Spring 2022, Vol 12 (1): 192-206 Adv. Appl. Geol. OPEN ACCESS

Research Article

Investigation of the effect of sodium chloride salt on the geotechnical properties of loess soil

Rasool Yazarloo[1], Amin Jamshidi[2*], Sina Zare[3], Kaveh Meyar[4]

1- Department of Civil Engineering, Gonbad Kavoos Branch, Islamic Azad University, Gonbad Kavoos, Iran
2- Department of Geology, Lorestan University, Iran
3- Department of Civil Engineering, Shams Higher Education Institute, Gonbad Kavoos, Iran
Iran
4- Department of Civil Engineering, Pouyandegan Danesh Higher Education Institute, Chaloos,
Iran

Keywords: Loess soil, Sodium chloride, Geotechnical properties

1- Introduction

Soil is one of the essential building materials, and the primary support of structures has long been a human interest (Cheshomi et al., 2016; Jamshidi et al., 2020). However, due to weakness in shear strength and lack of resistance to tensile forces, researchers have consistently sought to increase its bearing capacity, strength, and improve its properties and various methods including mechanical modification such as compaction, chemical modification such as treatment with lime, cement or salt (Al Aghbari, 2005; Tang et al., 2007).

One of the most important issues that should be considered in soil projects is the problematic soils. The most important problematic soils are collapsible soils. If these soils are not identified, if structures, roads, or railroads are built on them, water infiltration into the soil can cause significant problems. Loess deposits are common examples from collapsible soils that, based on their considerable distribution in Iran, research has been done on different aspects.

The purpose of this study is investigation of the effect of sodium chloride salt on the geotechnical properties of loess soil.

2- Material and methods

Loess soil was sampled from a Golestan province region and transferred to the Soil Mechanics Laboratory of the Shams University of Gonbad Kavoos. Sodium chloride salt was added to soil sample with content of 3, 6 and 9% by weight of soil. Soil samples were prepared in normal condition (without additives) and with different content of sodium chloride for geotechnical properties tests. Geotechnical properties including Atherberg limits, compaction, unconfined compressive strength and shear strength were determined in the normal condition and with different

* Corresponding author: jamshidi.am@lu.ac.ir
DOI: 10.22055/AAG.2021.34695.2156
Received 2020-08-19
Accepted 2021-12-26

ISSN: 2717-0764

content of sodium chloride. The obtained data were analyzed and the effect of sodium chloride salt on the geotechnical properties of loess soil was investigated.

3- Conclusion

The results show that the addition of sodium chloride salt reduces the plastic and liquid limits in the Atterberg limits test, increases the dry weight unit weight and decreases the optimum moisture in the compaction test, increases the strength in the unconfined compressive strength test and increases the cohesive and friction angle in the direct shear test.

References

Al Aghbari, M.Y., 2005. Suitability of Desert sand cement mixes for base course in highway pavements, Electronic Journal of Geotechnical 10, 21–40.

Cheshomi, A., Eshaghi, A., Hasanpoor, J., 2016. The effect of lime and cement on the swelling properties of sulfated clay. Journal of Advanced Applied Geology 6(4), 44-50.

Jamshidi, A., Yazarloo, R., Majidi Hasanabadi, A., Mahmodi Moghadam, A., 2020. Study of geotechnical properties of silty loess soil stabilized with lime and glass fiber. Journal of Advanced Applied Geology 10(2), 137–153.

Tang, C.S., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. Geotextiles and Geomembranes 25, 194–202.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Yazarloo, R., Jamshidi, A., Zare, S., Meyar, K., 2022. Investigation of the effect of sodium chloride salt on the geotechnical properties of loess soil. Adv. Appl. Geol. 12(1), 192-206.

DOI: 10.22055/AAG.2021.34695.2156
url: https://aag.scu.ac.ir/article_16801.html?lang=en

CC BY

بررسی تاثیر نمک سدیم کلرید بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس

رسول یازرلو
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گنبد کاوس، گنبد کاوس، ایران

امین جمشیدی*
گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

سینا زارع
گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی شمس گنبد کاوس، گروه عمران، گنبدکاوس، ایران

کاوه میار
گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی پویندگان دانش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹ *تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۵*

**jamshidi.am@lu.ac.ir*

چکیده

خاک‌های لس از مهمترین خاک‌های مسئله‌دار هستند که درصد قابل توجهی از سطح استان گلستان را پوشانده‌اند. نزدیکی به دریا سبب شوری آب‌های زیرزمینی شده و به علت تبخیر زیاد در استان، املاح نمک به سطح آمده و سبب شوری این خاک می‌شود. حضور نمک‌های محلول می‌تواند باعث تغییراتی در خصوصیات ژئوتکنیکی این نوع خاک‌ها در محل احداث سازه‌های مهندسی شود. بنابراین ضروری است تاثیر نمک بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های لسی بررسی شود. هدف از پژوهش حاضر تاثیر نمک سدیم کلرید به عنوان یکی از فراوان‌ترین نمک‌های محلول بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس است. به این منظور خاک لس از شهرستان گنبد کاووس (استان گلستان) تهیه و آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل حدود آتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم روی آن انجام شد. آزمایش‌ها در نمونه‌های خاک در حالت طبیعی و همچنین با ۳، ۶ و ۹ درصد سدیم کلرید انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نمک سدیم‌کلرید سبب کاهش حد خمیری و حد روانی در آزمایش حدود آتربرگ (با افزایش از صفر تا ۹ درصد نمک، حد روانی از ۲۲ به ۱۷ درصد و حد خمیری از ۱۵ به ۱۳ تغییر کرده‌اند)، افزایش وزن واحد حجم خشک و کاهش رطوبت بهینه در آزمایش تراکم (وزن واحد حجم خشک از ۱/۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک بدون نمک به ۱/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک با ۹ درصد نمک افزایش یافته است و رطوبت بهینه از ۱۲/۵ درصد در خاک بدون نمک به ۱۱/۹ درصد در خاک با ۹ درصد نمک کاهش یافته است)، افزایش مقاومت در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (با افزایش میزان غلظت نمک، مقاومت فشاری محصور نشده از ۱۱۸ کیلوپاسکال به ۱۴۵ کیلوپاسکال افزایش پیدا کرده است) و افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در آزمایش برش مستقیم (افزایش میزان نمک سبب افزایش میزان چسبندگی از ۱۴/۷ به ۱۹/۷ کیلو پاسکال و همچنین زاویه اصطکاک داخلی از ۲۶/۸۳ به ۳۴/۰۲ درجه شده است) شده است. در پایان دلیل تغییرات در خصوصیات ژئوتکنیکی نمونه خاک به دلیل حضور نمک مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: *خاک لس، سدیم کلرید، خصوصیات ژئوتکنیکی*

مقدمه

استان گلستان به‌خصوص در نواحی شمالی دارای سطح وسیعی از خاک‌های شور می‌باشد که به دلیل نزدیک بودن سفره آب زیرزمینی و بالا بودن تبخیر و تعرق ایجاد شده‌اند (Khormali, 2006). در فصل گرم (تابستان) با وجود اندک بارش پراکنده، تبخیر و تعرق بر میزان بارش فزونی دارد و این امر باعث تجمع املاح نمک در لایه‌های مختلف خاک می‌گردد. بررسی وضعیت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در خاک-های شور لسی مناطق مختلف استان گلستان نشان می‌دهد که سدیم و کلر، از کاتیون‌ها و آنیون‌های غالب در خاک‌ها هستند که باعث تشکیل نمک سدیم کلرید می‌شوند (Mohammad Nejad et al., 2012).

