Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Autumn 2025, Vol. 15 (3): 115 - 141

Research Article

Analyze the settlement and collapse of gypsum soils by PLT test, in Masjid Soleyman Petrochemical

Mohammad Hossein Jowkar[1], Mashalah Khamehchiyan[1*], Mohammad Reza Nikudel[1]

1-Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Keywords: *Gypsum soil, settlement, collapse, leaching, Masjed Soleyman petrochemical plant.*

1-Introduction

The most challenging and problematic soil in a group of problematic soils is formed when gypsum is present; conducting a project on such soils without accounting for and anticipating potential deformations can result in catastrophic consequences (Al-Sauodi et al., 2013). In the dry state, gypsum acts as cement and has good engineering properties. When it comes into contact with water and dissolves, it is removed from the environment along with the water, leading to large holes under structures and, ultimately, their settlement and destruction (Abbasi & Afsharian, 2018). Dissolution is exacerbated when water flows through the soil, leading to mass loss through leaching. Leaching is the process by which water, both natural and artificial, penetrates the soil, dissolves, and washes away soluble soil compounds (Al-Zgry, 1993; Ahmad et al., 2012). Therefore, Gypsum soils can be seen as both a problem and a mystery (Casby-Horton et al., 2015). Evaluating their engineering properties using both laboratory and in-situ methods presents its challenges. Therefore, in this study, to analyze the leaching and dissolution effects on the settlement and collapse behavior of these soils without any disturbance errors, the plate loading test (PLT) method was used in dry and saturated conditions at the Masjed Soleiman petrochemical site.

2-Material and methods

The purpose of this study is to examine the settlement and collapse characteristics of gypsum soils (of the Gachsaran Formation) in dry and saturated conditions. For this purpose, based on where the Masjed Soleyman petrochemical tanks and sensitive structures are located, six wells have depths of between 1.5 and 2 meters and a length and width of 2.5 meters and to located the loading plate, a small well with a depth of 10 to 15 centimeters and a diameter of 85 to 90 centimeters designed and implemented in the silt and clay with gypsum layer of the Gachsaran Formation. To evaluate the effects of water leaching and gypsum dissolution, PLT tests were conducted under dry and saturated conditions according to ASTM D1195. Additionally, to assess their engineering geological properties, sampling was conducted at the plate loading test site, and their physical and mechanical properties were evaluated in accordance with ASTM standards. In addition, thin sections of the soil were prepared using saturated petropaxy resin to study the clay mineralogy, microscopic, and micromorphological properties of the soil. Turbidimetric and experimental methods also measured the percentage of gypsum in soil samples, and then, using weight-volume relationships (Opukumo et al., 2022) under the criteria of Priklonskij (1952), Clevenger (1958), Feda (1964), and Ashour et al. (2020), the collapse of gypsum soils was evaluated. At last, the factors that affect the settlement and collapse of gypsum soils were assessed.

3-Results and discussions

By combining the final settlement results from the in-situ PLT test with the laboratory data of the samples, The factors that affect the settlement and collapse of gypsum soils in the region can be considered related

* Corresponding author: : khamechm@modares.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.49740.2516
Received: 2025-05-30
Accepted: 2025-11-17

ISSN: 2717-0764

to eight factors: soil texture, Atterberg limit, void ratio, gypsum content, carbonate content, compaction, the presence of water in the region and the initial degree of soil saturation. As shown in Figure 1, Sample P3 experienced the greatest settlement and collapse, with a higher content of coarse-grained particles (sand and silt) and the highest liquid and plastic limit values. Sample P6 reports lower settlement due to its high content of fine-grained particles, even when the soil is saturated. Gypsum acts as a cement in soil until it dries out, exhibiting a settlement rate similar to other soils. However, when water is present, the gypsum in the soil undergoes leaching, leading to a doubling of soil settlement in saturated conditions compared to dry conditions, as observed in sample P1 (Figure 1). Although the void ratio and soil collapse increase by removing gypsum and other dissolved soil materials under the influence of the leaching process, Nonetheless, the leaching intensity, void ratio, and the level of soil collapse due to compaction in sample P2 were low, because the soil compacts more, the permeability and leaching decreases due to the reduction of interstitial spaces between soil particles (Figure 1). This finding can help address the issues of maintaining ground stability and reducing subsidence in areas with high gypsum soils. Ultimately, it is predicted that Sample P2 will experience the same fate as Sample P3 due to increased leaching intensity and the removal of soil-soluble materials.

