



Performance Evaluation of Chlor-Alkali Process Waste in Marl Soil Stabilization with Emphasis on Unconfined Compressive Strength

Reza Mohammadzadeh^{a*}, Mehran Moallem^b, Alireza Dashti Rahmatabadi^b

^aDepartment of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

^bDepartment of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

*Corresponding Author: mohammadzadeh.r@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0000-3506-3368>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/03/25
Received in revised form:
2026/04/19
Accepted: 2026/04/26
Available online: 2026/05/21

Keywords:
Soil Stabilization,
Marl Soil,
Chlor-Alkali Process,
Waste Management,
Unconfined Compressive
Strength.

ABSTRACT

The growth of the petrochemical industry in Iran has resulted in the generation of substantial quantities of chemical waste, posing a significant environmental challenge in terms of waste management. Chlor-alkali process waste predominantly contains calcium carbonate and magnesium hydroxide, and its composition provides potential for beneficial reuse in various applications, including as a filler in construction materials, a neutralizing agent, and a stabilizing material for problematic soils. Marl soils are also highly sensitive to moisture variations and may experience substantial reductions in strength, with strength losses of up to 80% reported with increasing moisture content. Conventional soil stabilization methods, particularly the use of cement and lime, have limited environmental sustainability due to their high energy consumption and associated greenhouse gas emissions. Therefore, this study investigates the feasibility of utilizing chlor-alkali waste from Bandar Imam Khomeini as a low-cost stabilizing agent to improve the mechanical properties of marl soil. In this laboratory study, marl soil specimens were mixed with 30% chlor-alkali waste by dry weight, both with and without alkaline activators. The specimens were subsequently cured for 7 days and subjected to unconfined compressive strength (UCS) testing. The results showed that the addition of chlor-alkali waste increased the compressive strength from 90 kPa for the untreated control specimen to 123 kPa for the stabilized specimen, corresponding to a 35.66% improvement in strength. This enhancement in strength is attributed to the formation of hydrated calcium silicate and magnesium silicate phases resulting from pozzolanic reactions between the calcium and magnesium ions present in the waste and the silicate and aluminate components of the marl soil. In contrast, specimens containing alkaline activators exhibited a substantial reduction in strength, reaching 48.49 kPa, indicating the adverse effect of excessive alkalinity on the stabilization process. Based on the findings of this study, chlor-alkali process waste can provide a practical approach for the management and beneficial reuse of industrial waste while serving as an effective stabilizing material for marl soils.

Introduction

The rapid expansion of the oil, petrochemical, and chemical industries has contributed substantially to economic development and industrial growth but has also resulted in the generation of considerable quantities of industrial waste. The chlor-alkali process is one of the important industrial processes in which brine is electrolyzed to produce chlorine, sodium hydroxide, and hydrogen. These products are widely used in the production of pharmaceuticals, detergents, disinfectants, pesticides, plastics, and many other industrial products. However, the purification and demineralization of brine before electrolysis generates solid waste containing considerable amounts of calcium carbonate, magnesium hydroxide, sodium chloride, and other mineral constituents. Improper disposal of this waste can cause environmental problems and increase the burden on industrial waste-management systems. Marl is also considered a problematic soil because of its complex mineralogical composition and sensitivity to moisture variations. The simultaneous presence of clay minerals and calcium carbonate can significantly affect its mechanical behavior under wetting, drying, and loading conditions. Although marl may exhibit relatively high strength in a dry state, its strength can decrease considerably under saturated conditions, limiting its use in infrastructure projects. Chemical stabilization is widely used to improve the engineering properties of problematic soils because of its effectiveness, flexibility, and relatively low cost. Cement is one of the most common stabilizing materials; however, its production is energy-intensive and associated with considerable carbon dioxide emissions. Therefore, the reuse of industrial wastes as alternative stabilizing materials can provide both environmental and geotechnical benefits. Accordingly, this study investigated the feasibility of using chlor-alkali process waste generated in Bandar Imam Khomeini as a stabilizing agent for marl soil. The main objective was to evaluate the effect of the waste on the unconfined compressive strength (UCS) of marl and to determine whether this industrial by-product could serve as a more sustainable alternative to conventional stabilizing materials. The effect of an alkaline activator consisting of sodium hydroxide and sodium silicate was also examined.

Method

A laboratory-based experimental approach was adopted. Based on previous studies and the chemical composition of the chlor-alkali waste, particularly the presence of calcium carbonate and magnesium hydroxide, the waste was considered potentially suitable for marl stabilization. A waste content of 30% by dry weight was selected as an initial level for evaluating its stabilization performance. Three mixtures were prepared: untreated marl as the control specimen, marl containing 30% chlor-alkali waste, and marl containing 30% chlor-alkali waste with an alkaline activator. The dry materials were thoroughly mixed, after which water was added until a homogeneous mixture was obtained. The initial moisture content was set at 8%, corresponding to the dry side of the optimum moisture content obtained from compaction tests. The specimens were compacted to a dry density of 1.5 g/cm³, equivalent to approximately 84% of the maximum dry density. For the activated mixture, a 14 M sodium hydroxide solution was prepared and mixed with sodium silicate at an equal mass ratio. The resulting activator was added at a dosage corresponding to 50% of the mass of the chlor-alkali waste. The mixtures were compacted in cylindrical PVC molds measuring 5 cm in diameter and 10 cm in height in accordance with the requirements of ASTM D2166. Petroleum jelly was applied to the internal surfaces of the molds to facilitate demolding. After preparation, the specimens were placed in sealed plastic chambers to minimize moisture loss and cured for seven days at an ambient laboratory temperature of approximately 25 °C. Following curing, the specimens were removed from the molds and tested for unconfined compressive strength. Mean UCS values and standard deviations were subsequently determined.

Results

The results showed that adding 30% chlor-alkali process waste increased the mean UCS of marl from 90 to 123 kPa after seven days of curing, corresponding to a 35.66% improvement. This increase may be attributed to interactions between the calcium- and magnesium-bearing constituents of the waste and reactive mineral phases in the marl, potentially enhancing interparticle bonding and soil cohesion. However, the formation of C–S–H and M–S–H phases could not be experimentally verified because XRD and SEM analyses were not performed. In contrast, the addition of the alkaline activator reduced the UCS to 48.49 kPa. This reduction may be related to the high alkalinity and increased salinity resulting from the combined use of 14 M NaOH, sodium silicate, and the NaCl-rich waste (40.9% NaCl). Overall, direct application of chlor-alkali waste produced the most favorable mechanical performance, whereas alkaline activation had an adverse effect on strength development.

Conclusions

The findings demonstrate the potential of chlor-alkali process waste as a stabilizing material for marl soil. Incorporation of 30% waste by dry weight increased the seven-day UCS from 90 to 123 kPa, representing an improvement of approximately 35.66%. This improvement may be associated with interactions between calcium- and magnesium-bearing constituents of the waste and reactive mineral phases in the marl, potentially promoting the development of cementitious binding products. However, further mineralogical and microstructural analyses are required to confirm these mechanisms. In contrast, the alkaline activator composed of sodium hydroxide and sodium silicate reduced the UCS to 48.49 kPa, indicating that activation was not beneficial under the conditions investigated. Therefore, direct utilization of chlor-alkali waste, without alkaline activation, appears to be a more promising approach for marl stabilization. The reuse of this industrial waste can potentially reduce the volume of waste requiring disposal while decreasing dependence on conventional cementitious stabilizers. Considering the availability of chlor-alkali waste in southern Iran, particularly around Bandar Imam Khomeini, this approach may have practical potential for construction applications in the region. Nevertheless, further studies should investigate different waste contents, longer curing periods, durability under repeated wetting–drying cycles, and the leaching behavior of stabilized materials. XRD and SEM analyses are also recommended to identify reaction products and clarify the mechanisms governing strength development. Overall, the beneficial reuse of chlor-alkali process waste represents a potentially sustainable strategy for problematic-soil stabilization while simultaneously contributing to industrial waste management and more environmentally sustainable construction practices.



