‌های متوالی و کاهش قابل توجه سطح آب آن، با برجا ماندن بیش از ۱۰ میلیارد تن نمک، منبع نو ظهوری برای ماسه‌های بادی و گرد و غبار در شمال غرب کشور ایجاد کرده است (Boroughani et al., 2020; Karei, 2015). یکی از روش‌های متداول در مواجه با خاک‌های مسئله‌دار، استفاده از مواد افزودنی است که با ایجاد پیوند میان ذرات خاک، موجب تبدیل آن به خاک سخت یا سنگ ضعیف می‌شود. افت عملکرد و خرابی خاک‌های سیمانته ممکن است در اثر عوامل محیطی یا بهره‌برداری رخ دهد (Darsanj et al., 2026). از میان عوامل محیطی شیمیایی، تداخل نمک‌ها با واکنش‌های پوزولانی از اهمیت بسزایی برخوردار

استناد: دارسنج، س.، امامی تبریزی، م.، افشین، ح. (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد سیمان در تثبیت خاک‌های نمکی حوضه دریاچه ارومیه. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۴)، ۵۱۸-۵۳۳. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1013843

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

است. شناخته شده‌ترین ترکیب شیمیایی مضر برای بهسازی با مواد پایه کلسیمی، سولفات‌ها هستند (Saussaye et al., 2013). که موارد متعددی از این نوع خرابی به خصوص در مورد خاک‌های ریزدانه در ادبیات فنی گزارش شده است (Alonso and Ramon, 2013; Cerato et al., 2011; Mitchell and Dermatas, 1992; Rollings et al., 1999) در خاک‌های بهسازی شده با افزودنی‌های پایه کلسیمی که حاوی سولفات (ژیپس، آنیدریت(Anhydrite)، باریت (Baryte)و ژاروسیت (Jarosite)) بوده و یا در معرض آب‌های حامل سولفات قرار دارند، به دلیل تداخل سولفات با واکنش‌های پوزولانی، کانی‌های متورم شونده نظیر اترینگایت (Ettringite) و تائوماسیت (Thaumasite) تشکیل شده و باعث بروز تورم و تنش‌های کششی می‌گردند. هرچه فضای حفره‌ای خاک کمتر باشد میزان تورم ناشی از سولفات بیشتر خواهد بود؛ لذا خاک‌های ماسه‌ای در مقایسه با رس‌ها، تورم کمتری از خود نشان می‌دهند (Puppala et al., 2005). از طرف دیگر، مطالعه در خصوص اثرات سایر نمک‌ها محدود می‌باشد. در پژوهش اسولا (Osula, 1993) تأثیر استفاده از کلرید سدیم به‌عنوان افزودنی در فرآیند تثبیت خاک لاتریتی مسئله‌دار با سیمان پرتلند بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزودن نمک موجب افزایش مقاومت تک محوری ۷ روزه خاک نسبت به حالت بدون نمک شده و عملکرد بهتری در محدوده اقتصادی مصرف سیمان، ایجاد کرده است. این افزایش مقاومت به تشکیل ترکیبات هیدراتاسیون اضافی مانند کلسیم آلومینات کلرید هیدرات (نمک فریدل (Friedel)) نسبت داده شده که در تقویت ساختار خاک نقش دارد. کوسینیر و همکاران (Cuisinier et al., 2011) تأثیر ترکیبات شیمیایی مخرب مانند نیترات‌ها، فسفات‌ها و کلریدها را نیز به‌صورت کمی بر فرآیند تثبیت خاک‌های سیلتی و ماسه ریز، با آهک و سیمان بررسی کردند . نتایج نشان داد که اثر این ترکیبات نه‌تنها به غلظت آن‌ها، بلکه به نوع خاک، نوع سیمان و شرایط عمل‌آوری (دما و رطوبت) وابسته است. این ترکیبات ممکن است با فرآیندهای پوزولانی تداخل کرده و عملکرد مکانیکی را تقلیل دهند و یا بر سرعت و زمان واکنش‌های شیمیایی اثر بگذارند. بنابراین وجود آن‌ها به تنهایی در خاک نمی‌تواند معیار دقیقی برای ارزیابی قابلیت تثبیت خاک باشد. همچنین آن‌ها نشان دادند که برای ارزیابی دقیق اثرات مخرب احتمالی، انجام آزمایش‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری، ضروری است و تعیین یک آستانه غلظت مشخص برای تمام ترکیبات امکان‌پذیر نیست. در پژوهش ریکا و همکاران (Rica et al., 2016) اثر نمک‌های سولفات، کلرید، فسفات و نیترات، به‌صورت مجزا و ترکیبی، بر عملکرد خاک سیلتی تثبیت‌شده با سیمان و آهک در شرایط عمل‌آوری سریع بررسی گردید. بر اساس نتایج، نمک‌های سولفات باعث تورم قابل‌توجه در خاک‌های تثبیت‌شده می‌شوند که گاهی با کاهش مقاومت مکانیکی نیز همراه است. در مقابل، نمک‌های کلرید، فسفات و نیترات موجب ناپایداری حجمی نمی‌شوند، اما می‌توانند مقاومت کششی غیرمستقیم را کاهش دهند. همچنین نتایج نشان داد که تأثیر هر نمک به ترکیب کامل آن (کاتیون و آنیون) وابسته است و حضور هم‌زمان چند نمک می‌تواند اثرات مخرب هم‌افزا ایجاد کند. همچنین مطالعه چنگ و همکاران (Cheng et al., 2017) نشان داد که در خاک‌های ریزدانه شور حاوی کلرید، ترکیب سیمان پرتلند با آهک (PC+CH) موجب تشکیل محصول جدیدی به نام نمک فریدل می‌شود که به‌واسطه پرکردن فضای حفره‌ای و افزایش چگالی ساختار خاک، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. بر اساس این یافته، ایده‌ای نو برای طراحی ماده افزودنی ارائه شد که از کلرید موجود در خاک شور به‌عنوان بخشی از ترکیب شیمیایی تثبیت کننده بهره می‌گیرد که منجر به افزایش بیشتر مقاومت نسبت به حالت سیمان پرتلند معمولی گردید. در پژوهش رازقی و همکاران (Razeghi et al.,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

