Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

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

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Improvement the behaviors of a clay soil contaminated with dimethyl phthalate by magnesium oxide and hydrated lime as additives

Soroush Mahdavian[1], Ali Raeesi Estabragh[2]✉, Shima Azadeh Ranjbar [3]

1. M.Sc, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mahdaviansoroush@ut.ac.ir
2. Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: raeesi@ut.ac.ir
3. M.Sc, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Shima.azadeh.ran@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 August 2025
Accepted 18 November 2025

Keywords:
Clay soil, Contaminated soil, Dimethyl phthalate, Lime, Magnesium oxide.

ABSTRACT

This research study investigated the impact of dimethyl phthalate (DMP) on the physical and mechanical properties of clay soil through experimental testing. Additionally, the impact of hydrated lime and magnesium oxide on improving the properties of clay soil was investigated. The contaminated soil was artificially produced in the laboratory. Natural and contaminated soils were mixed with the above agents at percentages of 5.0%, 10.0% and 15.0%, respectively. The experimental test programme for this study comprised: Atterberg limits, compaction, uniaxial compression tests (UCS) and scanning electron microscopy (SEM). Samples for the UCS tests, both with and without additives, were prepared using the static compaction method and tested at curing times of 7, 14 and 28 days. The results showed that, in general, the Atterberg limit, compaction parameter (maximum dry unit weight) and UCS values for the contaminated soil were lower than for the natural soil. The results also indicated a reduction in UCS values for a mixture of contaminated soil and 10% hydrated lime or magnesium oxide. A comparison of the final strength values of samples made from a mixture of contaminated soil and 10% hydrated lime or magnesium oxide showed that the strength was 34.4% and 63.8% lower than that of a mixture with 5% of these additives at the same curing time. The E50 values were calculated from the stress-strain curves of the different tests. Additionally, the SEM results showed that changes in the properties of the mixture prepared from these agents and natural or contaminated soil were due to a chemical reaction between the soil and the additives.

Introduction

Improving the properties of clay soils contaminated with organic pollutants is an important issue in the fields of geotechnical and environmental engineering, given the detrimental effects that these compounds have on the soil's physical and mechanical properties. DMP is one such pollutant that can harm the environment due to its toxicity. There are many methods for stabilising and improving the behaviour of this type of soil. Among conventional soil stabilisation techniques, chemical additives such as lime and cement have long been used due to their availability and satisfactory performance in natural soils. However, their effectiveness is reduced in soils contaminated with organic compounds, as these contaminants prevent pozzolanic reactions between lime and clay minerals. Estabragh et al. (2022; 2025) stabilised a clay soil contaminated with glycerol using MgO and activated GGBS with MgO. They reported that they had managed to improve the behaviour of soil contaminated with glycerol. Nasiri et al. (2025) investigated the effect of hydrated lime on stabilising clay

Cite this article: Mahdavian, S., Raeesi Estabragh, A., Azadeh Ranjbar, S., (2025). Improvement the behaviors of a clay soil contaminated with dimethyl phthalate by magnesium oxide and hydrated lime as additives. Journal of Engineering Geology, 19 (3), 430-461. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1016072

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1016072

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

soil contaminated with crude oil. They performed a number of tests with different percentages of lime and curing times, and the results were satisfactory. Other researchers, such as Unluer and Al-Tabbaa (2011), Jin et al. (2015), and Estabragh et al. (2024), have used MgO as an additive to improve the properties of various clay soils. They found that MgO can improve soil properties and replace cement.The main aim of this study is to compare the performance of MgO and lime as sustainable, innovative stabilisers for improving the physical and mechanical properties of clay soil contaminated with DMP. The effect of each additive on the behaviour of the contaminated soil was examined at different percentages of additive and different curing times by conducting a program of experimental tests.

Material and methods

A clay soil was purchased from a local supplier and its physical and mechanical properties were determined according to ASTM standards. The grain-size distribution results revealed that the soil was composed of 2% sand, 45% silt and 53% clay. Based on the Atterberg limits and the grain size distribution, the soil was classified as a low-plasticity clay (CL) according to the USCS. The specific gravity of the solids was found to be 2.7, while the optimum moisture content and maximum dry density of the natural soil were found to be 17.88% and 16.94 kN/m³, respectively. X-ray diffraction analysis confirmed the presence of kaolinite and montmorillonite minerals. Chemical tests were performed on soil samples, and the results are shown in Table 1.Contaminated soil was artificially created in the laboratory by mixing soil with 0.003 mg of DMP per kg of soil. Lime and MgO were selected as additives. These additives were used as stabilisers at percentages of 5%, 10% and 15% by dry weight. The natural or contaminated soil was mixed with these additives by hand. Atterberg limits and standard Proctor compaction tests were performed on these soil mixtures. Samples for the UCS test were prepared from these materials using static compaction. UCS tests were conducted on the samples at curing times of 7, 14 and 28 days, in accordance with ASTM D1632-07. Scanning electron microscopy (SEM) tests were performed on the samples to examine microstructural changes and the formation of the soil and cementitious phases.

Table 1. Soil chemical characteristics

Chemical properties	value
PH	8.9
EC ($\mu mhos/cm$)	10.74
K^+ (meq/l)	0.33
CL^-(meq/l)	60
SO_4^{2-} (meq/l)	83
HCO_3^- (meq/l)	4
Co_3^{2-} (meq/l)	0.6
$CaCo_3$ (meq/l)	10.2
Ca^{2+} (meq/l)	24
Mg^{2+} (meq/l)	10
Oc^*	0.11%

Results and discussion

A total of Atterberg limit, compaction, unconfined compressive strength (UCS) and scanning electron microscopy (SEM) tests were performed on samples of uncontaminated and contaminated soil, as well as mixtures of these soils with different percentages of additives, according to the corresponding ASTM standards.. The Atterberg results showed that

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

DMP contamination decreased the liquid limit from 48.3% to 44.48% and the plastic limit from 26.2% to 26.4%, while the plasticity index decreased from 22.1% to 18%. Adding MgO and lime to the both natural and contaminated soils altered the consistency limits; the plastic limit increased as the additive content increased.

The results of the standard compaction tests for the natural and contaminated soils and the mixtures of these with different percentages of magnesium oxide and lime are presented in Table (2). According to Table (2), the maximum dry unit weight and optimum moisture content for the natural soil are 16.94 kN/m³ and 17.88%, respectively, but for contaminated soil, these values are 16.53 kN/m³ and 18.5% respectively.

Table 2. Compaction properties of samples containing lime and magnesium oxide

Sample	Lime (%)	Magnesium Oxide (%)	Maximum dry unit weight (kN/m^3)	water content (%)
Natural soil	0	0	16.94	17.88
Contaminated soil	0	0	16.53	18.5
Natural Soil - lime	5	0	16.61	19.38
	10	0	16.36	19.5
	15	0	15.78	21.46
Contaminated soil mixed with lime	5	0	16.48	18.5
	10	0	16.03	19.4
	15	0	15.71	21.4
Natural Soil - magnesium oxide	0	5	16.44	16.94
	0	10	16.22	16.59
	0	15	16.13	16.21
Contaminated soil mixed with magnesium oxid	0	5	16.26	18.74
	0	10	16.20	18.45
	0	15	16.01	17.38

Fig (1) shows the UCS results for natural and contaminated soil. It is seen from this Figure that the final strength of both soils is nearly the same (about 141 kPa). As can be seen from this figure, the final strength of both soils is almost identical (approximately 141 kPa). Fig. 2 shows that adding lime and MgO to natural soil increases its final strength. The higher the percentage of additives and the longer the curing time, the higher the strength achieved. Comparing the results for the two additives also shows that lime is more effective than MgO at increasing the strength of natural soil.The results of the study on the effect of lime on the strength of contaminated soil indicate that, for a given percentage of lime, the increase in the final strength of contaminated soil is less than that of natural soil under the same conditions. Surprisingly, the strength of stabilised contaminated soil with 10% lime was lower than that with 5% lime. This trend of variation in strength is also seen in stabilised contaminated soil with MgO, particularly at 10% of this additive. This may be due to incomplete hydration reactions and the formation of cementing material, as the surface of some particles is covered by DMP, preventing reactions between the soil and the additives.

The SEM images in Fig. 3 indicate that DMP altered the soil fabric by promoting edge-to-edge and edge-to-face flocculation. In stabilised samples, cementitious gel formation, such as brucite and due to MgO (Fig. 3e), and CSH and CAH, which are hydration products of lime, reduced the voids in the natural soil. Microstructural improvements were similar for both stabilisers, but more pronounced in the 10% lime samples, consistent with the strength results.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

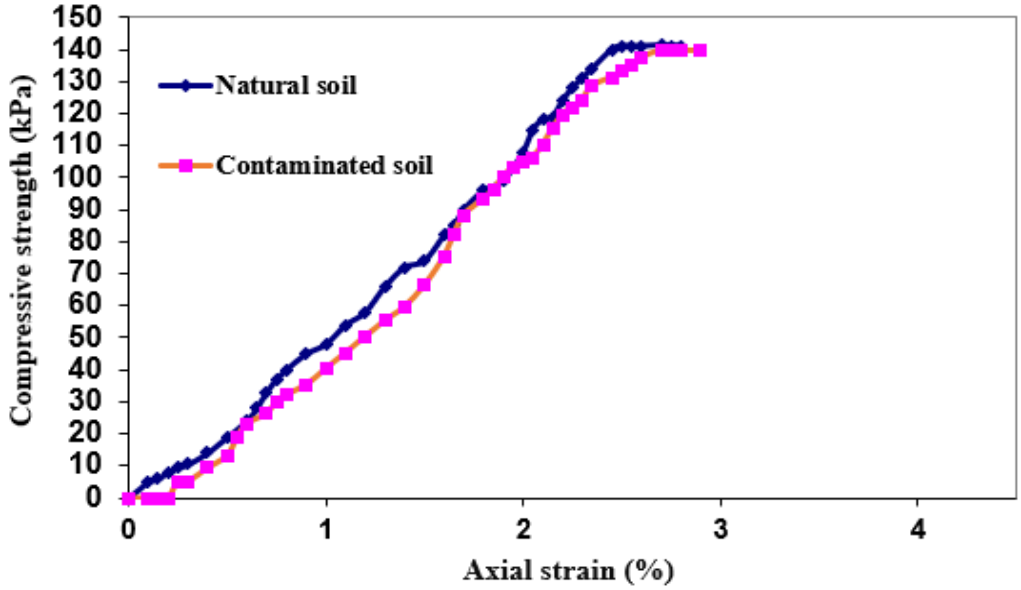


Fig. 1. Stress-strain diagram for natural soil and soil contaminated with dimethyl phthalate

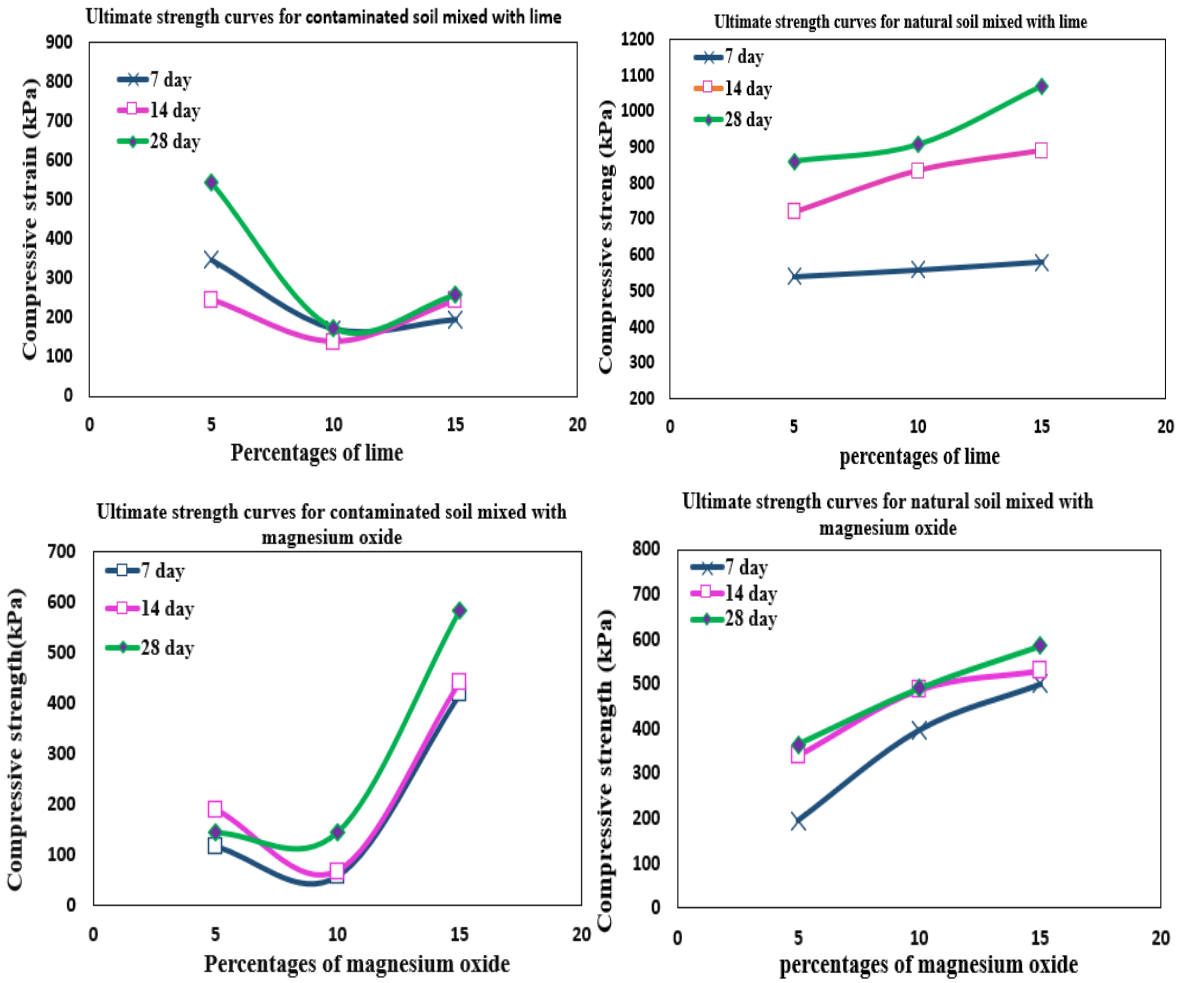


Fig. 2. Ultimate strength curves for natural soil and contaminated soil mixed with lime and magnesium oxide