ارزیابی عملکرد پسماند فرآیند کلر - آلکالی در تثبیت خاک مارن با تأکید بر مقاومت فشاری تک محوری

رضا محمدزاده^{a*}، مهران معلمی^b، علیرضا دشتی رحمت آبادی^b

^aگروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^bگروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول: رضا محمدزاده mohammadzadeh.r@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رشد صنایع پتروشیمی در ایران حجم زیادی پسماند شیمیایی تولید کرده که مدیریت آن چالش محیط زیستی جدی است. پسماند فرآیند کلر-آلکالی عمدتاً حاوی کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم می باشد که به جهت مدیریت پسماند می توان از پتانسیل این پسماند در مواردی از جمله پرکننده مصالح ساختمانی، خنثی کننده مواد و همچنین تثبیت کننده خاک های مسئله دار استفاده کرد. خاک مارن نیز از است که با افزایش رطوبت تا ۸۰ درصد افت مقاومت نشان می دهد. روش های متداول تثبیت (سیمان و آهک) به دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه ای، پایداری زیست محیطی کمی دارند. این پژوهش امکان سنجی استفاده از پسماند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به عنوان تثبیت کننده کم هزینه برای بهبود خواص مکانیکی خاک مارن را بررسی می کند. در این مطالعه آزمایشگاهی، نمونه های خاک مارن با ۳۰ درصد وزنی پسماند کلر-آلکالی همراه و بدون فعال کننده های قلیایی ترکیب شده و پس از ۷ روز عمل آوری، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن پسماند به خاک مارن، موجب افزایش مقاومت فشاری از ۹۰ کیلو پاسکال در نمونه شاهد به ۱۲۳ کیلو پاسکال در نمونه تثبیت شده گردیده که بیانگر بهبود ۳۵/۶۶ درصدی می باشد. این افزایش مقاومت به تشکیل فازهای هیدراته سیلیکات کلسیم و سیلیکات منیزیم در اثر واکنش های پوزولانی بین یون های کلسیم و منیزیم موجود در پسماند با سیلیکات ها و آلومینات های خاک مارن نسبت داده می شود. در مقابل، نمونه های حاوی فعال کننده های قلیایی با افت مقاومت به ۴۸/۴۹ کیلو پاسکال مواجه شدند که حاکی از اثر نامطلوب قلیائیت بالا بر فرآیند تثبیت است. بر اساس یافته های این پژوهش، پسماند فرآیند کلر-آلکالی ضمن ارائه راهکاری عملی برای مدیریت پسماندهای صنعتی، می تواند به عنوان ماده ای مؤثر در تثبیت خاک های مارن استفاده شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱	
کلیدواژه ها: تثبیت خاک، خاک مارن، فرآیند کلر - آلکالی، مدیریت پسماند، مقاومت فشاری تک محوری خاک.	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع صنایع نفت و پتروشیمی نقش بسزایی در توسعه اقتصادی کشورها ایفا کرده‌است، اما در عین حال منجر به تولید حجم بالایی از آلاینده‌ها و پسماندهای صنعتی شده‌است (Das et al., 2023; Oladimeji et al., 2025; Yeshiwas et al., 2024). بر اساس گزارش‌های موجود، صنایع پتروشیمی سالانه میلیون‌ها تن پسماند جامد تولید می‌کنند که بخش قابل توجهی از آن بدون مدیریت اصولی دفع می‌شود. این پسماندها به دلیل دارا بودن ترکیبات شیمیایی خطرناک نظیر فلزات سنگین، نمک‌های قلیایی و مواد سمی، اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارند (Hsu et al., 2019; Das et al., 2023). مدیریت نادرست این پسماندها در کشورهای در حال توسعه، یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی محسوب می‌شود. یکی از فرآیندهای مهم در صنایع پتروشیمی، فرآیند کلر-آلکالی است که با استفاده از الکترولیز محلول آب‌نمک، محصولات اصلی از جمله کلر، هیدروکسید سدیم و هیدروژن را تولید می‌کند (Aziz et al., 2017; Crook & Mousavi, 2016; Lakshmanan & Murugesan, 2014). کلر و هیدروکسید سدیم جزو ده ماده شیمیایی برتر و پرمصرف در جهان هستند که در تولید طیف گسترده‌ای از محصولات شامل داروها، مواد شوینده، دئودورانت‌ها، ضد عفونی‌کننده‌ها، علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها و پلاستیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Contreras et al., 2025; Ito & Manabe, 2022).

این فرآیند علاوه بر تولید مواد سودمند، منجر به ایجاد پسماندهایی غنی از کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم می‌شود که دفع غیراصولی آن‌ها مشکلات زیست‌محیطی جدی به همراه دارد. پسماندهای حاوی ترکیبات قلیایی و نمک‌ها، در صورت دفن غیراصولی، می‌توانند منابع آب زیرزمینی را آلوده کرده و تعادل شیمیایی خاک را بر هم بزنند. این فرآیند علاوه بر تولید مواد سودمند، منجر به تولید پسماندهای جامدی نیز می‌شود که بخش عمده آن‌ها در مرحله تصفیه و نمک‌زدایی آب‌نمک، پیش از ورود محلول به سلول‌های الکترولیز، ایجاد می‌شوند. در این مرحله، ناخالصی‌های موجود در آب‌نمک حذف شده و پسماندی موسوم به پسماند جامد آب‌نمک^۱ تولید می‌شود که عمدتاً حاوی ترکیباتی نظیر کربنات کلسیم، هیدروکسید منیزیم و مقادیر متغیری از کلرید سدیم است. این پسماند معمولاً به محل‌های دفن صنعتی منتقل می‌شود و مدیریت نامناسب آن می‌تواند پیامدهای محیط زیستی به همراه داشته باشد (De Carvalho Izidoro et al., 2021; Brinkmann et al., 2014).

در بخش نمک‌زدایی^۲ و تغلیظ آب نمک مراحل مختلفی جهت خالص‌سازی چرخه آب نمک وجود دارد. یکی از آن‌ها حذف مواد جامد معلق از آب نمک در خروجی کلاریفایرها می‌باشد که توسط فیلتر پرس^۳ انجام می‌شود که از رایج‌ترین سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌باشد (Ali et al., 2025; de Carvalho Izidoro et al., 2021). در این فرآیند عمل جداسازی جامد از مایع را تحت فشار انجام داده و رسوبات جمع‌آوری شده به شکل کیک با گل نمک جدا می‌گردد. رسوبات جمع‌آوری شده در بخش نمک‌زدایی فرآیند کلر-آلکالی به مقدار ۱۳۳ کیلوگرم در ساعت جمع‌آوری می‌شوند (Aziz et al., 2017; Brinkmann et al., 2014; O'Brien et al., 2005).