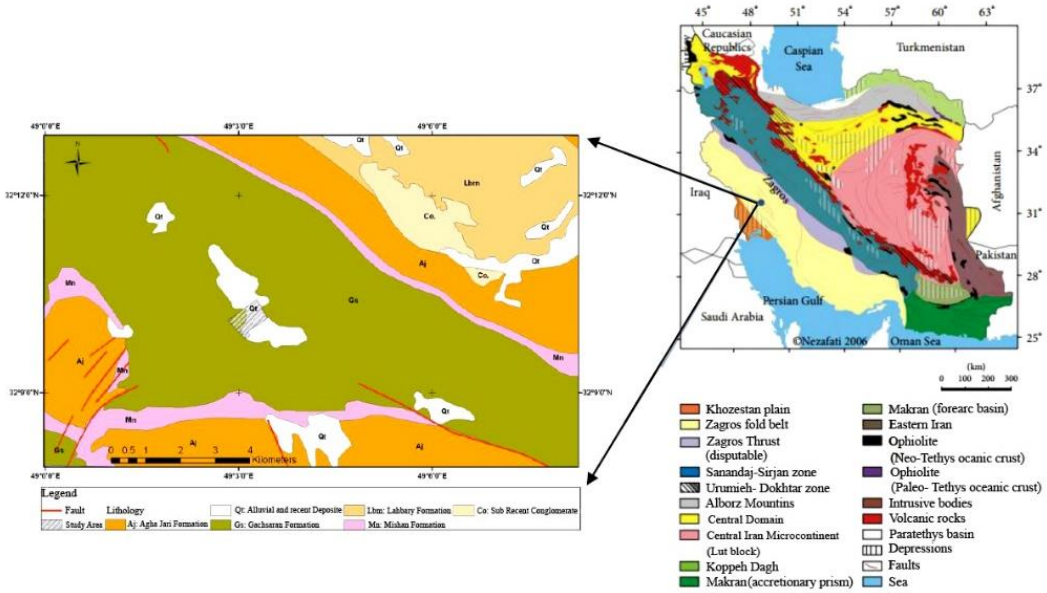


Figure 1. Examining the correlation between the ultimate settlement values measured in dry and saturated condition through the PLT test and (A) the soil 'class, initial void ratio, and gypsum content (B) the Atterberg limits of the soil, as well as the initial void ratio and gypsum content, (C) initial void ratio, void ratio at optimal moisture content, carbonate percentage, and gypsum content and (D) natural and maximum dry unit weights, of the samples.

4-Conclusion

This research examined the settlement and collapse of the silt and clay with gypsum layer within the Gachsaran Formation at the Masjed Soleyman petrochemical site, using in situ PLT test data and soil mechanics laboratory results. The results indicated that the soil at the formation's beginning contained significant salts and evaporated minerals, such as gypsum and anhydrite. The high solubility of gypsum and evaporite minerals, combined with the presence of water and soil micromorphology evidence, indicated significant leaching of gypsum particles from the soil over human time scales. Soil leaching is predicted to intensify over time, and the soil will change from a solubilizing state to a collapsing state, depending on soil class, void ratio, Atterberg limits, gypsum content, carbonate content, soil compaction, water presence, and the initial degree of saturation. As a result of this process, some of the soil has been lost, the cement bonds have weakened, and intermolecular bonds have started to break, leading to a porous soil structure characterized by substantial voids, akin to caverns within its matrix. So that in this region, the soil most

ISSN: 2717-0764
CC BY

susceptible to collapse and settlement is silt soil with gypsum, which has 78% coarse particles (silt and sand), an initial degree of saturation and a liquid limit is 13 and 41%, respectively, and is affected by the natural leaching process (infiltration process or changes in groundwater levels) its initial void ratio reached above 60%. In addition, when encountering gypsum layers, it is also essential to consider not only groundwater level maps, but also the groundwater flow direction map and the compaction of the geological layers in the area.

5-References

Abbasi, N., Afsharian, A.A., 2018. The Effects of Some Peripheral Conditions on the Solubility of Gypiferous Soils. Journal of Water and Soil Science 22(1), 1-13 (In Persian). https://doi.org/10.29252/jstnar.22.1.

Ahmad, F., Said, M.A., Najah, L., 2012. Effect of leaching and gypsum content on properties of gypseous soil. International Journal of Scientific and Research Publications 2(9), 1-5. https://www.ijsrp.org.