وجود نمک محلول در خاک لسی استان گلستان می‌تواند باعث تغییرات در خصوصیات ژئوتکنیکی آن در محل اجرای سازه‌های مهندسی شود. بنابراین قبل از احداث سازه مهندسی در ساختگاه‌هایی که احتمال حضور نمک محلول در آن وجود دارد، ضروری است تاثیر

نمک محلول بر خصوصیات مختلف ژئوتکنیکی بررسی شود و تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

تاکنون تحقیقاتی در ارتباط با تاثیر نمک‌های محلول مختلف بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی انواع خاک‌ها انجام شده است. محققان مختلفی از جمله Brandl (۱۹۹۲)، Cancelli و همکاران (۱۹۹۴)، Maio (۲۰۱۸) و Mishra و همکاران (۲۰۱۹) کاهش حد خمیری و روانی خاک‌های ریز دانه با افزایش غلظت شیمیایی محلول نمک سدیم کلرید را گزارش کرده‌اند. Alawaji (۱۹۹۹) در مطالعات خود کاهش تورم در خاک را با استفاده از نمک سدیم‌کلرید نشان داد. Castellanos و همکاران (۲۰۰۶) در گزارشی بیان کردند افزایش غلظت نمک سدیم‌کلرید از آب خالص تا محلول نمک ۲ مولار تحت اثر تنش ۲۵ کیلوپاسکال موجب کاهش تورم از حدود ۴۵ درصد به حدود ۳۳ درصد شده است. پژوهش‌های Emami azadi (۲۰۰۸)، Mansour و همکاران (۲۰۰۸)، Alainachi و Alobaidy (۲۰۱۰)، Shariatmadari و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که با افزایش شوری آب، رطوبت بهینه کاهش و وزن واحد حجم خشک خاک افزایش یافته است. Mashkoh و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه موردی پارامترهای مقاومتی و تورمی خاک شور در استان یزد پرداخته‌اند. نتایج بدست‌آمده نشان داد که با افزودن نمک ابتدا مقاومت برشی خاک کاهش، سپس افزایش و پس از مدتی ثابت می‌ماند در حالی که درصد تورم نمونه‌ها، همواره با افزایش نمک کاهش می‌یابد. در مورد تغییرات حدود اتربرگ نتایج آزمایش‌ها نشان داد که حضور نمک باعث کاهش حد خمیری و حد روانی خاک شده و متعاقبا کاهش در شاخص خمیری بوجود می‌آید. Ajalloiean و همکاران (۲۰۱۳) تاثیر شوری آب بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از کاهش حدود اتربرگ و افزایش در ضریب نفوذپذیری و پارامترهای مقاومت برشی خاک با افزایش شوری است. Ahmad (۲۰۱۳) رفتار هیدرومکانیکی خاک شنی نیمه اشباع در حضور کلسیم سولفات را مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد با افزایش مقدار کلسیم سولفات رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک کاهش یافته است. Matthew و Akinyele (۲۰۱۴) به بررسی تاثیر نمک‌های سدیمی و کلسیمی بر نفوذپذیری خاک پرداخته و به این نتیجه رسیدند که نمک سدیمی باعث افزایش در ضریب نفوذپذیری می‌شود درحالی که نمک کلسیمی سبب کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود. Turkoz و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی اثر محلول منیزیم‌کلرید بر خواص مهندسی خاک رس با ویژگی‌های فروریزشی و انبساطی پرداخته‌اند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تجزیه و تحلیل ریزساختار خاک در نمونه‌های خاک بدون افزودنی و با افزودنی مشخص شد مقدار افزودنی به شدت موجب بهبود کیفیت خصوصیت فروریزشی و انبساطی خاک رس می‌شود. Tajnin و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه بر روی شوری و اثر آن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک در منطقه جنوب غرب بنگلادش به این نتیجه رسیدند که با افزایش شوری مقاومت برشی زهکشی‌نشده افزایش پیدا می‌کند. Ajam و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر شوری آب بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه در هسته رسی سد گتوند که بر روی رودخانه کارون در استان خوزستان، ایران واقع شده است، پرداختند. برای این منظور از سه نوع نمک سدیم‌کلرید، منیزیم‌کلرید و کلسیم‌سولفات که دارای بالاترین غلظت در آب مخزن پشت سد است استفاده شد. نتایج نشان‌داد که نوع و مقدار شوری خاک تاثیر قابل‌توجهی در ویژگی‌های تراکمی یعنی رطوبت بهینه خاک و حداکثر وزن واحد حجم خشک دارد. نتایج حاصل از تورم نیز نشان‌داد که هر چه غلظت نمک بالاتر باشد، میزان تورم نمونه‌ها کمتر خواهد بود. Kumar و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی اثر شوری سدیم کلرید بر خصوصیات ژئوتکنیکی یک نوع خاک متورم‌شونده رسی، یک سری از آزمایشات ژئوتکنیکی مانند حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری محصور نشده انجام دادند و نتایج مربوطه با آب مقطر مقایسه شد. محدوده حدود اتربرگ به تدریج با افزایش مقدار نمک کاهش یافت. حداکثر وزن واحد حجم خشک با بیشتر شدن غلظت نمک در مقایسه با نمونه‌های آزمایش با استفاده از آب مقطر افزایش یافت. رطوبت بهینه نیز با اضافه کردن آب شور به خاک کاهش یافت. افت در شاخص تورم آزاد خاک توسط انجام تست تورم مشاهده شد. همچنین مقاومت فشاری محصور نشده خاک با اضافه کردن نمک به آب افزایش یافت. Dutta و Komar (۲۰۱۹) در رابطه با رفتار تحکیم رس بنتونیت در حضور محلول نمک سدیم کلرید مطالعه نموده و مشخص شد حضور نمک باعث کاهش شاخص فشردگی و افزایش ضریب تحکیم می‌شود.

با توجه به اینکه سطح وسیعی از استان گلستان را خاک‌های لسی پوشانده و این خاک‌ها در بعضی مناطق به ویژه مناطق ساحلی در معرض نمک‌های محلول به ویژه سدیم کلرید قرار دارند، ضروری به نظر می‌رسد که تاثیر این نمک روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لسی در محل اجرای سازه‌های مهندسی بررسی شود. با توجه به این، هدف از پژوهش حاضر بررسی تاثیر نمک سدیم کلرید بر خصوصیات ژئوتکنیکی (حدود آتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده، مقاومت برشی) یک نمونه خاک لس از استان گلستان است.

مواد و روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر ابتدا نمونه خاک لس از شهرستان گنبد کاووس استان گلستان تهیه شد. به نمونه خاک ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی خاک، سدیم کلرید اضافه شد. نمونه خاک در حالت طبیعی (بدون مواد افزودنی) و با درصدهای مختلف سدیم کلرید برای آزمایش‌های خصوصیات ژئوتکنیکی آماده سازی شدند. خصوصیات ژئوتکنیکی شامل حدود آتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت برشی در حالت طبیعی و با درصدهای مختلف سدیم کلرید تعیین

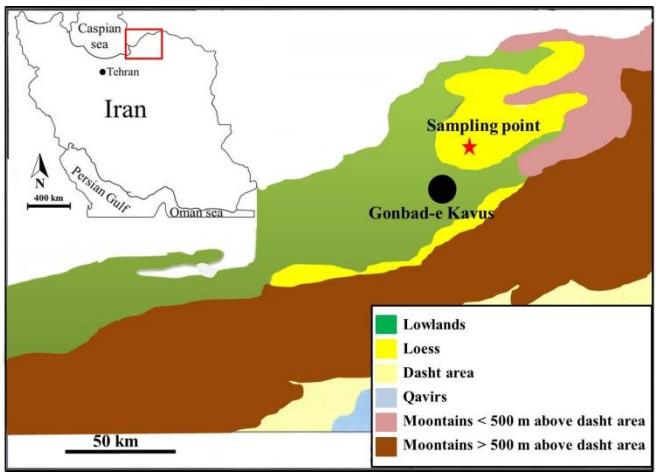
شدند. داده‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و تاثیر نمک سدیم کلرید روی خصوصیات ژئوتکنیکی نمونه خاک لس مورد بررسی قرار گرفت.