2022)، اثر شوری (NaCl) بر رفتار مکانیکی و ریزساختاری خاک ماسه‌ای شور تثبیت‌شده با سه نوع ماده افزودنی شامل سیمان پرتلند، خاکستر آتشفشانی فعال‌شده قلیایی، و سرباره فعال‌شده قلیایی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت نمک تا ۱ درصد وزنی در نمونه‌های حاوی سرباره فعال‌شده موجب افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۲۴۴ درصد گردید، در حالی که افزایش بیشتر شوری تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت نداشت. در مقابل، در نمونه‌های تثبیت‌شده با خاکستر آتشفشانی فعال‌شده، افزایش شوری تا ۴ درصد باعث کاهش مقاومت بلندمدت (۹۰ روزه) تا حدود ۷۰ درصد شد. همچنین، در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان پرتلند، شوری کم (۱ درصد) منجر به افزایش جزئی مقاومت ولی شوری بالاتر باعث افت قابل‌توجه استحکام به دلیل تشکیل فازهای نمکی حجیم مانند فریدل گردید. در پژوهش دوآن و همکاران (Duan et al., 2023)، سه نوع خاک لُس با سولفات سدیم (Na_2SO_4) در سطوح شوری ۰ تا ۲/۵ درصد بهسازی شده و با آزمایش برش مستقیم و تصاویر SEMبررسی شدند. نتایج نشان داد افزایش غلظت سولفات سدیم موجب تضعیف پیوند بین ذرات، تخریب ریزساختار و در نهایت کاهش مقاومت برشی خاک‌های لسی می‌شود. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2025) روشی مبتنی بر تزریق شیمیایی با دوغاب پلی‌یورتان/سیلیکات سدیم (PU/WG)را برای تثبیت ماسه‌های بادی شور ارائه کردند. آن‌ها اثر دانسیته خشک، مقدار دوغاب و شوری را بر مقاومت فشاری بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش شوری موجب کاهش مقاومت و افزایش شکل‌پذیری شده، در حالی‌که افزایش دانسیته و مقدار PU/WG مقاومت و سختی خاک را به‌طور چشمگیری بهبود می‌دهد. به طور کلی، مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی تداخل نمک بر فرآیند بهسازی شیمیایی در خاک‌های ریزدانه متمرکز بوده است در حالیکه تثبیت شیمیایی ماسه‌های بادی شور با هدف کنترل فرسایش بادی و یا ایجاد بستر مناسب برای توسعه سایر ساخت و سازها، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پژوهش، اثر بهسازی با استفاده از سیمان پرتلند بر مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌های بادی شور برداشت‌شده از حوضه دریاچه ارومیه بررسی شده است. با توجه به شوری بالای خاک‌های این منطقه و احتمال حضور ترکیبات محلول، نظیر کلرید و سولفات که می‌توانند در فرآیندهای شیمیایی مربوط به هیدراسیون سیمان تداخل ایجاد کنند، بررسی رفتار مکانیکی این خاک‌ها در برابر تثبیت با مواد سیمانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور، نمونه‌هایی با میزان شوری متفاوت تهیه و با درصدهای مختلفی از سیمان پرتلند نوع ۱ به ترتیب، ۱،۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ درصد وزنی نسبت به خاک خشک، تثبیت شدند. نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری، تحت آزمون مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند و نتایج حاصل جهت تحلیل تأثیر شوری و میزان سیمان بر عملکرد خاک بهسازی شده مورد مقایسه و بحث قرار گرفت.همچنین ریزساختار خاک با تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی می‌تواند گامی مؤثر در درک رفتار خاک‌های دانه‌ای شور تثبیت شده و انتخاب مناسب‌ترین ترکیب برای بهسازی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

مواد و روش‌ها

خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش از محدوده‌ای واقع در حوالی روستای جبل‌کندی، در فاصله حدود ۳۵ کیلومتری شمال شهر ارومیه و در ناحیه‌ای از ساحل غربی دریاچه ارومیه برداشت شده است (شکل ۱). به دنبال کاهش تراز آب دریاچه و خشک شدن آن، این منطقه در معرض فرسایش بادی قرار گرفته است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین نتایج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

آنالیز یونی بر روی خاک به همراه نتایج برخی از آزمایش‌های شیمیایی مهم در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس نتایج این جدول، از میان یون‌های اصلی منفی، کلر، بیکربنات و سولفات و از میان یون‌های اصلی مثبت، کلسیم، سدیم و پتاسیم به ترتیب بیشترین فراوانی را دارند. بر اساس میزان هدایت الکتریکی (EC) که به عنوان شاخصی برای طبقه‌بندی خاک از نظر شوری به کار می‌رود، خاک مبنای مورد استفاده در رده شور قرار می‌گیرد (Vice President for Strategic Planning and Supervision, 2008). مورفولوژی دانه‌های خاک در حالت طبیعی در مقیاس میکروسکوپیک با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، خاک مبنا متشکل از دانه‌های گرد گوشه با اشکال شبه کروی و میله‌ای است.