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

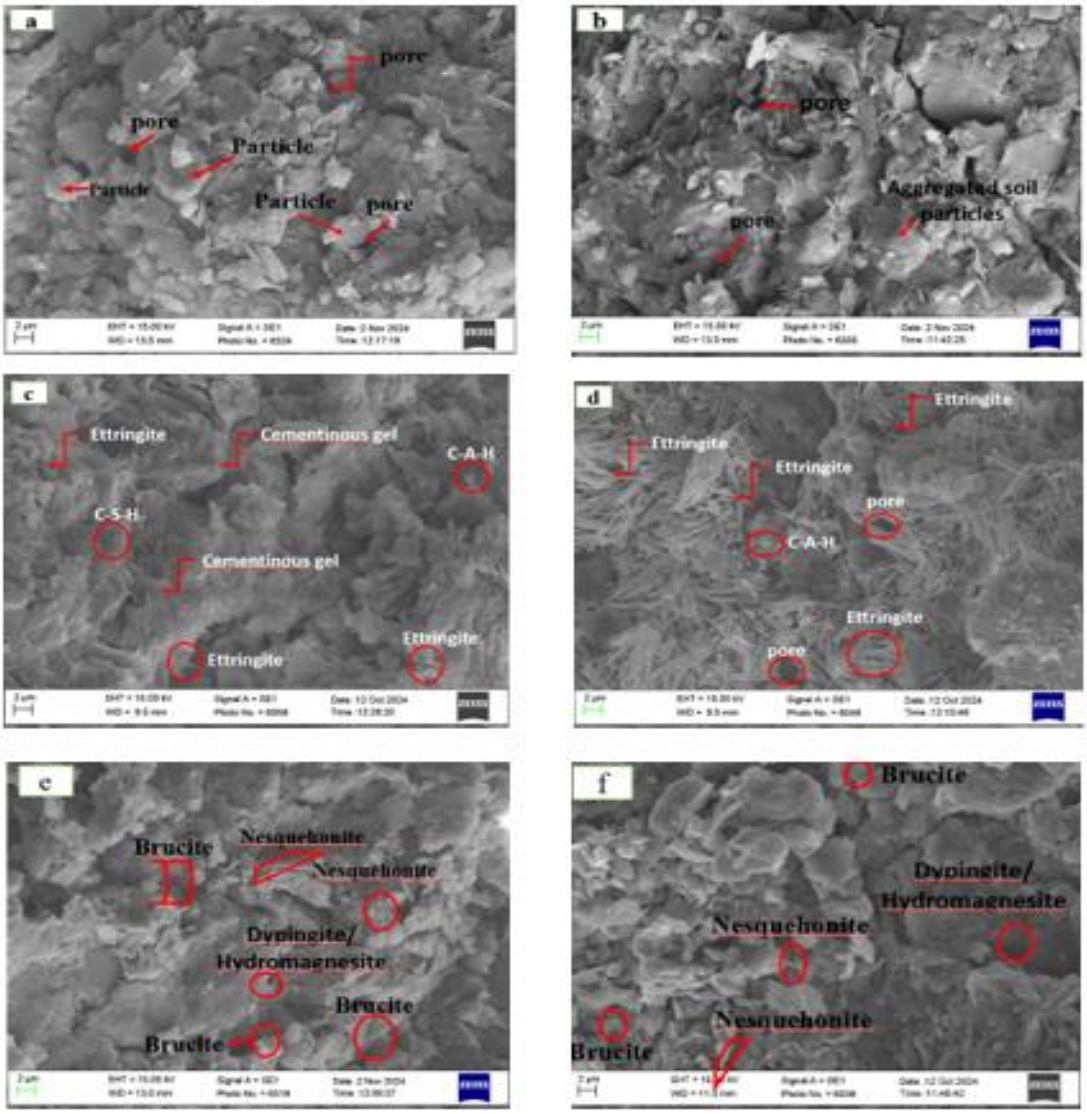


Fig. 3. SEM images of samples a) natural soil b) contaminated soil c) natural soil-lime d) contaminated soil-lime e) natural soil-magnesium oxide f) contaminated soil-magnesium oxide

As shown in Fig (3-a), the natural soil exhibits a flocculated structure, with very little space observed between the particles. The soil particles are positioned next to one another without any chemical bonding.

Figure 3(b) illustrates the change in soil structure after the addition of DMP. A comparison with natural soil shows that the size of the void spaces between the particles has changed. Adding DMP to the soil causes the particles to stick together, forming larger particles. As explained, the dielectric constant of DMP is lower than that of water. The lower dielectric constant of dimethyl phthalatecontributes to the formation of a flocculated structure, allowing the particles to bond together and create larger particles. Fig (3-c) shows the structure of the natural soil mixture with 10% Lime. The addition of lime induces pozzolanic reactions between the Ca^{++} ions and the silicates and aluminates that were released from the clay, resulting in the formation of gels such as CSH and CAH. These gels (see Figs 3-c and d), cause the particles to adhere to each other by increasing the curing time they are changed to a cohesive and hardened that causes increasing the strength of soil sample. Fig (3-d) shows that in the soil contaminated with DMP, the presence of this substance around the lime particles hinders the hydration reactions between

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

lime and clay particles. Consequently, the formation of CSH and CAH gels is reduced, leading to an increase in void spaces compared to the natural-lime soil condition. Fig (3-e) illustrates the addition of magnesium oxide to the contaminated soil. As indicated, the space between particles has increased in comparison with the mixture of natural soil and MgO, which is led to the reduction of strength.

Conclusion

The stabilisation of DMP-contaminated clay soil using lime and magnesium oxide (MgO) was evaluated through consistency, compaction, uniaxial compressive strength (UCS) and scanning electron microscopy (SEM) tests at different curing times and percentages of additives. DMP contamination changes the soil's physical and mechanical properties. Both additives improved the behaviour of the soil, with strength increasing with the percentage of additives and the length of the curing time. At a given percentage of additives, stabilised natural soil exhibited greater strength than contaminated soil, likely due to chemical reactions between the soil particles and the additives. Lime exhibited superior performance to MgO, particularly at higher concentrations and longer curing times. The strength variation for contaminated soil at 5% additive is similar to that for natural soil, but at 10%, the strength trend is lower than with 5%. The SEM results confirmed that the development of strength was associated with microstructural densification and cementitious bonding. Based on these findings, it can be concluded that lime is an effective and sustainable additive for stabilising DMP-contaminated clay soils.Adding lime to natural and contaminated soils decreases maximum dry unit weight and increases optimum moisture content during compaction. Additionally, the inclusion of lime increases the strength of natural soil and the E50 value. The extent of this increase depends on the percentage of lime used and the curing time. However, in the case of contaminated soil, adding lime decreases its strength.The addition of magnesium oxide to natural soil alters its compaction characteristics, resulting in a decrease in maximum dry unit weight and optimum moisture content. However, incorporating magnesium oxide into natural soil enhances the strength and E50 values of the samples. Comparing the strength changes in contaminated and natural soils shows that contaminated soil has lower strength and E50 values at fixed percentages and curing times. Specifically, adding 10% magnesium oxide reduces the strength of contaminated soil, whereas adding 15% increases its strength.The results of the SEM tests indicate that the observed changes in the mechanical and physical properties of natural and contaminated soil are due to a series of chemical reactions. These reactions are caused by the materials produced during the various stages of hydration involving the additive, the soil and the contaminant.

دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

دانشگاه خوارزمی

بهسازی خاک رسی آلوده به دی متیل فتالات با افزودنی‌های منیزیم اکسید و آهک هیدراته

سروش مهدویان [۱]، علی رئیسی استبرق [۲]✉، شیما آزاده رنجبر [۳]

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:mahdaviansoroush@ut.ac.ir
۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:raeesi@ut.ac.ir
۳. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Shima.azadeh.ran@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

کلیدواژه‌ها:
آهک، خاک آلوده، خاک رسی، دی متیل فتالات، منیزیم اکسید.

چکیده

در این تحقیق اثر آلاینده دی‌متیل‌فتالات بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رسی و امکان بهسازی آن با استفاده از دو ماده افزودنی آهک هیدراته و منیزیم اکسید با انجام آزمایشات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. خاک رسی به صورت مصنوعی با ماده دی‌متیل‌فتالات در آزمایشگاه آلوده گردید. مواد افزودنی آهک و منیزیم‌اکسید با درصدهای وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ به خاک طبیعی و خاک آلوده اضافه و مخلوط گردید. آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رسی آلوده شده به دی‌متیل‌فتالات در این تحقیق شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تک محوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) روی نمونه‌های مختلف می‌باشد. نمونه‌های مقاومتی به روش تراکم استاتیکی تهیه شدند و آزمایشات مقاومتی در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه صوررت گرفت. نتایج نشان داد که افزودن دی‌متیل‌فتالات به منجر کاهش مقادیر حدود اتبرگ، پارامترهای تراکمی (وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه) و مقاومت فشاری خاک در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. نتایج مقاومت فشاری نشان داد افزودن ۱۰٪ از آهک و یا منیزیم‌اکسید سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود به عنوان مثال در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز برای ۱۰٪ از آهک و منیزیم‌اکسید سبب کاهش مقاومت نمونه‌های خاک آلوده به ترتیب به میزان ۴۳/۴٪ و ۶۳/۸٪ نسبت به ۵٪ از این مواد افزودنی می‌گردد. علاوه بر این، مقایسه نتایج نمونه‌های بهسازی شده با یکدیگر نشان داد که برای درصدهای بالای افزودنی منیزیم‌اکسید و یا آهک سبب بهسازی خاک آلوده می‌گردد و همچنین مقادیر E_{50} برای آزمایش‌های مقاومتی در حالات مختلف محاسبه گردید. نتایج SEM هم نشان‌دهنده آن است که واکنش‌های شیمیایی بین ماده افزودنی و خاک صورت گرفته است.

مقدمه

آلاینده به‌طور کلی به عنوان یک ترکیب شیمیایی بیان می‌شود که قابلیت ایجاد تهدید در کوتاه‌مدت یا بلندمدت برای زندگی انسان یا محیط زیست را دارا است (Estabragh et al., 2014). آلاینده‌ها معمولاً به دو گروه آلی و غیر آلی تقسیم‌بندی می‌شوند (Swartjes, 2011). منشأ آلاینده‌های آلی معمولاً مشتقات نفت و صنایع وابسته به آن مانند صنایع پتروشیمی و غیره است (Reed, 2013). یکی از آلاینده‌های آلی استرهای فتالات می‌باشد که تقریباً یک قرن است که به عنوان نرم کننده در رنگ‌ها، چسب‌ها و در طیف گسترده‌ای از محصولات (Polyvinyl PVC(chloride مانند لباس‌ها، سیم‌ها در سراسر جهان استفاده می‌شوند (Bui et al., 2017). فتالات‌ها از مواد پر مصرف در صنعت می‌باشد. به علت استفاده جهانی از پلاستیک‌های دارای پلاستی‌ساز، فتالات‌ها در تمامی محیط‌هایی که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، شناسایی شده‌اند (Giam et al., 1984). افزایش غلظت PAEs (Phthalate

استناد: مهدویان، س.، رئیسی استبرق، ع.، آزاده رنجبر، ش. (۱۴۰۴). بهسازی خاک رسی آلوده به دی متیل فتالات با افزودنی‌های منیزیم اکسید و آهک هیدراته. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۴۳۰-۴۶۱. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1016072

ناشر: دانشگاه خوارزمی.

© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

(esters در خاک، از طریق تماس با پوست و مصرف محصولات غذایی که در خاک آلوده رشد می‌کنند موجب خطر بالایی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کنند (Net et al., 2015). آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده و مرکز ملی نظارت بر محیط زیست آلاینده PAEs را به عنوان آلاینده‌های اولویت‌دار درج نموده‌اند (Wu et al., 2007).

برای پاکسازی آلاینده از خاک‌ها روش‌های مختلفی، مانند: روش گیاه‌پالایی (Phytoremediation)، حرارتی (Thermal treatment)، شست و شو (Washing)، الکتروکنتیک (Electrokinetic) و تثبیت و جامدسازی (S/S) (Stabilization and solidification) وجود دارد. فرآیند تثبیت و جامدسازی معمولاً باعث کاهش انتقال آلاینده‌های خطرناک به محیط زیست می‌شود (Ouhadi et al., 2016). محققینی مانند درماتاز و همکاران (Dermatas et al., 2003) اثر افزودنی‌های آهک، خاکستر بادی، سیمان پرتلند نوع۱، کربن فعال و سلیس را بر روی خاک آلوده به آلاینده‌های آلی همچون نفتالین و پیرن با انجام آزمایشات آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری نمودند که نفتالین و پیرن مقاومت خاک را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که این امر ناشی از تأخیر واکنش‌های پوزولانی است. الرواس و همکاران (Al-Rawas et al., 2005) بهسازی خاک‌های آلوده به نفت را با استفاده از سیمان پرتلند و سیمان by-pass dust مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نفت باعث تأخیر در واکنش‌های هیدراتاسیون شده و در نتیجه مقاومت خاک را کاهش می‌دهد و همچنین آن‌ها اشاره کردند که با افزایش درصد سیمان و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک‌های آلوده به نفت افزایش یافته و نفوذپذیری آن‌ها کاهش می‌یابد. پژوهش چن و همکاران (Chen et al., 2017) اثر افزودنی سیمان را بر روی خاک آلوده به گازوئیل با درصدهای وزنی ۰، ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ با انجام آزمایشات UCS و SEM مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به نتایج زیر دست یافتند: ۱) مقاومت خاک آلوده به گازوئیل بدون افزودن سیمان و با افزایش مدت زمان عمل آوری کاهش می‌یابد. ۲) با افزودن سیمان تا ۱۰٪ وزنی، مقاومت خاک آلوده به گازوئیل و با افزایش زمان عمل آوری افزایش می‌یابد. ۳) با نسبت ثابت سیمان و با افزایش مقدار وزنی گازوئیل مقاومت خاک کاهش می‌یابد. دلیل آن را آن‌ها بیان کردند که گازوئیل بر فرآیند هیدراتاسیون و واکنش سیمان با ذرات خاک تأثیر می‌گذارد و موجب تضعیف در عملکرد سیمان می‌شود. (Rafiei et al., 2025) بیان کردند که نانوسیمان می‌تواند به‌طور مؤثری خواص مکانیکی و هیدرولیکی خاک‌های رسی طبیعی و آلوده به شیرابه شهری را بهسازی نماید. آن‌ها بیان نمودند که مطالعات گسترده‌تری در این خصوص باید صورت پذیرد. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) اثر افزودنی MgO در بهسازی خاک رسی آلوده به گلیسرول را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌گیری نمودند که گلیسرول سبب کاهش مقاومت خاک می‌گردد، همچنین دریافتند چون ویسکوزیته گلیسرول از آب بیشتر است و جابه‌جایی ذرات رس را روی هم دیگر تسهیل می‌کند که منجر به کاهش مقاومت خاک می‌شود آن‌ها بیان نمودند که با افزودن MgO به خاک طبیعی و خاک آلوده به گلیسرول سبب افزایش مقاومت خاک می‌گردد این افزایش با درصد MgO و زمان عمل آوری بستگی دارد. محققینی مانند افسری و همکاران (Afsari et al., 2021) و جانداری و همکاران (Jandari et al., 2021) خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رسی آلوده به گلیسرول و استون را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که آلاینده‌های مذکور موجب کاهش مقاومت خاک آلوده در مقایسه با خاک طبیعی می‌گردد. مهدویان و همکاران (Mahdavian et al., 2025) بهسازی یک خاک رسی را با استفاده از محلول منیزیم کلرید به عنوان افزودنی با انجام آزمایشات آزمایشگاهی بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه‌گیری

نمودند که این ماده افزودنی در کاهش پتانسیل تورم و فشار تورمی نسبت به خاک طبیعی مؤثر می‌باشد.

استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2025) تأثیر مخلوطی از منیزیم اکسید با سرباره کوره ذوب آهن و همچنین منیزیم اکسید و سرباره کوره ذوب آهن با سیمان را بر بهسازی خاک رسی آلوده به گلیسرول بررسی کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که این مواد افزودنی باعث بهسازی و افزایش مقاومت خاک آلوده می‌شوند. آهک یکی از مواد افزودنی است که در بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. آهک با قیمت نسبتاً ارزان و همچنین در همه‌جا در دسترس است (Rahimi and Abbasi, 2021). به طور کلی اختلاط آهک با خاک‌های ریزدانه، موجب کاهش پلاستیسیته، کاهش حساسیت آن نسبت به آب می‌شود (Unluer and Al-Tabbaa, 2012). همچنین افزودن آهک به خاک، موجب افزایش مقاومت خاک‌های رسی می‌گردد (Eskandari and Hodhodi, 2014). سیمان اگرچه به عنوان ماده افزودنی برای پاکسازی خاک‌های آلوده استفاده می‌شود، اما هزینه تولید بالا داشته و با انتشار مقدار زیادی کربن دی‌اکسید در فرآیند تولید، به آلودگی محیط زیست می‌افزاید (Ansar Shourijeh et al., 2023).

نصیری و همکاران (Nasiri et al., 2025) به بررسی خاک رس با پلاستیسیته بالا را با نفت خام در درصدهای وزنی ۴، ۷ و ۱۰ پرداختند. برای بهسازی، آهک هیدراته با خلوص بیش از ۷۲ درصد در درصدهای ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد استفاده و نمونه‌ها در زمان‌های عمل آوری ۱، ۱۴، ۲۸ و ۳۶۵ روزه آزمایش شدند. نتایج نشان داد افزودن ۶ درصد آهک به خاک‌های آلوده با ۴، ۷ و ۱۰ درصد نفت، مقاومت فشاری را پس از یک سال به ترتیب ۹، ۸ و ۶ برابر افزایش داد و همچنین آزمایش‌های دوام نشان داد نمونه‌های بهسازی شده با ۶ درصد آهک پس از ۶ چرخه تر و خشک مقاومت ۹ برابری داشتند.

محققین اخیراً منیزیم‌اکسید را به عنوان افزودنی جایگزین معرفی کرده‌اند که تولید آن نسبت به سیمان به انرژی کمتری نیاز داشته و در واکنش‌های شیمیایی، کربن دی‌اکسید را از محیط جذب می‌کند (Unluer and Al-Tabbaa, 2011). به دلیل قابلیت بالای منیزیم اکسید در تبادل یونی و تثبیت آلاینده‌های مختلف، از آن در بهسازی و پاکسازی خاک‌های رسی آلوده استفاده می‌شود (Jin et al., 2015). استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2024) از منیزیم اکسید و آهک هیدراته به‌عنوان مواد افزودنی جهت بهسازی و پاکسازی یک خاک رسی آلوده به MTBE استفاده نمودند و آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش درصد وزنی مواد افزودنی آهک و منیزیم اکسید و همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت خاک طبیعی و خاک آلوده افزایش می‌یابد.

هدف از انجام این تحقیق

محققین زیادی بیان نمودند که خواص یک خاک را با اضافه نمودن مواد افزودنی می‌توان تغییر داد. این تغییرات شامل پلاستیسیته، مقاومت و تغییر حجم آن می‌باشد. مواد افزودنی می‌توانند موادی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و غیره باشند. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که دی متیل فتالات به عنوان آلاینده خطرناک برای محیط زیست است (United States Environmental Protection Agency(USEPA . لیکن تحقیقات انجام شده در خصوص بهسازی و پاکسازی خاک‌های آلوده به DMP تحقیقاتی صورت نپذیرفته است، به جزء کار تحقیقاتی (Wang et al., 2021). آن‌ها از مخلوط MgO و سرباره کوره ذوب آهن به‌عنوان ماده افزودنی جهت بهسازی و پاکسازی یک خاک رسی آلوده به DMP استفاده نمودند و زمان عمل آوری ۷ روزه را برای آزمایشات خود منظور کردند. در این تحقیق جهت بدست آوردن اطلاعات جامع در این خصوص برای

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

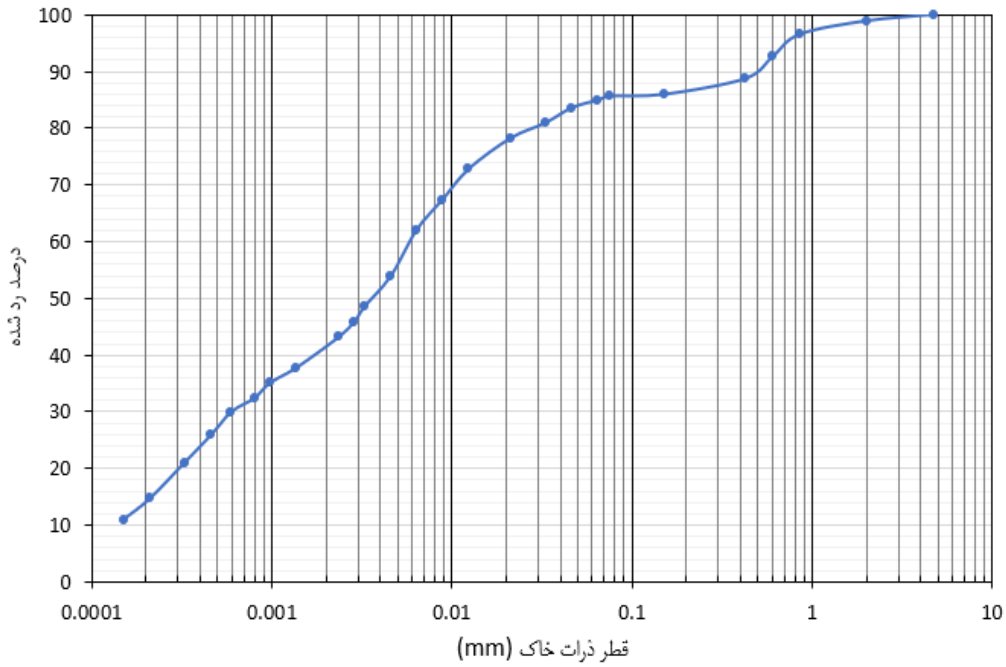
اولین بار MgO و آهک هیدراته به‌عنوان مواد افزودنی مورد استفاده قرار گرفتند و علاوه بر آن آزمایش‌ها در زمان عمل‌آوری ۷و ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گردیدند که منجر به اطلاعات جامعی در خصوص تغییرات فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده بهسازی شده با آن‌ها حاصل گردد و همچنین آزمایش SEM انجام گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایشات آزمایشگاهی برای دو ماده افزودنی مورد بررسی قرار گرفت و در خصوص آن‌ها بحث صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل خاک رسی، آب مقطر، آهک هیدراته ، دی متیل فتالات که در خصوص هر یک از این مواد توضیح داده می‌شود.

خاک

خاک رسی برای انجام آزمایش‌ها از فروشنده محلی مصالح ساختمانی تهیه شد. مطابق اطلاعات نامبرده خاک مورد استفاده از اطراف کرج (منطقه اشتهارد) تهیه شده است. به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، آزمایش‌های دانه‌بندی، وزن مخصوص دانه‌های جامد (Gs)، حدود آتربرگ، تراکم استاندارد روی نمونه‌های از آن انجام گرفت و نتایج در جدول شماره (۱) نشان داده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. سایر اطلاعات اندازه‌گیری و تعیین شده این خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات دانه‌بندی و حدود اتربرگ، خاک از نوع رس با پلاستیسیته پایین مطابق روش USCS (Unified Soil Classification System) طبقه‌بندی گردید. مشخصات شیمیایی خاک نیز با انجام آزمایشات لازم تعیین و نتایج در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱. نتایج آزمایش دانه‌بندی خاک

Fig. 1. Grain size distribution curve.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رسی مورد استفاده

Table 1. Physical and mechanical properties of clay soil

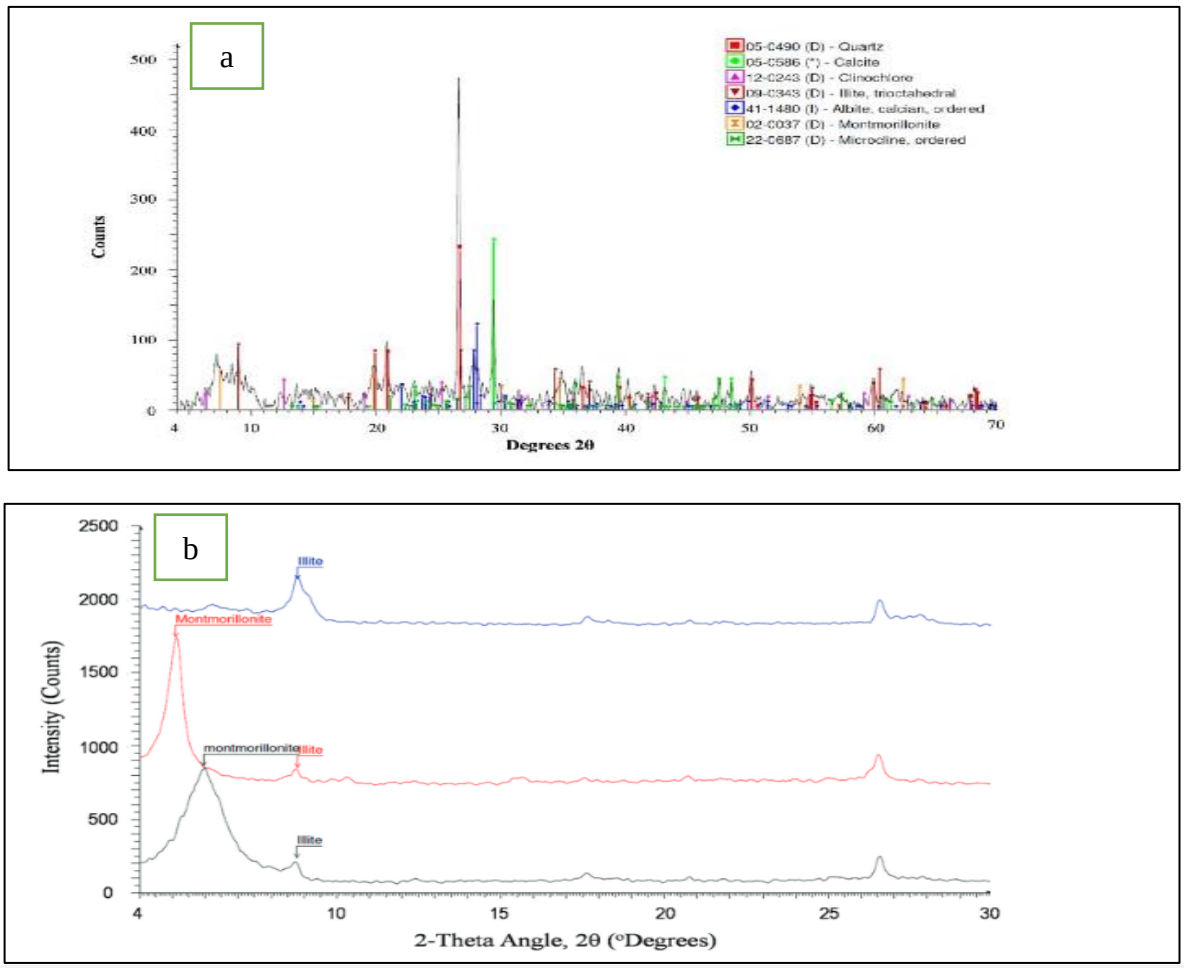
Parameter	value
Specific gravity of solids (Gs)	2.74
Liquid limit (LL) (%)	48.28
Plastic limit (PL) (%)	26.21
Plastic index (PI) (%)	22.07
Gravel (%)	0
sand (%)	2
silt (%)	45
clay(%)	53
Maximum Dry unit weight (kN/m3)	16.94
(%) Percent optimum moisture content (W_{opt})	17.88
Soil classification (USCS)	CL

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 2. Soil chemical characteristics

Chemical properties	value
PH	8.9
EC ($\mu mhos/cm$)	10.74
K^+ (meq/l)	0.33
CL^- (meq/l)	60
SO_4^{2-} (meq/l)	83
HCO_3^- (meq/l)	4
Co_3^{2-} (meq/l)	0.6
$CaCo_3$ (meq/l)	10.2
Ca^{2+} (meq/l)	24
Mg^{2+} (meq/l)	10
Oc^*	% 0.11

آزمایش XRD به منظور تعیین کانی‌های تشکیل دهنده خاک روی نمونه‌های از آن انجام شد و نتایج در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده کانی‌های تشکیل دهنده خاک شامل کوارتز، کلسیت و غیره می‌باشد و کانی‌های رسی آن شامل ایلیت و مونت موریلونیت است.