مصالح مورد استفاده

نمونه خاک

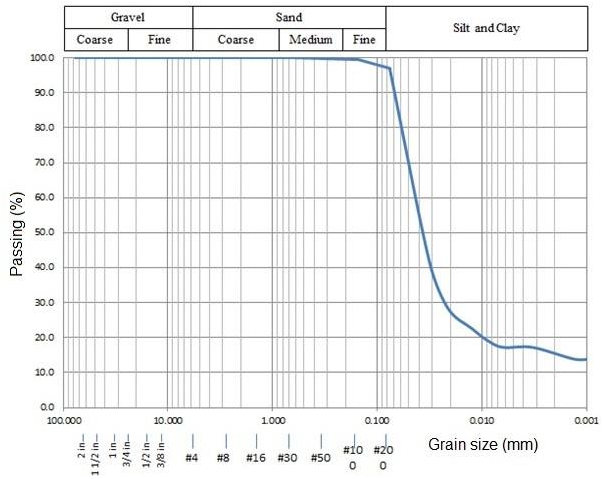
خاک مورد استفاده از حوالی روستای ترشکلی، ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان گنبدکاووس که در انواع خاک‌های لسی استان جزء لس سیلتی محسوب می‌گردد، تهیه شده است. شکل ۱ نقشه زمین شناسی محل نمونه برداری را نشان می دهد. به منظور جلوگیری از تاثیر هوادیدگی خاک در آزمایش‌ها، نمونه خاک لسی مورد آزمایش از عمق یک متری زمین برداشت شد. نمودار دانه بندی خاک مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. خاک مورد استفاده بر اساس طبقه‌بندی روش متحد در رده CL-ML (رس لای‌دار) می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام شده بر روی نمونه در جدول ۱ آورده شده است. بررسی وضعیت کاتیون‌ها و آنیون‌ها نشان می‌دهد که سدیم و کلر به ترتیب کاتیون و آنیون غالب خاک محدوده مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. بالا بودن میزان سدیم و کلر به دلیل وجود نمک کلرید سدیم است.

یکی از مشکلاتی که در خاک محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شود پدیده واگرایی است. پدیده واگرایی باعث فرسایش و شسته شدن ذرات خاک از محیط، ایجاد حفرات فرسایشی و آب‌بریدگی‌های عمیق در خاک، خالی شدن زیر فونداسیون‌ها، خالی شدن زیر پوشش کانال‌های آبیاری، ترک خوردن، شکستن، تغییر شکل و جابجایی قطعات پوشش بتنی می‌شود. ساخت پروژه‌های عمرانی در نواحی دارای خاک‌های واگرا بسیار مشکل است و احتمال فرسایش خاک همواره خطری جدی برای سازه‌های مستقر بر خاک‌های دارای خاصیت واگرایی محسوب می‌شود.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه نمونه برداری.

Fig. 1. Geological map of the sampling area.



شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه.

Fig. 2. Grading curve studied soil.

جدول ۲- خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Geotechnical properties of the studied soil.

Gs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	W_n (%)	q_u (KPa)	γ_{dmax} (g/cm^3)	W_{opt} (%)	C (KPa)	ϕ (^{o})
2.68	22.0	15.0	7.0	7.5	118	1.79	12.5	14.7	26.8

نمک و آب

با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین مشخص شده که یکی از نمک‌های غالب در خاک‌های لسی استان گلستان سدیم کلرید است (Mohammad Nejad et al., 2012)، به همین علت در این پژوهش از نمک سدیم کلرید به منظور بررسی تاثیرات آن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس مورد نظر استفاده شده است. نمک مورد استفاده در بازسازی نمونه‌ها خالص و بدون مواد افزودنی بوده که از شرکت نوین شیمیار تهیه شده است. آب استفاده شده در این مطالعه نیز برای تمامی آزمایش‌ها، آب مقطر می‌باشد.

آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه خاک

آماده سازی نمونه‌ها

برای بازسازی نمونه‌های خاک شور مورد آزمایش، نمک سدیم-کلرید با نسبت‌های ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی از خاک، در مقداری آب مقطر کاملا حل شده و به خاک اضافه شدند. پس از آن تا اندازه‌ای که خاک به حالت اشباع برسد به آن آب مقطر اضافه و کاملا باهم مخلوط شدند. سپس نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی سربسته به مدت ۲ هفته در دمای اتاق قرار گرفتند تا خاک و نمک در حضور آب باهم واکنش دهند. بعد از سپری شدن زمان مورد نظر، نمونه‌ها در فضای آزاد قرار داده شدند تا کاملا خشک شوند و پس از خشک شدن، کلوخه‌های آن خرد شده تا بصورت پودر درآیند و آماده برای آزمایش شوند.

آزمایش حدود آتربرگ

برای تعیین حدود آتربرگ شامل حد خمیری (PL)، حد روانی (LL) و شاخص خمیری (PI) از استاندارد (ASTM, D4318) استفاده شده است. شکل (۳) دستگاه آزمایش کاساگرانده برای تعیین حد روانی را نشان می‌دهد. آزمایش تعیین حدود آتربرگ برای ذرات خاک عبوری از الک شماره ۴۰# (۰/۴۲۵ میلیمتر) انجام شد. به این منظور ابتدا نمونه خاک لس سیلتی بدون هیچگونه افزودنی مورد آزمایش حدود اتربرگ، جهت بدست آوردن حد خمیری و حد روانی قرار گرفت. از تفاضل حد روانی و حد خمیری می‌توان شاخص خمیری خاک را به دست آورد (PI=LL-PL). سپس آزمایش حدود آتربرگ بر روی نمونه خاک حاوی درصدهای مختلف نمک به صورت جداگانه انجام پذیرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

شکل ۳- دستگاه کاساگرانده برای تعیین حد روانی خاک مورد مطالعه.

Fig. 3. Casagranda device to determine the liqiued limit of the studied soil.

آزمایش تراکم استاندارد

در این پژوهش، آزمایش تراکم به روش پروکتور اصلاح شده مطابق استاندارد (ASTM, D 698) انجام شد. این استاندارد ارائه دهنده روش تراکم آزمایشگاهی به منظور تعیین ارتباط بین درصد رطوبت و وزن واحد حجم خشک خاک‌ها (منحنی تراکم) می‌باشد.

برای انجام آزمایش تراکم از خاک عبوری از الک شماره ۴ استفاده شد. برای این منظور خاک مورد نظر در سه لایه و هرلایه ۲۵ ضربه در قالب آزمایش تراکم برای بدست آوردن حداکثر وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه کوبیده شد. ابتدا نمونه خاک لس سیلتی بدون هیچ‌گونه افزودنی مورد آزمایش قرار گرفت، سپس برروی نمونه خاک‌های بازسازی شده با درصدهای مختلف نمک آزمایش تراکم انجام گرفت. شکل ۴ دستگاه آزمایش تراکم مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. جدول ۲ و شکل ۵ نتایج تراکم آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد.