از طرفی دیگر، خاک مارن از خاک‌های مسئله‌دار به شمار می‌رود که به علت وجود حدود ۳۵ تا ۶۵ درصد کربنات کلسیم و کانی‌های رسی در ترکیبات خاک، رفتار مکانیکی پیچیده‌ای در شرایط مختلف به همراه دارد (Ouhadi & Yong, 2003). در مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های مسئله‌دار به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که به دلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی یا کانی‌شناسی خود، رفتار مهندسی نامطلوبی از جمله کاهش مقاومت، تغییر حجم، نشست یا ناپایداری در برابر تغییرات رطوبت یا بارگذاری از خود نشان می‌دهند. خاک مارن نیز به دلیل حضور هم‌زمان

¹ Brine Sludge

² Salt Washing

³ Filter press

کانی‌های رسی و کربناته، در مواجهه با تغییرات رطوبتی مستعد افت مقاومت و تخریب ساختار بوده و از این رو در زمره خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرد. وجود کانی‌های رسی فعال در خاک مارن، آن را به یکی از حساس‌ترین خاک‌ها از نظر واکنش به رطوبت تبدیل کرده است (Ebrahimi et al., 2025). خاک مارن با وجود مقاومت بسیار بالای آن در حالت خشک، مقاومت آن در حالت اشباع تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. لذا فقدان مقاومت فشاری مناسب خاک مارن در شرایط آب و هوایی مختلف باعث محدودیت استفاده از این خاک در پروژه‌های زیرساختی مانند بزرگراه و راه آهن شده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که خاک مارن در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، رفتار ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد که لزوم تثبیت آن را دوجندان می‌کند (Jamalimoghadam et al., 2024; Moallemi et al., 2025; Vakili et al., 2025).

روش‌های گوناگونی برای تثبیت خاک‌های ضعیف ارائه شده‌است که شامل روش‌های مکانیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و الکتریکی می‌باشد. در میان آن‌ها، تثبیت شیمیایی به دلیل انعطاف‌پذیری، دوام و هزینه کمتر، روشی رایج و مؤثر محسوب می‌شود. در این روش، با افزودن مواد معدنی یا پوزولانی، واکنش‌هایی مشابه با واکنش‌های سیمانی در خاک رخ می‌دهد که منجر به تشکیل فازهای سیمانی از جمله C-S-H و C-A-S-H با افزایش مقاومت خاک می‌شود (Vu et al., 2018; Wang et al., 2024). تثبیت شیمیایی خاک مارن با استفاده از افزودنی به عنوان یک روش اقتصادی و انعطاف‌پذیر با رویکرد اصلاح فیزیکی و مکانیکی خاک همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تثبیت شیمیایی می‌تواند موجب بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های مارنی شود. اوحدی و قلندرزاده اثر افزودن آهک و سیمان را بر خاک مارن بررسی کردند و نشان دادند که نوع ماده تثبیت‌کننده بر عملکرد خاک تثبیت‌شده تأثیرگذار است (Ouhadi & Ghalandarzadeh, 1991). همچنین العمودی و همکاران با بررسی تثبیت خاک مارن با آهک هیدراته و سیمان پرتلند، عملکرد بهتر نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان را نسبت به آهک گزارش کردند (Al-Amoudi et al., 2010). فیوضی و همکاران (Feyozi et al., 2016) نیز اثر مقادیر مختلف آهک و زمان‌های مختلف عمل‌آوری شامل ۱، ۷ و ۱۵ روز را بر پارامترهای مقاومت برشی خاک مارن بررسی کردند و نشان دادند که مقدار حداکثر چسبندگی خاک، در عمل‌آوری ۷ روزه و با ۸ درصد آهک حاصل شد تثبیت‌شده هستند. محمدرضایی و همکاران (Mohammad Rezaei, 2022) به بررسی اثر متاکائولن و خاکستر پوسته برنج بر روی خاک مارن پرداختند. ایشان درصد‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزودنی را بررسی نمودند. و دریافتند بیشترین مقاومت برشی در ۳۰ درصد افزودنی حاصل شده است. آبیان و همکاران (Aiban, et al., 1998; al., 1995) بررسی پارامترهای تراکم، درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک در خاک‌های مارن بدون افزودنی و تثبیت شده پرداختند. ایشان دریافتند نمونه‌های متراکم شده با سمت تر و خشک منحنی تراکم نسبت به نمونه‌های متراکم شده با رطوبت بهینه، تراکم‌پذیری بیشتر و مقاومت کمتری دارند. به طور کلی مطالعات گذشته حاکی از تأثیر نوع و مقدار ماده تثبیت‌کننده، شرایط رطوبتی، وزن مخصوص خشک و زمان عمل‌آوری در فرآیند تثبیت شیمیایی خاک مارن دارند. همچنین در میان افزودنی‌های خاک مارن به جهت تثبیت، سیمان جزو رایج‌ترین مواد می‌باشد. با توجه به تولید هر تن سیمان به انرژی زیادی برای پخته شدن ۲/۸ تن مواد خام نیاز است که تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن را در هوا پخش می‌کند، تولید سیمان با مسائل چالش‌برانگیز، تأثیرات خطرناک بر محیط زیست همراه است. بر اساس مطالعات، صنعت سیمان حدود ۵ تا ۸ درصد از انتشار جهانی دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص داده است که این موضوع لزوم یافتن جایگزین‌های پایدار را آشکار می‌سازد (Lacheheb et al., 2025). با توجه به پیامدهای محیط‌زیستی تولید سیمان، از جمله انتشار دی‌اکسید کربن و همچنین با هدف توسعه پایدار جهت عدم استفاده از منابع، یافتن افزودنی پایدار، ارزان‌قیمت و دوستدار محیط زیست در راستای توسعه پایدار امری ضروری است (Bansal & Jain, 2026; Inweer et al., 2025; Vakili et al., 2024). امروزه استفاده از پسماندهای

صنعتی به عنوان جایگزین سیمان، یکی از رویکردهای نوین در تثبیت خاک محسوب می‌شود که ضمن کاهش هزینه‌ها، به مدیریت پسماند نیز کمک می‌کند (Luo et al., 2025).

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، بررسی اثر استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به عنوان ماده تثبیت‌کننده بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک مارن است. در این راستا، با افزودن پسماند کلر-آلکالی به خاک مارن، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت‌شده مورد بررسی قرار گرفته و میزان بهبود مقاومت خاک در اثر افزودن پسماند ارزیابی می‌شود. نوآوری و اهمیت این پژوهش، بررسی قابلیت استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی به عنوان یک ماده تثبیت‌کننده برای بهسازی خاک مارن، هم‌زمان با ارائه رویکردی برای استفاده مجدد از یک پسماند صنعتی است که می‌تواند در کاهش مشکلات ناشی از دفع این پسماند و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک مؤثر باشد.

روش‌شناسی پژوهش

روش انجام پژوهش به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. ابتدا با مطالعه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با تثبیت خاک، این نتیجه حاصل شد که با توجه به وجود ترکیبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم در پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی، می‌توان از این پسماند به عنوان تثبیت‌کننده خاک مارن استفاده کرد. لذا برای سنجیدن میزان مقاومت فشاری حاصل شده از تثبیت نیاز است نمونه‌هایی مختلفی ساخته و با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت فشاری بررسی شود. در ادامه به مراحل مختلف روش انجام و مواد مورد استفاده پژوهش پرداخته شده است.

