

Effect of magnesium chloride solution on the improvement of a clay soil

Soroush Mahdavian¹, Navid Rashidi², Ali Raesi Estabragh^{3✉}, and Jamal Abdollahi⁴

1. MSc Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mahdaviansoroush@ut.ac.ir
2. Phd Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: rashidi.navid@ut.ac.ir
3. Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: raesi@ut.ac.ir
4. Lecturer, Department of Irrigation Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jaabaik@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 22 January 2025
Accepted 1 June 2025

Keywords:

Clay soil, Magnesium chloride, Swelling, Strength, Curing time, SEM.

ABSTRACT

Clay soils typically have low strength and a high swelling percentage. They are considered as problematic soils in Civil Engineering projects. This research study examined the effects of magnesium chloride ($MgCl_2$) solution on the clay soil improvement through conducting laboratory experiments. The experimental program included Atterberg limits, compaction, swelling, unconfined compression strength (UCS) and Scanning Electron Microscopy (SEM) tests. Available clay soil in the Lab was mixed with $MgCl_2$ solution at weight percentages of 3%, 5%, 7% and 10%. Samples for the swelling and strength tests were made using the static compaction method. The moisture and dry unit weight of the prepared samples were the same as those of the corresponding compaction curves. The strength test results showed that the final strengths of the samples with 3% $MgCl_2$ at 7-, 14-, and 28-day curing times were 1401, 2018, and 1848 kPa, respectively. The results also showed that a reduction in strength of the samples occurred with more than a 3% solution of $MgCl_2$. For samples with 10% $MgCl_2$ solution, the strength decreased until 14 days of curing time, but increased thereafter. Additionally, the results indicated that the reduction in swelling percentage compared to natural soil was 4.95%, 3.98%, 2.8%, and 3.9% for samples with 3%, 5%, 7%, and 10% $MgCl_2$, respectively, showing that the reduction in swelling depends on the $MgCl_2$ percentage. Additionally, the SEM results showed that the improvement in the soil was due to chemical reactions between the soil and $MgCl_2$.

Introduction

Clay soils are considered problematic for construction projects due to their low bearing capacity, strength, permeability, compressibility, and tendency to swell. Several methods can be used to stabilize soils. These methods can be categorized as mechanical or chemical. Reinforcement is a widely used mechanical method in geotechnical engineering for constructing road and railway embankments, stabilizing slopes, and improving soft ground. Reinforced soil is a composite construction material whose strength is enhanced by the addition of reinforcement. In general,

incorporating reinforcement inclusions into soil is an effective and reliable way to improve its engineering properties. Estabragh et al. (2011b) used randomly reinforced soil to improve the properties of clay soil, stating that this method is suitable for soil improvement. Chemical stabilization involves adding agents, such as lime, cement, or fly ash, to natural soil to produce new cementitious materials that enhance the soil's engineering properties. The quantity of the agent used depends on various factors, such as the percentage of clay, the type of clay minerals, the percentage of organic matter in the soil, and the curing time.

Cite this article: Mahdavian, S., Rashidi, N., Estabragh, A.R., Abdollahi, J. (2025). Effect of magnesium chloride solution on the improvement of a clay soil. *Journal of Engineering Geology*, 19 (1), 60-83. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1016071>

Researchers such as Bell (1996) and Little and Nair (2009) used lime and cement as additives to improve the behavior of clay soils. They reported that their results were acceptable. Recently, researchers such as Estabragh et al. (2022) used MgO to stabilize a clay soil due to its advantages over cement. They found that its effect on stabilization is acceptable compared to cement and lime. Latifi et al. (2015) and Turkoz et al. (2014) used $MgCl_2$ solutions to stabilize clay soils. They found that this solution improves the behavior of expansive soils. A review of the literature shows that investigations into the effects of $MgCl_2$ solutions on stabilized clay soils are relatively rare. Therefore, this study focused on examining the behavior of clay soils mixed with different percentages of $MgCl_2$ solution and curing times through various tests.

Material and methods

A set of experimental tests was conducted to study the effects of different percentages of $MgCl_2$ solution on the physical and mechanical behaviors of a clay soil with low plasticity (CL) at different curing times. The soil was mixed with 3%, 5%, 7%, and 10% $MgCl_2$ solution. The tests included the Atterberg limits, compaction, swelling, and unconfined compressive strength (UCS). According to ASTM standards, these tests were conducted on samples of natural and mixed soils with different percentages of $MgCl_2$ solution. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) tests were conducted on samples of natural and mixed soils with $MgCl_2$ at different curing times. The SEM test was conducted to obtain more information about the microstructure of soil under different conditions (natural and mixed with different percentages of $MgCl_2$ at various curing times). The soil samples were formed using the static compaction method in special molds with a loading machine. The water content and dry unit weight of the prepared samples corresponded to their respective compaction curves. The dimensions of the mold used to prepare the

samples for swelling tests were the same as the ring of the oedometer. The mold used for preparing the UCS (unconfined compressive strength) samples had a diameter of 50 mm and a length of 100 mm. Free swelling tests continued until swelling reached a constant value. Swell potential is defined as the maximum swelling that can be achieved by the sample. The swelling pressure was determined using the consolidation method. Loading continued until deformation reached zero, which was exactly the initial height of the sample. For the UCS tests, the loading rate was set to 1 mm/min. Loading continued until sample failure was achieved, and the load value was continuously recorded. Each of the aforementioned tests was repeated three times, and the average results were presented as the final results.

Results and discussion

The Atterberg limits (LL, PI, and PI) results for the natural soil and the soil mixtures with 3%, 5%, 7%, and 10% $MgCl_2$ solutions are presented in Table 1. As shown in the table, the values of the Atterberg limits generally decrease with an increase in the percentage of $MgCl_2$. Table 2 shows how the compaction parameters (maximum dry unit weight and optimum water content) change with increasing percentages of $MgCl_2$. As shown in Table 2, there is no specific trend in the variation of the optimum water content as the percentage of $MgCl_2$ increases. However, it causes an increase in maximum dry unit weight. Figures 1 and 2 show the free swelling and swelling pressure values for natural soil and soil mixed with different percentages of $MgCl_2$. As shown in Fig. 1, the free swelling values were 8.9% for natural soil and 4.95%, 3.98%, 2.8%, and 3.99%, respectively, for mixtures of soil with 3%, 5%, 7%, and 10%. A similar trend is seen in Fig. 2. These figures show that free swelling and swelling pressure both decrease as the percentage of $MgCl_2$ increases. Figure 3 shows the variation in final strength for different percentages of $MgCl_2$ at curing times of 7, 14,

and 28 days. As shown in the figure, the final strengths of the samples with 3.0% MgCl_2 at curing times of 7, 14, and 28 days were 1401,

2018, and 1848 kPa, respectively. These strength values show that strength increases until day 14, then decreases with increasing curing time.

Table 1. Results of Atterberg Limits Tests

PI%	PL%	LL%	Sample
11.3	20.7	32	Soil
11.1	20.2	31.3	Soil + MgCl_2 3%
11	20	31	Soil + MgCl_2 5%
10.7	19.3	30	Soil + MgCl_2 7%
10.6	19.3	29.9	Soil + MgCl_2 10%

Table 2. Results of Compaction tests

Maximum Dry unit weight, (kN/m ³)	Optimum water Content (%)	Sample
17.81	16	Soil
17.51	15.5	Soil + MgCl_2 3%
17.59	15.2	Soil + MgCl_2 5%
17.59	15	Soil + MgCl_2 7%
18.1	14.4	Soil + MgCl_2 10%

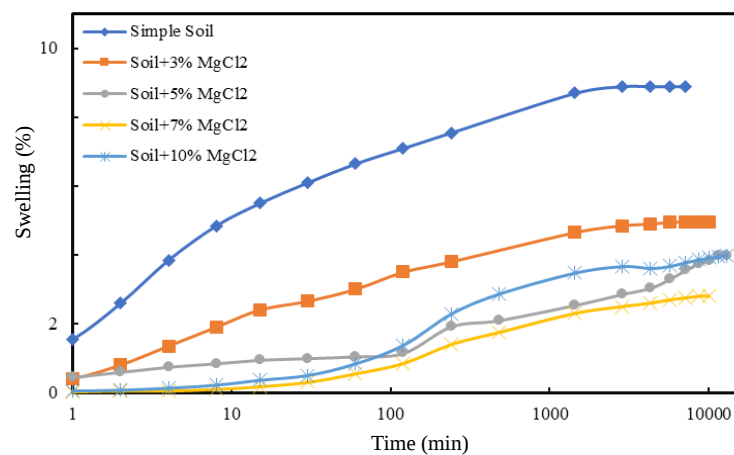


Fig. 1. Comparison of free swelling curves for natural soil and soil mixed with different weight percentages of MgCl_2

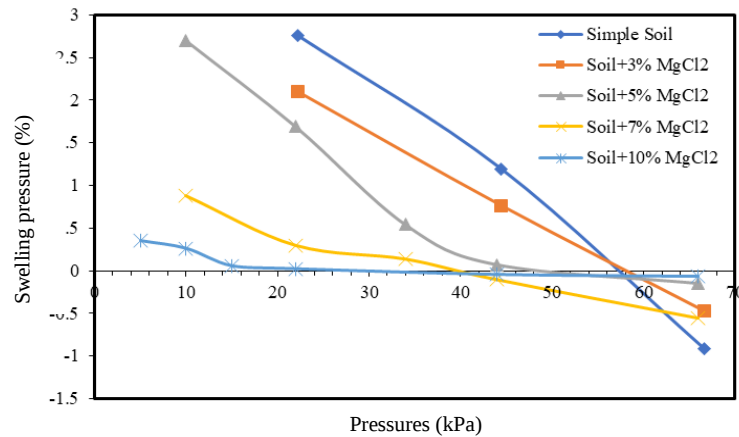


Fig. 2. Comparison of swelling pressure curves for natural soil and soil mixed with different weight percentages of MgCl_2