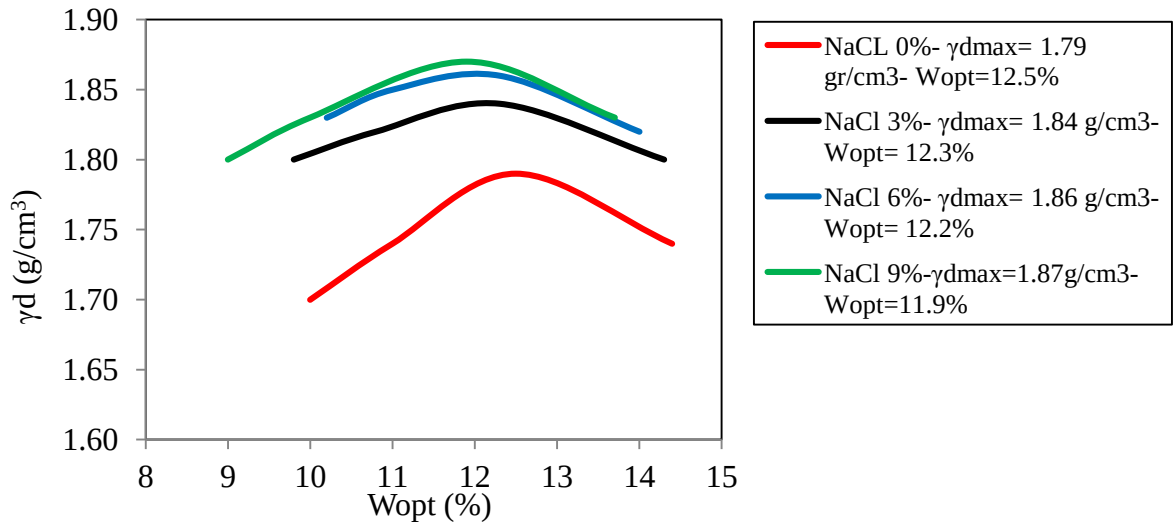
شکل ۴- دستگاه آزمایش تراکم مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Fig. 4. Hammer and standard compression mold used in this study.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ و تراکم روی نمونه خاک.

Table 2. Results of Atherberg and compaction tests on soil samples.

Compaction test		Atherberg test			Salt content (%)
W_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm^3)	PI (%)	LL (%)	PL (%)	
12.5	1.79	7	22	15	0
12.3	1.84	5	20	15	3
12.2	1.86	5	19	14	6
11.9	1.87	4	17	13	9



شکل ۵- نتایج آزمایش تراکم برای نمونه خاک در حالت طبیعی و با درصدهای مختلف نمک.

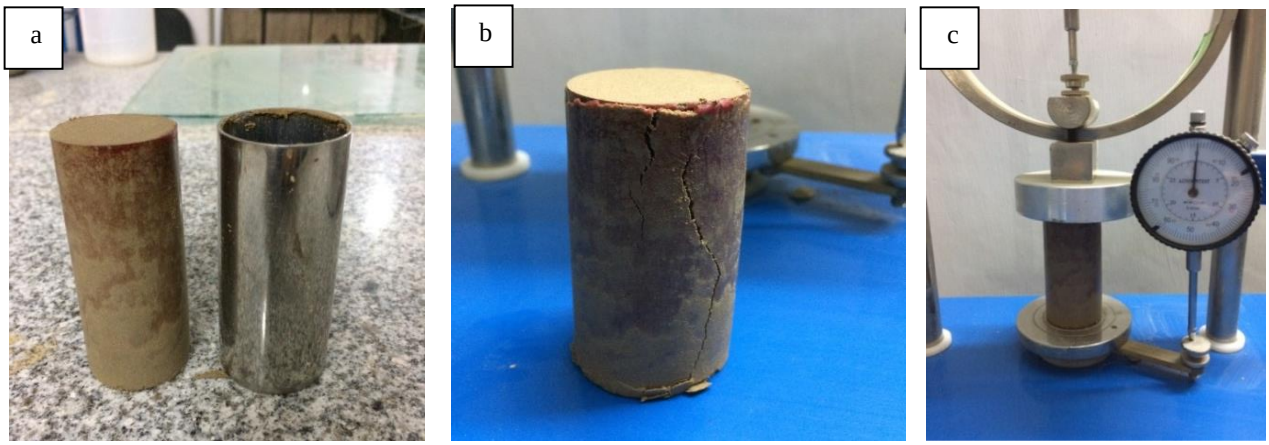
Fig. 5. Compaction test results for soil samples in normal condition and with different salt content.

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده براساس استاندارد (ASTM, D2166) روی نمونه مورد مطالعه در شرایط طبیعی و با درصدهای مختلف نمک انجام شد. برای این منظور پس از انجام آزمایش تراکم و به‌دست آوردن حداکثر وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های خاک، نسبت به آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده اقدام شده است. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها براساس آزمایش تراکم آزمایشگاهی بوده بدین‌گونه که با توجه به نمودار آزمایش تراکم آزمایشگاهی هریک از نمونه‌ها و درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک به‌دست‌آمده، نسبت به تهیه نمونه‌ها اقدام شده است. با مشخص بودن وزن واحد حجم لازم، درصد رطوبت بهینه و حجم قالب، مقدار وزن خاک لازم را به‌دست آورده و در قالب آزمایش نسبت به بازسازی نمونه‌ها اقدام گردید؛ که متوسط قطر نمونه‌های سیلندری ۳/۶۲ سانتی‌متر و ارتفاع آن‌ها نیز در حدود ۷/۶۰ سانتی‌متر بوده است. در شکل (۶) تصاویری از نمونه ساخته‌شده، دستگاه انجام آزمایش و یکی از نمونه بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

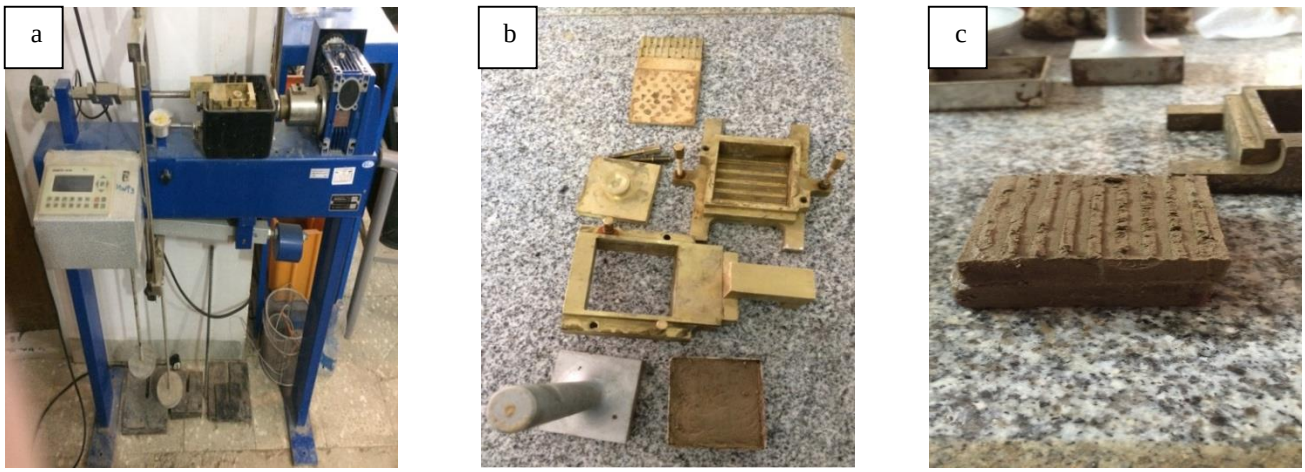
آزمایش برش مستقیم

در این تحقیق نمونه‌های خاک تحت بارگذاری‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و آزمایش برش مستقیم برروی آن‌ها مطابق استاندارد (ASTM, D2850) انجام شده است. آزمایش‌ها روی نمونه خاک در شرایط طبیعی و همچنین با درصدهای مختلف نمک انجام شد. به این منظور پس از انجام آزمایش تراکم و به‌دست آوردن حداکثر وزن واحد حجم خشک و درصد رطوبت بهینه برای تمامی نمونه خاک‌ها نسبت به آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش برش مستقیم برای هرکدام از نمونه‌ها به‌صورت جداگانه اقدام شده است. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها همانند آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده براساس آزمایش تراکم آزمایشگاهی بوده بدین‌گونه که با توجه به نمودار آزمایش تراکم آزمایشگاهی هریک از نمونه‌ها و درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک به‌دست آمده، نسبت به تهیه نمونه‌ها اقدام شده است. با مشخص بودن وزن واحد حجم لازم، درصد رطوبت بهینه و حجم قالب، مقدار وزن خاک لازم را به‌دست آورده و نسبت به بازسازی نمونه‌ها اقدام گردید. ابعاد قالب استفاده شده در این آزمایش ۲×۶×۶ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۷ تصاویر مختلفی از وسایل انجام آزمایش برش مستقیم و نمونه برش‌خورده تحت آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. در جدول ۳ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌ها ارائه شده است. همچنین در شکل ۸ نمودارهای آزمایش‌های برش مستقیم برای نمونه مورد مطالعه نشان داده شده‌اند.