شکل ۱. محل نمونه‌برداری از روستای جبل کندی

Fig. 1. Sampling location in Jabal Kandi Village

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه مورد مطالعه

Table 1. Physical properties of the studied sand

Classification (USCS)	SP
P.P. NO. 50	**100**
P.P. NO. 200 (%)	**<5**
Mean Effective Diameter,D_{50}(mm)	**0.1~0.2**
Uniformity Coefficient	**2.18**
γ_{dmax} (gr/cm^3)	**1.68**
γ_{dmin} (gr/cm^3)	**1.49**
Gs	**2.74**
Friction angle (degree) at Dr=70%	**33**
Cohesion at Dr=70%	**0.0**

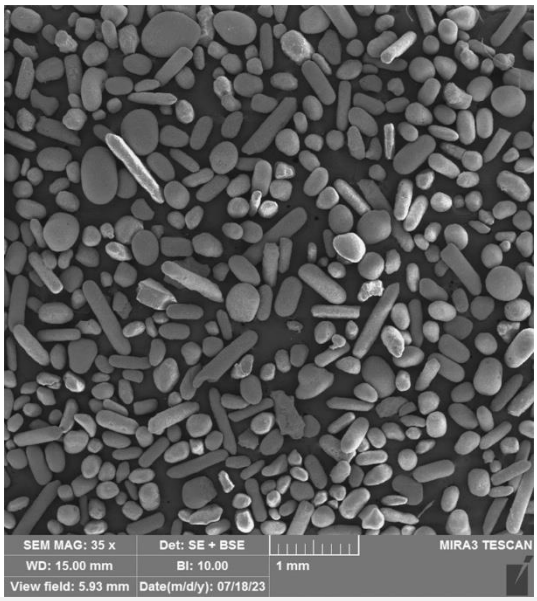
جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی ماسه نمکی مورد مطالعه

Table2. Chemical analysis results of the saline sand

پارامتر	روش	مقدار
EC (µs/cm)	1soil:2water	**1442~6630**
TDS (ppm)	ASTM D5907-18	**16050**
pH	1soil:2water	**7.7**

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

So_4^{2-} (ppm)	INSO 2353-1392	**760**
NO_3^-	Brucine	**250**
CL^-	INSO 2350-1392	**4358**
NH_4^+	Nesslerization	**52.5**
Na^+	ICP-MASS	**2810**
K^+	ICP-MASS	**600**
Ca^{2+}	ICP-MASS	**3420**
$Mg2^+$	ICP-MASS	**350**
Carbonate ($CaCo_3$)	Titrimetric	**70**
Bicarbonate ($CaCo_3$)	Titrimetric	**2625**



شکل ۲. مورفولوژی دانه‌های خاک با استفاده از SEM

Fig. 2. Soil particle morphology observed using SEM

سیمان

برای ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولیدی کارخانه سیمان صوفیان استفاده گردیده است که مطابق تعریف استاندارد ملی ایران (۳۸۹) مقاومت ۲۸ روزه این نوع سیمان، بایستی حداقل ۴۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع باشد (Alilou et al., 2021).

آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت انتخاب روش مناسب آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه، ابتدا روش‌های اجرایی ممکن برای تثبیت و بهسازی سطحی توده خاک و روش‌های آزمایشگاهی نظیر هر یک از آن‌ها، در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد می‌توان برای سه روش اجرایی مرسوم، نمونه‌های آزمایشگاهی متناظری ساخت. اما به جهت لزوم تولید نمونه‌های همسان در آزمایشگاه و کنترل حداکثر بر ریز ساختار، روش تراکم لایه لایه در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌ها، انتخاب گردید.

نمونه‌های سیمانته با افزودن درصد معینی سیمان به خاک خشک، آماده شدند. پس از اختلاط کامل، آب با نسبت W/C=1 و ۲٪ رطوبت اضافی، افزوده شد تا مخلوطی یکنواخت و قابل تراکم حاصل شود. این مخلوط در قالب‌های تفلونی (قطر ۵، ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) در چهار لایه کوبیده شد، به طوری که در بین لایه‌ها برای افزایش چسبندگی، خراش‌هایی ایجاد گردید. تراکم با روش آندرکامپکشن انجام

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

گرفت (Ladd, 1978). نمونه‌های متراکم شده پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و در کیسه‌های پلاستیکی، به مدت ۷ روز به‌صورت غرقاب عمل‌آوری شدند. در پایان عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۵۰ درجه خشک و پس از اندازه‌گیری ابعاد و وزن، تحت آزمایش قرار گرفتند. دانسیته خشک هدف برای ساخت نمونه‌ها ۱/۶۲۳ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد که معادل دانسیته نسبی ۷۰٪ برای ماسه مبنا است. نمونه‌های استوانه‌ای هم با استفاده از خاک مبنا با مقادیر هدایت الکتریکی متفاوت و هم با استفاده از خاک نمک‌زدایی شده، ساخته شدند. برای حذف نمک، خاک شور پایه به نسبت ۱ به ۱۰ با آب مقطر مخلوط شد و پس از زمان لازم برای ته‌نشینی کامل، محلول رویی تخلیه شده و هدایت الکتریکی در عصاره ۱ به ۲ از خاک خشک شده به جا مانده، اندازه‌گیری گردید. این فرآیند نمک‌زدایی تا دستیابی به هدایت الکتریکی کمتر از ۲۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر (Vice President for Strategic Planning and Supervision, 2008) تکرار شد. جهت بررسی همگن بودن نسبی ساختار داخلی نمونه‌ها، اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک پیش از انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی آن‌ها انجام گرفت. آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C597-16 انجام گرفت. در این روش، امواج با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز در امتداد محور طولی نمونه بین دو سنسور فرستنده و گیرنده عبور داده شد و مدت زمان عبور موج از نمونه به‌صورت دقیق ثبت گردید. سپس با تقسیم طول نمونه استوانه‌ای بر زمان اندازه‌گیری شده، سرعت موج محاسبه گردید. با توجه به متخلخل بودن نمونه‌ها از وازلین، جهت حذف هوای بین سنسور و نمونه استفاده شد.