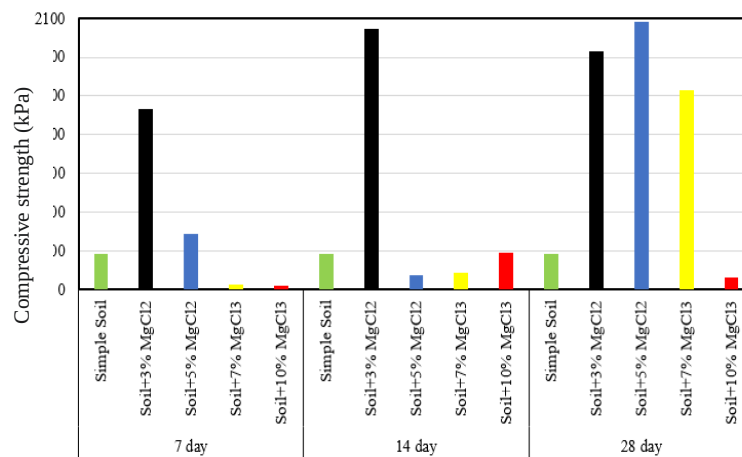
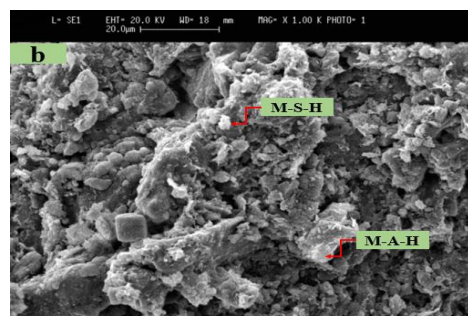
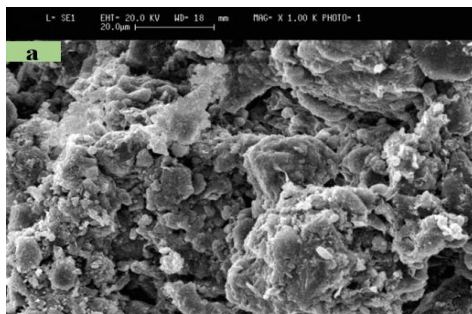


Fig. 3. Ultimate strength for natural soil and soil mixed with different weight percentages of MgCl_2 at different curing times

SEM results (Fig. 4) also indicate that natural soil structures differ from those of soil mixtures with various percentages of MgCl_2 . This difference is likely due to the interaction

between the soil particles and the MgCl_2 solution.



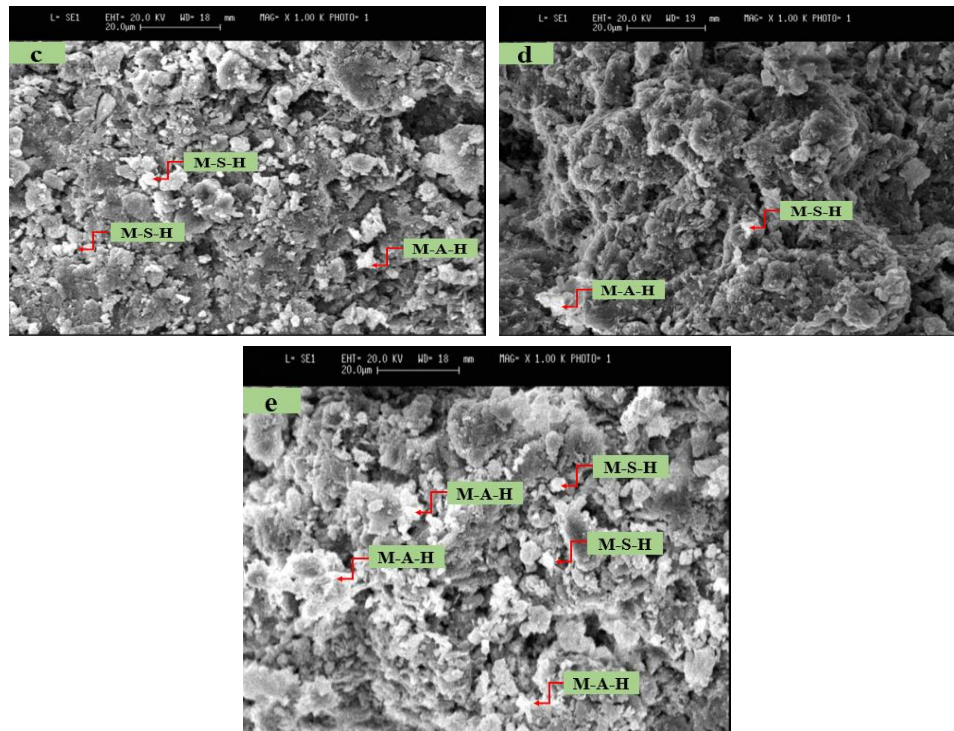


Fig. 4. Scanning electron microscopy (SEM) images are at the scale of $20 \times 20 \mu\text{m}$ for natural soil and mixed soil with different weight percentages of MgCl_2 (a) natural soil, (b) 3%, (c) 5%, (d) 7% and (e) 10%

The change in soil behavior depends on many factors, such as changes in the initial soil structure. This can be explained by the diffuse double layer (DDL). The DDL is a thin layer of water around soil particles. Reducing the thickness of this layer causes flocculation in the soil structure (Mitchell and Soga, 2005). In a flocculated structure, particles adhere to each other, forming coarser particles and reducing the specific surface area compared to natural soil. Under these conditions, the capacity to absorb water decreases, resulting in a reduction in Atterberg limits values (see Table 1). However, these changes result in a reduction in Atterberg limits and swelling potential and an increase in maximum dry unit weight in compaction tests. This is due to an increase in the degree of flocculation of the soil and a reduction in the particles' specific surface area. As seen in Fig. 3, variations in strength are a function of curing time and the percentage of MgCl_2 . A solution of MgCl_2 contains Mg^{2+} and Cl^- ions. The Mg^{2+} ion reacts with the OH^- ion to produce $\text{Mg}(\text{OH})_2$, which is called brucite. Brucite reacts

with CO_2 and water to produce nesquehonite ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hydromagnesite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), and dypingite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Yi, Liska, and Al-Tabbaa (2014) stated that nesquehonite produces higher strength than the other products (hydromagnesite and dypingite) during the carbonation process. These materials have an important effect on the strength of soil samples. Increasing the amount of MgCl_2 increases the amount of these materials, but their effect on strength is not the same. Water and CO_2 play an important role in the formation of these materials. The results show that an increase in strength is seen with 3% MgCl_2 , but the opposite is observed with 5%, 7%, and 10%. It can be concluded that MgCl_2 has a high potential for absorbing water, and at these percentages, the water content is insufficient for forming cementitious materials, resulting in a reduction in strength.

Conclusion

The Mg^{2+} ion reacts with the OH^- ion to produce $\text{Mg}(\text{OH})_2$, which is called brucite.

Brucite reacts with CO_2 and water to produce nesquehonite ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hydromagnesite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), and dypingite ($4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Yi, Liska, and Al-Tabbaa (2014) stated that nesquehonite produces higher strength than the other products (hydromagnesite and dypingite) during the carbonation process. These materials have an important effect on the strength of soil samples. Increasing the amount of MgCl_2 increases the amount of these

materials, but their effect on strength is not the same. Water and CO_2 play an important role in the formation of these materials. The results show that an increase in strength is seen with 3% MgCl_2 , but the opposite is observed with 5%, 7%, and 10%. It can be concluded that MgCl_2 has a high potential for absorbing water, and at these percentages, the water content is insufficient for forming cementitious materials, resulting in a reduction in strength.



اثر محلول منیزیم کلرید بر بهسازی یک خاک رسی

سروش مهدویان^۱، نوید رشیدی^۲، علی رئیسی استبرق^۳، جمال عبداللهی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mahdaviansorouh@ut.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران. کرج، ایران. رایانامه: rashidi.navid@ut.ac.ir

۳. استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران. کرج، ایران. رایانامه: raeesi@ut.ac.ir

۴. مربی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران. کرج، ایران. رایانامه: jaabaik@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

کلیدواژه‌ها:

خاک رس، تورم آزاد، فشار تورمی، مقاومت تک محوری، محلول منیزیم کلرید، SEM.

خاک‌های رسی معمولاً دارای مقاومت کم و درصد تورم زیاد می‌باشند. آن‌ها از گروه خاک‌های مشکل آفرین در پروژه‌های عمرانی تلقی می‌شوند. در این کار تحقیقاتی اثر محلول منیزیم کلرید ($MgCl_2$) بر بهسازی یک خاک رسی با انجام آزمایشات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات برنامه‌ریزی شده به منظور انجام این تحقیق شامل حدود اتربرگ، تراکم، تورم، مقاومت و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) می‌باشد. خاک رس موجود با درصدهای وزنی ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ از محلول $MgCl_2$ مخلوط شده و برای انجام آزمایش تورم و مقاومت، نمونه‌ها با استفاده از روش تراکم استاتیکی تهیه گردید. این نمونه‌ها دارای رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم مطابق با منحنی تراکم مربوطه بودند. نتایج آزمایش‌های مقاومتی نشان داد که مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌های تهیه شده با محلول ۳٪ $MgCl_2$ مقادیر مقاومت نهایی برای نمونه‌های با زمان عمل آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه برابر ۱۴۰۱ و ۲۰۱۸ و ۱۸۴۸ کیلو پاسکال می‌باشد. نتایج همچنین نشان دادند که برای مقادیر بیشتر از ۳٪ کاهش مقاومت در نمونه‌ها رخ می‌دهد. از طرف دیگر برای ۱۰٪ از محلول $MgCl_2$ تا زمان عمل آوری ۱۴ روزه مقاومت کاهش می‌یابد ولیکن برای ۲۸ روزه روند آن افزایشی است. همچنین دیگر نتایج نشان دادند که افزودن این محلول با درصدهای ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ به خاک مقادیر درصد تورم معادل ۴/۹۵، ۳/۹۸، ۲/۸ و ۳/۹ نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد. بنابراین افزودن محلول $MgCl_2$ به خاک موجب کاهش پتانسیل تورم و فشار تورمی می‌گردد و مقدار این کاهش متناسب با افزایش درصد $MgCl_2$ می‌باشد. بطوریکه برای مقادیر تغییرات فیزیکی و مکانیکی خاک که منجر به بهسازی آن می‌شود، ناشی از واکنش‌های شیمیایی روی داده بین خاک و $MgCl_2$ است، به طوریکه نتایج SEM حاکی از آن می‌باشد.