شکل ۶- (a) نمونه ساخته شده برای آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، (b) نمونه گسیخته شده پس از انجام آزمایش و (c) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده.

Fig. 6. (a) Specimen prepared to test unconfined compressive strength, (b) a failured specimen after testing, and (c) unconfined compressive strength test device.



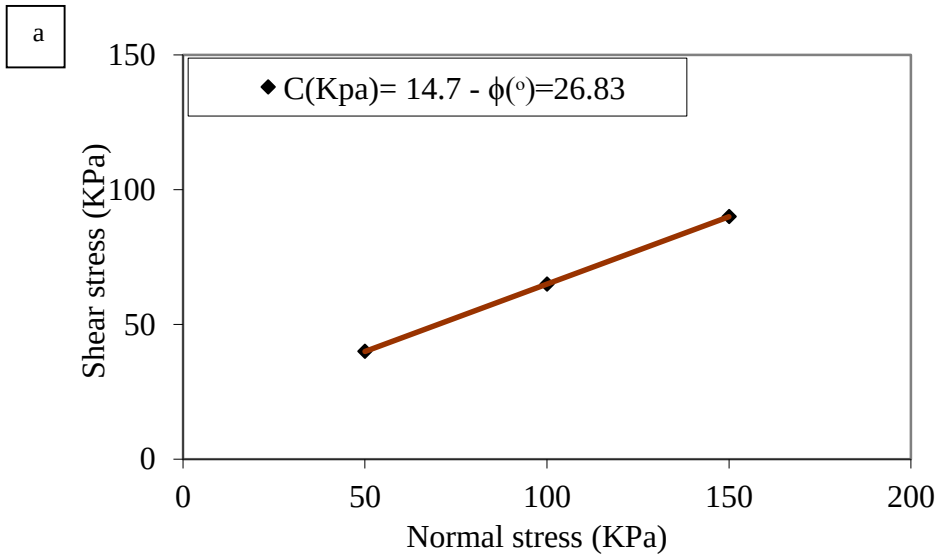
شکل ۷- (a) دستگاه آزمایش برش مستقیم، (b) جعبه برش، صفحات متخلخل و نمونه ساخته شده و (c) نمونه برش خورده بعد از انجام آزمایش.

Fig. 7. (a) Direct shear test device, (b) cut box, porous plates and specimen prepared for testing, and (c) a failured specimen after testing.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم بر روی نمونه مورد مطالعه.

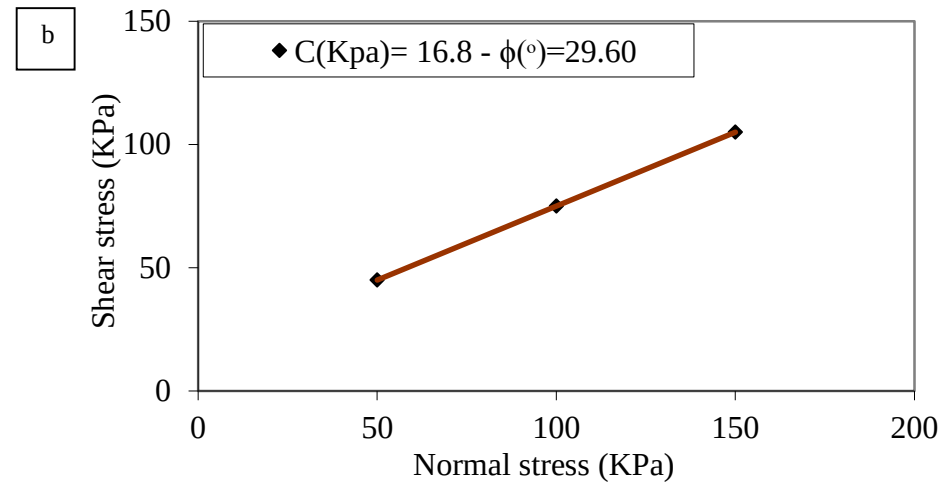
Table 3. Results of unconfined compressive and direct shear tests on soil specimens.

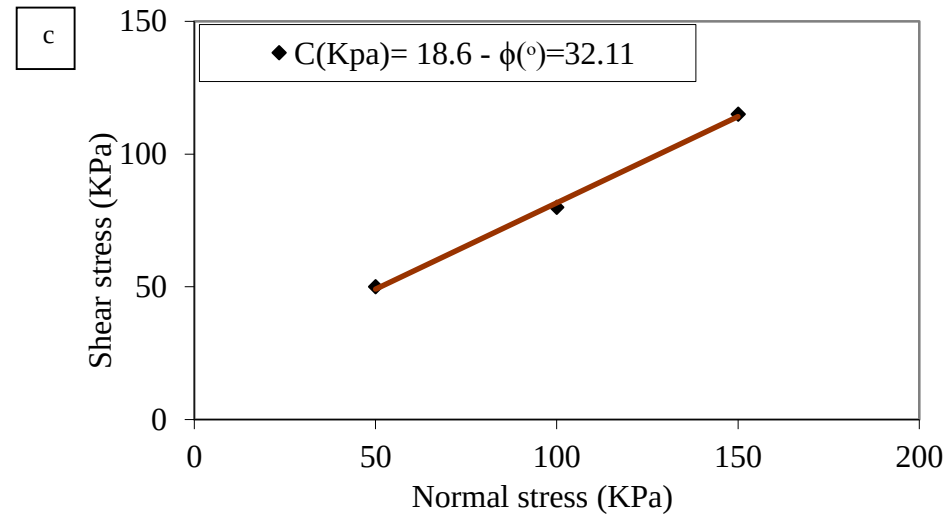
Direct shear strength		Unconfined compressive strength	Salt content (%)
C (KPa)	ϕ(°)	qu (KPa)	
14.7	26.83	118	0
16.8	29.60	132	3
18.6	32.11	143	6
19.7	34.02	145	9

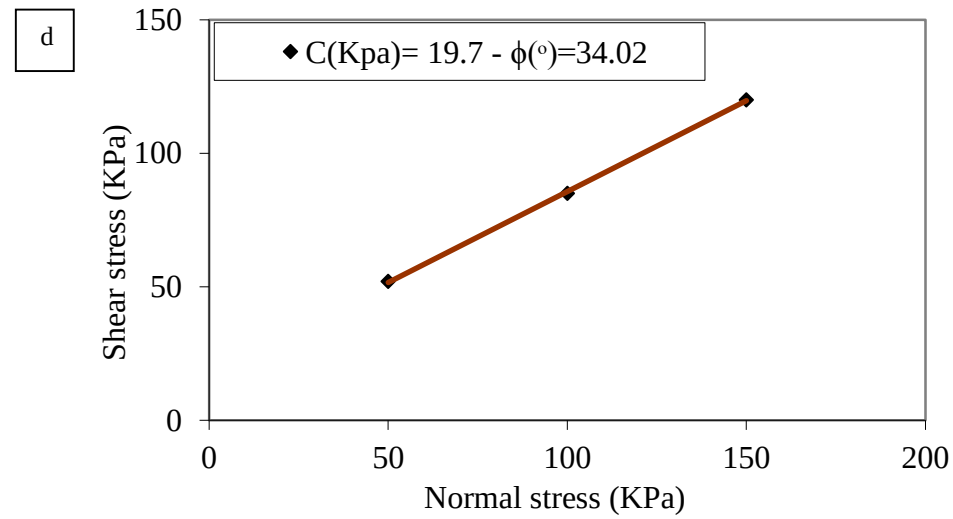


شکل ۸- نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم خاک (a) در شرایط طبیعی، (b) با ۳ درصد نمک، (c) با ۶ درصد نمک و (d) با ۹ درصد نمک.