شکل۲. تصاویر آزمایش XRD a) خاک طبیعی b) کانی‌های رس تشکیل دهنده خاک

Fig. 1. XRD test images a) Natural soil b) Clay minerals forming the soil

دی متیل فتالات

در این تحقیق، به منظور آلوده نمودن خاک از آلاینده دی متیل فتالات استفاده گردید. دی متیل فتالات دارای فرمول شیمیایی $C_{10}H_{10}O_4$ و محصولی از شرکت مرک آلمان می‌باشد که از نمایندگی آن خریداری شد و تصویری از آن در شکل شماره (۳) قرار داده شده است. این ماده آلاینده قبلاً بوسیله استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2023) مورد استفاده قرار گرفت. برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی دی متیل فتالات اخذ شده از تولید کننده در جدول(۳) ارائه شده است.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

شکل ۳. دی متیل فتالات مورد استفاده

Fig. 3. XRD test images Fig 1. XRD test images

جدول ۳. خواص فیزیکی و شیمیایی دی متیل فتالات دی متیل فتالات (Estabragh et al., 2023)

Table 3. Chemical properties of Dimethyl phthalate (Estabragh et al., 2023)

Characteristic	value
Color	Colorless
Molecular mass	194.18 g/mol
Density	1.189 g/cm^3
Melting point	2 ℃
Boiling point	284℃
Octanol-water partition coefficient	log ^{P} = 1/60
Dielectric constant	8/66
Viscosity (25°C)	17/2
Solubility in water	4000 mg/l

آب مقطر

آب مورد استفاده در آزمایشات از نوع آب مقطر تهیه گردید که pH و EC به ترتیب آب مقطر ۶.۵-۷.۵ و ۰.۰۰۹mS/cm می‌باشد.

اتانول

در این پژوهش آزمایشگاهی، از اتانول به عنوان حلال استفاده گردید. اتانول از یک شرکت داخلی تهیه گردید. خصوصیات اتانول مورد استفاده در جدول شماره (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. خصوصیات اتانول مورد استفاده

Table 4. Properties of ethanol

Characteristic	value
Chemical formula	C_2H_5OH
Density (20℃)	0.8 gr/cm^3
Boiling point	78- 79℃
pH	< 10
Solubility	Miscible

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

آهک

در این تحقیق از آهک هیدراته به عنوان یکی از مواد افزودنی مورد استفاده قرار گرفت. این افزودنی از یک فروشنده محلی تهیه گردید و با اخذ اطلاعاتی از فروشنده، مشخصات آهک مورد استفاده در جدول (۵) ارائه شده است.این ماده افزودنی نیز قبلاً توسط انصار و همکاران(۲۰۲۳) برای بهسازی یک خاک رسی آلوده به MTBE مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵. مشخصات آهک مورد استفاده (Ansar Shourijeh et al., 2023)

Table 5. Lime specifications (Ansar Shourijeh et al., 2023)

Characteristic	value
Specific gravity of solid particles (Gs)	2.75
Sand (%)	14
Silt (%)	37
Clay(%)	49
Liquid limit (LL)	88
Plastic limit (PL)	31
Plastic index (PI)	57
Acidity (pH)	10

منیزیم اکسید

در این تحقیق علاوه بر آهک، از منیزیم اکسید (MgO) به عنوان یکی از مواد افزودنی، مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد بهسازی خاک با استفاده از منیزیم اکسید (MgO) می‌تواند بسیار سریع و مؤثر است (Jin and Al-Tabbaa, 2013). منیزیم اکسید مورد نیاز از یک شرکت داخلی با درجه خلوص ٪۹۹ تهیه گردید. مشخصات فیزیکی و شیمیایی منیزیم اکسید در جدول (۶) آمده شده است. منیزیم اکسید مورد استفاده در این تحقیق قبلاً نیز توسط محققینی مانند امینی و همکاران (Amini et al., 2022) جهت بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و شیمیایی منیزیم اکسید (Estabragh et al., 2022)

Table 6. Physical and chemical properties of magnesium oxide (Estabragh et al., 2022)

Characteristic	value
Molar mass	40.30 g/mol
Density	3.58 g/cm3
Specific surface area	300-250 m^2/g
Particle size	$< 20\mu m$
Solubility	0.0086 g/100mL

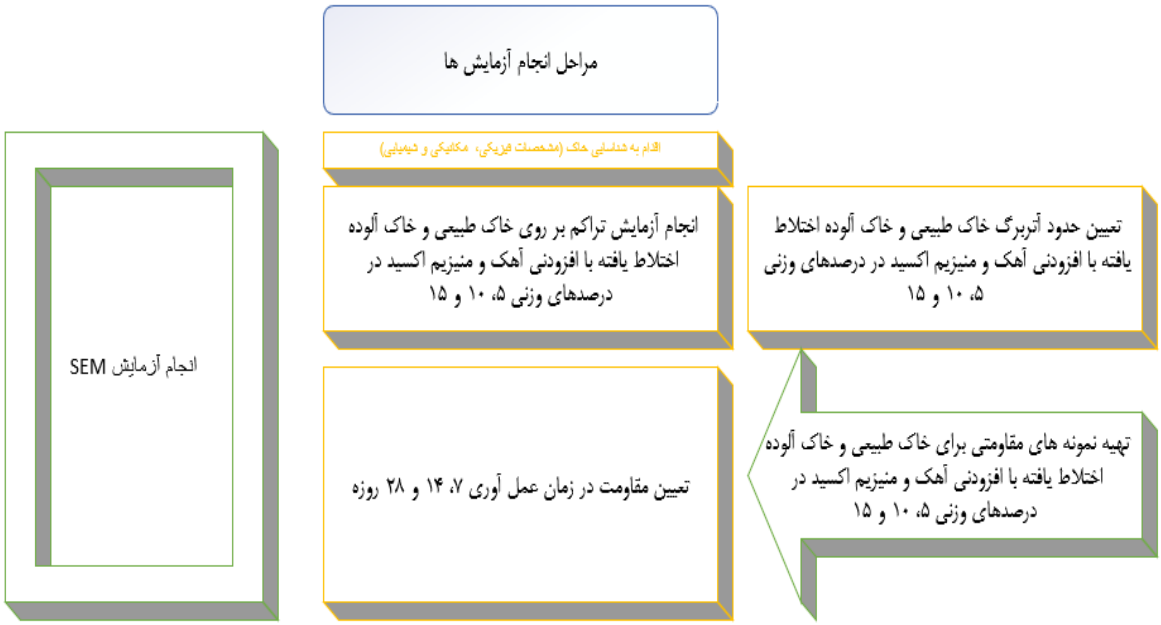
تهیه خاک آلوده

در ابتدا اقدام به تهیه خاک آلوده به طور مصنوعی در آزمایشگاه گردید. مطابق با پژوهش وانگ و همکاران (Wang et al., 2021)، برای آلوده سازی ۰.۰۰۳ میلی‌گرم از ماده دی متیل فتالات به ۱ کیلوگرم خاک اضافه گردید. به دلیل حلالیت بسیار کم دی متیل فتالات در آب از اتانول به عنوان حلال استفاده گردید. در ابتدا دی متیل فتالات در مقدار ثابتی از اتانول حل گردید سپس به صورت اسپری با خاک طبیعی مخلوط گردید و به مدت یک هفته در معرض هوای آزاد قرار گردید تا اتانول از آن خارج شود (Estabragh et al., 2023). مطابق با پژوهش وانگ و همکاران (Wang et al., 2021)، پس از آن نمونه‌های خاک

آلوده به منظور انجام واکنش‌های شیمیایی متقابل بین خاک، آلاینده، به مدت ۴ روز داخل نایلون سر بسته نگهداری شدند (Wang et al., 2021).

روش انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش‌های مورد نظر در گراف (۴) نشان داده شده است. آزمایشات تعیین حدود آتربرگ و پارامترهای تراکمی (وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه) به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM-D4318-17 و ASTM-D698-78 روی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده و اختلاط یافته با افزودنی آهک و منیزیم اکسید در درصدهای ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ انجام گردید. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نیز روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-D1633-00 به روش کرنش کنترل شونده انجام گردید. برای تهیه نمونه‌های مقاومتی مطابق رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه حاصل از آزمایش تراکم استاندارد برای هر ماده اقدام به ساخت نمونه‌های مقاومتی با استفاده از تراکم استاتیکی شد. تراکم خاک جهت ساخت نمونه‌های مقاومتی به وسیله دستگاه بارگذاری تک محوری با سرعت ۱/۵ mm/mim در ۳ لایه از خاک صورت گرفت (Estabragh et al., 2011). بعد از آن، آن‌ها در اتاقک مخصوص کنترل رطوبتی با دمای تقریباً یکسان برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه، ۱۴روزه و ۲۸ روزه قرار گرفتند. مطابق با شرایط به کار رفته بوسیله استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) و وانگ و همکاران (Wang et al., 2021) می‌باشد.



شکل ۴. مراحل انجام آزمایش‌ها

Fig. 4. Steps for conducting experiments

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک محوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به شرح زیر است.

آزمایش حدود آتربرگ

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک اقدام به تعیین حدود آتربرگ شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) گردید. نتایج آزمایش حدود آتربرگ نمونه‌های حاوی آهک و منیزیم اکسید در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، مقادیر LL، PL و PI برای خاک طبیعی به ترتیب برابر با ۴۸/۳، ۲۶/۲ و ۲۲/۱ درصد است و افزودن دی متیل فتالات به خاک طبیعی مقادیر LL، PL و PI به ترتیب برابر با ۴۴/۴۸، ۲۶/۴۷ و ۱۸/۰۱ تغییر یافته است. از آنجا که ثابت دی الکتریک ماده دی متیل برابر با ۸/۶۶ است و این مقدار از آب بسیار کمتر است، این خصوصیت موجب کاهش ضخامت لایه دوگانه می‌شود که در نتیجه، ساختمان خاک به سمت فلوکوله شدن تمایل پیدا می‌کند و ذرات به یکدیگر می‌چسبند و ذرات بزرگ‌تری تشکیل می‌شوند. این ذرات به علت کاهش سطح ویژه، جذب آب کمتری خواهند داشت و در نتیجه، حد روانی خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد. نتایج برای افزودنی آهک نشان می‌دهد که با افزودن ۵٪ آهک به خاک طبیعی موجب کاهش حد روانی آن می‌شود. این امر به دلیل تبادل یونی بین آهک و خاک رسی است که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و فاصله بین کانی‌ها می‌گردد. در نتیجه، نیروی جاذبه بین کانی‌ها افزایش یافته و ذرات رس تمایل به چسبیدن به یکدیگر و ایجاد ساختار فلوکوله و تشکیل ذرات بزرگ‌تر پیدا می‌کنند (Ouhadi et al., 2016). این ذرات مشابه سیلت می‌شوند که به علت کاهش سطح ویژه ذرات و در نتیجه کاهش حد روانی منجر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزودن ۱۰٪ و ۱۵٪ آهک به خاک طبیعی سبب کاهش حد روانی نسبت به ۵٪ آهک می‌شود لیکن مشابه حد روانی خاک طبیعی می‌باشند. به دلیل تبادل کاتیونی که آهک به ذرات رس انجام می‌دهد سبب جایگزین شدن یون‌های کلسیم با یون‌های تک ظرفیتی می‌شود و همچنین در درصد زیاد آهک به دلیل افزایش pH سبب ایجاد ساختار فلوکوله در ساختار رس می‌شود که فضاها برای قرارگیری مولکول‌های آب فراهم می‌شود و در نتیجه حد روانی و حد خمیری افزایش می‌یابد، مشابه این روند بوسیله انصار و همکاران (Ansar Shourijeh et al., 2022) نیز گزارش شده است نتایج بدست آمده برای ۱۰٪ و ۱۵٪ با نتایج گزارش شده بوسیله استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2013) مطابقت ندارد شاید علت آن به عدم یکسان بودن خاک مورد استفاده می‌باشد. همچنین با افزودن آهک به خاک آلوده موجب افزایش حد روانی و حد خمیری شده است. به طوری که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری با افزودن ۵٪ آهک به خاک آلوده، به ترتیب برابر با ۴۵/۵۷، ۳۱/۹ و ۱۲/۸۲ و با افزودن ۱۰٪ آهک، به ترتیب برابر با ۴۸/۱۳، ۳۲/۷۵ و ۱۵/۳۸ درصد شده است. در جدول (۷) مشاهده می‌شود که حد روانی خاک آلوده مخلوط شده با آهک کمتر از خاک طبیعی با آهک است، همان طور که گفته شد ماده دی متیل فتالات به دلیل کاهش در ثابت دی الکتریک خاک رس موجب کاهش سطح ویژه ذرات شده است و جذب آب کاهش می‌یابد.

با افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی باعث افزایش حد روانی و حد خمیری نسبت به خاک طبیعی می‌شود. با این حال، حداکثر حد روانی در غلظت ۵٪ از منیزیم اکسید مشاهده می‌شود، در حالی که در غلظت‌های ۱۰ ٪ و ۱۵٪ منیزیم اکسید، کاهش در حد روانی مشاهده می‌شود. به طوری که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری با افزودن

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

٪۵ منیزیم اکسید به خاک طبیعی، به ترتیب برابر با ۶۲/۷۶، ۳۱ و ۳۱/۷۶ درصد است و با افزودن ۱۰٪ منیزیم اکسید، به ترتیب برابر با ۵۴/۵، ۳۲/۰۱، ۲۲/۴۹ درصد شده است. این نتایج با یافته‌های محققینی مانند لیسکا و همکاران (Liska et al., 2008) و استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) مطابقت دارد. افزودن منیزیم اکسید به خاک آلوده باعث افزایش حد روانی و حد خمیری نسبت به خاک آلوده می‌شود. همانند منیزیم اکسید-خاک طبیعی نیز در غلظت‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ منیزیم اکسید، کاهش در حد روانی نسبت به ۵٪ منیزیم اکسید مشاهده می‌شود. به طوری که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری با افزودن ۵٪ منیزیم اکسید به خاک آلوده، به ترتیب برابر با ۵۰، ۲۹/۸و۲۰/۱و با افزودن ۱۰٪ منیزیم اکسید، نیز مقادیر آن‌ها برابر با ۴۹/۵، ۳۱/۵ و ۱۸ می‌گردد. این افزایش حد روانی و حد خمیری را می‌توان به سطح ویژه بالای منیزیم اکسید (حدود ۲۵۰-۳۰۰ متر مربع بر گرم) نسبت داد که در مقایسه با خاک طبیعی عدد قابل توجهی است. افزایش سطح ویژه در یک حجم ثابت سبب افزایش حد روانی و حد خمیری می‌شود. این نتایج با تحقیقات محققانی چون استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) و لیسکا و واندپر (Liska and Vandeperre, 2008) مطابقت دارد. زمانی که افزودنی منیزیم اکسید به خاک رس اضافه می‌شود، pHسیال منفذی افزایش می‌یابد. این افزایش pH موجب افزایش بارهای منفی در ذرات رسی می‌شود، این عامل باعث چسبیدن بیشتر ذرات رسی به یکدیگر می‌شود و در نتیجه ذرات بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که دارای سطح ویژه کمتری نسبت به حالت قبل هستند. به همین دلیل، با افزایش درصد منیزیم اکسید در حجم ثابت خاک رسی، pHسیال منفذی افزایش می‌یابد و در نتیجه ذرات به یکدیگر می‌چسبند که سبب کاهش حدود آتربرگ شده است.