Al-Sauodi, N., Al-Khafaji, A., Al-Mosawi, M., 2013. Challenging Problems of Gypseous Soils in Iraq. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (p. 479-482). Paris, France. https://www.issmge.org.

Al-Zgry, E., 1993. The effect of leaching on lime stabilized gypseous soil. M.Sc. Thesis. Civil Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul. https://uomosul.edu.iq.

Ashour, M., Abbas, A., Altahrany, A., Alaaeldin, A., 2020. Modelling the behavior of inundated collapsible soils. Engineering Reports 2(4), e12156. https://doi.org/10.1002/eng2.12156.

ASTM (D1195), Standard Test Method for Repetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

Casby-Horton, S., Herrero, J., Rolong, N.A., 2015. Gypsum soils their morphology, classification, function and landscapes. Advances in agronomy 130, 231-290. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.002.

Clevenger, W.A., 1958. Experiences with loess as foundation material. Transactions of the American Society of Civil Engineers 123(1), 151-169. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007546.

Feda, J., 1964. Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. Proceedings of Soil Mechanic Seminar (P. 531–546) .Loda, Illinois. https://www.researchgate.net.

Opukumo, A.W., Davie, C.T., Glendinning, S., Oborie, E., 2022. A review of the identification methods and types of collapsible soils. Journal of Engineering and Applied Science 69(1), 1-21. https://doi.org/10.1186/s44147-021-00064-2.

Priklonskij, V.A., 1952. Gruntovenedie-utoraiva chast. Gosgeolizdat, Moscow. P. 371. https://www researchgate.net.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Jowkar, M., Khamehchiyan, M., Nikudel, M., 2025. Analyze the settlement and collapse of gypsum soils by PLT test, in Masjid Soleyman Petrochemical. Adv. Appl. Geol. 15 (3), 115-141.
DOI: 10.22055/aag.2025.49740.2516
https://aag.scu.ac.ir/article_20434.html

©2025 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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

تحلیل نشست و فروریزش خاک‌های گچی با آزمون PLT، در محدوده پتروشیمی مسجدسلیمان

محمدحسین جوکار
گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
ماشاالله خامه چیان
گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمدرضا نیکودل
گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
khamechm@modares.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

چکیده
پیچیدگی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های گچی باعث شده تحقیقات به‌عمل‌آمده در این زمینه بسیار کمتر از سایر خاک‌های مسئله‌دار و با استفاده از نمونه‌های خاک توسعه‌یافته مصنوعی انجام گیرد. درصورتی‌که این نوع پژوهش‌ها شرایط کنترل‌شده‌ای را ارائه می‌کنند و ممکن است پیچیدگی‌ها و تنوع خاک‌های گچی طبیعی رایج در سطح زمین را به‌طور کارآمد نشان ندهند. بنابراین در این پژوهش جهت مطالعه رفتار نشست و فروریزش خاک‌های گچی واقع در پتروشیمی مسجدسلیمان در شرایط خشک و اشباع از آزمایش برجای PLT استفاده گردید. نتایج حاکی از آن بود که در زمان اشباع شدن، در طول زمان انسانی رفتار این نوع خاک‌ها وابسته به بافت خاک، نسبت پوکی، حدود اتربرگ، محتوای گچ، محتوای کربنات، تراکم خاک، حضور آب و درجه اشباع اولیه، از انحلال‌پذیری به سمت رمبندگی سوق داده‌شده و سیمانی که ذرات خاک را در کنار هم نگه می‌دارد از بین می‌رود و خاک دچار نشست و فروریزش می‌گردد. به‌نحوی‌که مستعدترین خاک نسبت به فروریزش و نشست‌پذیری در منطقه خاک سیلت گچ‌دار با محتوای ذرات درشت دانه (سیلت و ماسه) ۷۸ درصد و درجه اشباع اولیه و حد روانی به ترتیب ۱۳ و ۴۱ درصد بوده که تحت تاثیر فرایند آب‌شویی طبیعی (فرایند نفوذ یا تغییرات سطح آب زیرزمینی) قرارگرفته و میزان نسبت پوکی اولیه آن بالاتر از ۶۰ درصد شده است. همچنین در زمان مواجهه با لایه‌های گچی ضروری است علاوه بر نقشه‌های سطح آب زیرزمینی، نقشه جهت جریان آب زیرزمینی منطقه و تراکم لایه‌های زمین‌شناسی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: *خاک گچی، نشست، فروریزش، آب‌شویی، پتروشیمی مسجدسلیمان*