مقدمه

گرفته و با انتخاب بهترین روش نسبت به تثبیت آن‌ها اقدام گردد. بهسازی این نوع خاک‌ها به روش‌های مختلف مانند روش‌های مکانیکی و شیمیایی صورت می‌پذیرد (Namdaraligoudarz et al., 2010). مسلح‌سازی خاک یکی از روش‌های مکانیکی است که به دو روش تصادفی و غیر تصادفی انجام می‌شود که در روش مسلح‌سازی تصادفی،

خاک‌های رسی به دلیل ظرفیت باربری، مقاومت، نفوذ پذیری کم، تراکم پذیری و تورم بالا از جمله خاک‌های مشکل آفرین در اجراء پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. به منظور افزایش ضریب اطمینان پروژه‌های که قرار است از این نوع خاک‌ها ساخته شوند و یا سازه‌های مانند سازه‌های آبی که روی آن‌ها احداث گردند، بهسازی آن‌ها باید مورد مطالعه قرار

(Fly-Ash) بر روی خاک رسی، بیان کردند که این ماده به تنهایی تأثیر قابل توجهی در بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک ندارد و نتایج نشان داد که مخلوط کردن خاکستر بادی با آهک منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود. به علاوه، افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز نیز به بهبود بیشتر مقاومت خاک حاصل، کمک می‌کند. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2025) اثر مواد افزودنی مانند مخلوطی از سرباره (GGBS) و منیزیم اکسید (MgO) و مخلوطی از سرباره (GGBS) و سیمان (Cement) را در بهسازی یک خاک رسی آلوده به گلیسرول مطالعه نمودند آن‌ها گزارش نمودند که مواد افزودنی موجب افزایش مقاومت خاک می‌گردد. اخیراً متخصصین شیمی از موادی تحت عنوان پلیمر برای بهسازی این خاک‌ها استفاده نموده‌اند که می‌توان به تحقیقات ماجبی و همکاران (Ajayi-Majebi et al., 1991) و بولندر (Bolander., 1999) اشاره کرد. آن‌ها با کاربرد این مواد قادر به بهسازی خاک‌های متورم شونده گردیدند. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2024) اثر دو نوع پلیمر را بر خصوصیات تورمی یک خاک رسی متورم شونده بررسی نمودند و کاهش خصوصیات تورمی خاک را گزارش نمودند. گروهی از محققین نیز برای جایگزین کردن سیمان به علت هزینه‌های بالا و آلودگی محیط زیست، مواد افزودنی مانند MgO را برای بهسازی این خاک‌ها پیشنهاد نموده‌اند. (Jin, Gu and Al-Tabbaa., 2015) و (Yi Liska and Al-Tabbaa., 2014). آن‌ها با انجام آزمایشات مختلف دریافتند که این ماده نیز خاصیت بهسازی خاک رسی را داراست. استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022) بهسازی یک خاک رسی را با افزودن MgO به آن مطالعه نمودند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند. در بین مواد افزودنی فوق، سیمان و آهک معمول‌ترین و اقتصادی‌ترین مواد می‌باشند. لیکن در خاک‌های رسی حاوی سولفات کاربرد این مواد موجب

درصد مشخصی از الیاف طبیعی یا مصنوعی با خاک مخلوط شده و موجب بهسازی خاک می‌گردد (Estabragh et al., 2011b). احمد و همکاران (Ahmad et al., 2009)، اتوم و همکاران (Attom et al., 2009) و تانگ و همکاران (Tang et al., 2007) با انجام آزمایشات مختلف دریافتند که این روش موجب بهبود خواص خاک می‌گردد. در روش شیمیایی مواد افزودنی مانند آهک، سیمان یا خاکستر بادی با درصدهای وزنی معین به خاک افزوده می‌شود، از اختلاط بین آن‌ها و خاک رسی یکسری واکنش‌های شیمیایی مانند تبادل یونی و تولید مواد پوزولانی صورت می‌پذیرد. بطوریکه خواص فیزیکی و مکانیکی خاک تا حدی بهبود می‌یابد. محققینی مانند بل (Bell., 1996) و شرود (Sherwood., 1993) بهسازی یک خاک رسی را با افزودن آهک با درصدهای مختلف مطالعه نمودند و نتیجه‌گیری کردند که خواص خاک تغییر و بهبود می‌یابد و قابلیت کاربرد آن در پروژه افزون می‌گردد. سیمان نیز به عنوان یکی از مواد افزودنی معمول برای این امر مورد استفاده قرار می‌گیرد، محققینی مانند لیتل و نایر (Little and Nair., 2009)، ابوفرسخ و همکاران (Abu-Farsakh et al., 2015) بهسازی خاک رسی را با افزودن سیمان مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند که با افزودن سیمان به خاک رسی در مرحله اول تبادل یونی Ca^{++} بین سیمان و کانی‌های رسی صورت گرفته و با گذشت زمان سیمان با SiO_2 و Al_2O_3 موجود در خاک رس واکنش نشان می‌دهد و تولید مواد چسبناکی می‌نماید که این واکنش‌ها منجر به چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر می‌شوند که تحت عنوان واکنش‌های پوزولانی شناخته می‌شوند. در مرحله واکنش‌های پوزولانی، مواد تولید شده، پیوند بین ذرات خاک را تقویت کرده و سطح ویژه ذرات را کاهش می‌دهند. این تغییرات به افزایش مقاومت و کاهش قدرت تورم خاک منجر می‌گردد. دیپاک و همکاران (Deepak et al., 2021) با افزودن خاکستر بادی

سبب افزایش مقاومت خاک از نوع کائولین شده، که با افزایش درصد آن، کاهش مقاومت رخ می‌دهد. خاک‌های رسی ممکن است به عنوان مصالح برای احداث یک پروژه مورد استفاده قرار گیرند و یا به عنوان بستری برای احداث بعضی پروژه‌ها، ایمنی و پایداری این پروژه‌ها ایجاب می‌کند قبل از انجام هرگونه فعالیت عمرانی بهسازی آن‌ها انجام شود. گرچه روش‌های مختلفی برای بهسازی پیشنهاد شده، لیکن روش شیمیایی از عمومی‌ترین آن‌ها می‌باشد. در این روش معمولاً از سیمان و آهک بعنوان ماده افزودنی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر محققین مواد افزودنی دیگری مانند MgO و $MgCl_2$ را جهت بهسازی خاک پیشنهاد نموده‌اند در مورد کاربرد MgO مطالعات گسترده‌ای انجام یافته است لیکن در خصوص $MgCl_2$ تحقیقات محدود و اندک می‌باشد فقط می‌توان به تحقیقات تورکوز و همکاران ([Turkoz, et al., 2014](#)) و لطیفی و همکاران ([Latifi et al., 2015](#)) اشاره نمود جهت کاربرد $MgCl_2$ در اجرای بهسازی خاک برای پروژه‌های عمرانی می‌بایست مطالعات گسترده آزمایشگاهی صورت پذیرد. بنابراین در این کار تحقیقاتی اثر ماده $MgCl_2$ به عنوان ماده افزودنی به یک خاک رسی، روی خصوصیات تورمی و مقاومتی آن خاک مطالعه می‌گردد. برای انجام این تحقیق مجموعه‌ای از آزمایشات شامل آزمایش‌های اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری، تورم آزاد، فشار تورمی و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اجرا گردید. پس از انجام آزمایشات آزمایشگاهی و استفاده از درصدهای مختلف $MgCl_2$ ، نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شد و بحث‌های کافی و لازم در خصوص آن‌ها انجام گردید.

افزایش حجم خاک می‌گردد، که خود موجب خسارات فراوان می‌گردد. این پدیده تحت عنوان افزایش حجم ناشی از سولفات نامیده می‌شود ([Puppala et al., 1999](#)). لطیفی و همکاران ([Latifi et al., 2015](#)) پیشنهاد استفاده از محلول‌هایی که فاقد یون کلسیم می‌باشند مانند محلول منیزیم کلرید را پیشنهاد نموده‌اند. عملکرد این مواد در بهسازی خاک متنوع می‌باشد. عملکرد آن‌ها جهت بهسازی خاک شامل پوشش ذرات رس، تبادل کاتیونی و خروج آب از لایه مضاعف می‌باشد. $MgCl_2$ به عنوان یک ماده شیمیایی برای جلوگیری از یخ زدگی در جاده‌ها استفاده می‌شود ([Act., 2001](#)). مورین و پرکانوک ([Morin and perkanok., 2000](#)) بیان کردند که طبق اطلاعات بدست آمده از صنعت تقریباً ۲۵۰۰۰-۳۵۰۰۰ تن از منیزیم کلرید، سالانه برای فعالیت‌های جلوگیری از یخ‌زدگی برای جاده‌ها در کانادا استفاده می‌شود. همچنین جاینلی و همکاران ([Jianli et al., 2010](#)) بیان کردند که $MgCl_2$ ظرفیت جذب آب بسیار بالایی دارد. تورکوز و همکاران ([Turkoz, et al., 2014](#)) اثر افزودنی $MgCl_2$ را بر روی یک خاک رسی با خاصیت خمیری (پلاستیسیته) زیاد بررسی نمودند و دریافتند که با افزایش درصد افزودنی منیزیم کلرید، درصد تورم و فشار تورمی خاک رسی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، آن‌ها با انجام آزمایشات سه محوری بر روی نمونه‌ها، نتیجه گیری نمودند که افزودن تا ۷٪ منیزیم کلرید باعث افزایش مقاومت خاک گردیده و لیکن افزودن بیش از این مقدار باعث کاهش مقاومت خاک می‌گردد. لطیفی و همکاران ([Latifi et al., 2015](#)) اثر افزودنی $MgCl_2$ را بر روی دو نوع خاک رسی یکی سدیم بنتونیت و دیگری کائولن بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گیری نمودند که افزودن ۸٪ منیزیم کلرید سبب افزایش مقاومت خاک بنتونیت می‌گردد و پس از آن افزایش درصد ماده افزودنی مذکور، سبب کاهش مقاومت خاک می‌شود. لیکن افزودن ۱۰٪ منیزیم کلرید

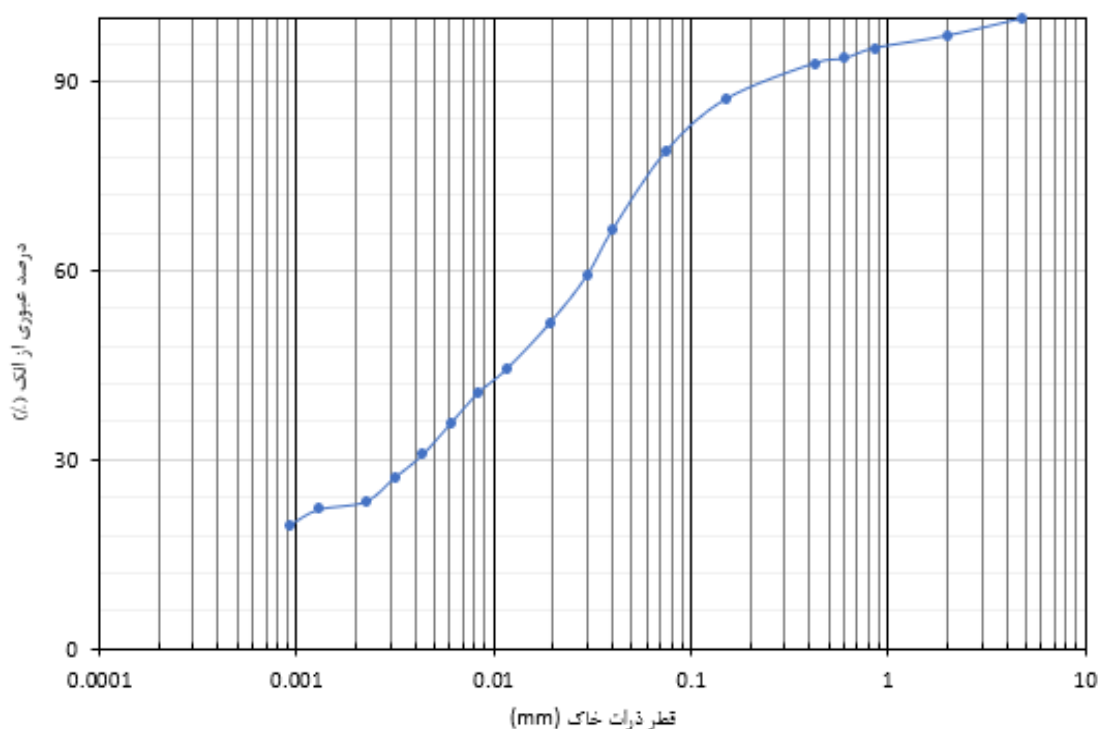
مواد و روش

برای اجرای این کار تحقیقاتی از موادی که عبارت اند از خاک، آب و منیزیم کلرید استفاده گردید که مختصری از خواص آن‌ها به شرح زیر می‌باشد.