جدول ۷. مقادیر حدود اتربرگ نمونه‌های حاوی آهک و منیزیم اکسید

Table 7. Atterberg limits of samples containing lime and magnesium oxide

Sample	Lime (%)	Magnesium Oxide (%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index(%)
Natural soil	0	0	48.3	26.2	22.1
Contaminated soil	0	0	44.48	26.47	18.01
Soil - lime	5	0	46.59	30.1	16.49
	10	0	48.24	31.6	16.63
	15	0	48.45	32.6	15.85
Contaminated soil mixed with lime	5	0	45.57	31.9	12.82
	10	0	48.13	32.75	15.38
	15	0	48.45	33.07	14.44
Soil - magnesium oxide	0	5	62.76	31	31.76
	0	10	54.5	32.01	22.49
	0	15	53.02	33.35	19.67
Contaminated soil mixed with magnesium oxide	0	5	50	29.8	20.1
	0	10	49.5	31.5	18
	0	15	49.16	31.69	17.47

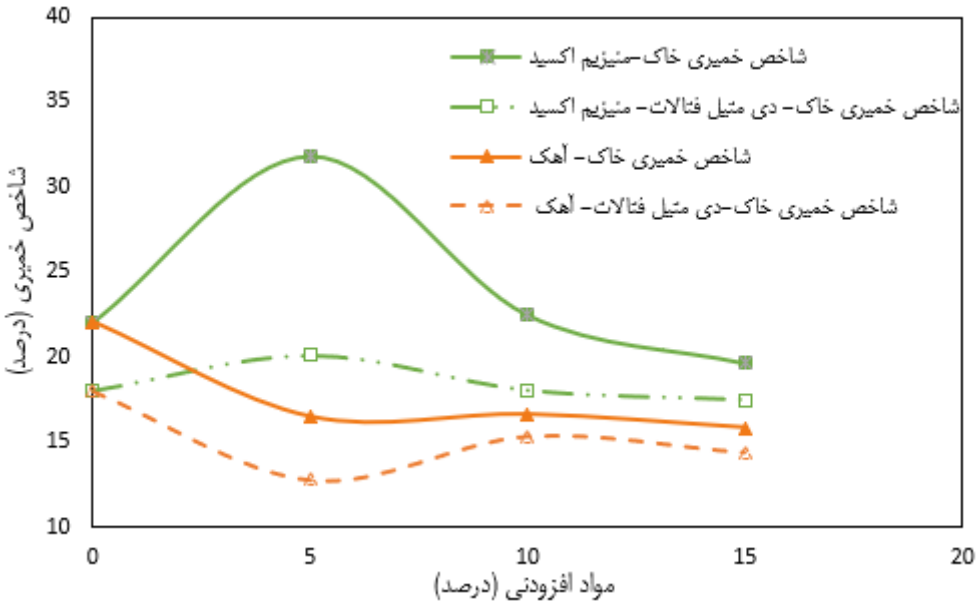
منحنی تغییرات شاخص خمیری برای خاک طبیعی و خاک آلوده مخلوط شده با آهک و منیزیم اکسید مطابق شکل (۵) رسم شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار آهک و منیزیم اکسید، تغییرات محسوسی در حد خمیری خاک

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

مورد مطالعه ایجاد کرده است. به عنوان مثال، شاخص خمیری خاک طبیعی برابر با ۲۲.۱٪ بوده و با افزودن ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ آهک به خاک طبیعی، شاخص خمیری به ترتیب برابر با ۱۶.۴٪، ۱۶.۶٪ و ۱۵.۸٪ شده است. همچنین روند تغییرات شاخص خمیری آهک مخلوط شده با خاک آلوده، مشابه خاک طبیعی اختلاط یافته با آهک می‌باشد.

خاک‌های ریزدانه و چسبنده هنگامی که با آهک و آب مخلوط می‌شوند، در اولین مرحله واکنش تبادل کاتیونی و در مراحل بعدی واکنش‌های پوزولانی انجام می‌گردد که منجر به تغییر ساختار خاک به حالت مجتمع و فلوکوله می‌شود (Das, 1995).

افزودن ۵٪ منیزیم اکسید به خاک طبیعی، سبب افزایش شاخص خمیری نسبت به خاک طبیعی بدون افزودنی شده است، لیکن افزودن ۱۰٪ و ۱۵٪ منیزیم اکسید، موجب کاهش شاخص خمیری نسبت به ۵٪ منیزیم اکسید مخلوط شده با خاک طبیعی گردیده است. همچنین روند تغییرات شاخص خمیری برای منیزیم اکسید مخلوط شده با خاک آلوده، مشابه تغییرات آن برای منیزیم اکسید مخلوط شده با خاک طبیعی است.



شکل ۵. منحنی تغییرات شاخص خمیری برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک و منیزیم اکسید

Fig. 5. Plasticity index curve of natural soil and contaminated soil mixed with Lime

آزمایش تراکم استاندارد

نتایج آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده و نیز اختلاط یافته آهک و منیزیم اکسید در جدول (۸) ارائه شده است. باتوجه به جدول (۸)، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای خاک طبیعی به ترتیب شامل ۱۶/۹۴ kN/m^3 و ۱۷/۸۸٪ و برای خاک آلوده آن‌ها شامل مقادیر ۱۶/۵۳ kN/m^3 و ۱۸/۵٪ می‌باشند. افزودن دی متیل فتالات به خاک سبب تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌شود. نتایج آزمایش تراکمی نشان می‌دهد که افزودن ماده دی متیل فتالات به خاک طبیعی باعث کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه شده است.

با اضافه نمودن دی متیل فتالات به خاک طبیعی سبب می‌شود تا بخشی از این ماده دور ذرات خاک را بپوشانند و این امر موجب می‌شود که میزان آب بیشتری مورد نیاز باشد

تا خاک به حالت رطوبت بهینه برسد پس در نتیجه رطوبت بهینه افزایش پیدا می‌کند. از طرفی احتمالاً بر اثر جذب ماده آلاینده پیوند شیمیایی قوی بین ذرات ایجاد می‌گردد که موجب می‌شود ذرات تحت انرژی ثابت تراکم مقاومت نماید و جابجایی صورت نپذیرد و کاهش وزن واحد حجم خشک نسبت به خاک طبیعی ایجاد شود.

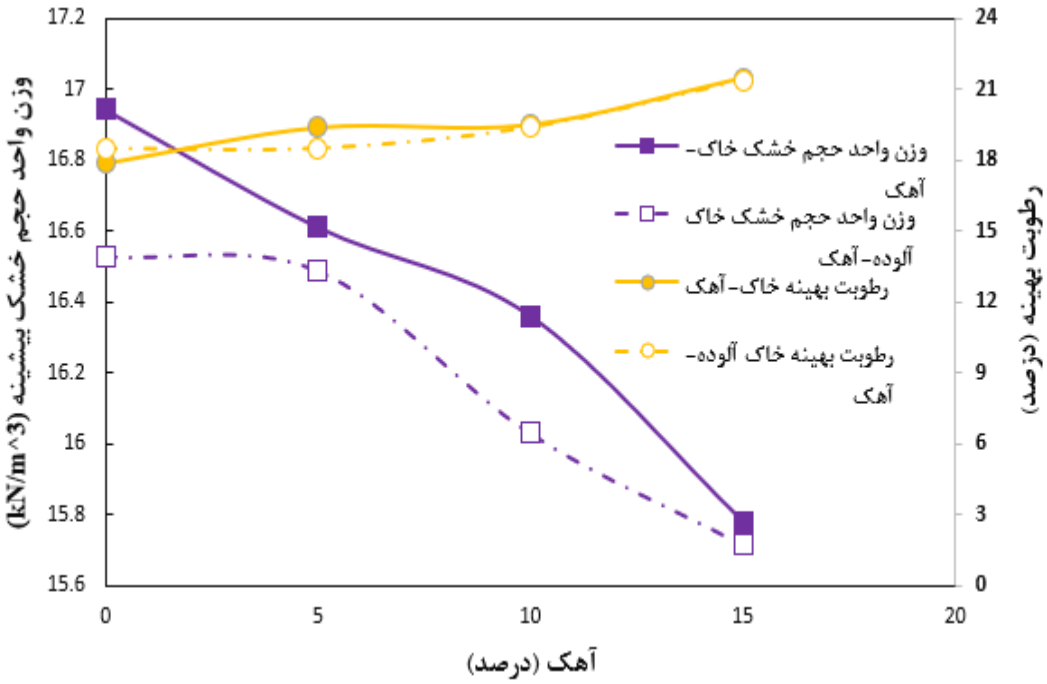
با افزودن آهک به خاک طبیعی سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و سبب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک شده است. به طوری که با افزودن ۱۰٪ آهک به خاک طبیعی، وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت به ترتیب برابر با ۱۶/۳۶ kN/m^3 و ۱۹/۵٪ شده است و همچنین مشابه با آن با افزودن آهک به خاک آلوده سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه خاک شده است. منحنی تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک در شکل (۶) نشان داده شده است.

اختلاط آهک با خاک رسی منجر به تغییراتی در خواص خاک می‌شود که ناشی از تبادل کاتیونی است. کاتیون کلسیم به دلیل دو ظرفیتی بودنش می‌تواند با یون‌های تک‌ظرفیتی موجود در لایه دوگانه خاک رسی جایگزین شود. این جایگزینی باعث خنثی شدن بارهای الکتریکی منفی سطح رس و کاهش ضخامت لایه دوگانه می‌گردد. در نتیجه، افزودن آهک به خاک رسی موجب ساختار فلوکوله خاک و افزایش تخلخل در ساختار آن می‌گردد. این تغییرات باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک در خاک می‌شود. این نتایج با یافته‌های انصار و همکاران (Ansar Shourijeh et al., 2022) و استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2013) مطابقت دارد.

منحنی تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید در شکل (۷) نشان داده شده است. با افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه خاک شده است. به طوری که با افزودن ۱۰٪ منیزیم اکسید به خاک طبیعی، وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه به ترتیب برابر با ۱۶/۲۲ kN/m^3 و ۱۶/۵۹٪ شده است و همچنین با افزودن منیزیم اکسید به خاک آلوده سبب کاهش وزن واحد حجم خشک درصد رطوبت بهینه خاک شده است. افزودن منیزیم اکسید به دلیل تبادل یونی و انجام واکنش‌های هیدراتاسیون، سبب افزایش pH در محیط خاک شده که سبب ایجاد ساختار فلوکوله می‌شود و در نتیجه موجب چسبیدن ذرات با پیوندهای قوی می‌شود و این پیوند در حالت سختی قرار گرفته که وقتی تحت انرژی ثابت در تراکم قرار می‌گیرد از خود مقاومت نشان داده و مانع از تو هم تر شدن ذرات بهم شده و در نتیجه فضاهای باقی می‌ماند که وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش می‌یابد و همچنین علاوه بر این فضاها به دلیل تبادل کاتیونی که منیزیم اکسید با رس انجام می‌دهد سبب چسبیدن بیشتر ذرات به یکدیگر شده که ذراتی با ابعاد بزرگ‌تر و سطح ویژه کمتر تشکیل می‌دهد که مطابق با تصاویر SEM ارائه شده است، پس در نتیجه قدرت جذب آب کاهش می‌یابد و درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های انصار و همکاران (Ansar Shourijeh et al., 2023)، استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) و واندپر و همکاران (Vandeperre et al., 2008) همخوانی دارد.

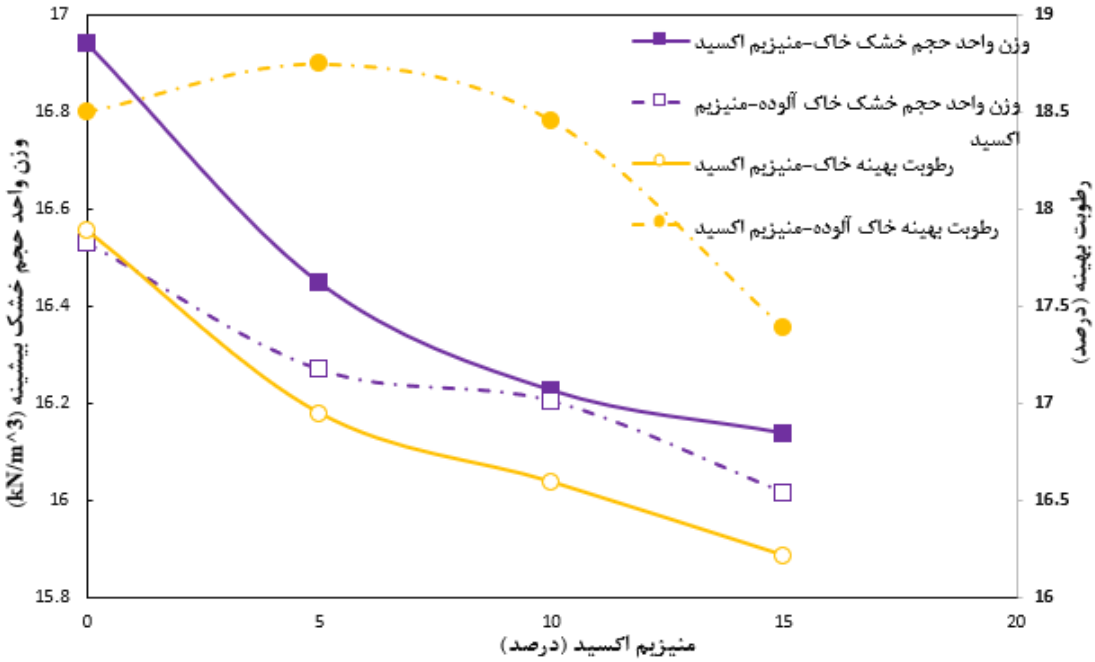
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]



شکل ۶. منحنی تغییرات وزن واحد حجم ماکزیمم و رطوبت بهینه خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک

Fig. 6. Maximum dry unit weight and Optimum content curve of natural soil and contaminated soil mixed with Lime



شکل ۷. منحنی تغییرات وزن واحد حجم ماکزیمم و رطوبت بهینه خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید

Fig. 7. Maximum dry unit weight and Optimum content curve of natural soil and contaminated soil mixed with Magnesium oxid

جدول ۸. ویژگی‌های تراکمی نمونه‌های حاوی آهک و منیزیم اکسید

Table 8. Compaction properties of samples containing lime and magnesium oxide

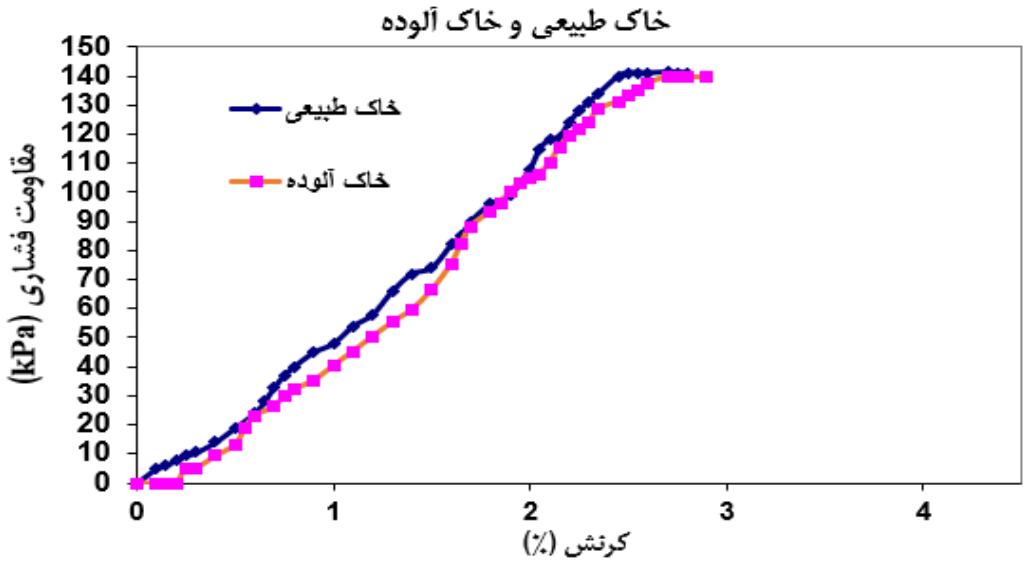
Sample	Lime (%)	Magnesium Oxide (%)	Maximum dry unit weight (kN/m^3)	water content (%)
Natural soil	0	0	16.94	17.88
Contaminated soil	0	0	16.53	18.5
Natural Soil - lime	5	0	16.61	19.38
	10	0	16.36	19.5
	15	0	15.78	21.46
Contaminated soil mixed with lime	5	0	16.48	18.5
	10	0	16.03	19.4
	15	0	15.71	21.4
Natural Soil - magnesium oxide	0	5	16.44	16.94
	0	10	16.22	16.59
	0	15	16.13	16.21
Contaminated soil mixed with magnesium oxid	0	5	16.26	18.74
	0	10	16.20	18.45
	0	15	16.01	17.38

آزمایش مقاومت تک‌محوری

در انجام آزمایش مقاومت از داده‌های ثبت شده در طول آزمایش اقدام به تهیه منحنی‌های تغییرات تنش-کرنش برای نمونه‌ها گردید. منحنی‌های تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقاومت نهایی خاک طبیعی ۱۴۱ kPa در کرنش ۲/۸٪ است. لیکن با افزودن دی متیل فتالات موجب کاهش مقاومت خاک آلوده شده است. به طوری که مقاومت نهایی برای نمونه خاک آلوده برابر ۱۳۹ kPa در کرنش ۲/۹٪ است که نشان می‌دهد مقدار کاهش مقاومت به میزان ۱/۴٪ درصد رخ داده است. بنابراین، می‌توان گفت برای خاک آلوده محنی تنش-کرنش موقعیت نزولی به خود می‌گیرند. ویسکوزیته ماده دی متیل فتالات برابر با cP (CentiPoise) ۱۷/۲ و آب برابر با cP ۱ است و بنابراین می‌توان گفت ویسکوزیته بالای ماده آلاینده دی متیل فتالات نسبت به آب سبب می‌شود تا اصطکاک بین ذرات کاسته شده و ذرات آسان‌تر بر روی یکدیگر حرکت کنند و در نتیجه سبب کاهش مقاومت خاک آلوده می‌شود. به طوری که محققینی مانند میگودا و راتناویرا (Meegoda and Ratnaweera, 1993) بیان کردند که لزوجت زیاد موجب کاهش مقاومت می‌گردد و همچنین محققانی مانند شنگ و بوید (Sheng and Boyed, 1996) و جینز و ونس (Jaynes and Vance, 1999) گزارش داده‌اند که خاک‌های رسی قادر به جذب مواد آلی مانند فنول، بنزن و تولوئن از طریق کاتیون‌هایی نظیر Na^+ ، K^+، Ca^{2+} و Mg^{2+} و غیره هستند. بخشی از این مواد آلی به دلیل کمبود کاتیون‌های لازم و همچنین سطح ویژه نامناسب، به ذرات رس جذب نمی‌شوند و در فضای بین ذرات باقی می‌مانند که این موضوع بر جابه‌جایی ذرات تأثیر می‌گذارد و موجب کاهش مقاومت می‌شود (Khatibi et al., 2015).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]



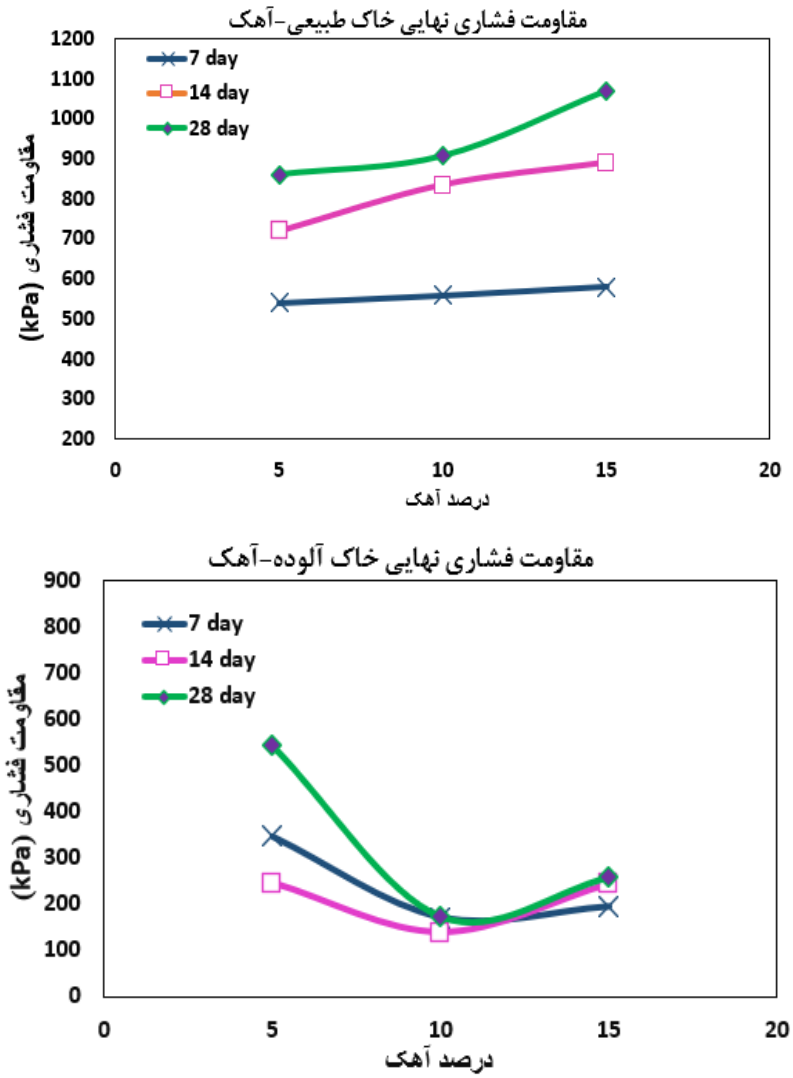
شکل ۸. نمودار تنش-کرنش برای خاک طبیعی و خاک آلوده به دی متیل فتالات
Fig. 8. Stress-strain diagram for natural soil and soil contaminated with dimethyl phthalate

شکل (۹) منحنی‌ها تنش-کرنش برای خاک طبیعی اختلاط یافته با افزودنی آهک را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود مقاومت نهایی خاک طبیعی با افزایش درصد آهک و همچنین افزایش زمان عمل آوری، افزایش یافته است. به عنوان مثال مقاومت نهایی خاک طبیعی اختلاط یافته با ۱۵٪ آهک در زمان عمل آوری ۷ روز برابر با ۵۸۰ kPa در کرنش ۴٪ و در زمان ۲۸ روز برابر با ۱۰۷۰ kPa در کرنش ۴/۱٪ می‌رساند.

انصار شوریجه و همکاران (Ansar Shourijeh et al., 2022) بیان کردند که بهسازی خاک با آهک شامل واکنش بین سیلیکا و آلومینا تشکیل دهنده کانی رس با آهک و آب می‌باشد، بطوری که هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات سیلیکات آلومینیم که نوعی ماده ژل مانند و سیمانته کننده است، تشکیل می‌گردد که ذرات را بهم می‌چسباند و موجب تشکیل ساختار مقاوم می‌گردد. به هرحال واکنش شیمیایی آهک و خاک رس، بخشی از بهسازی خاک را تشکیل می‌دهند که منجر به تشکیل ماده سیمانته کننده و چسبیدن ذرات به یکدیگر و درنهایت موجب افزایش مقاومت خاک می‌گردد.

شکل شماره (۹) نشان دهنده‌ی نمودارهای مقاومت نهایی برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی آهک را نشان می‌دهد. با افزودن ۵٪ آهک مقاومت خاک آلوده افزایش یافته است به طوریکه مقاومت نهایی برای افزودن ۵٪ در زمان عمل آوری ۷ روز برابر با ۳۴۵ kPa است و در زمان عمل آوری ۲۸ روز برابر یا ۵۴۲ kPa است. همان طور که مشخص است برای ۱۰٪ وزنی از آهک مقاومت خاک آلوده کاهش یافته است به طوری که برای زمان عمل آوری ۷ روز برابر با ۱۷۰ kPa و برای زمان ۲۸ روز برابر با kPa ۱۷۳ است و همچنین برای درصد ۱۵٪ آهک مشاهده می‌شود مقاومت خاک نسبت به ۱۰٪ بیشتر شده ولی همچنان کاهش مقاومت را نشان می‌دهد. می‌توان گفت ذرات آهک از آلاینده پوشیده شده‌اند شاید به علت کانی‌های تشکیل دهنده آهک باشد. عمل هیدراتاسیون انجام گرفته است لیکن برای ۱۴ روزه زمان عمل آوری کاهش مقاومت است به علت افزایش pH مایع منفذی و تشکیل باز و از بین

رفتن پیوندهای شیمیایی بین ذرات خاک باشد که کاهش مقاومت را موجب شده است و برای مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد آهک مقاومت کاهش یافته، لیکن مقدار مقاومت نهایی کسب شده کمتر از ۵٪ است. شاید در درصدهای بالا مقادیر بیشتری از ذرات آهک به وسیله آلاینده احاطه شده و با آلاینده پوشیده شده است که امکان تولید محصولات هیدراتاسیون محدود گردیده است که عکس‌های SEM حاکی از آن است. ولیکن با افزایش زمان عمل آوری مقاومت افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی افزایش مقدار مواد سیمانته کننده ناشی از هیدراتاسیون آهک می‌باشد.



شکل۹. منحنی‌های مقاومت نهایی برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک

Fig. 9. Ultimate strength curves for natural soil and contaminated soil mixed with lime

شکل شماره (۱۰) منحنی‌های تنش-کرنش نهایی برای خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با درصدهای مختلف منیزیم اکسید را در زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. همان طور که نشان داده شده است با افزایش درصد منیزیم اکسید به کار رفته و همچنین با افزایش زمان عمل آوری مقاومت خاک افزایش یافته است. به طوریکه با افزودن ۱۵٪

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

منیزیم اکسید مقاومت خاک برای زمان عمل آوری ۷ روز برابر با ۴۹۹ kPa است. افزودن منیزیم اکسید به خاک موجب تبادل یونی می‌شود که این وضعیت به افزایش چسبندگی ذرات منجر می‌گردد (Ansar Shourijeh et al., 2023). در طی فرآیند هیدراتاسیون، MgO به بروسیت ($Mg(OH)_2$) تبدیل شده و سپس با دی‌اکسید کربن و آب موجود در هوا واکنش می‌دهد. این واکنش منجر به تولید مواد معدنی مانند نسکوهونیت، هیدرومگنزیت و دیپینگیت می‌شود که به افزایش مقاومت فشاری نهایی خاک کمک می‌کند(Unluer et al., 2011). خلاصه‌ای از انجام واکنش‌های منیزیم اکسید با خاک طبیعی در جدول (۹) آمده است.

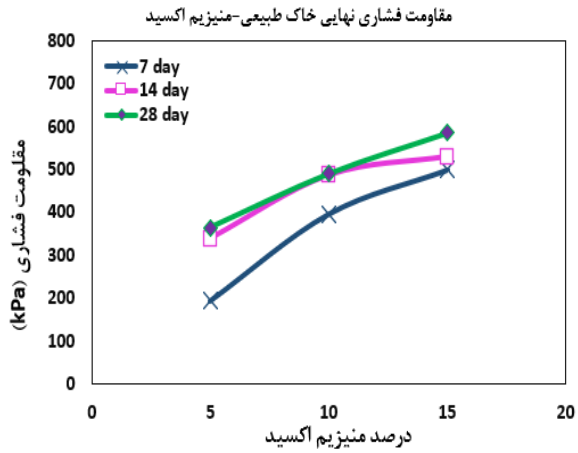
جدول ۹. روند تولید محصولات کربناسیون منیزیم اکسید (Cai and Liu., 2017)

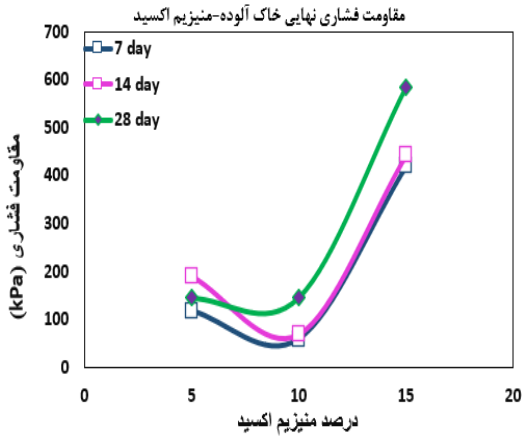
Table 9. Production process of magnesium oxide carbonation products (Cai and Liu., 2017)

$MgO + H_2O = Mg(OH)_2$	Brucite
$Mg(OH)_2 + CO_2 + H_2O = MgCO_3,3H_2O$	Nesquehonitw
$Mg(OH)_2 + CO_2 + H_2O = Mg_5(CO_3)_4,5H_2O$	Dypingite
$5Mg(OH)_2 + 4CO_2 = Mg_5(CO_3)_4(OH)_2,4H_2O$	Hydromagnesite

با توجه به شکل(۱۰)، کمینه مقدار مقاومت نهایی برای خاک آلوده-منیزیم اکسید برای ۱۰٪ درصد منیزیم اکسید با زمان عمل آوری ۷ روزه ۵۹ kPa است و بیشینه مقاومت نهایی برای خاک آلوده-منیزیم اکسید برای ۱۵٪ منیزیم اکسید با زمان عمل آوری ۲۸ روز ۵۸۵ kPa است.