۱-مقدمه
خاک‌های گچی در سراسر جهان در اقلیم خشک و نیمه‌خشک در حدود ۲۰۰-۱۰۰ میلیون هکتار گسترده شده‌اند (Pearson et al., 2015)، که در این میان تخمین زده می‌شود کشور ایران با دارا بودن ۲۸ میلیون هکتار اراضی گچی (معادل ۱۷/۵ درصد مساحت کشور) بیشترین وسعت اراضی گچی دنیا را دارا باشد (Yaghmaeian Mahabadi and Givi, 2008; Toomanian, 2011). گچ به ۴ روش می‌تواند در خاک تشکیل گردد، که عبارتند از: ۱_ هوازدگی برجا مواد مادری، ۲- بارش غنی از سولفات از یک منبع اقیانوسی، ۳ – ورودی‌های بادی یا رودخانه‌ای رسوبات غنی از سولفات یا گچ و ۴- اکسیداسیون برجا کانی‌های سولفیدی (Buck and van hoesen, 2002)، و حضور گچ در خاک منجر به شکل‌گیری پیچیده‌ترین و مشکل‌دارترین خاک، در گروه خاک‌های مسئله‌دار می‌گردد که انجام پروژه بر روی این خاک‌ها بدون در نظر گرفتن و پیش‌بینی تغییر شکل‌ها می‌تواند منجر به بروز یک فاجعه گردد (Al-Sauodi et al., 2013). گچ در حالت خشک به صورت سیمان عمل می‌کند و خصوصیات مهندسی خوبی را از خود نشان می‌دهد ولی در اثر تماس با آب و انحلال، همراه با جریان آب از محیط خارج‌شده و باعث به وجود آمدن حفرات بزرگ در زیر سازه‌ها و نهایتاً نشست و تخریب سازه های مهندسی می‌گردد (Abbasi and Afsharian, 2018). مشکل انحلال زمانی شدیدتر می‌شود که جریان آب از داخل خاک باعث از دست رفتن جرم به دلیل آب‌شویی (Leaching) گردد. آب‌شویی