خاک

در این تحقیق خاک رسی مورد نیاز از یک فروشنده محلی تهیه گردید. بر اساس اطلاعات نامبرده محل اصلی قرضه آن تاکستان قزوین می‌باشد. نتایج دانه بندی مطابق با شکل شماره (۱) نشان می‌دهد که این خاک متشکل از صفر درصد شن، ۲۱٪ ماسه، ۵۵٪ سیلت و ۲۳٪ رس می‌باشد. سپس وزن مخصوص، حدود آتربرگ و پارامترهای تراکمی آن تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که وزن مخصوص ذرات جامد (Gs)،

برابر با ۲/۷۸ می‌باشد. براساس نتایج حاصل از حدود آتربرگ، مشخص گردید که حد روانی، حد خمیری این خاک به ترتیب برابر با ۳۱/۵٪، ۲۰/۷٪ و شاخص خمیری آن ۱۰/۸٪ است. همچنین نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که وزن واحد حجم بیشینه و رطوبت بهینه این خاک به ترتیب برابر با ۱۷/۸۱ (kN/m³) و ۱۵/۹٪ می‌باشند. براساس اطلاعات بدست آمده از نتایج دانه بندی و حدود آتربرگ خاک در سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، این خاک تحت عنوان CL رس با خاصیت خمیری (پلاستیسته) کم طبقه‌بندی گردید. آزمایشات شیمیایی هم روی نمونه‌هایی از این خاک انجام شد که نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک

Fig. 1. Soil Grain size distribution curve

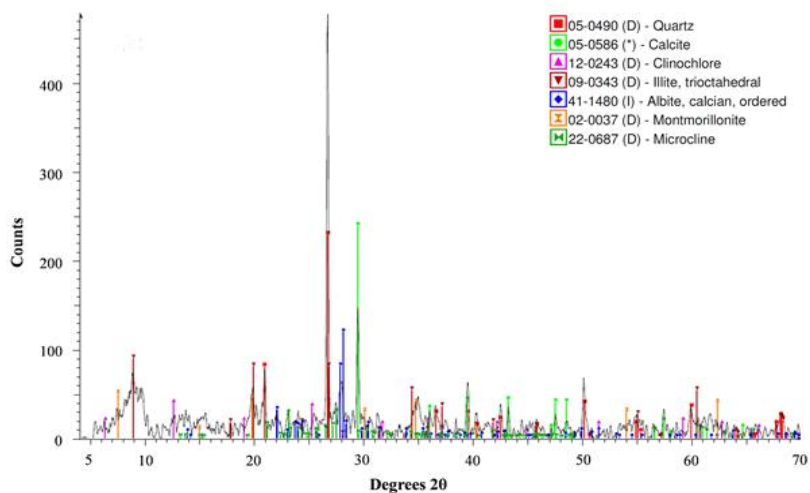
جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاک

Table 1. Soil chemical characteristics

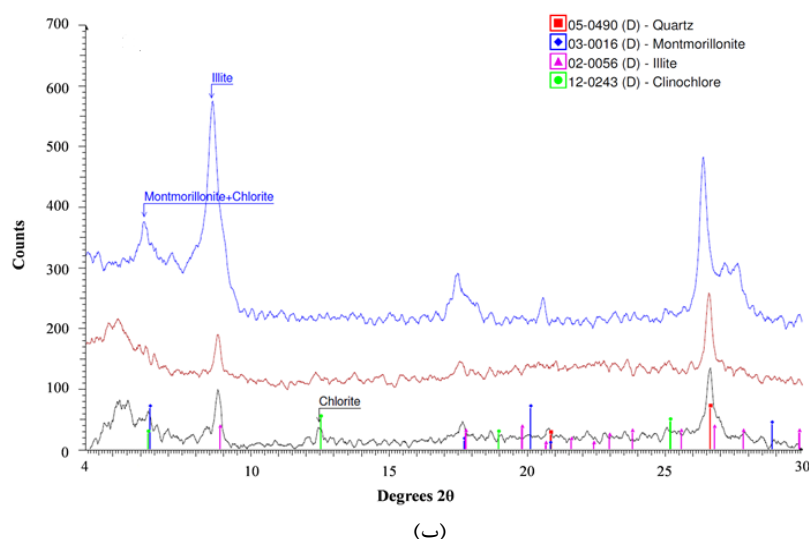
مقدار	مشخصات شیمیایی
7.96	PH
(dS/m) 2.62	EC
(meq/l) 6.8	SO_4^{2-}
(meq/l) 10	CL^-
(meq/l) 12.5	HCO_3^-
(meq/l) 9.89	Na^+
(meq/l) 17.1	Ca^+
(meq/l) 0.95	Mg^{2+}

خاک شامل از کوارتز، کلسیت و کانی‌های رسی (ایلیت و مونتوریلونیت+ کلریت) می‌باشد (شکل ۲ الف و ب)).

آزمایش XRD بر روی نمونه‌های این خاک برای تعیین نوع کانی‌های موجود در این خاک انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مشخص گردید که کانی‌های تشکیل دهنده



(الف)



شکل ۲. نتایج آزمایش XRD: (الف) کانی‌های خاک (ب) کانی رسی خاک
Fig. 2. results of XRD test: (a) Minerals of soil (b) Clay mineral of soil

آب

آب مورد استفاده در این تحقیق از نوع شرب بوده و دارای اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) به ترتیب برابر با ۷/۷۶ و ۱/۲ (dS/m) می‌باشد. همچنین میزان غلظت یون کلر و مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم در آن نیز به ترتیب برابر ۱/۷ و ۹/۱ (meq/l) اندازه‌گیری شد. از این آب برای تهیه نمونه‌های لازم و محلول منیزیم کلرید استفاده گردید.

منیزیم کلرید

منیزیم کلرید ($MgCl_2$) مورد استفاده در این تحقیق از یک شرکت داخلی تهیه شده و بر اساس اطلاعات بدست آمده از شرکت تولید کننده، وزن واحد حجم 1.56 g/cm^3 ، جرم مولکولی 203.30 g/mol و دارای انحلال پذیری 50-55 g/100ml (20°C) در آب می‌باشد، این ماده از نظر شکل ظاهری به صورت بلورهای سفید رنگ است و قدرت جذب آب زیادی را دارا است. از خصوصیات این ماده اینکه: دارای خاصیت عدم خسارت به سیمان، بتن، اسفالت، گیاهان، موجودات زنده بوده و بعنوان ماده ضد یخ هم بکار می‌رود (Act., 2001).

تهیه نمونه‌های لازم برای انجام آزمایشات

به منظور تهیه نمونه برای انجام آزمایشات، خاک رسی خشک شده در هوای آزاد به مقدار لازم توزین گردید. سپس، درصد‌های وزنی ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ از محلول منیزیم کلرید به صورت اسپری با خاک مخلوط شد. مخلوط‌های حاصل در کیسه‌های نایلونی به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند تا توزیع یکنواخت ماده افزودنی و واکنش شیمیایی بین آن ماده و خاک به خوبی انجام شود. عمل اختلاط خاک و ماده افزودنی و نگهداری آن مطابق با روشی است که قبلاً توسط محققینی مانند تورکوز و همکاران (Turkuz et al., 2014) و لطیفی و همکاران (Latifi et al., 2015) مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تهیه مخلوط خاک و ماده افزودنی آزمایش حدود آتربرگ و تراکم استاندارد روی نمونه‌هایی از خاک‌های اختلاط یافته با محلول $MgCl_2$ انجام گردید. پس از انجام آزمایش تراکم استاندارد، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای هر نمونه تعیین گردید، به منظور تهیه نمونه برای آزمایشات تورمی و مقاومتی، روش تراکم استاتیکی مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که رطوبت

نمونه‌های مقاومتی بعد از ساخت، در اتاقک مخصوص که دارای رطوبت و دمای تنظیم شده و ثابت بود، قرار داده شد، که این اتاقک دارای رطوبت نسبی بیشتر از ۹۰٪ بوده است. نمونه‌ها پس از گذشت زمان و رسیدن به زمان عمل آوری مورد نظر از اتاقک خارج شده و آزمایشات مربوط، روی آن‌ها انجام گردید، مشابه شرایط به کار رفته در پژوهش استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2022).

آزمایش‌ها

برای اجرای این کار تحقیقاتی، یک سری آزمایشات برنامه ریزی گردید مطابق با جدول (۲)، که به شرح زیر می‌باشند.

اولیه مخلوط خاک و ماده افزودنی به میزان رطوبت بهینه مربوط به منحنی تراکمی آن رسانده شد و سپس مخلوط مورد نظر در قالب‌های مخصوصی که برای تهیه نمونه تورمی و یا مقاومتی ساخته شده بود، انتقال یافت و متعاقباً با اعمال بار، با سرعت 1.5 mm/min در سه لایه متراکم گردید. شکل شماره (۳) دستگاه بارگذاری مورد استفاده را نشان می‌دهد. مقدار بار وارده به هر لایه از روش سعی و خطا تعیین شده، بطوریکه با اعمال آن مقدار وزن واحد حجم خشک لایه خاک متراکم شده، معادل وزن واحد حجم خشک بیشینه منحنی تراکم مربوطه گردید. نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش تورم دارای قطر و ارتفاع به ترتیب ۷۵ و ۲۰ میلی‌متر بوده و نمونه‌های مقاومتی نیز دارای ارتفاع و قطر معادل ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر بودند.