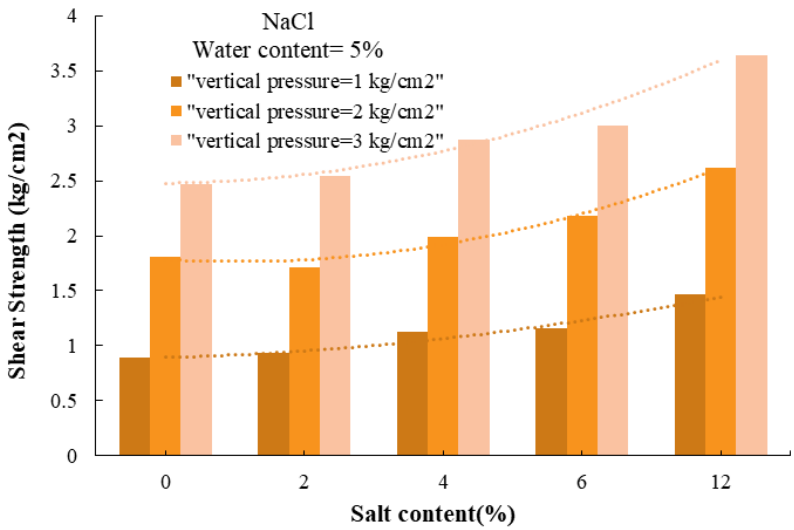
جدول ۳. روش‌های اجرایی ممکن برای تثبیت سطحی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی

Table 3. Possible implementation methods for surface stabilization and laboratory simulation

روش اجرایی	شبیه‌سازی آزمایشگاهی
اختلاط	اختلاط خشک خاک و ماده افزودنی، افزودن آب و تراکم لایه لایه در قالب (Ladd, 1978)
تزریق به روش غرقاب کردن	ریختن خاک خشک در قالب، گذردهی جریان آب، تزریق دوغاب (Delfosse-Ribay et al., 2007)
	اختلاط خشک خاک و ماده افزودنی، ریختن در قالب، عبور گاز CO_2 و گذردهی جریان آب (Ismail et al., 2002)
دوغاب پاشی	اسپری کردن دوغاب روی سطح نمونه تسطیح شده در سینی

تأثیر نمک بر مقاومت برشی خاک غیرسیمانته

اثر نمک کلرید سدیم بر مقاومت برشی ماسه مبنا در حالت غیر سیمانته جهت درک بهتر از وضعیت پایه پیش از بهسازی، با استفاده از آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. در حالت خشک، حضور نمک تأثیر محسوسی بر مقاومت برشی ماسه‌ها نخواهد داشت، زیرا پیوندهای بین‌دانه‌ای عمدتاً مکانیکی بوده و نمک در این شرایط نقشی در افزایش یا کاهش مقاومت ایفا نمی‌کند. با این حال، در شرایط مرطوب، نمک می‌تواند بر رفتار برشی خاک اثرگذار باشد. نتایج آزمایش برش مستقیم، مطابق شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نمک NaCl در رطوبت ثابت ۵ درصد و تحت دانسیته یکسان، مقاومت برشی ماسه‌های بادی، یا بدون تغییر باقی می‌ماند یا اندکی افزایش می‌یابد. این تغییرات بیانگر آن است که نمک در حضور رطوبت می‌تواند بر نحوه تماس بین‌دانه‌ای و رفتار برشی خاک اثر گذاشته و ویژگی‌های اولیه خاک را تعدیل کند.



شکل ۳. تغییرات مقاومت برشی خاک با افزودن نمک سدیم کلرید به خاک نمک‌زدایی شده تحت تنش‌های قائم متفاوت در رطوبت ۵٪

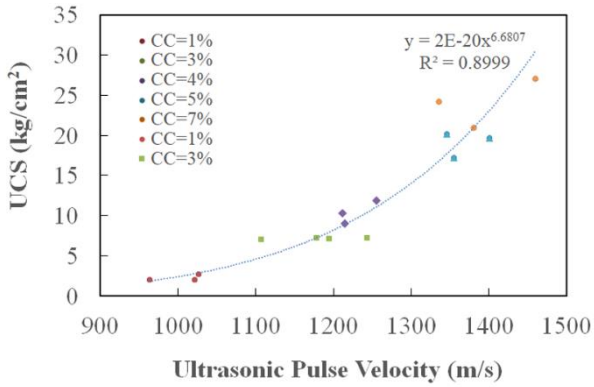
Fig. 3. Variation of soil shear strength with the addition of sodium chloride to the desalinated soil under different normal stresses at 5% moisture content.