Fig. 8. (a) Diagram of direct shear tests (a) normal condation, (b) with 3% salt content, (c) with 6% salt content, and (d) with 9% salt content.







شکل ۸-*ادامه*.

Fig. 8. *Continued*.

نتایج و بحث

با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و ترسیم نمودارهای مربوط به حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) در شکل ۹ مشخص گردید که با افزایش میزان نمک سدیم کلرید در ترکیب خاک، حدود روانی و خمیری خاک کاهش یافتند. به طوری که با افزایش از صفر تا ۹ درصد نمک، کاهش حد روانی از ۲۲ به ۱۷ درصد و حد خمیری از ۱۵ به ۱۳ درصد رخ داده است که به ترتیب باعث کاهش ۲۲/۷ و ۱۳/۴ درصدی در حد روانی و خمیری خاک شده است. این تغییرات به‌طور کلی باعث پایین آمدن شاخص خمیری خاک (PI=LL-PL) از ۷ به ۴ درصد شده است که این کاهش نشانه مطلوبی از نظر مهندسی ژئوتکنیک به‌حساب می‌آید. با توجه به نتایج به‌دست آمده، کاهش حد روانی و حد خمیری را می‌توان به حضور کاتیون‌ها با ظرفیت زیاد با افزایش غلظت نمک نسبت داد که شکل‌پذیری خاک را کاهش داده و به موجب آن‌ها نیروهای دافعه در بین ذرات کاهش یافته و ذرات به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. تجمع ذرات، سطح تماس با آب را کاهش داده و بدین ترتیب حد روانی و حد خمیری با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد. از طرف دیگر Mahasneh (۲۰۰۴) کاهش حد روانی و حد خمیری با افزایش نمک را به جانشینی مولکول‌های آب با نمک نسبت داده است که سبب کاهش ضخامت لایه دوگانه و کاهش رطوبت خاک و در نتیجه سفت‌تر شدن ساختار خاک گردیده است.

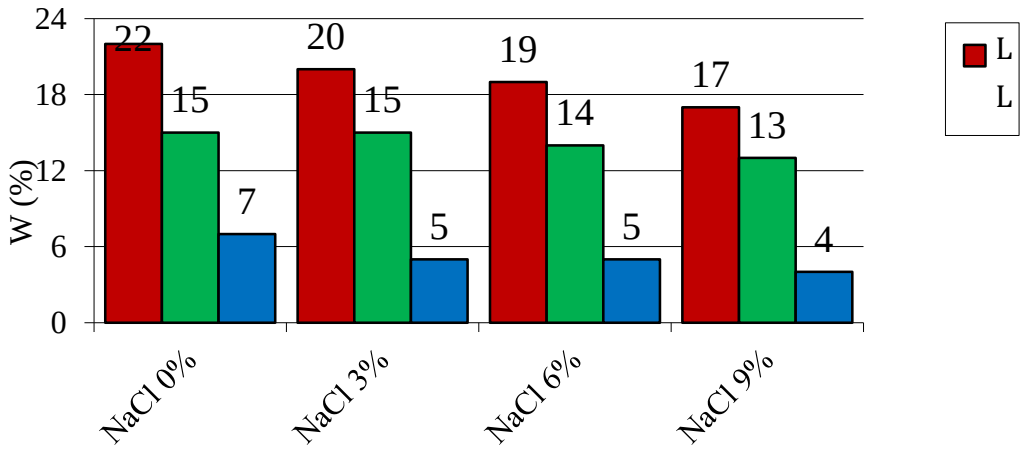
نتایج این تحقیق با نتایج سایر محقیقن مانند Brandl (1992)، Cancelli et al. (1994)، Maio (2018) و Mishra et al. (2019) مقایسه شده‌اند. این محققین با بررسی تاثیر نمک روی خاک‌های ریز دانه به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار نمک، حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری خاک کاهش پیدا کرده‌اند. همچنین Kumar و همکاران (۲۰۱۸) به منظور بررسی اثر شوری با استفاده از نمک سدیم کلرید بر خصوصیات ژئوتکنیکی یک نوع خاک متورم‌شونده رسی، یک سری از آزمایش‌های ژئوتکنیکی مانند حدود آتربرگ انجام دادند و نتایج مربوطه با آب مقطر مقایسه شد. نتایج این محققین نشان داد که محدوده حدود اتربرگ به تدریج با افزایش مقدار نمک به نمونه خاک، کاهش می‌یابد. به هر حال نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که حدود آتربرگ خاک لسی مورد مطالعه، با افزایش مقدار نمک کاهش پیدا کرده اند که در تطابق با نتایج سایر محققین است.

شکل ۱۰ نتیجه آزمایش تراکم استاندارد انجام شده بر روی نمونه‌های خاک در شرایط طبیعی و با درصدهای مختلف نمک را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، با افزایش غلظت نمک سدیم‌کلرید از صفر به ۹ درصد، حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک افزایش ۴/۳ درصدی از خود نشان داد، به طوری که از ۱/۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک بدون نمک سدیم‌کلرید به ۱/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک با ۹ درصد نمک سدیم‌کلرید افزایش یافته است. علاوه بر این نمک سدیم‌کلرید باعث کاهش ۴/۸ درصدی مقدار درصد رطوبت بهینه شد، به‌طوری که با افزایش میزان نمک سدیم‌کلرید این مقدار از ۱۲/۵ درصد در خاک بدون نمک سدیم کلرید به ۱۱/۹ درصد در خاک با ۹ درصد نمک سدیم‌کلرید کاهش یافته است.

با توجه به نتایج آزمایش تراکم می‌توان افزایش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک را این گونه توجیه کرد که با توجه به شکننده‌تر بودن بلورهای نمک نسبت به بلورهای خاک، بلورهای نمک تحت عمل تراکم خرد شده و با نفوذ بین حفرات خاک باعث کاهش فضای خالی دانه‌های خاک شده که این امر سبب افزایش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک با افزایش درصد نمک شده است. علاوه بر این Alainachi و Alobaidy (۲۰۱۰) و Shariatmadari و همکاران (۲۰۱۱) افزایش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک و کاهش رطوبت بهینه با افزایش مقدار نمک را به کاهش ضخامت لایه دو گانه و افزایش نیروی جاذبه در بین ذرات رس در اثر افزایش غلظت آب منفذی نسبت داده‌اند.