جدول ۲. جدول برنامه آزمایش‌ها

Table2. Tests program Schedule

مرحله	عملیات آزمایشگاهی	هدف
۱	شناسایی خاک طبیعی	مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک طبیعی
۲	تعیین حدود آتربرگ خاک طبیعی و اختلاط یافته با افزودنی منیزیم کلرید در درصدهای وزنی ۳، ۵، ۷ و ۱۰	حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری
۳	انجام آزمایش تراکم بر روی خاک طبیعی و اختلاط یافته با منیزیم کلرید در درصدهای وزنی ۳، ۵، ۷ و ۱۰	درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه
۴	ساخت نمونه‌های مقاومتی بر روی خاک طبیعی و اختلاط یافته با منیزیم کلرید در درصدهای وزنی ۳، ۵، ۷ و ۱۰	تهیه نمونه برای تعیین مقاومت
۵	تعیین مقاومت تک محوری محصور نشده با زمان عمل آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روزه)	ترسیم منحنی تنش-کرنش و تعیین مقاومت نهایی
۶	انجام آزمایش تورم آزاد و فشار تورمی بر روی خاک طبیعی و اختلاط یافته با منیزیم کلرید در درصدهای وزنی ۳، ۵، ۷ و ۱۰	ترسیم منحنی تورم آزاد و فشار تورمی
۷	انجام آزمایش SEM بر روی تعدادی منتخب از نمونه‌ها با توجه به شرایط	تصاویر ریز ساختاری از نمونه‌ها

نمونه‌های خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف از محلول $MgCl_2$ انجام گردید. سپس مقادیر حد

آزمایشات حدود آتربرگ و تراکم به ترتیب مطابق با استاندارد ASTM-D4318-10 و ASTM-D698-12 روی

است از فشاری که به نمونه وارد شود تا تغییر شکل ایجاد شده در آن حذف و ضخامت نمونه به مقدار اولیه خود برسد. تعیین فشار تورمی به وسیله دستگاه اودومتر انجام شد. در این روش بارگذاری روی نمونه بصورت مرحله‌ای و تصاعدی مشابه آزمایش تحکیم صورت گرفت. در هر مرحله از بارگذاری، مقدار تغییر شکل نمونه تا زمانی که تغییرات آن به مقدار ثابت رسید، ثبت گردید و سپس مرحله بعد که با افزایش بار همراه بود، صورت پذیرفت. این مراحل تا جایی ادامه یافت که تغییر شکل ایجاد شده در نمونه بر اثر تورم به مقدار اولیه خود رسانده شد، که آن را فشار تورمی می‌نامند. بنابراین تغییرات کاهش ضخامت نمونه با بار وارده به آن، ترسیم و در نقطه‌ای که مقدار تغییر شکل صفر گردید، آن نقطه متناظر با مقدار فشار تورمی می‌باشد.

آزمایش میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM)، مربوط به ساختار خاک‌های رسی متشکل از ریز ساختار و درشت ساختار می‌باشد. ریز ساختارها نقش بسیار مهمی در تعیین خواص و رفتار این خاک‌ها دارند. هدف از انجام آزمایش SEM تعیین میکروساختارهای خاک رس و تعیین مواد تولید شده حاصل از واکنش‌های شیمیایی بین خاک و ماده افزودنی می‌باشد. آزمایش SEM روی نمونه‌های از خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصد‌های ۰.۳٪، ۰.۵٪، ۰.۷٪ و ۱.۰٪ از محلول $MgCl_2$ با زمان عمل آوری ۲۸ روزه مطابق با روش ترمبلی و همکاران (Tremblay et al., 2002) انجام گرفت.

روانی (LL)، حد خمیری (PL) و اندکس خمیری (PI) برای آن‌ها اندازه گیری و تعیین گردید. در آزمایش‌های تراکم استاندارد نیز مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک پیشنهادی برای خاک طبیعی و مخلوط خاک با درصد‌های مختلف از محلول $MgCl_2$ مشخص شد.

به منظور تعیین مقاومت، آزمایش مقاومت تک محوری نیز روی نمونه‌های مختلف تهیه شده در زمان‌های عمل‌آوری گوناگون انجام گردید. سرعت بارگذاری در این آزمایش مطابق باروش استبرق و همکاران (Estabragh et al., 2011a)، 1mm/min انتخاب شد. در حین آزمایش مقدار بار وارده و تغییر شکل ایجاد شده در نمونه قرائت و ثبت گردید و بارگذاری تا آنجا ادامه یافت که در نمونه گسیختگی رخ داد. سپس با استفاده از داده‌های ثبت شده، مقدار تنش و کرنش برای هر نمونه تعیین و متعاقباً اقدام به ترسیم منحنی تنش و کرنش گردید. آزمایش تورم آزاد نیز مطابق با استاندارد ASTM-D4546-08 روی نمونه‌های تهیه شده انجام شد. ثبت تغییرات ضخامت نمونه در این آزمایش، تا زمانی انجام شد که از آن به بعد دیگر هیچگونه تغییراتی در ضخامت نمونه مشاهده نگردید. محاسبه درصد تغییر شکل با استفاده از رابطه زیر انجام شد.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

هنگامیکه درصد تغییر شکل به مقدار ثابتی رسید، آن مقدار به عنوان درصد تورم آزاد نامیده می‌شود. فشار تورمی عبارت



شکل ۳. دستگاه بارگذاری

Fig. 3. Loading machine

بحث و نتایج

نتایج آزمایش‌های انجام شده در این کار پژوهشی به شرح زیر می‌باشد.

حدود اتربرگ

نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ شامل (LL, PL, PI) برای نمونه‌های خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصد‌های مختلف از محلول $MgCl_2$ در جدول شماره (۳)

جدول ۳. نتایج آزمایش حدود اتربرگ

Table 3. Results of Atterberg Limits Tests

PI%	PL%	LL%	نمونه
11.3	20.7	32	خاک طبیعی
11.1	20.2	31.3	خاک + ۳٪ منیزیم کلرید
11	20	31	خاک + ۵٪ منیزیم کلرید
10.7	19.3	30	خاک + ۷٪ منیزیم کلرید
10.6	19.3	29.9	خاک + ۱۰٪ منیزیم کلرید

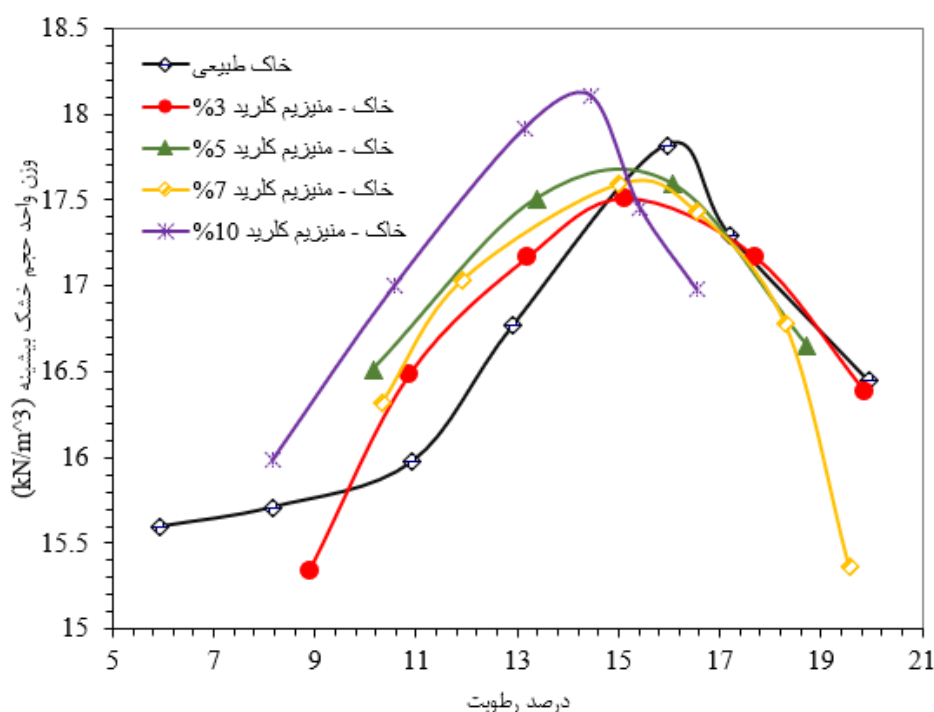
طبیعی گردیده است. لذا می‌توان گفت افزودن منیزیم کلرید به خاک طبیعی سبب کاهش سطح ویژه شده است. همچنین تبادل کاتیونی، با جایگزینی یون‌های دو ظرفیتی Mg^{++} در لایه دوگانه، سبب کاهش ضخامت آن لایه در ذرات خاک

تغییرات ایجاد شده متناسب با افزودن درصد وزنی از محلول $MgCl_2$ مورد استفاده می‌باشد. به طوریکه درصد‌های افزودنی به کار رفته سبب کاهش حد روانی نسبت به خاک طبیعی شده است. همچنین، تمامی درصد‌های وزنی به کار رفته از $MgCl_2$ ، سبب کاهش حد خمیری نسبت به خاک

شده است (Turkoz et al., 2014). در نتیجه حد روانی و حد خمیری کاهش می‌یابد.