نتایج و بحث

ارتباط سرعت موج اولتراسونیک و مقاومت فشاری تک محوری در خاک نمکی

آزمایش اولتراسونیک و بررسی انتشار امواج طولی به عنوان یک روش غیرمخرب، ابزاری مؤثر در بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های خاک سیمانته محسوب می‌شود (Emami Tabrizi et al., 2010). در شکل ۴، رابطه بین سرعت موج اولتراسونیک (V) و مقاومت تک‌محوری (UCS) در نمونه‌هایی با دانسیته نسبی ۷۰٪ و درصدهای مختلف سیمان (۱، ۳، ۴، ۵ و ۷ درصد) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان سیمانتاسیون، سرعت انتشار موج اولتراسونیک در نمونه‌ها افزایش یافته است که بیانگر بهبود ساختار داخلی و افزایش سختی ماده می‌باشد (Luong et al., 2007). علاوه بر این، بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج اولتراسونیک، رابطه‌ای توانی مطابق رابطه (۱) با دقت قابل قبولی برقرار است که نشان‌دهنده وابستگی غیرخطی و قابل پیش‌بینی مقاومت نمونه به سرعت انتشار موج است. این رابطه امکان استفاده از داده‌های اولتراسونیک به منظور تخمین مقاومت مکانیکی نمونه‌های سیمانته را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است این رابطه توانی در خصوص مقاومت خمشی خاک‌های بهسازی شده نیز گزارش گردیده است (Mandal et al., 2016). از طرفی برای بتن غیر مسلح ارتباط نمایی (Demirboğa et al., 2004) و برای ارتباط خطی در خصوص سنگ‌های کربناته و ملات پر کننده سیمان (Kahraman and Yeken, 2008; Yılmaz and Ercikdi, 2016) بین سرعت موج و مقاومت تک محوری نیز پیشنهاد شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]



شکل ۴. ارتباط بین مقاومت تک محوری با سرعت موج اولتراسونیک در نمونه‌های با دانسیته نسبی ۷۰٪ و درصد سیمانتاسیون ۱ تا ۷٪

Fig. 4. Correlation between unconfined compressive strength and ultrasonic wave velocity in specimens with 70% relative density and cement content ranging from 1% to 7%

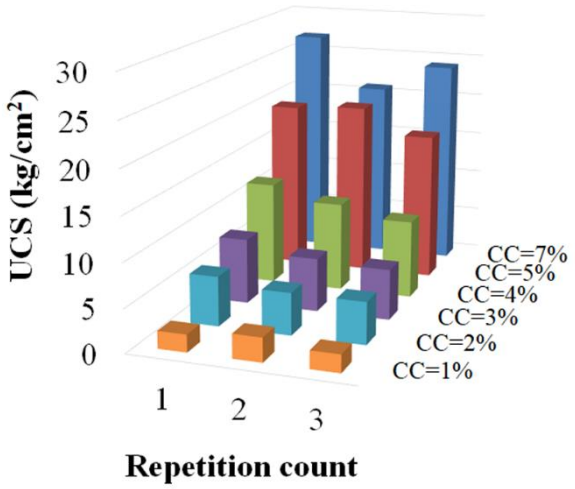
$$UCS = 2\times10^{-20}(V^{6.6807}) \quad (۱)$$

ارتباط مقاومت فشاری تک محوری و درصد سیمان در خاک نمکی

نتایج حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری روی نمونه‌های ماسه سیمانته (شکل ۵) نشان‌دهنده افزایش قابل توجه مقاومت با افزایش درصد سیمان است. این افزایش مقاومت عمدتاً ناشی از تغییرات ساختاری درونی نمونه‌ها می‌باشد. با افزایش درجه سیمانتاسیون، خمیر سیمان در نقاط تماس بیشتری از دانه‌ها تشکیل شده (شکل ۶) و باعث ایجاد پیوندهای پایدارتری می‌شود که انتقال بار در نمونه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر افزایش تعداد پیوندها، نحوه توزیع و مورفولوژی آن‌ها نیز از عوامل مؤثر در تعیین مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها محسوب می‌شود. پیوندهای صفحه‌ای بین دانه‌های میله‌ای ماسه که دارای سطح تماس وسیع‌تری هستند، نسبت به پیوندهای نقطه‌ای مقاومت بیشتری در برابر بارگذاری اعمال‌شده نشان می‌دهند و افزایش سهم این نوع پیوندها می‌تواند عامل مهمی در بهبود مقاومت نمونه باشد (Song et al., 2022). در شکل ۷ ارتباط بین مقادیر میانگین مقاومت تک محوری با درصد سیمان (CC) به همراه انحراف استاندارد نشان داده شده است. بر اساس این شکل ارتباط این دو پارامتر با یک رابطه توانی مطابق رابطه (۲) با همبستگی بالا قابل توصیف است. این الگو به طور مشابه در خصوص ماسه‌های غیر نمکی نیز مشاهده گردیده است (Consoli et al., 2011).

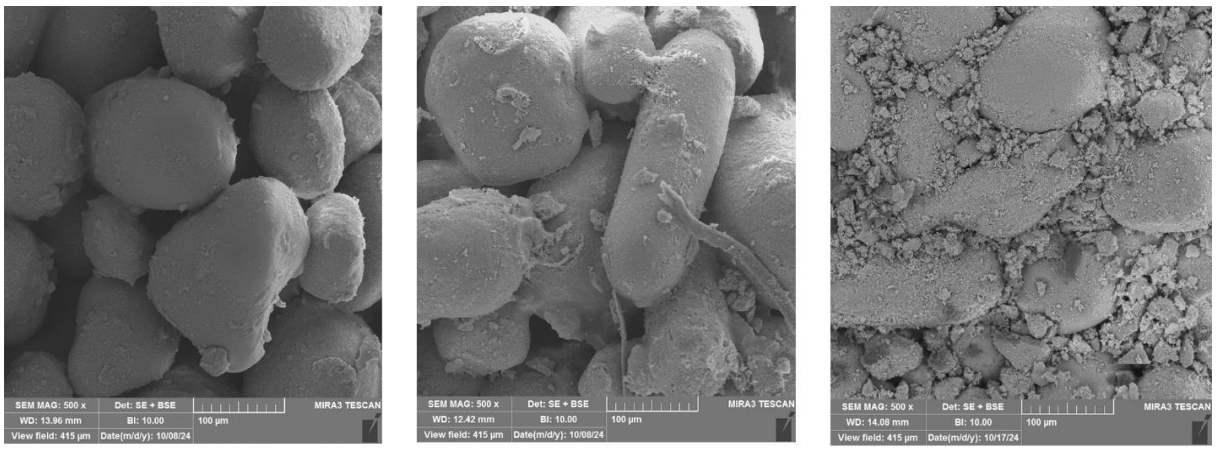
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]