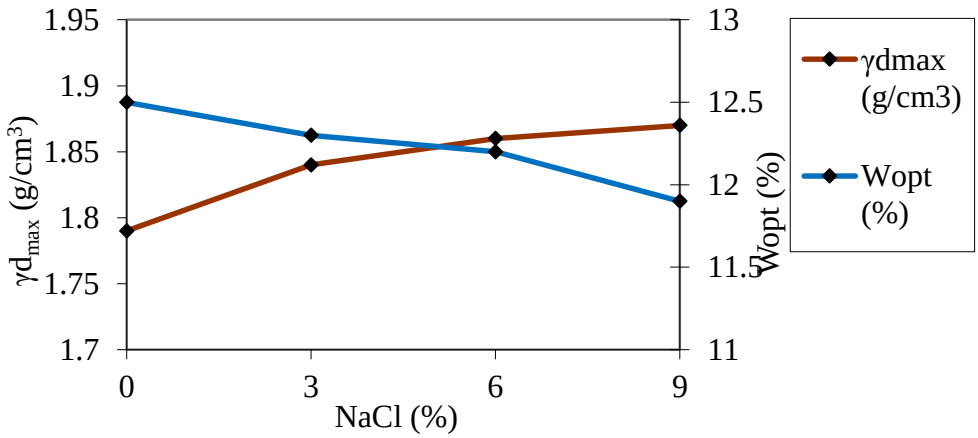
نتایج این بخش از تحقیق در تطابق با نتایج تحقیقات Emami azadi (2008)، Mansour et al. (2008)، Alainachi and Alobaidy (2010)، Shariatmadari et al. (2011) است. نتایج این محققین نشان داد که با افزایش شوری خاک، حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک افزایش و رطوبت بهینه کاهش یافته است. علاوه بر این نتایج تحقیق Kumar و همکاران (۲۰۱۸) روی یک نمونه خاک متورم‌شونده رسی نشان داد که با افزایش مقدار نمک سدیم کلرید، حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک با بیشتر شدن غلظت نمک در مقایسه با نمونه‌های آزمایش با استفاده از آب مقطر افزایش یافته و همچنین رطوبت بهینه نیز با اضافه کردن آب شور به خاک کاهش یافته است. به هر حال نتایج تحقیقات Almdar (۱۹۹۹) و Ajalloiean و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که با افزایش مقدار نمک در ترکیب خاک تغییر چندانی در حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک و رطوبت بهینه آن مشاهده نشده است.

شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها را بر حسب درصدهای مختلف نمک سدیم‌کلرید نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست، با افزایش میزان غلظت نمک سدیم‌کلرید مقاومت فشاری از ۱۱۸ کیلوپاسکال به ۱۴۵ کیلوپاسکال (حدود ۱۸ درصد) افزایش پیدا کرده است. دلیل این افزایش را می‌توان ایفای نقش نمک به عنوان سیمان بین دانه‌های خاک دانست. همچنین املاح نمک موجود در خاک سبب برقراری پیوند در بین ذرات خاک شده‌اند که به موجب آن مقاومت خاک افزایش یافته است. نتایج تحقیق Kumar و همکاران (۲۰۱۸) نیز نشان داد که مقاومت فشاری محصور نشده یک خاک رسی با اضافه کردن نمک سدیم کلرید به آن افزایش می‌یابد.



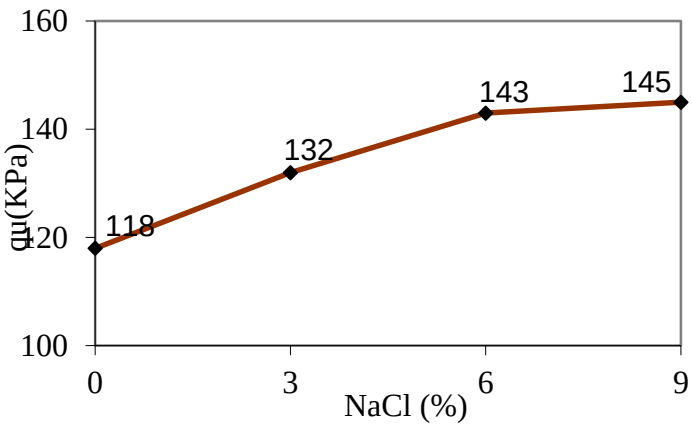
شکل ۹- حدود آتربرگ و شاخص خمیری نمونه خاک در شرایط طبیعی و درصدهای مختلف نمک.

Fig. 9. Atherberg limits and plasticity index of soil specimens under natural conditions and different salt content.



شکل ۱۰- تغییرات در حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه خاک در شرایط طبیعی و با درصدهای مختلف نمک.

Fig. 10. Changes in maximum unit weight and optimum moisture of specimens under natural conditions and with different salt content.



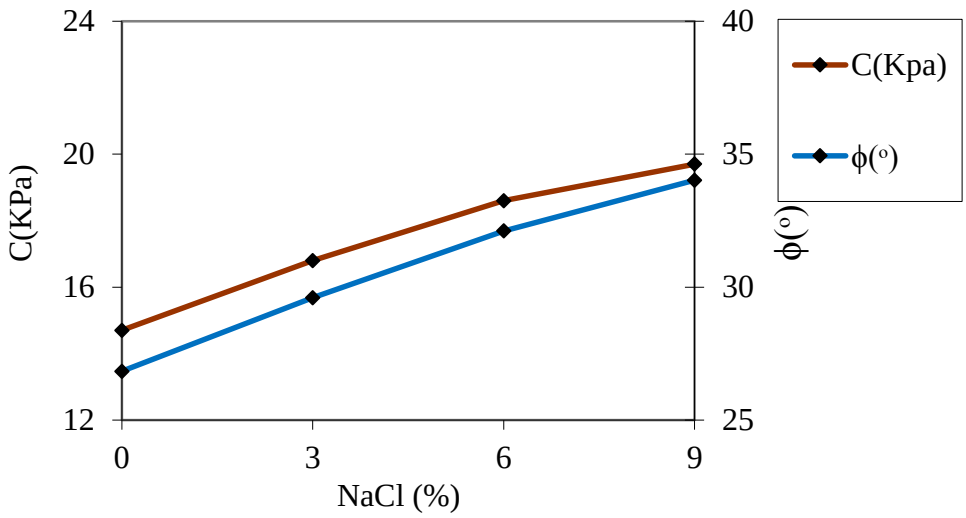
شکل ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک با درصدهای مختلف نمک.

Fig. 11. Changes in unconfined compressive strength of specimens with different salt content.

با انجام آزمایش برش مستقیم برروی نمونه‌ها مشخص شد نمک باعث تغییر در پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌شود. شکل ۱۲ تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک را با مقدار نمک سدیم‌کلرید نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌مشاهده می‌شود، افزایش میزان نمک سبب افزایش میزان چسبندگی از ۱۴/۷ به ۱۹/۷ کیلو پاسکال (معادل ۳۴ درصد) و همچنین زاویه اصطکاک داخلی از ۲۶/۸۳ به ۳۴/۰۲ درجه (معادل ۲۷ درصد) شده است. علت افزایش پارامترهای مقاومت برشی را می‌توان اینطور توجیه کرد که ذرات نمک بین دانه‌های خاک قرار گرفته و باعث سیمانیته شدن و قفل و بست و همچنین چسبندگی بهتر بین دانه‌های خاک شده و این میزان با افزایش درصد نمک بیشتر شده است.

نتایج آزمایش برش مستقیم در این تحقیق با نتایج Naeini و Jahanfar (۲۰۱۷) مقایسه شده‌اند. این محققین نشان دادند که محلول نمک به شدت مقاومت برشی خاک ریز دانه را افزایش می‌دهد. همچنین مطالعه Maio (۲۰۱۸) نشان داد که قرار گرفتن بنتونیت در معرض سدیم کلرید سبب مقدار قابل توجهی افزایش زیادی در مقاومت برشی آن شده است. با این حال نتایج Ajalloiean و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که افزایش ناچیزی در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی یک نمونه خاک ریز دانه در اثر اضافه کردن نمک اتفاق افتاده است. به هر حال نتایج تحقیق حاضر نشان دهنده یک افزایش در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در خاک مورد مطالعه در اثر افزایش نمک است.