خاک مارن

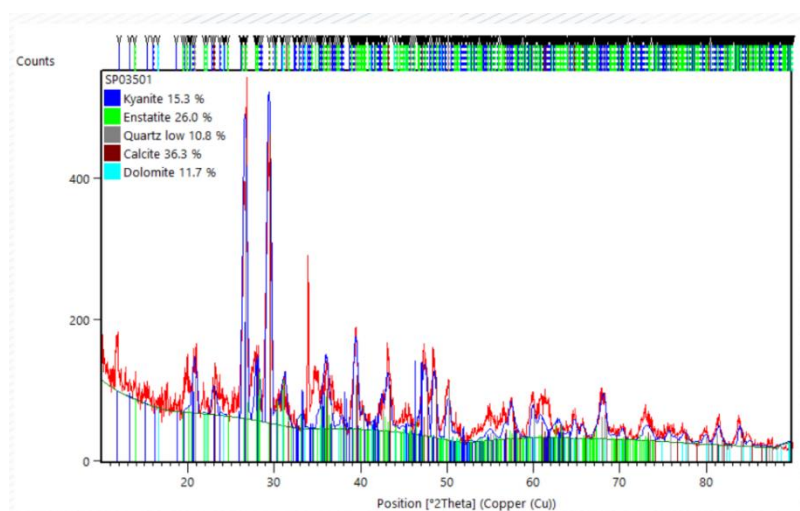
در این پژوهش از خاک مارن منطقه شهرک قدس شهر قم واقع در استان قم استفاده و با مشخصات فیزیکی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱، این خاک از نوع رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مارن پژوهش

Table 1. Physical Characteristics of the Marl Soil Studied

مشخصات	حد خمیری (درصد)	حد روانی (درصد)	نشانه خمیری (درصد)	دانسپته در محل (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	وزن مخصوص (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت بهینه (درصد)	چگالی مخصوص ذرات جامد (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	رده بندی خاک بر اساس نتایج دانه بندی
مقدار	۴۱	۲۱/۱	۱۸/۹	۱/۶۱	۱/۷۸	۱۴٪	۲/۵۸	CL
استاندارد	ASTM-D4318			ASTM-D1556	ASTM-D698		ASTM-D854	ASTM-D422

به منظور شناسایی ترکیبات کانی‌شناسی و فازهای بلوری خاک مارن مورد استفاده در این تحقیق، آنالیز XRD انجام شد. نتایج این آنالیز در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. آنالیز XRD خاک مارن بدون افزودنی
Figure 1. XRD analysis of marl soil without additives

جدول ۲. مواد تشکیل دهنده‌ی خاک مارن

Table 2. Marl Soil Constituents

ماده تشکیل دهنده	فرمول شیمیایی	درصد (%)
Calcite	CaCO_3	۳۶/۳
Quartz	SiO_2	۱۰/۸
Enstatite	MgSiO_3	۲۶
Kyanite	Al_2SiO_5	۱۵/۳
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	۱۱/۷

پسماند فرآیند کلر-آلکالی

پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی پتروشیمی امام خمینی حاوی ترکیبات ناخالصی از جمله کلرید سدیم، کربنات کلسیم، هیدروکسید منیزیم و فلزات سنگین می‌باشد. این پسماند به عنوان تثبیت کننده خاک مارن مورد استفاده قرار گرفته‌است. این پسماند بدین جهت جایگزین سیمان شده‌است که مانند سیمان آلودگی‌های محیط زیستی در فرآیند تولید ندارد و از منابع دست اول استفاده نمی‌کند و همچنین کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم با نسبت ۴ به ۱ در پسماند نهایی فرآیند موجود می‌باشد. به منظور تاثیرگذاری بیشتر و اختلاط بهتر با خاک، ابتدا این ماده در اون در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس پسماند آسیاب شد و به شکل پودر مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳ ترکیبات و درصد وزنی هر یک از مواد موجود در پسماند نهایی فرآیند کلر-آلکالی و نمونه‌ای از پسماند خشک‌شده در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۳. مشخصات شیمیایی پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی

Table 3. Chemical Characteristics of Chlor-Alkali Process Waste in Bandar Imam Khomeini

ترکیبات	کلرید سدیم	کربنات کلسیم	منیزیم هیدروکسید	منعقد کننده	پوشش فیلترها	آب	سایر
درصد وزنی	۴۰/۹	۱۰/۹	۵/۴	۱/۲	۹/۷	۲۸/۰۵	۸ ۳/۵



شکل ۲. پسماند فرآیند کلر-آلکالی به صورت پودر خشک

Figure 2. Chlorine-alkali process waste as dry powder

فعال‌ساز

به جهت فعالسازی اثرگذاری ترکیبات از فعال‌ساز ترکیبات بر پایه هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) استفاده شده‌است.

مواد و روش‌ها

طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه خاک

با توجه به روش تحقیق در این پژوهش، مقدار ۳۰ درصد وزنی پسماند با استناد به نتایج مطالعات پیشین در زمینه تثبیت خاک‌های ماری با مواد افزودنی معدنی و پوزولانی، به‌عنوان یک سطح مناسب اولیه برای بررسی عملکرد پسماند انتخاب شد (Moallemi et al., 2025; Mohammad Rezaei, 2022). مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس اصول پیشنهادی FHWA (۲۰۱۳)، ابتدا مصالح خشک شامل خاک مارن و پسماند فرآیند کلر-آلکالی به‌طور یکنواخت با یکدیگر مخلوط شدند و سپس مقدار آب موردنظر به مخلوط افزوده شد و اختلاط تا دستیابی به توزیع یکنواخت رطوبت ادامه یافت. رطوبت اولیه نمونه‌ها برابر ۸ درصد در نظر گرفته شد که بر اساس نتایج آزمایش تراکم در سمت خشک رطوبت بهینه قرار داشت. انتخاب این مقدار رطوبت با هدف شبیه‌سازی شرایط نسبتاً محافظه‌کارانه و بحرانی انجام شد. نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک ۱.۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل حدود ۸۴ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه، متراکم شدند. در نمونه‌های حاوی فعال‌کننده قلیایی، ابتدا محلول NaOH با غلظت ۱۴ مولار تهیه شد و سپس محلول NaOH و سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) با نسبت وزنی برابر با یکدیگر مخلوط شدند. محلول فعال‌کننده حاصل به میزان ۵۰ درصد وزنی نسبت به مقدار پسماند به مخلوط افزوده شد. پس از آماده‌سازی و اختلاط کامل، مخلوط‌ها در قالب‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از لوله PVC با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر قرار داده و متراکم شدند. این ابعاد مطابق با استاندارد مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها ASTM D2166 تعیین شد. قالب‌ها به‌صورت دوکپه‌ای طراحی شدند تا خروج نمونه پس از عمل‌آوری با حداقل دست‌خوردگی انجام شود. برای اتصال دو بخش قالب از بست‌های فلزی و پلاستیکی استفاده شد و سطح داخلی قالب‌ها نیز پیش از آماده‌سازی نمونه با لایه‌ای نازک از وازلین پوشانده شد تا از چسبندگی نمونه به قالب و آسیب هنگام خروج جلوگیری شود. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها در محفظه پلاستیکی قرار داده شدند تا از