تراکم

شکل شماره (۴) و جدول شماره (۴) نتایج آزمایش‌های تراکم شامل رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه را برای خاک طبیعی و خاک مخلوط شده با درصدهای مختلف $MgCl_2$ ارائه می‌دهد. نتایج رطوبت بهینه نشان می‌دهد که



شکل ۴. نمودار تراکم برای خاک طبیعی و اختلاط یافته با ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ منیزیم کلرید

Fig. 4. Compaction curve of natural soil and soil mixed with 3%, 5%, 7% and 10% magnesium chloride

جدول ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد

Table 4. Results of Compaction tests

وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m ³)	رطوبت بهینه (درصد)	نمونه
17.81	16	خاک طبیعی
17.51	15.5	خاک + ۳٪ منیزیم کلرید
17.59	15.2	خاک + ۵٪ منیزیم کلرید
17.59	15	خاک + ۷٪ منیزیم کلرید
18.1	14.4	خاک + ۱۰٪ منیزیم کلرید

مقاومت تک محوری

شکل شماره (۵) بعنوان نمونه منحنی تغییرات تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با ۵٪ $MgCl_2$ در زمان عمل آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد مقاومت نهایی برای خاک طبیعی معادل ۲۸۰ کیلو پاسکال در کرنش ۳/۶٪ می‌باشد. لیکن مقاومت نهایی نمونه خاک اختلاط یافته با محلول ۵٪ $MgCl_2$ پس از زمان عمل آوری ۷ روزه معادل ۴۳۰ کیلو پاسکال در کرنش ۲/۹٪ می‌باشد، که افزایش مقاومت نهایی آن تقریباً برابر با ۵۳/۵۸٪ نسبت به خاک طبیعی می‌باشد. از طرفی مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش در شکل شماره (۵) نشان می‌دهد که نمونه اختلاط یافته با محلول ۵٪ $MgCl_2$ دارای خاصیت شکنندگی بیشتری نسبت به خاک طبیعی است، به این دلیل که در ۵٪ $MgCl_2$ تحت تأثیر کرنش کمتری گسیخته می‌شود. مقاومت نهایی نمونه‌های مختلف در زمان‌های عمل آوری گوناگون از منحنی تنش-کرنش آن‌ها استخراج گردیده و تغییرات مقاومت آن‌ها برای زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز با درصدهای مختلف $MgCl_2$ (۳٪ و ۵٪ و ۷٪ و ۱۰٪) در شکل شماره (۶) نشان داده شده است. در نمودار مذکور مشاهده می‌گردد که مقادیر مقاومت نهایی برای نمونه‌های تهیه شده با ۳٪ $MgCl_2$ برای ۷، ۱۴ و ۲۸ روز زمان عمل آوری برابر ۱۴۰۱ و ۲۰۱۸ و ۱۸۴۸ کیلو پاسکال می‌باشد. این مقادیر مقاومتی نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل آوری تا ۱۴ روز، افزایش مقاومت در نمونه ایجاد شده است، لیکن برای زمان عمل آوری ۲۸ روزه کاهش مقاومتی معادل ۱۷۰ کیلو پاسکال نسبت به نمونه مربوط با زمان عمل آوری ۱۴ روز، مشاهده می‌گردد.

ذرات تشکیل دهنده خاک رس معمولاً حامل بار منفی می‌باشند. این بار منفی قادر به جذب کاتیون‌ها و بخش مثبت

باتوجه به جدول شماره (۴) می‌توان گفت که افزودن محلول منیزیم کلرید به خاک موجب تبادل یونی با کانی‌های تشکیل دهنده خاک می‌گردد (Turkoz et al., 2014). این تبادل یونی تولید پیوند قوی بین ذرات خاک می‌نماید، به گونه‌ای که نیروی وارده در فرآیند تراکم، قادر به جابجایی زیاد آن ذرات نمی‌باشد، لذا کاهش محدودی در وزن واحد حجم بیشینه ایجاد می‌شود.

برای مقایسه بین ۱۰٪ و ۷٪ از محلول $MgCl_2$ مشاهده می‌گردد (مطابق با جدول شماره ۴) که وزن واحد حجم بیشینه در ۱۰٪ نسبت به ۷٪ بیشتر شده و رطوبت بهینه برای ۱۰٪ نسبت به ۷٪ کمتر شده است. در محلول ۷٪ $MgCl_2$ پیوند بین ذرات، قوی تر نسبت به ۱۰٪ بوده و این عمل سبب شده که جا به جایی ذرات کمتر صورت گیرد و تحت تأثیر انرژی ثابت در فرآیند تراکم، وزن واحد حجم بیشینه نسبت به ۱۰٪ کم تر شده و در ۷٪ نسبت به ۱۰٪ $MgCl_2$ فضاها کمتر کاهش پیدا کرده و مقداری آب بین فضاها قرار گرفته، و در نتیجه رطوبت بیشتر شده است و همچنین می‌توان گفت در ۱۰٪ $MgCl_2$ ، مقدار این ماده زیاد بوده و فضای بین ذرات را بیشتر پر کرده و نتیجتاً مقدار آب بین فضاها کاهش پیدا کرده است که طبیعتاً وزن واحد حجم افزایش می‌یابد. برای مقایسه بین ۵٪ و ۷٪، نیز می‌توان گفت که در ۵٪ پیوند بین ذرات قوی تر ایجاد شده است، یعنی جابه‌جایی ذرات کم‌تر شده پس رطوبت بین ذرات افزایش پیدا کرده است و همچنین، این تغییرات برای ۳٪ از منیزیم کلرید نیز صادق است. برای وزن واحد حجم بیشینه خشک می‌توان گفت چون وزن واحد حجم ماده منیزیم کلرید برابر با $15/6 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ است، که این مقدار نسبت به خاک طبیعی کمتر است، پس زمانی که با خاک مخلوط می‌گردد، وزن واحد حجم خشک خاک در یک حجم مشخص در قالب تراکم، کم‌تر می‌شود.

مقاومت در زمان عمل آوری ۲۸ روزه افزایش یافته که نشان دهنده وجود مقادیر متنوعی از محصولات پیش گفته است، که بین ذرات قرار می گیرند و موجب پیوند قوی با آن ها شده و مقاومت افزایش می یابد.

برای نمونه حاوی ۳٪ از محلول $MgCl_2$ ، مشاهده می گردید که مقدار رطوبت کافی برای تولید محصولات ناشی از هیدراسیون $MgCl_2$ به خمیر سفتی بین ذرات خاک تبدیل می شود (شکل ۹_ب) و سبب افزایش اصطکاک بین ذرات خاک گردیده که با افزایش مقاومت نمونه همراه است. ولی برای نمونه های حاوی ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ از $MgCl_2$ کاهش مقاومت مشاهده شد، شاید این امر ناشی از عدم تشکیل مواد پیش گفته به مقدار کافی باشد. به علت درصد بالای $MgCl_2$ (Jianli et al., 2010)، با انجام آزمایشات مختلف نتیجه گیری نمود که تغییرات خواص خاک ناشی از ظرفیت جذب آب بسیار بالای $MgCl_2$ می باشد. پس می توان گفت که در مقادیر زیاد منیزیم کلرید، مولکول های آب به دور ذرات منیزیم کلرید در توده خاک، تجمع می کنند. این پدیده باعث لغزش ذرات رسی بر روی یکدیگر می شود و در نتیجه، مقاومت خاک کاهش می یابد.

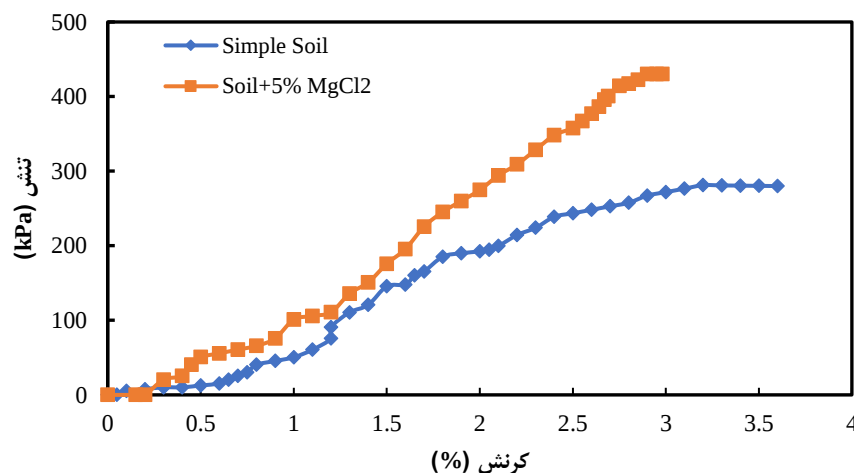
ولیکن در نمودارهای تغییرات مقاومت برای نمونه های تهیه شده از ۵٪ و ۷٪ $MgCl_2$ نیز مشاهده می گردد، که مقاومت، با افزایش زمان عمل آوری افزایش یافته است. همانطور که توسط (Turkoz et al., 2014) بیان گردید مقاومت نمونه هایی که به مدت ۲۸ روز نگهداری شدند، دارای مقاومت بیشتری بودند. آن ها بیان کردند که این امر به این دلیل است که بر اثر تبادلی یونی $MgCl_2$ با کانی های رسی خاک، تولید یک سری مواد ژل مانند می شود که معمولاً از نوع M-S- H (Magnesium _ Silicate _ Hydrate) یا M-A-H (Magnesium _ Aluminum _ Hydrate) است. که این مواد تولید شده در زمان عمل آوری کوتاه، مدت به صورت خمیر نرم بین ذرات قرار می گیرد. لیکن با افزایش مدت زمان

مولکول های آب احاطه کننده ذرات، می باشد. این عمل منتج به تشکیل لایه آب چسبیده به ذرات می شود، که آب جذبی نامیده می شود. این لایه از آب، حاوی کاتیون و آنیون می باشد. بیشترین غلظت کاتیون ها در مجاور سطح ذرات بوده و مقدار آن با افزایش فاصله از سطح ذرات کاهش می یابد، تا اینکه غلظت آن مشابه آب معمولی گردد، که منجر به تشکیل ساختمان پراکنده و یا فلوکوله در خاک می گردد. ذرات رسی همچنین توانایی تبادل کاتیون ها را دارند. کاتیون های با ظرفیت بالا در آب و خاک می توانند جانشین کاتیون های با ظرفیت کم گردند. کاتیون هایی که جذب ذرات می شوند، کاتیون های تبدالی نامیده می شوند و با کاتیون های دیگر تعویض می گردند. این فرایند موجب تغییر در نیروهای جاذبه و دافعه می شود، که موجب تغییر در ساختار خاک می گردد. معمولاً مجموعه کاتیون های قابل تبادل، ظرفیت تبدالی خاک نامیده می شود. عواملی مانند توزیع ذرات، درجه حرارت و عوامل محیطی نیز در مقدار آن موثر می باشند.