فرایندی است که در آن آب به صورت طبیعی و مصنوعی به داخل خاک نفوذ می‌کند و درنتیجه باعث حل و شستشوی ترکیبات انحلال‌پذیر خاک می‌شود (Al-Zgry, 1993; Ahmad et al., 2012). درنتیجه این فرایند سازه‌های احداث‌شده در خاک‌های گچی دچار درز و شکاف، انحراف یا کج شدگی، نشست، ریزش شده (Al-Dabbas et al., 2010; Razouki et al., 2008)، و همچنین در آهن و بتن خوردگی ایجاد می‌شود (Herrero and Porta, 2000). چنانچه حضور گچ و کانی‌های تبخیری باعث ایجاد مشکل در ساختگاه ۲۴ سد شده که ۱۴ مورد از آن‌ها در ایالات‌متحده می‌باشد. در این میان شکست فاجعه‌بار سد سنت فرانسیس (در لس‌آنجلس کالیفرنیا)، در سال ۱۹۲۸ یکی از بزرگ‌ترین بلایای مهندسی است که در این خصوص رخداده است و منجر به مرگ ۴۰۰ نفر شد (Yilmaz, 2001). از دیگر موارد چالش‌های خاک گچی در جهان می‌توان به ایجاد ترک، شکستگی در پوشش بتنی تونل ووبارنو (Vobarno) در ایتالیا بعد از ۹ سال از احداث، به دلیل جذب آب بتن توسط گچ و متورم شدن آن (Wittke, 1990)، تشکیل حفره‌هایی با قطر ۸۰ متر و عمق ۳۰ متر و فرونشست ناشی از انحلال گچ در منطقه ریپون (در یورکشایر، انگلستان (Ripon in Yorkshire, England)) (Waltham, 2008; Cooper and Calow, 1998)، فرونشست شهر تاریخی کالاتایود (Calatayud) (در اسپانیا) (Gutiérrez and cooper 2002)، تشکیل کارست‌ها و حفرات گچی در سیواس (Sivas) ترکیه (Gökkaya et al., 2021) در مقیاس جهانی، و ایجاد ترک‌های شدید و فرار آب از مخزن زیرزمینی آب آشامیدنی جزیره هنگام در خلیج‌فارس (Rahimi and Yoosefi, 1995)، تخریب کانال‌های آبیاری و انتقال آب نکوآباد و کانال مهیار در حوضه رودخانه زاینده‌رود در اصفهان، کانال اصلی شبکه آبیاری بهبهان، کانال شهید چمران اهواز، کانال انتقال آب خداآفرین در استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل (Pourmehr and Dargahi, 2002; et al., 2011; Abbaspour et al., 2008; Makvendi)، انتقال آلاینده‌ها از کارست گچی سد باطله آق دره (Naseri and Nikghojagh, 2012) و ایجاد فرسایش شدید در مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان به دلیل انحلال‌پذیری خاک‌های گچی (Jowkar et al., 2019)، در ایران اشاره کرد. حال‌آنکه، خاک‌های گچی به‌عنوان پیچیده‌ترین و مشکل‌آفرین‌ترین خاک در گروه خاک‌های مسئله‌دار، به دلایل گستردگی عوامل تأثیرگذار بر کیفیت و کمیت انحلال آن‌ها، همچون نوع گچ، بافت خاک، میزان گچ موجود در خاک، شیب هیدرولیکی، دمای محیط و آب جاری از محیط خاک گچی، نوع و غلظت دیگر کاتیون‌های موجود در خاک، نوع و غلظت کاتیون‌های موجود در آب منفذی و یا آبی که توسط پدیده نشست به خاک وارد خواهد شد، درجه اشباع خاک، درصد تراکم خاک، درصد تحکیم خاک، وضعیت تنش‌های اعمالی بر خاک، شیب هیدرولیکی، اسیدیته خاک و آب موجود در آن رفتار مهندسی یکسانی از خود نشان نمی‌دهند (Mansouri Kia et al., 2000; Al-Sauodi et al., 2013; Abbasi and Afsharian, 2018)، و استاندارد مشخصی نیز در برخورد با آن‌ها وجود ندارد. چنانچه حتی در طبقه‌بندی‌های یونیفاید و آشتو مسائل مربوط به خاک‌های دارای مواد انحلال‌پذیر مانند گچ در نظر گرفته نشده است که این مسئله می‌تواند خطاهای قابل‌توجه ای را در برآورد کلاس خاک در این نوع طبقه‌بندی‌ها به وجود آورد (Rahimi et al., 1998). تنها گزارش‌شده که اعمال درجه حرارت ۱۰۵ درجه در این خاک‌ها باعث ایجاد یک خطای فاحش در حدود اتربرگ و رطوبت بهینه تراکم استاندارد و غیره می‌گردد و به‌جای آن باید از دمای ۶۰ درجه استفاده کرد (ASTM D2216-19). این مسئله از آنجا مهم تلقی می‌گردد که حتی اضافه شدن مقادیر پایین گچ (٪۶ -۱) به خاک هم می‌تواند خصوصیات مهندسی خاک را تغییر دهد (Jha and Sivapullaiah, 2014)، و همه آزمایش‌های مکانیک خاک صرف‌نظر از خطای دست‌خوردگی نمونه، با اضافه کردن آب به خاک صورت می‌گیرد و این عمل، منجر به تغییر در اندازه، دانه‌بندی و وزن خاک می‌گردد. بنابراین ارزیابی این نوع خاک‌ها و مطالعه رفتار مهندسی آن‌ها به یک چالش برای پژوهشگران تبدیل‌شده است.

چنانچه جهت ارزیابی اندازه ذرات خاک‌های ماسه‌ای گچی روش‌های، الک خشک‌کردن، تکان دادن خاک در یک محلول با نسبت ۷:۳، اتانول: آب و استفاده از امواج اولتراسونیک در محلول ۷:۳ اتانول: آب به‌کاربرده می‌شود که مؤثرترین روش استفاده از امواج فراصوت است (Pearson et al., 2015). همچنین جهت تعیین انتقال - جرم در طی آب‌شویی گچ پژوهشگران مجبور شده مدل‌های ریاضی و عددی را جهت تحلیل به‌کاربرده و با استفاده از معادلات مشتق جزئی و روش المان محدود اختلاف مقدار گچ خاک در طی فرایند انحلال را محاسبه و یا با استفاده