خاک لس دارای چسبندگی بوده از همین رو امکان تهیه نمونه دست نخورده وجود دارد اما امکان اختلاط نمک با نمونه دست نخورده وجود ندارد. زیرا بطور یکنواخت با خاک پایه ترکیب نمی‌شود. از همین رو امکان انجام آزمایش‌های ژوتکنیکی بر روی نمونه‌های دست نخورده همراه نمک وجود ندارد. بنابراین خاک لسی مورد مطالعه در پژوهش حاضر در حالت دست خورده مورد آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی قرار گرفت. به هر حال اگر با فرض اینکه خاک در حالت دست نخورده مورد مطالعه قرار می‌گرفت نتایج ممکن بود متفاوت از حالت دست خورده باشد. از آنجا که خاک لسی مورد مطالعه در حالت دست نخورده دارای ساختار لانه زنبوری می‌باشد به همین دلیل طاق‌های دانه‌ای زیادی در ساختار میکروسکوپی آن وجود داشته که سبب می‌شود در حالت خشک و تحت بارگذاری استاتیک، دارای مقاومت قابل توجه‌ای باشند. در همین راستا می‌توان حدس زد مقادیر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های لسی در حالت دست نخورده بیشتر از نمونه‌های دست‌خورده باشد.



شکل ۱۲- تغییرات پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خاک با درصدهای نمک.

Fig. 12. Changes in shear strength parameters (cohesion and internal friction angle) of specimens with different salt content.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر نمک سدیم کلرید روی خصوصیات ژئوتکنیکی یک نمونه خاک لس از شهرستان گنبد کاووس استان گلستان پرداخته شد. به این منظور، خاک مورد نظر بعد از اضافه کردن ۳، ۶ و ۹ درصد نمک مورد آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل حدود آتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم قرار گرفت. با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌ها، نتایج زیر حاصل شد.

۱- نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ نشان داد افزودن سدیم‌کلرید از صفر به ۹ درصد به خاک لس، سبب کاهش حد روانی (۲۲ به ۱۷ درصد) و حد خمیری (۱۵ به ۱۳ درصد) شد که متعاقبا سبب کاهش

شاخص خمیری خاک (۷ به ۴ درصد) شد. کاهش حدود آتربرگ را می‌توان به حضور کاتیون‌ها با ظرفیت زیاد با افزایش غلظت نمک نسبت داد که شکل‌پذیری خاک را کاهش داده و به‌موجب آن‌ها نیروهای دافعه در بین ذرات کاهش یافته و ذرات به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. تجمع ذرات سطح تماس با آب را کاهش داده و بدین ترتیب حد روانی و حد خمیری با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد.

۲- با توجه به نتایج آزمایش تراکم، مشخص گردید که با افزودن نمک به ترکیب خاک لس، حداکثر وزن واحد حجم خاک افزایش یافت. همچنین میزان درصد رطوبت بهینه با افزایش میزان درصد نمک سیر کاهشی را نشان داد.

۳- یک افزایش از ۱۱۸ به ۱۴۵ کیلوپاسکال در مقاومت فشاری محصور نشده خاک در اثر افزایش نمک از صفر به ۹ درصد رخ داد. این افزایش در مقاومت معادل با ۱۸ درصد است. دلیل این افزایش را می‌توان ایفای نقش نمک به عنوان سیمان بین دانه‌های خاک دانست، که به موجب آن مقاومت خاک افزایش یافته است.

۴- افزودن نمک سبب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک شد به‌طوری که چسبندگی از ۱۴/۷ به ۱۹/۷ کیلو پاسکال (معادل ۳۴ درصد) و همچنین زاویه اصطکاک داخلی از ۲۶/۸۳ به ۳۴/۰۲ درجه (معادل ۲۷ درصد) افزایش یافتند. علت افزایش پارامترهای مقاومت برشی را می‌توان اینطور توجیه کرد که ذرات نمک بین دانه‌های خاک قرار گرفته و باعث سیمانیته شدن و قفل و بست و همچنین چسبندگی بهتر بین دانه‌های خاک شده و این میزان با افزایش درصد نمک بیشتر شده است.

منابع

Ahmed, K.I., 2013. Effect of gypsum on the hydro-mechanical characteristics of partially saturated sandy soil. PhD. Thesis, Cardiff University.

Ajalloeian, R., Mansouri, H., Sadeghpour, A.H., 2013. he Evaluation of Water Salinity Effect on Geotechnical fine-grained soils. Journal of Engineering Geology 7(2), 23-45.

Ajam, M., Sabour, M., Dezvareh, G.A., 2017. Study of water salinity effect on geotechnical behavior of soil structure using response surface method. Ciência eNatura, Santa Maria 36, 360-369.

Alainachi I.H., Alobaidy G.A., 2010. The Effects of Basra Gulf Salt Water on The Proctor Compaction and CBR Test Results of Soil Samples at Baniyas City, Abu Dhabi, UAE. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 15, 1−17.

Alawaji, H., 1999. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids. Applied Clay Science 15, 411−430.

Almdar, S., 1999. Long-term effect of saline water on fine-grained soils. M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Modares University.

ASTM., 2007. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken.

Brandl, H., 1992. Mineral liners for hazardous waste containment. Geotechnique 42(1), 57-65.

Cancelli, A., Cossu, R., Malpei, F., Offredi, A., 1994. Effects of leachate on the permeability of sand-bentonite mixtures. Proc. Landfilling of Waste 13, 259−293.

Castellanos, E., Gens, A., Lioret, A., Romero, E., 2006. Influence of water chemistry on the swelling capacity of a high-density bentonite. In: Miller, G.A., Geotechnical Special Publication 147(1), 962−971.

Dutta, J., Komar, A.K., 2019. Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions. Applied Clay Science 120, 61–69.

Emami azadi, M.R., 2008. The Effects of Urmieh Lake Salt Water on the Proctor Compaction and CBR Test Results of Well Graded Gravel-Sand Mixed With Clay (GSCW) Soil Samples. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 13, 87−99.

Khormali, F., 2006. Evolution, Physico-Chemical and Mineralogical properties of saline and sodic soils of Major series in Golestan Province. Researching proposa, 88p.

Kumar, N., Jeevana, S., Uday, K.V., 2018. Effect of Salinity on Geotechnical Properties of Expansive Soils. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 4(7), 6008−6016.

Mahasneh, B.Z., 2004. Dead Sea Water as a Soil Improvement Agent. Electronic Journal of Geotechnical Engineering(9), 87−93.

Maio, C.D., 2018. Exposure of bentonite to salt solution osmotic and mechanical effects. Geotecnique 46(4), 695−707.

Mansour, Z. M., Taha, M.R., Chik, Z., 2008. Fresh- Brine Water Effect on the Basic Engineering Properties of Lisan Marl-Dead Sea- Jordan. Journal of Applied Sciences 8, 3603−3611.

Mashkoh, Z., 2012. Case study of salinity and resistance parameters of saline soil in Yazd province. Second National Conference on Structure -Earthquake –Geotechnics.

Matthew, A.G., Akinyele, A.O., 2014. Sodium and Calcium Salts Impact on Soil Permeability. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering 4(3), 37−45.

Mishra, A.K., Ohtsubo, M., Li, Y.L., Higashi, T., Park, J., 2019. Effect of salt of various concentrations on liquid limit and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures. Environmental Geology 57, 1145−1153.

Mohamadnezhad, M., Khormali, F., Raghimi, M., 2012. Physico-chemical properties and electron microscopic studies of saline and sodic soils in Golestan Province. Journal of Water and Soil Conservation 19(1), 134-152.

Naeini, S.A., Jahanfar, M.A., 2017. Effect of Salt Solution and Plasticity Index on undrain Shear Strength of Clays. World Academy of Science, Engineering and Technology 5(1), 982−986

Shariatmadari, N., Salami, M., Karimpour Fard, M., 2011. Effect of Inorganic Salt Solutions on Some Geotechnical Properties of Soil-Bentonite Mixtures as Barriers. International Journal of Civil Engineering 9, 103−110.

Tajnin, R., Abdullah, T., Rokonuzzaman, M.D., 2014. Study on the salinity and pH and its effect on geotechnical properties of soil in south-west region of Bangladesh. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering 3(2), 2348−1439.

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.

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.