شکل ۵. تغییرات مقاومت تک محوری نمونه‌های سیمانته به ازای درصدهای مختلف سیمان

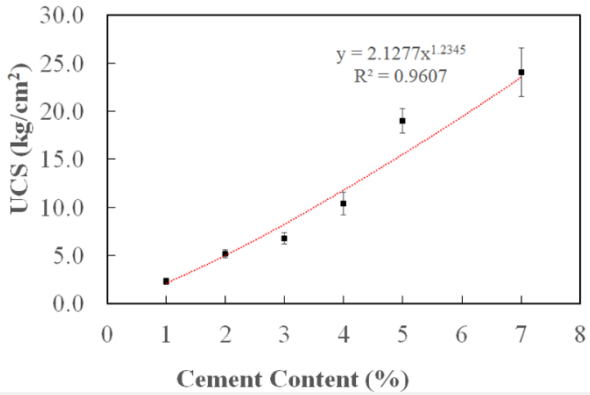
Fig. 5. Variations in unconfined compressive strength of cemented samples with different cement contents



(a) (b) (c)

شکل ۶. ریز ساختار ماسه‌های سیمانته در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر در مقدار سیمان الف) ۲٪، ب) ۳٪ و ج) ۴٪

Fig. 6. Microstructure of cemented sands at 500× magnification with cement contents of (a) 2%, (b) 3%, and (c) 4%



شکل ۷. ارتباط بین مقاومت تک محوری میانگین و درصد سیمانتاسیون در نمونه‌های ماسه بادی سیمانته

Fig. 7. Correlation between average UCS and cement content in cemented aeolian sand specimens

$$UCS = 2.13(CC^{1.23}) \quad (۲)$$

تأثیر نمک بر مقاومت تک محوری و مدول تغییرشکل

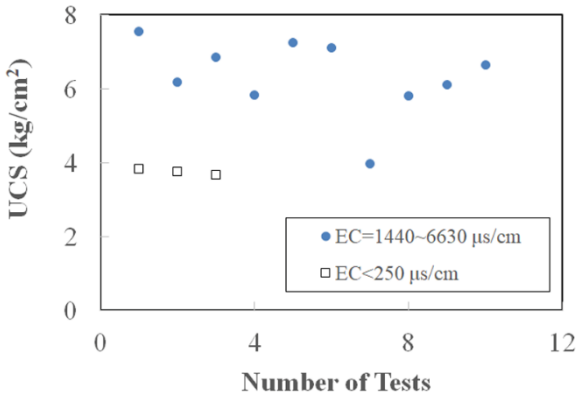
در شکل ۸ مقادیر مقاومت تک محوری در ماسه‌های سیمانته با مقادیر هدایت الکتریکی مختلف و ۳ درصد سیمان نشان داده شده است. با توجه به این شکل، نمونه تهیه شده از خاک نمک‌زدایی شده، با مقدار هدایت الکتریکی کمتر از ۲۵۰ دسی زیمنس بر سانتیمتر، دارای حداقل UCS و نمونه با بیشترین هدایت الکتریکی، دارای بالاترین مقدار UCS در عمر عمل‌آوری ۷ روزه بوده است. با توجه به آنالیز یونی صورت گرفته، فراوانی یون‌های کلرید در خاک مبنا بیش از سایر یون‌هاست. یون‌های کلرید (به‌ویژه در حضور یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان) به عنوان تسریع‌کننده اولیه هیدراتاسیون عمل می‌کنند و با افزایش سرعت هیدراتاسیون اولیه به بهبود مقاومت اولیه نمونه‌های بهسازی شده منجر می‌شوند (Cao et al., 2021). از سوی دیگر این یون‌ها با فاز آلومیناتی سیمان (مانند C_3A) واکنش داده و ترکیب نمک فریدل را تشکیل می‌دهند که با کاهش تخلخل به بهبود مقاومت کمک می‌کند (Cheng et al., 2017). به نظر می‌رسد در حضور غلظت‌های کافی از یون کلرید، فازهای آلومیناتی سیمان (C_3A) ترجیحاً با کلریدها واکنش داده‌اند. این رقابت در واکنش، دسترسی C_3A به سولفات‌ها را کاهش داده و در نتیجه از تشکیل اترینگایت مخرب و افزایش حجم ناشی از آن جلوگیری می‌کند.