با افزایش درصد منیزیم اکسید از ۵٪ به ۱۰٪ به سبب حضور بیشتر این ماده که منجر به جذب بیشتر ماده دی متیل فتالات به دلیل سطح ویژه بالا می‌شود که ژل نرم تشکیل شده سبب جلوگیری از انجام واکنش‌های میان ذرات منیزیم و ذرات رس می‌شود که پدیده مانع می‌شود تا انجام واکنش‌های هیدراتاسیون به طور کامل انجام نشود و همچنین به سبب حضور ماده دی متیل فتالات در فضای میان ذرات سبب کاهش اصطکاک بیشتر بین ذرات شده که مقاومت را کاهش می‌دهد و در آخر، نتایج آزمایش‌های تنش-کرنش نمونه‌ها در جدول شماره (۱۰) قرار داده شد.





شکل ۱۰. منحنی‌های مقاومت نهایی برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید

Fig. 10. Ultimate strength curves for natural soil and contaminated soil mixed with magnesium oxide

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

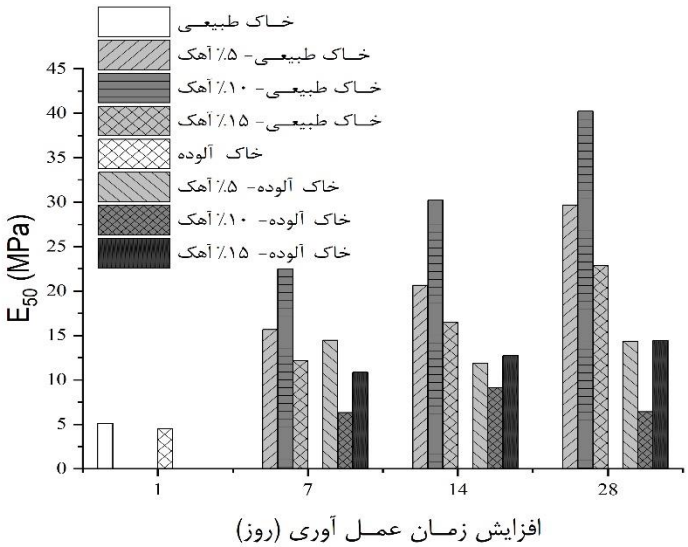
جدول ۱۰. نتایج تنش و کرنش برای نمونه‌های حاوی آهک و منیزیم اکسید در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

Table 8. Values of stress and strain for-mixture soil-samples with lime and magnesium oxide at different curing times

Sample	Lime (%)	Magnesium Oxide (%)	Curing time (days)	Axial strain (%)	Compressive strength (kPa)
Natural soil	0	0	0	2.8	141
Contaminated soil	0	0	0	2.9	139
Natural Soil - lime	5	0	7	2.7	541
			14	2.75	720
			28	2.5	860
	10	0	7	2.1	558
			14	2.4	835
			28	2.64	906
	15	0	7	4	580
			14	4	891
			28	4.1	1070
Contaminated soil mixed with lime	5	0	7	3	345
			14	2.65	245
			28	4	542
	10	0	7	3.2	170
			14	2.6	138
			28	2.7	173
	15	0	7	2.5	193
			14	2.45	243
			28	2.45	258
Natural Soil - magnesium oxide	0	5	7	1.6	195
			14	2	339
			28	1.25	364
	0	10	7	2.3	397
			14	2.3	487
			28	1.95	490
	0	15	7	1.95	499
			14	2.05	530
			28	2.7	585
Contaminated soil mixed with magnesium oxid	0	5	7	2.9	118
			14	2.5	191
			28	1.8	145
	0	10	7	2	59
			14	2.8	69
			28	0.75	146
	0	15	7	3	420
			14	2.2	443
			28	2.7	585

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

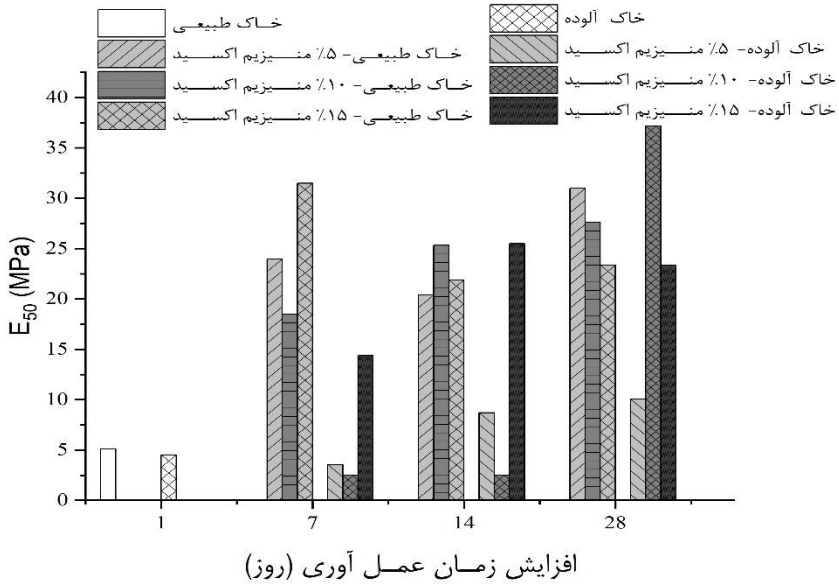
ضریب کشسانی (الاستیک) مربوط به ۵۰٪ از مقاومت نهایی (E_{50}) برای هر نمونه از منحنی تنش و کرنش مربوطه محاسبه گردید. مقادیر آن‌ها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) برای آهک و منیزیم اکسید اختلاط یافته با خاک طبیعی و خاک آلوده نشان داده شده است. مقادیر E_{50} برای خاک طبیعی و خاک آلوده به ترتیب برابر ۵.۱ MPa و ۴.۵ MPa گردید. افزودن آهک و منیزیم اکسید به خاک طبیعی و آلوده موجب تغییر در مقادیر اولیه آن گردیده است. بطوری که برای ۵٪ از آهک مقادیر آن در زمان‌های عمل آوری ۷و ۱۴ و ۲۸ روزه برای خاک طبیعی به ترتیب معادل ۱۵.۶ MPa، ۲۰.۶ MPa و ۲۹.۶ MPa گردید. این مقادیر برای خاک آلوده در همین بازه زمانی به ترتیب برابر با ۱۴.۴ MPa، ۱۱.۸ MPa ۱۴.۳ MPa می‌باشد. شکل (۱۲) E_{50} خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید را نشان می‌دهد. خاک طبیعی اختلاط یافته با منیزیم اکسید E_{50} بیشتری نسب به خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید بدست آمده است (البته این امر در برخی از نمونه‌های آلوده صادق نمی‌باشد که علت آن به تغییرات منحنی تنش-کرنش نمونه‌های خاک و پراکندگی داده‌ها ثبت شده مرتبط می‌باشد. از نتایج بدست آمده نتیجه‌گیری می‌شود که تغییرات E_{50} تابع از نوع ماده افزودنی و درصد آن و زمان عمل‌آوری می‌باشد. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2016) نیز نتایج مشابه‌ای برای خاک رسی آلوده شده به گلیسرول گزارش نمودند.



شکل ۱۱. منحنی‌های E50% برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک

Fig. 11. Variations of E50% for natural soil and contaminated soil mixed with Lime

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]



شکل ۱۲. منحنی‌های E50% برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با منیزیم اکسید

Fig. 12. Variation of E50% for natural soil and contaminated soil mixed with magnesium oxide

میکروسکوپ الکترونی روبشی

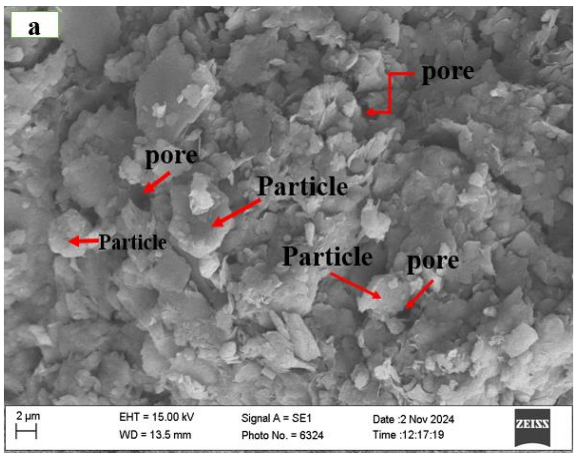
به منظور تحلیل و بررسی میکرو ساختار خاک در اثر آهک و منیزیم اکسید، و همچنین آرایش ذرات ناشی از افزودن ماده آلی دی‌متیل فتالات، نمونه‌ها با استفاده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. برای این بررسی، از نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده استفاده شده و اختلاط آهک و منیزیم اکسید با خاک طبیعی و آلوده به درصد وزنی ۱۰٪ و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز انجام گردید. در شکل (۱۳) تصاویر SEM برای خاک طبیعی و خاک آلوده به دی متیل فتالات نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل(۱۳-a) نشان داده شده، خاک طبیعی دارای ساختار مجتمع (flocculated) است به طوری که فضای بسیار کمی بین ذرات مشاهده می‌شود و ذرات خاک بدون هیچ اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

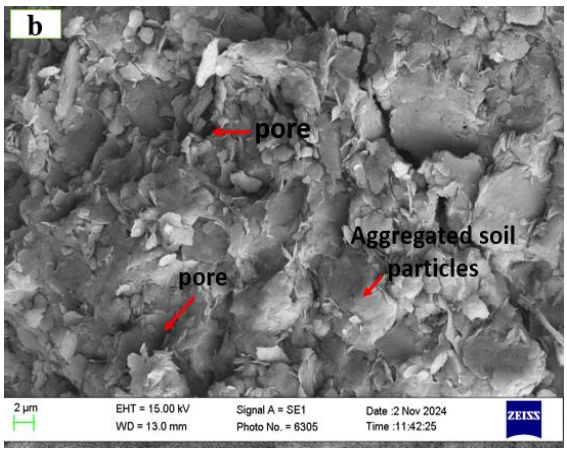
شکل شماره (۱۳-b) تغییر ساختار خاک را پس از افزودن دی‌متیل فتالات نشان می‌دهد. در مقایسه با خاک طبیعی، میزان فضاهای خالی بین ذرات تغییر کرده است. با افزودن دی‌متیل فتالات، ذرات خاک به یکدیگر چسبیده و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، دی‌متیل فتالات نسبت به آب دارای ثابت دی‌الکتریک کمتری است که این ویژگی موجب ایجاد ساختار فلوکوله می‌شود و بدین ترتیب، ذرات به یکدیگر متصل و ذرات بزرگ‌تری شکل می‌گیرند. شکل شماره (۱۳-c) ساختار خاک با افزودن آهک به خاک طبیعی نشان می‌دهد. با افزودن آهک سبب ایجاد واکنش‌های پزولانی میان Ca^{++} و سیلیکات‌ها و آلومینات‌های آزاد شده از رس می‌گردد که در نتیجه ژل‌های مانند CSH و CAH تشکیل می‌شود. این ژل‌ها همانند آن که در تصویر پ و ت مشاهده می‌کنید سبب چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود و همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری به یک جسم یکپارچه و سختی تبدیل می‌شود که افزایش مقاومت نمونه را دارد و همچنین شکل (۱۳-d) با افزودن آهک به خاک آلوده را مشاهده می‌کنید که واسطه اینکه ماده دی متیل فتالات دور ذرات آهک را پوشانده است مانع از ایجاد واکنش‌های هیدراتاسیون میان آهک و ذرات رس شده است و در نتیجه ژل‌های CSH و CAH کاسته شده و همچنین فضای میان ذرات نسبت به حالت خاک

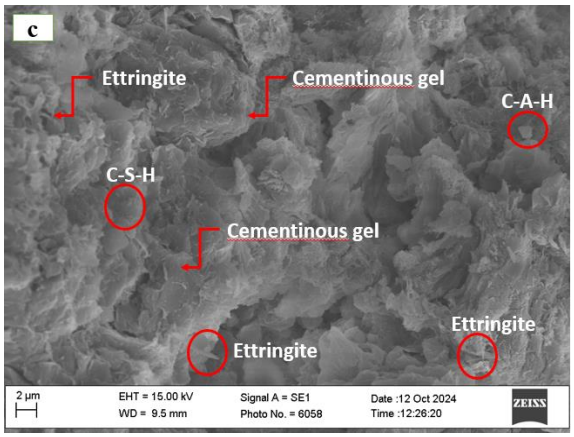
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

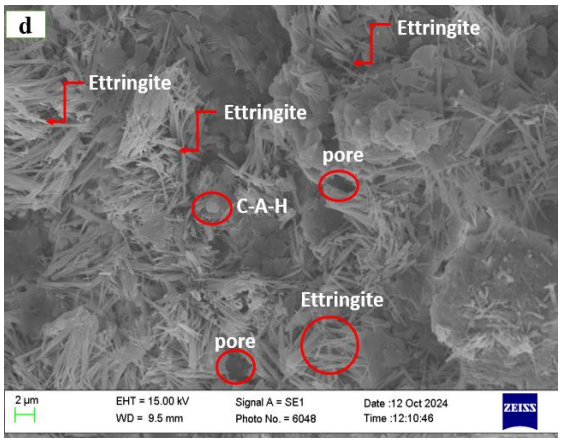
طبیعی-آهک افزایش یافته است که از دلایل کاهش مقاومت در شکل (۹) خاک آلوده-آهک می‌توان مرتبط دانست.