تبخیر رطوبت جلوگیری شود و به مدت ۷ روز در دمای محیط آزمایشگاه، حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد، عمل‌آوری شدند. در جدول ۴، مشخصات نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول ۴. مشخصات نمونه‌های ساخته شده

Table 4. Specifications of the fabricated samples

شماره نمونه	وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد رطوبت (برحسب درصد وزن خاک)	درصد پسماند (برحسب درصد وزن خاک)	زمان عمل‌آوری (روز)	فعال‌کننده قلیایی (سودپرک و سیلیکات سدیم)
۱	۱/۵	۸	۰	۰	-
۲	۱/۵	۸	۳۰	۷	-
۳	۱/۵	۸	۳۰	۷	دارد

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری^۱ طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شد. بارگذاری به صورت کنترل کرنش^۲ و با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه و حداکثر جابجایی ۱۰ میلی‌متر و با استفاده از سه‌محوری سیکلیک الکترومکانیکال شرکت MTM ثبت و در شکل ۳ نمایش داده شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، یک روش آسان و سریع برای تعیین مقاومت زهکشی نشده خاک‌های چسبنده است. مقاومت فشاری تک‌محوری بدست‌آمده از این آزمایش، در پژوهش‌های متعدد شاخصی برای تعیین تنش کل وارده و نتیجه بهسازی در نظر گرفته می‌شود. نوع بارگذاری به صورت کنترل کرنش قرار داده شد و جابه‌جایی و زمان بارگذاری با توجه به سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه، ۱۰ میلی‌متر و ۶۰۰ ثانیه تعیین شده است.



شکل ۳. دستگاه ۳ محوری سیکلیک مورد استفاده در این پژوهش

Figure 3. Three-axis cyclic device used in this research

^۱ Uniaxial compressive strength (UCS)

^۲ Displacement Control

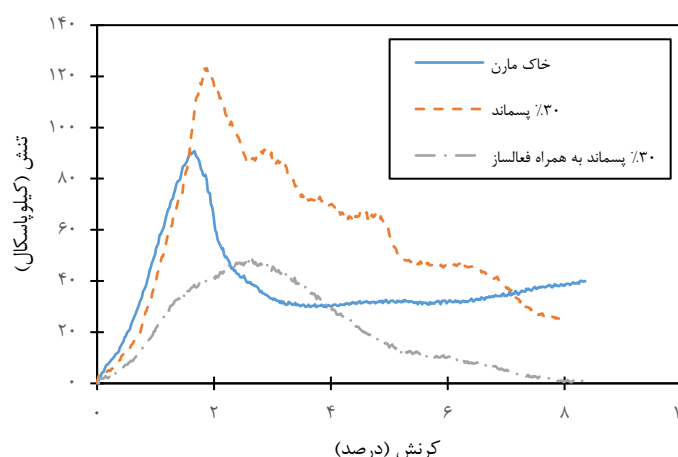
یافته‌ها و بحث

مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها

طبق نتایج بدست‌آمده و مطابق شکل ۴، مقاومت فشاری نمونه خاک مارن بدون تثبیت کننده برابر با ۹۰ کیلوپاسکال است. شکل ۴، نشان دهنده منحنی تنش کرنش نمونه‌های ساخته‌شده می باشد.

افزودن پسماند فرآیند کلر-آلکالی به عنوان تثبیت‌کننده، به دلیل ترکیبات کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم، موجب افزایش مقاومت تا ۱۲۳ کیلوپاسکال شده‌است. در نمونه فعال‌کننده قلیایی حاوی سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم، مقاومت نهایی کاهش‌یافته و به ۴۸/۴۹ کیلوپاسکال رسیده‌است. در این پژوهش، استفاده از فعال‌کننده قلیایی با هدف افزایش انحلال فازهای واکنش‌پذیر موجود در خاک مارن و تسریع فرآیند تثبیت انجام شد. با این حال، نتایج نشان داد که استفاده از فعال‌کننده در سامانه مورد بررسی منجر به کاهش مقاومت فشاری گردید. این رفتار احتمالاً به ترکیب شیمیایی پسماند مورد استفاده مربوط است؛ به‌گونه‌ای که پسماند حاوی ۴۰/۹ درصد کلرید سدیم بوده و استفاده همزمان از محلول ۱۴ مولار NaOH و سدیم سیلیکات (با نسبت وزنی برابر) می‌تواند موجب افزایش غلظت یون‌های سدیم و شوری محیط واکنش شود. علاوه بر این، ممکن است قلیائیت بالای محیط موجب انحلال بخشی از ترکیبات کربناته یا تشکیل فازهایی با قابلیت چسبندگی کمتر شده باشد که در نهایت به کاهش مقاومت فشاری منجر شده است. با این وجود، با توجه به اینکه در این پژوهش آزمون‌های ریزساختاری نظیر SEM و XRD انجام نشده است، این موارد صرفاً به‌عنوان تفسیرهای علمی محتمل مطرح شده و تأیید قطعی آن‌ها مستلزم انجام مطالعات تکمیلی است. به طور کلی، افزایش مقاومت فشاری در بهترین حالت معادل ۳۵/۶۶ درصد نسبت به نمونه‌ی اولیه تثبیت‌نشده بود. افزایش مقاومت فشاری می‌تواند ناشی از تثبیت با پسماند به دلیل واکنش‌های میان یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} موجود در پسماند با سیلیکات‌ها و آلومینات‌های خاک مارن می‌باشد که منجر به تشکیل پیوندهایی از جمله C-S-H و M-S-H شده‌است. این پیوندها باعث فاز چسبندگی بین ذرات، کاهش تخلخل و بهبود ساختار خاک شده‌است. جدول ۵ به تفسیر نمونه‌ها و نتایج پرداخته شده است.

مطابق جدول ۵ مقاومت فشاری تک‌محوری متوسط نمونه‌های خاک مارن، خاک مارن حاوی ۳۰ درصد پسماند و خاک مارن حاوی ۳۰ درصد پسماند به همراه فعال‌کننده قلیایی، به ترتیب ۹۰، ۱۲۳ و ۴۸/۴۹ کیلوپاسکال به‌دست آمد. انحراف معیار نتایج به ترتیب ۲/۸۳، ۳/۵۱ و ۳/۲۶ بدست آمد.



شکل ۴. منحنی تنش کرنش نمونه‌های ساخته‌شده

Figure 4. Stress-strain curves of the fabricated samples

جدول ۵: نمونه‌ها و نتایج

Table 5: Samples and Results

نمونه	مقاومت فشاری میانگین (Kpa)	انحراف معیار (Kpa)	تعداد آزمونه
خاک مارن بدون افزودنی	۹۰	۲/۸۳	۲
خاک مارن + ۳۰ درصد پسماند	۱۲۳	۳/۵۱	۳
خاک مارن + ۳۰ درصد پسماند + فعال کننده	۴۸/۴۹	۳/۲۶	۳

تحلیل رفتار مکانیکی نمونه‌ها

در نمونه‌های تثبیت‌شده با پسماند، تغییر شکل پلاستیک در مرحله‌ی بارگذاری به‌صورت یکنواخت‌تر مشاهده شد. این امر بیانگر افزایش پیوستگی ساختاری در خاک است. همچنین، مقاومت نهایی در اثر عمل‌آوری ۷ روزه، افزایش قابل ملاحظه‌ای به همراه داشته‌است که نشان از تداوم واکنش‌های شیمیایی در طول زمان عمل‌آوری می‌باشد.