از منظر مقایسه‌ای، نتایج این پژوهش با یافته‌های اسولا (Osula, 1993) و رازقی و همکاران (Razeghi et al., 2022) که افزودن NaCl را عامل افزایش مقاومت اولیه خاک‌های بهسازی شده دانسته‌اند، تطابق کامل دارد .در مقابل، یافته‌های حاضر با نتایج ریکا و همکاران (Rica et al., 2016) و دوآن و همکاران (Duan et al., 2023) که اثرات تخریبی نمک‌های سولفاتی بر کاهش مقاومت و تخریب ریزساختار را نشان داده‌اند، در تضاد است. این تضاد بیانگر آن است که تأثیر نمک بر فرآیند تثبیت نه‌تنها به نوع آنیون (کلرید یا سولفات) بلکه به مکانیسم شیمیایی و نوع ماده افزودنی نیز وابسته است (Razeghi et al., 2022). در مجموع، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در محیط‌های شور با غلبه یون کلرید، تشکیل فازهای کلریدی پایدار می‌تواند با جلوگیری از واکنش‌های مخرب سولفاتی، موجب افزایش چشمگیر مقاومت اولیه و پایداری ساختاری خاک‌های سیمانته شود.

در شکل ۹ منحنی‌های تنش-کرنش تعدادی از نمونه‌های سیمانته با خاک شور و خاک نمک‌زدایی شده نشان داده شده است. مقایسه مدول سکانت در تنش نظیر 0.5 UCS

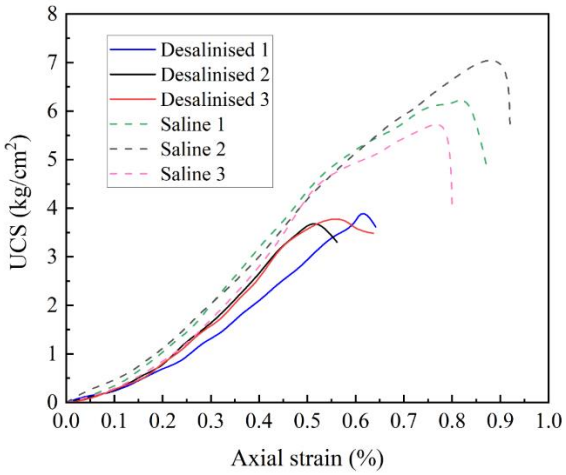
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

بین نمونه‌های مختلف تهیه‌شده از خاک شور و غیر شور نشان می‌دهد که حضور نمک موجب افزایش قابل‌توجه سختی شده است. میانگین مدول الاستیسیته برای نمونه‌های شور حدود ۷۶۴ kg/cm^2 و برای نمونه‌های غیر شور حدود ۵۴۷kg/cm^2 است که نشان‌دهنده افزایشی در حدود ۴۰ درصد در سختی نمونه‌های شور است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید این افزایش را می‌توان به نقش یون‌های کلرید موجود در خاک شور در فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان مربوط دانست.



شکل ۸. تأثیر میزان نمک بر مقاومت تک محوری نمونه‌های بهسازی شده

Fig. 8. Effect of salt content on the unconfined compressive strength of stabilized specimens



شکل ۹. تأثیر میزان نمک بر رفتار تنش-کرنش نمونه‌های بهسازی شده فاقد نمک و نمونه‌های دارای نمک

Fig. 9. Effect of salt content on the stress–strain behavior of stabilized specimens prepared from saline and desalinised soils

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر بهسازی ماسه‌های بادی شور دریاچه ارومیه با سیمان پرتلند پرداخته است. برای این منظور نمونه‌هایی با درجات سیمانتاسیون و شوری متفاوت با سیمان پرتلند نوع ۱ تثبیت و پس از ۷ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل، تأثیر متقابل شوری و میزان سیمان بر عملکرد بهسازی خاک را آشکار ساخت. اهم نتایج حاصل از پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

۱. استفاده از سیمان پرتلند در بهسازی خاک‌های ماسه‌ای شور کارا بوده و تأثیر مثبتی بر افزایش مقاومت تک محوری این خاک‌ها داشته است به نحوی که با افزایش درصد سیمان، مقاومت تک محوری خاک بهسازی شده نیز افزایش یافته است.

۲. بین مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های نمکی بهسازی شده و درصد سیمانتاسیون رابطه توانی با ضریب همبستگی بالا مشاهده گردید.

۳. وجود نمک در ماسه‌های بادی مورد مطالعه، تأثیر مثبتی بر فرآیند بهسازی داشته و مقاومت تک محوری نمونه‌ها را در عمر عمل‌آوری ۷ روزه و درجه سیمانتاسیون یکسان، افزایش می‌دهد.

۴. با توجه به اثر متفاوت نمک‌های مختلف، دستیابی به طرح اختلاط بهینه در بهسازی شیمیایی باید با در نظر گرفتن نوع نمک‌ها و مقدار آن‌ها صورت گیرد.

References

Alilou kesejini, Y., Bahranifar, A., Afshin, H. & Emami Tabrizi, M. (2021). High Deformable Concrete (HDC) element: An experimental and numerical study, Advances in concrete construction, 11(5), 357-365.

Alonso, E., & Ramon, A. (2013). Massive Sulfate Attack to Cement-Treated Railway Embankments. Géotechnique, 63(10), 857–870.

Boroughani, M., Hashemi, H., Hosseini, S. H., Pourhashemi, S., & Berndtsson, R. (2020). Desiccating Lake Urmia: A New Dust Source of Regional Importance. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17(9), 1483–1487.

Cao, Y., Guo, L., Chen, B., & Wu, J. (2021). Effect of Pre-Introduced Sodium Chloride on cement Hydration Process. Advances in Cement Research, 33(12), 526–539.

Cerato, A. B., Miller, G. A., Madden, M. E., Varnier, M. C., & Adams, A. (2011). Calcium-Based Stabilizer Induced Heave in Oklahoma Sulfate-Bearing Soils (Final Report – FHWA-OK-11-03). Oklahoma. Dept of Transportation.