شکل شماره (۱۳-e) افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی را نشان می‌دهد که با افزودن منیزیم اکسید محصولات ناشی واکنش‌های هیدراتاسیون در جدول (۹) شکل گرفته است که این محصولات در افزایش مقاومت خاک طبیعی- منیزیم اکسید نقش دارند. شکل شماره (۱۳-f) افزودن منیزیم اکسید به خاک آلوده را نشان می‌دهد و همان طور که مشخص است فضای میان ذرات نسبت به خاک طبیعی-منیزیم اکسید افزایش پیدا کرده است که می‌تواند از دلایل کاهش مقاومت در شکل (۱۰) خاک آلوده-منیزیم اکسید اشاره کرد.

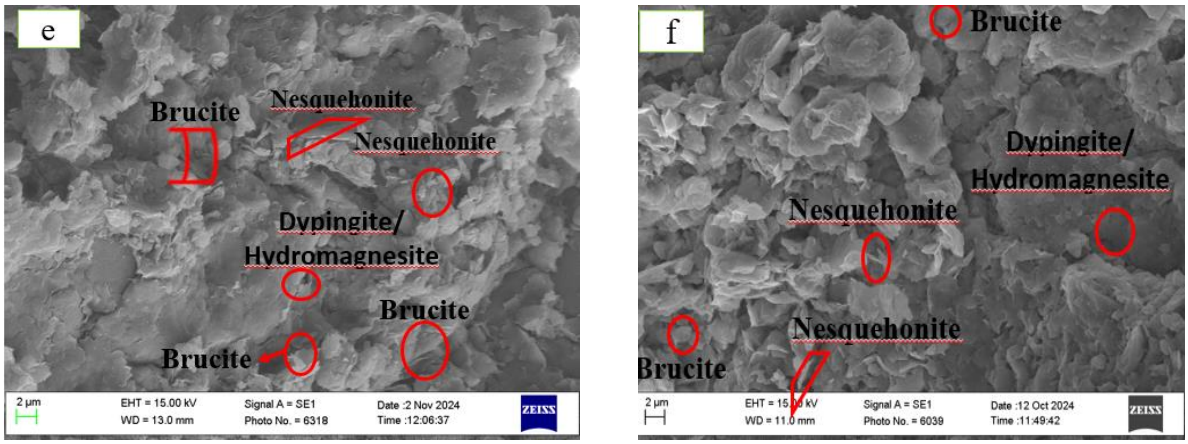








[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]



شکل ۱۳. تصاویر SEM نمونه‌های a) خاک طبیعی b) خاک آلوده c) خاک طبیعی-آهک d) خاک آلوده-آهک e) خاک طبیعی- منیزیم اکسید f) خاک آلوده-منیزیم اکسید

Fig. 13. SEM images of samples a) natural soil b) contaminated soil c) natural soil-lime d) contaminated soil-lime e) natural soil-magnesium oxide c) contaminated soil-magnesium oxide

نتیجه‌گیری

جهت اجرای پروژه‌های عمرانی در مکان‌های مختلف نیاز به خاک‌های می‌باشد لیکن ممکن است در بعضی از نواحی منابع خاک قرضه آلوده به آلاینده‌های آلی و نفتی باشند. شرایط اقتصادی برای اجرای پروژه‌های مورد نظر ایجاب می‌کند که انتقال خاک از محل‌های دیگر امکان‌پذیر نباشد لذا بایستی از خاک آلوده استفاده نمود. جهت کاربرد آن ابتدا باید خواص فیزیکی و مکانیکی آن بررسی شود و سپس در صورت لزوم بهسازی آن‌ها با مواد افزودنی انجام و سپس با منظور نمودن مسائل زیست محیطی مورد استفاده قرار گیرند.

در این پژوهش، بهسازی یک خاک رس آلوده به دی متیل فتالات مورد بررسی قرار گرفت. مواد افزودنی شامل آهک و منیزیم اکسید در درصدهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات شامل حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت تک محوری بر روی خاک طبیعی و خاک آلوده و نیز مخلوط آن‌ها با درصدهای مختلف مواد افزودنی انجام گردید و نتایج زیر حاصل گردید.

- ❖ افزودن آهک و منیزیم اکسید به خاک تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی آن دارد. به طوری که افزایش یا کاهش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به تعاملات شیمیایی ناشی از افزودنی‌ها مرتبط است. دی متیل فتالات باعث کاهش حد روانی و افزایش فلوکوله شدن ذرات خاک می‌شود. در مورد آهک، با افزودن ۵٪ آهک به خاک طبیعی و همچنین خاک آلوده سبب کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری می‌گردد و با افزایش درصد آهک به ۱۰٪ و ۱۵٪ منجر به افزایش حد روانی و حد خمیری می‌شود. همچنین، منیزیم اکسید در ۵٪ حد روانی و حد خمیری را افزایش می‌دهد، اما در ۱۰٪ و ۱۵٪ حد روانی را کاهش و حد خمیری افزایش می‌یابد.
- ❖ افزودن دی متیل فتالات به خاک رسی موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی می‌شود.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

- افزودن آهک به خاک طبیعی و آلوده، منجر به کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه تراکمی می‌شود. همچنین افزودن آهک باعث افزایش مقاومت خاک طبیعی و E_{50} می‌گردد که این افزایش مقاومت و E_{50} به درصد آهک به کار رفته و زمان عمل آوری بستگی دارد. در مورد خاک آلوده، افزودن آهک سبب کاهش مقاومت می‌شود.
- افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی باعث تغییر در مشخصات تراکمی شده است به طوریکه وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک کاهش می‌یابد و سبب کاهش درصد رطوبت بهینه تراکمی می‌گردد. افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی باعث افزایش مقاومت و E_{50} نمونه‌ها می‌شود. مقایسه تغییرات مقاومتی در خاک آلوده و طبیعی نشان می‌دهد که خاک آلوده در درصدهای ثابت و زمان عمل آوری ثابت، مقاومت و E_{50} کمتری به دست آورده است. به طوری که با افزودن ۱۰٪ منیزیم اکسید، مقاومت خاک آلوده کاهش می‌یابد، اما با افزودن ۱۵٪ منیزیم اکسید، مقاومت خاک آلوده افزایش پیدا کرده است.
- نتایج آزمایشات SEM نشان می‌دهد که تغییراتی که در خواص مکانیکی و فیزیکی خاک طبیعی و خاک آلوده به وجود می‌آید، ناشی از یک سری واکنش‌های شیمیایی است. این واکنش‌ها به علت مواد تولید شده در مراحل مختلف هیدراتاسیون بین ماده افزودنی، خاک و آلاینده به وجود آمده‌اند.

References

Al-Rawas, A., Hassan, H. F., Taha, R., Hago, A., Al-Shandoudi, B., & Al-Suleimani, Y. (2005). Stabilization of oil-contaminated soils using cement and cement by-pass dust. Management of Environmental Quality: An International Journal, 16(6), 670-680.

Afsari, E. Estabragh, A. Mohaddeh, A. (2021). Effect of Glycerol and Acetone on the physical and mechanical properties of a clay soil. Journal of Engineering Geology. 15 (3) :361-378.

Ansar Shourijeh, A. & Raeesi Estabragh, A. (2022). Evaluation of the Effect of Activated GGBS and Hydrated Lime on the Improvement of a Clay Soil Contaminated with Methyl Tert-Butyl Ether. Iranian Journal of Soil and Water Research, 53(8),1743-1756.doi: 10.22059/ijswr.2022.345688.669316. (in Persian)

Ansar Shourijeh, A., Raeesi Estabragh, A., & Amini, M. (2023). Effect of Magnesium Oxide and Lime on the Improvement a Clay Soil Contaminated with MTBE. Civil Infrastructure Researches, 9(1), 29-45.

Bui, T. T., Alves, A., Palm-Cousins, A., Voorspoels, S., Covaci, A., & Cousins, I. T. (2017). Estimating uptake of phthalate ester metabolites into the human nail plate using pharmacokinetic modelling. Environment International, 100, 148-155.

Cai, G., & Liu, S. (2017). Compaction and mechanical characteristics and stabilization mechanism of carbonated reactive MgO-stabilized silt. KSCE Journal of Civil Engineering, 21(7), 2641-2654.

Chen, H., Jiang, Y., Zhang, W., & He, X. (2017). Experimental study of the stabilization effect of cement on diesel-contaminated soil. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 50(2), 199-205.

Das, B. M. (1995). Principles of foundation engineering PWS Publ. Co., Boston.

Dermatas, D., & Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. Engineering geology, 70(3-4), 377-394.

Eskandari, A,. and Hodhodi, M. (2014). Investigation of the effect of stabilizing clay with lime, First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tehran, .(in Persian)

Estabragh, A.R., A. Ansar Shourijeh, K. Rezaei, A.A. Javadi, & M. Amini. (2024). Stabilization and Solidification of a clay soil contaminated with

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]

MTBE by using MgO and hydrated lime. Soil Sediment. Contam. 33(2): 175-94.

Estabragh, A. R., Amini, M., Javadi, A. A., & Noguera, C. L. (2023). Remediation of a clay soil contaminated with phenanthrene by using mixture of bentonite and cement. Environmental Progress & Sustainable Energy, 42(3), e14055.

Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., & Javadi, A. A. (2011). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(7), 969-976.

Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., Moradi, M., & Javadi, A. A. (2014). Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol. Engineering geology, 178, 102-108.

Estabragh, A. R., Jandari, F., Javadi, A. A., & Amini, M. (2022). Effect of magnesia on stabilization of contaminated clay soil. ACI Materials Journal, 119 (3).

Estabragh, A. R., Khatibi, M., & Javadi, A. A. (2016). Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(4), 04015157.

Estabragh, A.R., Jahani, A., Javadi, A.A., Amini, M & khajepour, H. (2025). Effect of different agents on the stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. Geomechavics and Geoengineering. Vol.20, No.1, pp. 179-197.

Estabragh, A. R., Pereshkafti, M. R. S., Parsaei, B., & Javadi, A. A. (2013). Stabilised expansive soil behaviour during wetting and drying. International Journal of Pavement Engineering, 14(4), 418-427.

Giam, C. S., Atlas, E., Powers Jr, M. A., & Leonard, J. E. (1984). Phthalic acid esters. Anthropogenic compounds, 67-142.

Jaynes, W. F., & Vance, G. F. (1999). Sorption of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) compounds by hectorite clays exchanged with aromatic organic cations. Clays and Clay Minerals, 47(3), 358-365.

Jandari,. F. Estagragh,. A. Mohaddeh,. A. Abdollahi,. A. (2021). Improvement of soil contaminated with organic matter glycerol with magnesium oxide. Journal of Geology of Engineering. 15(4):62-78.

Jin, F., & Al-Tabbaa, A. (2013). Thermogravimetric study on the hydration of reactive magnesia and silica mixture at room temperature. Thermochimica acta, 566, 162-168.

Jin, F., Gu, K., & Al-Tabbaa, A. (2015). Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste. Cement and Concrete Composites, 57, 8-16.

Khatibi, M. & Reissi Estabragh, A. (2015). The effect of glycerol on compressional strength of soil and soil – cement mixture. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 8(Number 1 & 2), 91-98. (in Persian)

Liska, M., & Vandeperre, L. J. (2008). Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement- based pressed masonry units, Advances in Cement Research, 20(2), 53-64. doi: 10.1680/adcr.2008.20.2.53

Mahdavian, S., Rashidi, N., Raeesi, A., & Abdullahi, J. (2025). Effect of magnesium chloride solution on the improvement of a clay soil. Journal of Engineering Geology. 19 (1) :60-83.

Meegoda, N. J., & Rajapakse, R. A. (1993). Short-term and long-term permeabilities of contaminated clays. Journal of Environmental Engineering, 119(4), 725-743.

Nasiri, H., Khayat, N., & Nazarpour, A. (2025). Long-term performance and durability of lime-stabilized oil-contaminated soils. Heliyon, 11(2).

Net, S., Sempéré, R., Delmont, A., Paluselli, A., & Ouddane, B. (2015). Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices. Environmental science & technology, 49(7), 4019-4035.

Ouhadi,V., Amiri,M., Bagher,M. (2016).Microstructural Evaluation of Progress of Lime Pozzolanic Reactions in Stabilization and Solidification of Zn Contaminant. Journal of Environmental Science and Technology,1(),96-106. (in Persian)

Raeesi Estabragh, A. , Fathali, H. , Rezaee tireh shabankareh, K. and Abdolhossein, H. (2023). Remediation of A Clay Soil Contaminated With Dimethyl Phthalate By Using Electrokinetic Method. Ferdowsi Civil Engineering, 36(1), 69-84. (in Persian)

Rafiei, A., Ahmadi, H., & Ranjbar, P. Z. (2025). Using nano-cement for the improvement of clayey soils affected by municipal leachate. Case Studies in Construction Materials, 22, e04924

Rahimi, H., Abbasi, N.,(2021). Geotechnical Engineering Ground Modification Principals and Method, Vol. 2: Reinforcement and Physical-Chemical Methods. University of Tehran Press, Tehran, 1097p.

Reed, D. (2013). Structural adjustment, the environment and sustainable development. Routledge.

Sheng, G., Xu, S., & Boyd, S. A. (1996). Cosorption of organic contaminants from water by hexadecyltrimethylammonium-exchanged clays. Water Research, 30(6), 1483-1489.

Swartjes, F. A. (Ed.). (2011). Dealing with contaminated sites: from theory towards practical application. Springer Science & Business Media.

Unluer, C., & Al-Tabbaa, A. (2011). Green construction with carbonating reactive magnesia blocks: effect of cement and water contents.

Unluer, C., & Al-Tabbaa, A. (2012). Effect of aggregate size distribution on the carbonation of reactive magnesia based porous blocks. In 18th Annual International Sustainable Development Research Conference, Hull, UK.

Vandeperre, L. J., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2008). Microstructures of reactive magnesia cement blends. Cement and Concrete Composites, 30(8), 706-714.

Wang, F., Xu, J., Yin, H., Zhang, Y., Pan, H., & Wang, L. (2021). Sustainable stabilization/solidification of the Pb, Zn, and Cd contaminated soil by red mud-derived binders. Environmental Pollution, 284, 117178.

Wu, D. L., Hu, B. L., Zheng, P., & Qaisar, M. (2007). Anoxic biodegradation of dimethyl phthalate (DMP) by activated sludge cultures under nitrate-reducing conditions. Journal of Environmental Sciences, 19(10), 1252-1256.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-09-21]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.5.2]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1016072]