مقایسه با پژوهش‌های مشابه

برای ارزیابی بهتر عملکرد پسماند فرآیند کلر-آلکالی، نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات مشابه بین‌المللی مقایسه گردید. در جدول ۶ مقایسه میان پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده نشان داده شده است.

جدول ۶. مقایسه میان پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های انجام شده

Table 6. Comparison of the present study with other conducted studies

ردیف	نوع پسماند تثبیت‌کننده	نوع خاک	مقاومت فشاری تک محوره قبل از تثبیت (kPa)	مقاومت فشاری تک محوره بعد از تثبیت (kPa)	دامنه افزایش مقاومت گزارش شده (%)	نتایج	منابع
۱	پسماند فرآیند کلر- آلکالی (حاوی کربنات کلسیم و منیزیم هیدروکسید)	خاک مارن (رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین)	۹۰	۱۲۳	۳۵/۶۶	پیوندهای C-S- ، M-S-H و H افزایش مقاومت فشاری، افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، پرسیدن منافذ	پژوهش حاضر
۲	Brine Sludge (پسماند آب نمک فرایند کلر- آلکالی)	Marine Clay (خاک رس دریایی نرم)	۸/۵ (مقاومت نمونه ۳۰ درصد افزودنی در زمان عمل آوری صفر)	۱۱/۳ (مقاومت نمونه ۳۰ درصد افزودنی در زمان عمل آوری صفر)	۳۲/۹	در Brine Sludge درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ موجب افزایش مقاومت و بهبود خواص مهندسی خاک شد؛ افزودن ۳٪ آهک افزایش بیشتری در مقاومت ایجاد کرد.	Kuriakose et al.

۳	پسماند فرآیند کلر-آلکالی (حاوی کربنات کلسیم و منیزیم هیدروکسید)	خاک مارن (رس غیرآلی با پلاستیسیته کم و بافت نیمه سنگین)	۹۰	۱۲۳	۳۵/۶۶	پیوندهای C-S، M-S-H و H افزایش فشاری، افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل آوری، پرشدن منافذ	پژوهش حاضر
۴	پسماند صنعتی غنی از منیزیم	خاک تورب	۵۲	۲۸۰-۲۱۰	۴۰۰-۳۰۰ درصد	بهبود پیوسته با لایه‌چینی و زمان کیورینگ؛ افزایش چسبندگی و تراکم‌پذیری.	Almuaythir et al.
۵	سرباره فولاد، خاکستر بویلر، پسماند بتن	خاک رسی و ماسه‌ای	۳۰۰-۲۰۰	۹۰۰-۶۰۰	۲۵۰-۲۰۰ درصد	اثر ترکیبی پرکنندگی و تشکیل C-S-H؛ مناسب برای خاک‌های ضعیف.	Wacinski et al.
۶	خاکستر پوسته برنج (RHA) و باگاس (Bagasse Ash)	خاک رسی انبساطی	۱۵۰	۱۲۰۰-۶۵۰ درصد	۷۰۰-۳۰۰ درصد	واکنش‌های پوزولانی با C-S-H و کاهش تورم	Gidebo et al.
۷	ترکیب پسماندهای صنعتی دوده، سرباره، لجن و خاکستر	خاک رسی انبساطی	۱۶۰	۱۲۵۰-۹۸۰ درصد	۷۰۰-۵۰۰ درصد	افزایش مقاومت و دوام تشکیل C-S-H و Ettringite.	Zimar et al.

مطابق جدول ۶ مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از پسماندهای کشاورزی و صنعتی به‌عنوان مواد تثبیت‌کننده می‌تواند، بسته به نوع و ترکیب ماده، مقدار مصرف و شرایط آماده‌سازی و عمل‌آوری، موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت خاک شود. در مطالعات مرور شده توسط گیدبو و همکاران (Gidebo et al., 2023) افزایش مقاومت در برخی مطالعات استفاده‌کننده از پسماندهای کشاورزی در محدوده ۳۰۰ تا ۷۰۰ درصد و در برخی موارد ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ درصد گزارش شده است. همچنین، زیمار و همکاران (Zimar et al., 2023) افزایش قابل‌توجه مقاومت خاک را در اثر استفاده از ترکیبی از پسماندهای صنعتی گزارش کردند. اختلاف میان این نتایج و نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به تفاوت در ماهیت و ترکیب شیمیایی مواد تثبیت‌کننده، میزان مواد واکنش‌پذیر، مقدار مصرف و شرایط آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها نسبت داد. کیریاکوز و همکاران (Kuriakose et al., 2024) اثر پسماند جامد آب‌نمک حاصل از صنعت کلر-آلکالی برای بهسازی خاک رسی نرم بررسی کردند. این پسماند حاوی مقدار قابل توجهی (نزدیک به ۳۲/۵ درصد از مواد تشکیل دهنده) کربنات کلسیم بود و نتایج نشان داد که افزودن این پسماند می‌تواند موجب بهبود برخی خواص مهندسی و افزایش مقاومت فشاری خاک شود. همچنین، نویسندگان تشکیل ترکیبات پوزولانی را به‌عنوان یکی از سازوکارهای احتمالی بهبود رفتار خاک مطرح کردند و نشان دادند که افزودن مقدار کمی آهک و افزایش زمان عمل‌آوری می‌تواند افزایش مقاومت را تقویت کند. در پژوهش حاضر، پسماند فرآیند کلر-آلکالی حاوی ۴۰/۹ درصد کلرید سدیم، ۱۰/۹ درصد کربنات کلسیم و ۵/۴ درصد هیدروکسید منیزیم بوده و نمونه‌ها با ۳۰ درصد پسماند، تراکم ۸۴ درصد و رطوبت سمت خشک رطوبت بهینه تهیه و پس از ۷ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. تفاوت در ترکیب شیمیایی و واکنش‌پذیری مواد تثبیت‌کننده و همچنین تفاوت در شرایط تراکم،

رطوبت و زمان عمل‌آوری می‌تواند از عوامل مؤثر بر اختلاف میزان افزایش مقاومت در مطالعات مختلف باشد. با توجه به حضور ترکیبات کلسیمی و منیزیمی در پسماند و وجود ترکیبات سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی در خاک مارن، تشکیل احتمالی محصولات سیمانی از جمله $C-S-H$ و $M-S-H$ می‌تواند یکی از سازوکارهای مؤثر در بهبود مقاومت باشد. با این حال، از آنجا که در پژوهش حاضر آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM انجام نشده است، تشکیل این فازها به صورت تجربی تأیید نشده و بررسی دقیق سازوکار واکنش‌ها به مطالعات تکمیلی نیاز دارد. در پژوهش حاضر، استفاده از پسماند فرآیند کلر-آلکالی موجب افزایش $35/66$ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوره خاک مارن نسبت به خاک طبیعی شد. اگرچه این میزان افزایش در مقایسه با برخی مطالعات پیشین کمتر است، نتایج نشان می‌دهد که پسماند مورد بررسی، تحت شرایط آزمایش حاضر، قابلیت بهبود مقاومت خاک مارن را دارد. همچنین، استفاده مجدد از این پسماند می‌تواند از منظر کاهش نیاز به دفع و بهره‌گیری مجدد از یک ماده زائد صنعتی دارای پتانسیل زیست‌محیطی باشد. از طرفی در دسترس بودن و هزینه پایین این پسماند استفاده از آن را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای تثبیت خاک در پروژه‌های محلی توجیه‌پذیر می‌سازد.