محلول $MgCl_2$ که به خاک اضافه می شود دارای یون های Mg^{++} و Cl^- می باشد. یون های Mg^{++} با OH^- ترکیب و تولید $Mg(OH)_2$ می نماید. این ماده با آب و CO_2 ترکیب گردید و با گذشت زمان باعث تولید محصولی با فرمول شیمیایی $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ و نیز محصولات دیگری مانند هیدرومگنیزیت می شود. این مواد در فرآیند کسب مقاومت نمونه های مورد آزمایش، نقش مهمی دارند. بنابراین در تشکیل این مواد، آب و گاز کربنیک نقش اساسی داشتند، از طرفی با مهیا بودن این عوامل به اندازه کافی، هر چه مقدار $MgCl_2$ بیشتر باشد مقدار تولیدی این مواد افزایش می یابد. اثر مواد تولید شده نیز در فرآیند کسب مقاومت یکسان نبوده، بعنوان مثال ماده تولیدی نسکونیت بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت دارد. در این کار تحقیقاتی قرار دادن نمونه ها در دمای ثابت و رطوبت زیاد، به لحاظ تامین رطوبت، نقش مهمی دارد. نتایج، در شکل (۶) نشان می دهد که

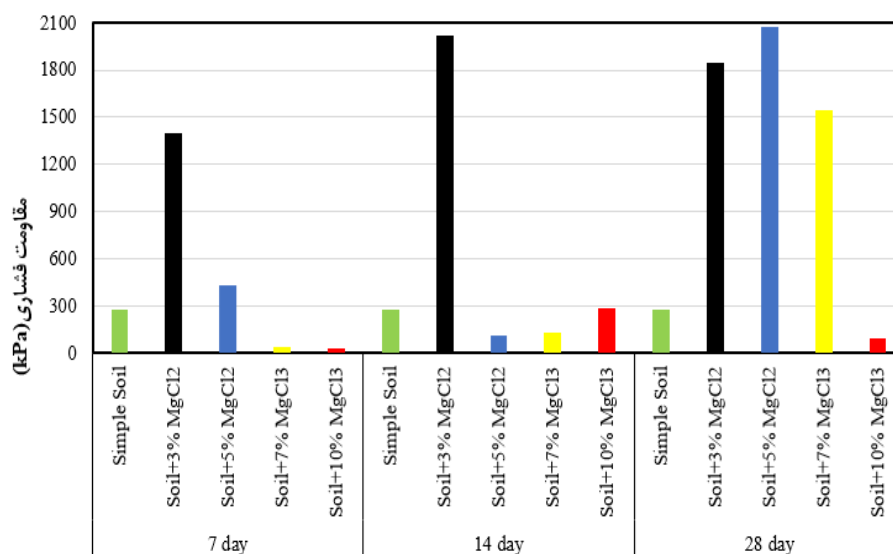
همکاران (Turkoz et al., 2014) و لطیفی و همکاران (Latifi et al., 2015) مطابقت دارد.

عمل‌آوری، این خمیر نرم به یک جسم سخت تبدیل شده به طوری که در مدت ۲۸ روز، سبب افزایش استحکام خاک می‌گردد. این نتایج با تحقیقات بدست آمده از تورکوز و



شکل ۵. منحنی‌های تغییرات تنش_کرنش برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با ۵٪ $MgCl_2$

Fig. 5. stress-strain curves of natural soil and soil mixed with 5% $MgCl_2$



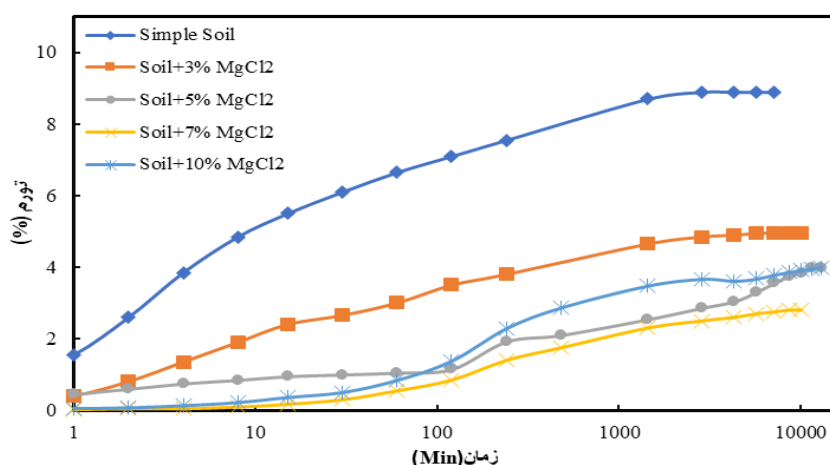
شکل ۶. مقاومت نهایی برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصد‌های وزنی مختلف از $MgCl_2$ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف
Fig. 6. Ultimate strength for natural soil and soil mixed with different weight percentages of $MgCl_2$ at different curing times

تورم آزاد پس از ۵ روز به مقدار ثابت ۸/۹٪ می‌رسد. این مقدار، با توجه به طبقه‌بندی (McKeen., 1992)، نشان‌دهنده قدرت تورمی زیاد خاک انتخابی می‌باشد. نتایج

نتایج تورم آزاد نمونه‌های مختلف با زمان، در شکل (۷) ارائه شده است. برای نمونه خاک رسی بدون ماده افزودنی، درصد

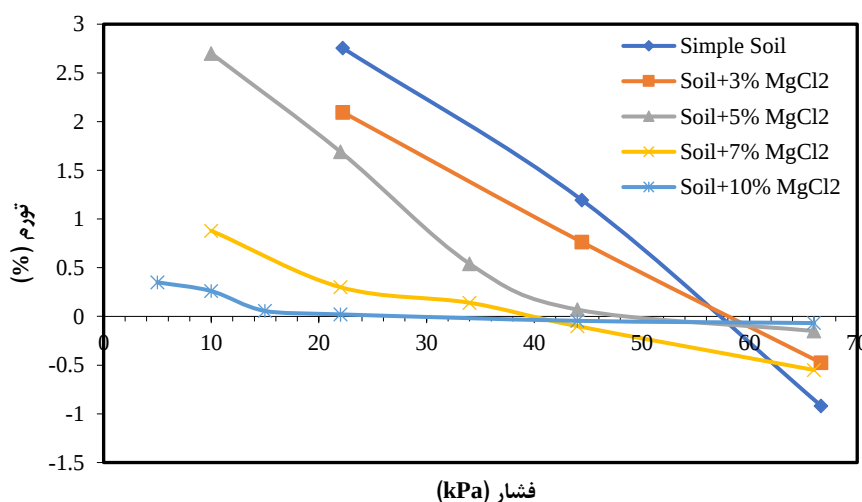
$MgCl_2$ کاهش می‌یابد، بطوریکه مقدار فشار تورمی برای خاک طبیعی، ۵۸ کیلوپاسکال است و به ازای ۷٪ $MgCl_2$ مقدار آن به ۴۱ کیلوپاسکال تغییر می‌یابد. به عبارت دیگر کاهش ایجاد شده معادل ۴۱/۴۶٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات فشار تورمی متناسب با مقادیر تورم آزاد با زمان عمل آوری است، بطوریکه افزایش پتانسیل تورم موجب افزایش فشار تورمی می‌گردد.

نشان می‌دهند که برای مقادیر ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ $MgCl_2$ اختلاط یافته با این خاک مقدار درصد تورم به ۴/۹۵٪، ۳/۹۸٪، ۳/۸۸٪ و ۳/۹۹٪ می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار درصد تورم آزاد با افزایش درصد ماده افزودنی $MgCl_2$ کاهش می‌یابد. شکل (۸) مقادیر فشار تورمی را برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف $MgCl_2$ نشان می‌دهد. مقادیر فشار تورمی با افزایش درصد



شکل ۷. منحنی‌های تغییرات تورم آزاد برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای وزنی از $MgCl_2$

Fig. 7. Comparison of free swelling curves for natural soil and soil mixed with different weight percentages of $MgCl_2$



شکل ۸. منحنی‌های فشار تورمی برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای وزنی از $MgCl_2$

Fig. 8. Comparison of swelling pressures curves for natural soil and soil mixed with different weight percentages of $MgCl_2$

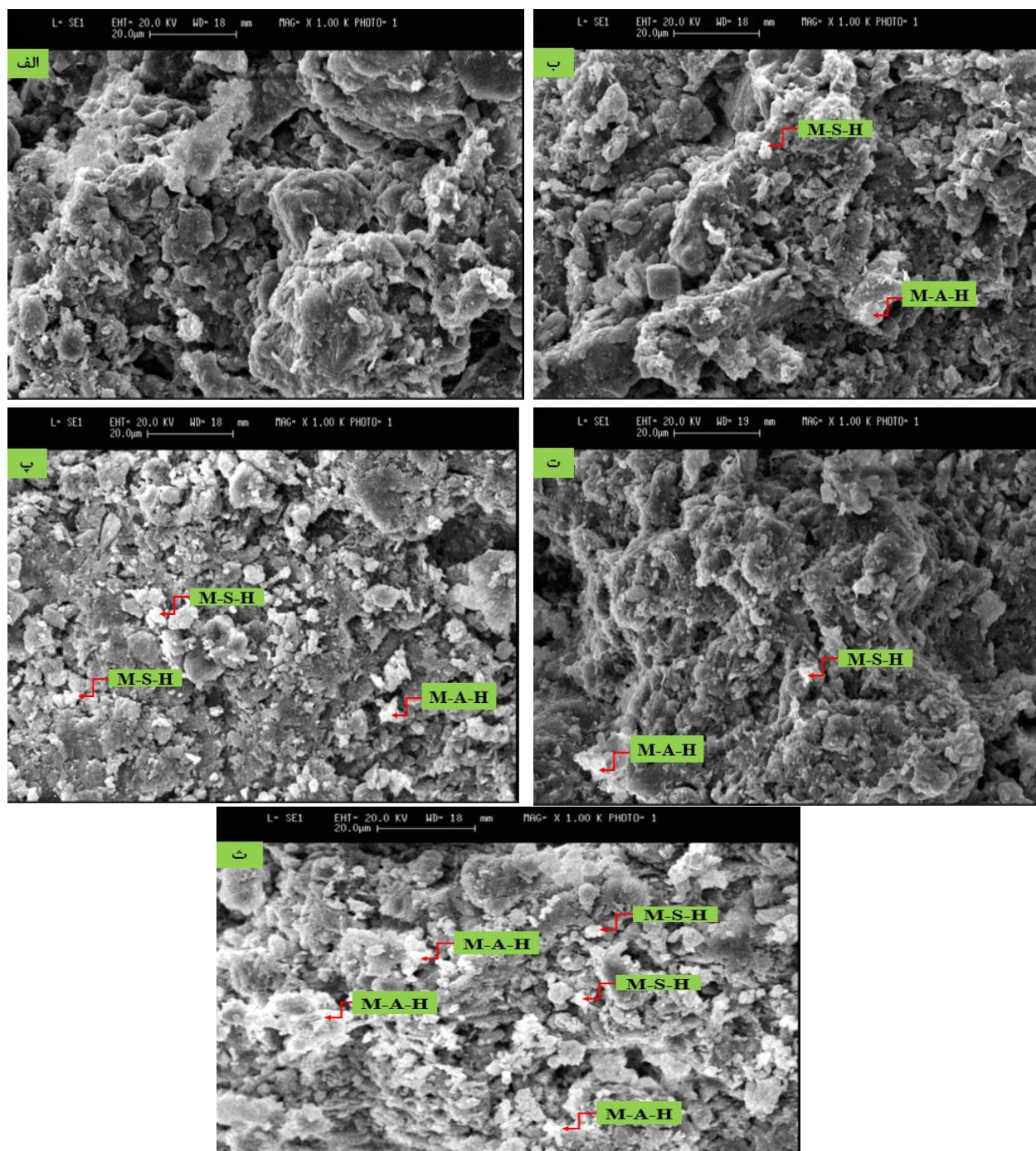
شکل (۹) نشان دهنده‌ی تصاویر میکروسکوپی از خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف $MgCl_2$ ، در زمان عمل آوری ۲۸ روزه می‌باشد. تصویر میکروسکوپی خاک رس طبیعی بدون هیچگونه ماده افزودنی در شکل (۹-الف) نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌گردد ذرات خاک در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، با توجه به فضای بین آن‌ها و پیوند بین ذرات، خاک به صورت توده‌ای متراکم به نظر می‌رسد. شکل (۹-ب) میکرو ساختار خاک اختلاط یافته با ۳٪ $MgCl_2$ را نشان می‌دهد. در این حالت خاک به صورت توده‌ای که ذرات آن درهم و متراکم است، نشان داده می‌شود و سطح ذرات نیز از ماده سفید رنگی پوشیده شده است که ممکن است محصولی از واکنش‌های شیمیایی انجام شده بین $MgCl_2$ و یون‌های موجود در فضای بین ذرات باشد. این محصولات تشکیل شده، منافذ خاک را پر می‌کنند و موجب چسبیدن ذرات به یک دیگر می‌شوند.