Cheng, Y., Li, Z. guo, Huang, X., & Bai, X. hong. (2017). Effect of Friedel's Salt on Strength Enhancement of Stabilized Chloride Saline Soil. Journal of Central South University, 24(4), 937–946.

Consoli, N. C., da Fonseca, A. V., Cruz, R. C., & Silva, S. R. (2011). Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(11), 1126–1131.

Cuisinier, O., Le Borgne, T., Deneele, D., & Masrouri, F. (2011). Quantification of the Effects of Nitrates, Phosphates and Chlorides on Soil Stabilization with Lime and Cement. Engineering Geology, 117(3–4), 229–235.

Darsanj, S., Emami Tabrizi, M., & Constantinescu, A. (2026). Fatigue Performance of Cemented Aeolian Sands: Linking Material Structural Characteristics to Long-Term Subgrade Durability, Transportation Geotechnics, 56.

Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R., & Gouvenot, D. (2007). Comparison of Creep Behaviour and Fatigue Behaviour of Grouted Sand. Soils and Foundations, 47(2), 185–194.

Demirboğa, R., Türkmen, İ., & Karakoç, M. B. (2004). Relationship Between Ultrasonic Velocity and Compressive Strength for High-Volume Mineral-Admixtured Concrete. Cement and Concrete Research, 34(12), 2329–2336.

Duan, Z., Wang, J., Yan, X., Song, K., Zheng, L., & Zhang, M. (2023). Study on the Structure and Strength Characteristics of Loess under the Action of Sodium Sulfate. Environmental Science and Pollution Research International, 30(60), 125609–125627.

Elipe, M. G. M., & López-Querol, S. (2014). Aeolian sands: Characterization, Options of Improvement and Possible Employment in Construction - The State-of-the-art. Construction and Building Materials, 73, 728–739.

Emami Tabrizi, M., Halphen, B., Luong, M.P., & Eytard J.C., (2010). Experimental Detection of Local Instability in Materials, EPJ Web of Conferences 6, 13002.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]

Ismail, M. A., Joer, H. A., Randolph, M. F., & Meritt, A. (2002). Cementation of Porous Materials Using Calcite. Géotechnique, 52(5), 313–324.

Kahraman, S., & Yeken, T. (2008). Determination of Physical Properties of Carbonate Rocks from P-Wave Velocity. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(2), 277–281.

Keramat, A., Marivani, B., & Samsami, M. (2011). Climatic Change, Drought And Dust Crisis in Iran. World Academy of Science, Engineering and Technology, 6, 10–13.

Vice President for Strategic Planning and Supervision. (2008). Instructions for laboratory analysis of soil and water samples, Journal No. 467. (In persian)

Ladd, R. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. Geotechnical Testing Journal, 1(1), 16–23.

Luong, M.P., Emami Tabrizi, M., Halphen, B. & Eytard, J. (2007), Non-destructive Evaluation of the Stable Behavior of a Quasi-brittle Sandston, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, 081.

Mandal, T., Tinjum, J. M., & Edil, T. B. (2016). Non-Destructive Testing of Cementitiously Stabilized Materials Using Ultrasonic Pulse Velocity Test. Transportation Geotechnics, 6, 97–107.

Mitchell, J. K., & Dermatas, D. (1992). Clay Soil Heave Caused by Lime-Sulfate Reactions. In Innovations and uses for lime. ASTM International.

Karei, M. (2015). Sedimentological Study of Dust-Prone Areas in the Northwestern Peripheral Lands of Lake Urmia. Geological Survey and Mineral Explorations of Iran (GSI). (In persian).

Osula, D. O. A. (1993). Laboratory Trial of Soil-Sodium Chloride-Cement Stabilization for Problem Laterite. Journal of Transportation Engineering, 119(1), 149–158.

Puppala, A. J., Intharasombat, N., & Vempati, R. K. (2005). Experimental Studies on Ettringite-Induced Heaving in Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(3), 325–337.

Razeghi, H. R., Ghadir, P., & Javadi, A. A. (2022). Mechanical Strength of Saline Sandy Soils Stabilized with Alkali-Activated Cements. Sustainability (Switzerland), 14(20), 1–21.

Rica, H. C., Saussaye, L., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2016). Stabilization of a Silty Soil: Effects of Disruptive Salts. Engineering Geology, 208, 191–197.

Rollings, R. S., Burkes, J. P., & Rollings, M. P. (1999). Sulfate Attack on Cement-Stabilized sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(5), 364–372.

Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F., Leleyter, L., & Abdo, J. (2013). Influence of Chloride and sulfate Ions on the geotechnical Properties of Soils Treated with Hydraulic Binders. Road Materials and Pavement Design, 14(3), 551–569.

Shi, P., Yan, P., Yuan, Y., & Nearing, M. A. (2004). Wind erosion Research in China: Past, Present and Future. Progress in Physical Geography, 28(3), 366–386.

Song, C., Wang, C., Elsworth, D., & Zhi, S. (2022). Compressive Strength of MICP-Treated Silica Sand with Different Particle Morphologies and Gradings. Geomicrobiology Journal, 39(2), 148–154.

Yılmaz, T., & Ercikdi, B. (2016). Predicting the uniaxial Compressive Strength of cemented Paste Backfill from ultrasonic Pulse Velocity Test. Nondestructive Testing and Evaluation, 31(3), 247–266.

Zhang, T., Cao, D., Guo, C., & Wang, F. (2025). Mechanical Properties and reinforcement Mechanism Study of sulfate Saline Soil Solidified by Polyurethane and Water Glass. Case Studies in Construction Materials, 22(December 2024), e04328.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.2.1]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1013843]