از منظر زیست‌محیطی، استفاده از پسماند کلر-آلکالی می‌تواند با کاهش مصرف سیمان و استفاده مجدد از یک پسماند صنعتی همراه باشد. با این حال، با توجه به احتمال وجود عناصر بالقوه آلاینده در این نوع پسماندها، ارزیابی قابلیت آشفویی آنها ضروری است. ژانگ و همکاران در بررسی یک نوع لجن تصفیه آب‌نمک حاصل از فرایند کلر-آلکالی، مقادیر TCLP جیوه حدود $200-400$ میکروگرم بر لیتر ($\mu g/L$) را برای پسماند اولیه گزارش کردند. بنابراین، اگرچه استفاده از پسماند مورد مطالعه می‌تواند از نظر کاهش مصرف سیمان و بازیافت پسماند دارای مزیت بالقوه باشد، تأیید قطعی ایمنی زیست‌محیطی آن نیازمند ارزیابی قابلیت آشفویی عناصر بالقوه آلاینده با آزمون‌هایی نظیر TCLP است (Zhuang et al., 2004).

نتیجه‌گیری

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی این نتیجه حاصل شد که افزودن 30 درصد وزنی از پسماند فرآیند کلر-آلکالی بندر امام خمینی به خاک مارن باعث افزایش حدود $35/66$ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری 7 روزه در مقایسه با نمونه خاک مارن بدون افزودنی 7 روزه شده است. این افزایش مقاومت به دلیل تشکیل احتمالی فازهای $C-S-H$ (کلسیم-سیلیکات-هیدرات) و $M-S-H$ (منیزیم-سیلیکات-هیدرات) به دلیل وجود کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم در پسماند می‌باشد که باعث ایجاد پیوندهای محکم بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش چسبندگی، کاهش تخلخل و بهبود یکپارچگی ساختار خاک شده است. با این حال، به دلیل عدم انجام آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM، تشکیل این فازها در پژوهش حاضر به صورت تجربی تأیید نشده است. در نمونه دیگر که از فعال‌کننده ی قلیایی سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم استفاده شده، کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری به دلیل واکنش‌های نامطلوب بین ترکیبات معدنی پسماند و ذرات خاک مشاهده گردید که نشان‌دهنده اثر منفی قلیائیت بالا بر فرآیند تثبیت می‌باشد.

لذا پسماند فرآیند کلر-آلکالی می‌تواند به عنوان یک گزینه بالقوه، پایدار و اقتصادی برای جایگزینی بخشی از مواد سیمانی در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار مورد توجه قرار گیرد. این امر باعث کاهش استخراج منابع طبیعی و کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان می‌شود. همچنین استفاده از روش استفاده مجدد از این پسماند در تثبیت خاک، باعث مدیریت پسماند صنعتی و حفاظت بیشتر از محیط‌زیست می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عمرانی مناطق جنوبی کشور که دسترسی به این پسماند به راحتی میسر است، از این روش به عنوان یک راهکار عملی و کم‌هزینه بهره گرفته شود. با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر، انجام مطالعات

تکمیلی در زمینه بررسی اثر درصدهای مختلف پسماند، زمان‌های طولانی‌تر عمل‌آوری، دوام خاک تثبیت‌شده در چرخه‌های تر و خشک، و همچنین بررسی رفتار نشت و آزادسازی احتمالی آلاینده‌ها پیشنهاد می‌شود. انجام آزمون‌های ریزساختاری نظیر XRD و SEM نیز می‌تواند به شناسایی محصولات واکنش و تبیین دقیق‌تر سازوکار بهبود یا کاهش مقاومت کمک کند. پژوهش حاضر نشان داد که رویکرد استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی در بهسازی خاک، ضمن کاهش بار محیط زیستی، گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار در صنعت ساخت‌وساز کشور محسوب می‌شود.

References

- Ali, B. T. I., Ismail, M., Wahyudi, I., Mustafa, A., Syari'at, A., Parmiyatni, S., Bakhtiar, Y., Wahyuono, B. A., Saputra, H., & Santoso, I. (2025). Eco-Efficient Sea Salt Purification via Coupled Brine Washing and Elutriation Technology: A Pathway to High-Purity Salt for Sustainable Chlor-Alkali Industry. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101295>
- Aiban, S.A. (1995). Strength and compressibility of Abqaiq marl, Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 39(3-4), 203-215.
- Aiban, S.A., Wahhab, H.I.A.A., Al-Amoudi, O.S.B. & Ahmed, H.R., (1998). Performance of a stabilized marl base: a case study. *Construction and building materials*, 12(6-7), 329-340.
- Al-Amoudi, O.S.B., Khan, K., Al-Kahtani, N.S. (2010). Stabilization of a Saudi calcareous marl soil, *Construction and Building Materials*, vol. 24, No. 10, 1848-1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019>
- ASTM International. (2024). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil (ASTM D2166/D2166M-24). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2166_D2166M-24
- ASTM International. (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils (ASTM D422-63(2007)e2). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R98>
- ASTM International. (2023). Standard test methods for specific gravity of soil solids by the water displacement method (ASTM D854-23). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM International. (2021). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (ASTM D698-12(2021)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM International. (2024). Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method (ASTM D1556/D1556M-24). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1556_D1556M-24
- ASTM International. (2017). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-17e1). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- Aziz, H. A., Ghazali, M. F., Yusoff, M. S., & Hung, Y.-T. (2017). Waste Treatment and Management in Chlor-Alkali Industries. In *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Management* (pp. 611-655). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22213-4>
- Bansal, N., & Jain, R. (2026). Recycling and potential use of industrial cementitious waste in expansive soil stabilization: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, e70535. <https://doi.org/10.1002/ep.70535>
- Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Filz, G.M., Terashi, M., Yang, D.S., Collin, J.G. and Geotechnica, S., 2013. Federal highway administration design manual: Deep mixing for embankment and Foundation Support. (Report No. FHWA-HRT-13-046). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://ntlrepository.blob.core.windows.net/lib/61000/61600/61675/13046.pdf>
- Brinkmann, T., Santonja, G. G., Schorch, F., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2014). Best available techniques (BAT) reference document for the production of chlor-alkali. JRC (Joint Research Center EU), JRC91156, 25-39. <https://doi.org/10.2791/13138>
- Contreras, R. R., Almarza, J., Rincon, L., & Ruiz, C. (2025). Green sodium hydroxide for industrial purposes. A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(1), 114972. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114972>