میکرونمودار مربوط به ۵٪ ماده افزودنی $MgCl_2$ در شکل (۹-پ) ملاحظه می‌شود. در این حالت سطح ذرات از ماده سفید رنگی پوشیده شده که با مقایسه آن برای حالت ۳٪ $MgCl_2$ ، سطوح بیشتری از ذرات خاک از این ماده پوشیده شده است. این شرایط در شکل (۹-ت) و شکل (۹-ث) برای ۷٪ و ۱۰٪ $MgCl_2$ هم حاصل می‌گردد. در این اشکال ملاحظه می‌گردد که ساختار خاک به حالت پراکنده متمایل می‌باشد. به طور کلی محصولات رسوبی و نمکی حاصل از $MgCl_2$ تشکیل شده به صورت توده‌های سفید رنگ بر روی خاک شکل گرفته اند و تغییرات قابل توجهی را در سطح ذرات خاک باعث شده است.

اثر $MgCl_2$ بر پتانسیل تورمی و فشار تورمی در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد مقدار پتانسیل تورمی با افزودن محلول منیزیم کلرید کاهش می‌یابد که این کاهش همراه با افزایش درصد محلول منیزیم کلرید بیشتر می‌گردد. آنگونه که اشاره شد ذرات رس حاوی بار منفی می‌باشند و یون‌های مثبت محلول مذکور را به وسیله نیروی الکتروسیسته ساکن (الکتروستاتیکی) جذب می‌نمایند. این سازوکار موجب کاهش غلظت یون در لایه مضاعف می‌شود، که کاهش ضخامت این لایه را موجب می‌گردد، لذا ساختار خاک به فلوکوله تغییر می‌نماید. در این ساختار ذرات بهم می‌چسبند و تشکیل ذرات درشت‌تر می‌دهند، ذرات تشکیل شده با کاهش سطح ویژه مواجه می‌شوند و این کاهش با افزایش درصد محلول اختلاط یافته مرتبط می‌باشد. بنابراین با کاهش سطح ویژه قدرت جذب آب کاهش یافته و قدرت پتانسیلی تورم و فشار تورمی نیز کاهش می‌یابد. نتایج حاصل مطابق با نتایج تحقیقات گزارش شده توسط تورکوز و همکاران (Turkoz et al., 2014) و لطیفی و همکاران (Latifi et al., 2015) می‌باشد.

آزمایش SEM

همان طور که قبلاً بیان گردید، هدف از انجام آزمایش SEM تعیین تغییر در میکرو ساختار خاک می‌باشد، که با اضافه نمودن ماده افزودنی حاصل می‌گردد و همچنین مشخص نمودن موادی که در طول مدت زمان تثبیت در خاک، طی واکنش‌های شیمیایی بین ماده افزودنی و خاک به وجود می‌آید، نیز مدنظر است.



شکل ۹. تصاویر SEM با مقیاس ۲۰ میکرون برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصد‌های وزنی از منیزیم کلرید (الف) خاک طبیعی، (ب) ۳٪، (پ) ۵٪، (ت) ۷٪ و (ث) ۱۰٪

Fig. 9. Scanning electron microscopy (SEM) images are at the scale of $20 \times 20 \mu\text{m}$ for natural soil and mixed soil with different weight percentages of MgCl_2 (a) natural soil, (b) 3%, (c) 5%, (d) 7% and (e) 10%

نتیجه گیری

در این پژوهش، بهسازی یک خاک رسی با استفاده از افزودن $MgCl_2$ در زمان عمل آوری و درصدهای وزنی مختلف، مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این کار آزمایش‌های دانه بندی، حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک محوری، تورم آزاد، فشار تورمی و SEM بر روی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای گوناگون وزنی از $MgCl_2$ انجام گرفت و نتیجه گیری زیر حاصل گردید:

- $MgCl_2$ به عنوان افزودنی برای خاک رسی سبب تغییر در حدود اتربرگ و پارامترهای تراکمی (رطوبت بهینه و وزن واحد حجم ماکزیمم) می‌گردد. به طور کلی سبب کاهش حد روانی و حد خمیری نسبت به خاک طبیعی و همچنین موجب کاهش وزن واحد حجم ماکزیمم و کاهش رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی گردیده است.
- نتایج نشان داد که برای درصدهای مختلف از $MgCl_2$ ، کاهش تورم آزاد و فشار تورمی با افزایش تثبیت وزنی $MgCl_2$ همراه است.

Attom, M. F., Al-Akhras, N. M., & Malkawi, A. I. (2009). Effect of fibers on the mechanical properties of clayey soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 162(5), 277-282.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.

Bolander, P. (1999). Laboratory testing of nontraditional additives for stabilization of roads and trail surfaces. *Transportation research record*, 1652(1), 24-31.

Deepak, M. S., Rohini, S., Harini, B. S., & Ananthi, G. B. G. (2021). Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. *Materials today: proceedings*, 37, 2014-2018.

Etabragh, A.R., Babaei, M., Javadi, A.A. and Amini, M. (2024). Effects of two different polymers and calcium chloride solution on the swelling behavior of an expansive soil. *Advances in Civil Materials*. Vol.13, No.1, pp.1-15.

- تا افزودن ۳٪ منیزیم کلرید سبب افزایش مقاومت خاک طبیعی می‌گردد و بعد از آن افزایشی دیده نمی‌شود و حتی کاهش مقاومت نشان داده شده است.
- جهت اجرای و احداث پروژه‌های عمرانی بایستی خاک مورد استفاده اگر از گروه خاک‌های مشکل آفرین باشد بهسازی شود و سپس اجرای پروژه صورت پذیرد. روش شیمیایی یکی از روش‌های معمول برای این کار می‌باشد جهت اصلاح و بهسازی با استفاده از این روش بایستی مسائل اقتصادی و نیز کیفیت و دوام خاک بهسازی شده مورد توجه قرار گیرد. یکی از مواردیکه اخیراً برای این امر پیشنهاد شده است استفاده از محلول $MgCl_2$ می‌باشد. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص عملکرد و کاربرد آن انجام نشده است. بنابراین ضروری است مطالعات بیشتری در مورد کاربرد آن جهت بهسازی خاک‌ها انجام گردد و سپس کاربرد آن در کارهای اجرایی تدوین گردد.

References

Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., & Chen, Q. (2015). Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 55(3), 504-516.

Act, C. E. P. (2001). Priority substances list assessment report: Road salts. *Environmental Canada, Quebec*.

Ajayi, M. A., Grissom, W. A., Smith, L. S., & Jones, E. E. (1991). Epoxy-resin-based chemical stabilization of a fine, poorly graded soil system. *Transportation Research Record*, 1295, 95-108.

Ahmad, N., Hassan, F. U., & Belford, R. K. (2009). Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*): I. Compaction. *Field Crops Research*, 110(1), 54-60.

- Estabragh, A. R., Beytollahpour, I., & Javadi, A. A. (2011a). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 969-976.
- Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., & Javadi, A. A. (2011b). Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 899-908.
- Estabragh, A. R., Moghadas, M., & Javadi, A. A. (2013). Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying. *Soils and Foundations*, 53(5), 617-627.
- Estabragh, A. R., Khajepour, H., Javadi, A. A., & Amini, M. (2022). Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1691-1705.
- Estabragh, A.R., Jahani, A., Javadi, A.A., Amini, M. and khajepour, H. (2025). Effect of different agents on the stabilization of a clay soil contaminated with glycerol. *Geomechanics and Geoengineering*. Vol.20, No.1, pp. 179-197.
- 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., Babaei, M., Javadi, A. A., & Amini, M. (2024). Effects of two different polymers and calcium chloride solution on the swelling behavior of an expansive soil. *Advances in Civil Engineering Materials*, 13(1), 151-165.
- Jianli, M., Youcai, Z., Jinmei, W., & Li, W. (2010). Effect of magnesium oxychloride cement on stabilization/solidification of sewage sludge. *Construction and Building Materials*, 24(1), 79-83.
- 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.
- Latifi, N., Rashid, A. S. A., Siddiqua, S., & Horpibulsuk, S. (2015). Micro-structural analysis of strength development in low-and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution—A green soil stabilizer. *Applied Clay Science*, 118, 195-206.
- Little, D. N., & Nair, S. (2009). Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials.
- McKeen, R. G. (1992). A model for predicting expansive soil behavior. In *International conference on expansive soils* (pp. 1-6).
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*.
- Morin, D., & Perchanok, M. (2000). Road salt loadings in Canada.
- Namdaraligoudarz, P. A., Estabragh, A. R., Abdullahi, J. A., (2010). Improvement of clay soils using mechanical and chemical methods. Paper presented at the 6th National Civil Engineering Congress in Semnan. (in persian)
- Puppala, A. J., Mohammad, L. N., & Allen, A. (1999). Permanent deformation characterization of subgrade soils from RLT test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4), 274-282.
- Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime.
- Tang, X. Y., Zhu, Y. G., Shan, X. Q., McLaren, R., & Duan, J. (2007). The ageing effect on the bioaccessibility and fractionation of arsenic in soils from China. *Chemosphere*, 66(7), 1183-1190.
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J., & Leroueil, S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian geotechnical journal*, 39(3), 535-546.
- Turkoz, M., Savas, H., Acaz, A., & Tosun, H. (2014). The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics. *Applied Clay Science*, 101, 1-9.
- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2014). Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 267-274.