- Crook, J., & Mousavi, A. (2016). The chlor-alkali process: A review of history and pollution. *Environmental Forensics*, 17(3), 211-217. <https://doi.org/10.1080/15275922.2016.1177755>
- Das, S., Sultana, K. W., Ndhlala, A. R., Mondal, M., & Chandra, I. (2023). Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: exploring green technology for remediation. *Environmental health insights*, 17, 11786302231201259. <https://doi.org/10.1177/11786302231201259>
- de Carvalho Izidoro, J., Fungaro, D. A., Viviani, L. C., & da Costa Silva, R. (2021). Brine sludge waste from a Chlor-alkali industry: characterization and its application for non-structural and structural construction materials. *Journal of Applied Materials and Technology*, 3(1), 1-7. <https://doi.org/10.31258/Jamt.3.1.1-7>
- Ebrahimi, M. J., Yazdandoust, M., & Khodaparast, M. (2025). Cyclic and post-cyclic behavior of Qom marl, Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 192, 109209. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109209>
- Feyozi, M., Vakili, A., & Panjestooni, A. (2016). Investigation of the effect of marl soil improvement with lime on shear strength parameters. *International Conference of Civil Engineering* (pp. 801-806). <https://civilica.com/doc/506802> (In Persian)
- Federal Highway Administration. (2013). Geosynthetic reinforced soil performance testing – Axial load deformation relationships (Report No. FHWA-HRT-13-066). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/13066/13066.pdf>
- Gidebo, F.A., Yasuhara, H. & Kinoshita, N. Stabilization of expansive soil with agricultural waste additives: a review. *Geo-Engineering* 14, 14 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00194-x>
- Hsu, C.-Y., Chiang, H.-C., Chen, M.-J., Yang, T.-T., Wu, Y.-S., & Chen, Y.-C. (2019). Impacts of hazardous metals and PAHs in fine and coarse particles with long-range transports in Taipei City. *Environmental Pollution*, 250, 934-943. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.038>
- Inweer, M. A., Salem, H. A., Khalid, K. A., Nassar, Y. F., Salem, M. A., Akasha, A. A., Amer, K. A., Elmnifi, M., Rekik, S., & Khaleel, M. (2025). Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya. *Discover Concrete and Cement*, 1(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00037-1>
- Ito, H., & Manabe, A. (2022). Chlor-alkali electrolysis. In *Electrochemical power sources: Fundamentals, systems, and applications* (pp. 281-304). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00011-2>
- Jamalimoghadam, M., Vakili, A. H., & Ajalloeian, R. (2024). Wetting–drying impact on geotechnical behavior of alkali-stabilized marl clay with glass powder. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(6), 205. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01515-4>
- Jamshidi, M., Mokhberi, M., Vakili, A. H., & Nasehi, A. (2023). Effect of chitosan bio-polymer stabilization on the mechanical and dynamic characteristics of marl soils. *Transportation Geotechnics*, 42, 101110. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101110>
- Kuriakose, M., Athira, K.N., Abraham, B.M., Cyrus, S. (2024). Utilization of Brine Sludge to Improve the Strength and Compressibility Characteristics of Soft Clays. In: Jose, B.T., Sahoo, D.K., Puppala, A.J., Reddy, C.N.V.S., Abraham, B.M., Vaidya, R. (eds) *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 4. IGC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 479. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1753-8_11
- Lacheheb, L. K., Bouteldja, F., Morvan, M., & Breul, P. (2025). Stabilisation of Marl Soil for Use in Compacted Embankments by Eggshell Quicklime and Zeolite. *Civil and Environmental Engineering*, 21(2), 990-1004. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0075>
- Lakshmanan, S., & Murugesan, T. (2014). The chlor-alkali process: work in progress. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0630-6>
- Luo, J., Yu, F., Chen, X., & Li, S. (2025). Comparative sustainability investigation on a novel industrial-waste-based soil stabilizer and cement based on life cycle assessment. *Scientific Reports*, 15(1), 19936. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04809-4>
- Mildawati, R., Dewi, S. H., & Hidayah, E. H. (2025). Stability Analysis of Clay Soil Plus Sand, Cement and DIFA Soil Stabilizer Additives Using Unconfined Compressive Strength (UCS)

- Testing. International Journal of Innovation in Mechanical Construction and Energy, 2(2), 58-67. <https://repository.uir.ac.id/id/eprint/27550>
- Moallemi, M., Khodaparast, M., & Yazdandoust, M. (2025). Cyclic and post-cyclic behavior of stabilized marl soil for pavement engineering applications. Transportation Engineering, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100413>
- Mohammad Rezaei, M. H. (2022). Improvement of Qom marl soil using rice husk ash and metakaolin additives (Master's thesis). University of Qom. (In Persian)
- O'Brien, T. F., Bommaraju, T. V., & Hine, F. (2005). Handbook of chlor-alkali technology: volume I: fundamentals, volume II: brine treatment and cell operation, volume III: facility design and product handling, volume IV: plant commissioning and support systems, volume V: corrosion, environmental issues, and future development. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/b113786>
- Oladimeji, T., Oyedemi, M., Emetere, M., Agboola, O., Adeoye, J., & Odunlami, O. (2024). Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. Heliyon, 10(23). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370>
- Ouhadi, V., & Ghalandarzadeh, A. (1991). Identification and improvement of engineering properties of marl soils along the northern shores of the Persian Gulf and the Oman Sea (Master's thesis). Faculty of Engineering, University of Tehran. (In Persian)
- Ouhadi, V., & Yong, R. (2003). The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. Engineering geology, 70(3-4), 365-375. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00104-2)
- Vakili, A. H., Keskin, İ., Salimi, M., Kol, H. Ş., Onur, M. İ., Abdullah, A. I. A., & Awam, A. H. M. (2024). Dynamic response, durability, and carbon footprint analysis of the marl clay treated with sodium lignosulfonate as a sustainable-environmentally friendly approach. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 135, 103658. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103658>
- Vakili, A. H., Salimi, M., Keskin, I., Onur, M. I., Tabaroei, A., & Dadgar, M. (2025). An enhanced approach to red mud (RM) sustainable management and utilization for marl stabilization considering the dynamic response and durability analysis. Case Studies in Construction Materials, 22, e04084. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04084>
- Vu, B. T., Tran, V. Q., Nguyen, Q. D., Ngo, A. Q., Nguyen, H. N., Nguyen, H. V., & Zhu, H. (2018). A geochemical model for analyzing the mechanism of stabilized soil incorporating natural pozzolan, cement and lime. Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering: Volume 1. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97112-4_191
- Waciński W, Kuligowski K, Olejarczyk M, Zając M, Urbaniak W, Cyske W, Kazimierski P, Tylingo R, Mania S, Cenian A. (2024). Recycling of Industrial Waste as Soil Binding Additives-Effects on Soil Mechanical and Hydraulic Properties during Its Stabilisation before Road Construction. Materials, 17(9), 2000. <https://10.3390/ma17092000>
- Wang, D., Wang, Z., & Wang, H. (2024). Feasibility and performance assessment of novel framework for soil stabilization using multiple industrial wastes. Construction and Building Materials, 449, 138228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138228>
- Yeshiwas, A. G., Bayeh, G. M., Tsega, T. D., Tsega, S. S., Gebeyehu, A. A., Alamrie Asmare, Z., Anteneh, R. M., Ejigu, A. G., Ahmed, A. F., & Yigzaw, Z. A. (2025). Scoping review on mitigating the silent threat of toxic industrial waste: eco-rituals strategies for remediation and ecosystem restoration. Environmental health insights, 19, 11786302251329795. <https://doi.org/10.1177/11786302251329795>
- Zhuang, J. M., Lo, T., Walsh, T., & Lam, T. (2004). Stabilization of high mercury contaminated brine purification sludge. Journal of hazardous materials, 113(1-3), 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.06.003>
- Zimar, Z., Robert, D., Giustozzi, F. et al. Use of industrial wastes for stabilizing expansive clays in pavement applications: durability and microlevel investigation. Acta Geotech. 19, 6259–6287 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02298-9>