از یک کار تئوری، بر مبنای حل سه معادله تعادل (Equilibrium)، جریان (Flow)، فرورفت ـ پراکندگی (Advection-Dispersion) و استفاده از نتایج آن‌ها در کار آزمایشگاهی، رفتار خاک‌های گچی را مطالعه کنند (Al-Mufty, 1997; Obaidi, 2007). بر مبنای تطابق مدل عددی (بر پایه معادلات مشتق جزئی تعادل، پیوستگی و معادلات انتقال جرم) برای مطالعه رفتار آب‌شویی خاک گچ آزمایش‌های، آب‌شویی فشردگی ـ نفوذپذیری ((CPLT) Compressibility-Permeability Leaching Test,)، آزمایش چرخه‌های فروریزی – آب‌شویی ((CLCT) Cyclic Leaching-Collapse Test,)، آزمایش ادئومتر آب‌شویی– نفوذپذیری ((PLOT) Permeability-Leaching Odometer Test,) و آزمایش روسل (Rowe cell) آب‌شویی نفوذپذیری (PLRCT) Permeability-Leaching Rowe Cell Test,) ارائه‌شده که بعد از اتمام آزمایش‌ها، ضروری است نمونه را خشک و وزن و اندازه آن بعد از آب‌شویی مجدد مورد بررسی قرار گیرد (Muayad and Al-Sharrad, 2007; Karkush et al., 2008). علاوه بر این آزمایش‌ها، به دلیل دشواری جهت تهیه نمونه‌های دست‌نخورده می‌توان با ارتقا دستگاه سه محوری به ارزیابی وضعیت فروریزش خاک‌های ماسه‌ای گچ‌دار پرداخت (Abdalhusein et al., 2020). نتیجه این آزمایش‌ها حاکی از وابستگی فروریزش خاک‌های گچی به محتوای گچ، نسبت پوکی اولیه، وزن واحد حجم خشک خاک، محتوای رطوبت و درجه اشباع اولیه و پارامترهای مقاومت برشی که از درصد آب‌شویی و همچنین مقدار گچ در خاک تأثیر می‌پذیرند، و همچنین برهمکنش این عوامل با یکدیگر می‌باشد (Al-Mufty, 1997; Al-Riahi et al., 2024). چنانچه در محتوای رطوبت اولیه و تراکم یکسان، خاک کربلا با محتوای گچ (۳۰٪) فروریزش بالاتری نسبت به خاک تکریت با محتوای گچ (۵۵٪) به دلیل بالاتر بودن ضریب یکنواختی (Cu) نشان می‌دهد، چرا که در شرایط مرطوب و اشباع ذرات ریزدانه خاک تمایل به پر کردن فضاهای خالی موجود دارند درنتیجه نسبت پوکی کمتری در مقایسه با خاک‌های با درجه‌بندی ضعیف دارند (Fattah and Dawood, 2020). همچنین با افزایش مکش بافتی در توده خاک، سختی و مقاومت برشی خاک کاهش پیداکرده و کرنش‌های حجمی ایجادشده در خاک به‌شدت افزایش می‌یابد (Abdalhusein et al., 2020). با ارزیابی تغییرات حجم و فروریزش خاک‌های گچی غیر اشباع با استفاده از سنسورهای بلوک متخلخل گچی متصل به دیتالاگرهای ویژه (Gypsum porous block sensors attached to special data logger) می‌توان دریافت با افزایش وزن واحد خشک اولیه، پتانسیل ریزش ۱۱ تا ۲۷ درصد بسته به محتوای گچ در خاک کاهش می‌یابد. همچنین افزایش محتوای آب اولیه پتانسیل ریزش را برای تمام نمونه‌های خاک استفاده‌شده کاهش می‌دهد و نسبت خالی اولیه نقش اساسی در مقدار فروپاشی خاص دارد (Fattah et al., 2025).

در ارتباط با نشست خاک‌های گچی، ساخت نمونه‌های مصنوعی با درصدهای مختلف گچ و انجام آزمایش تحکیم در آزمایشگاه حاکی از وابستگی میزان نشست خاک‌های گچی به فشار مؤثر تحکیم، درصد گچ و ضریب فشردگی می‌باشد (Khalf Shoshtari et al., 2017). علاوه بر آن در مسئله تاثیر آب‌شویی بر رفتار خاک‌های گچی نیز، بررسی تأثیر آب‌شویی بلندمدت بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس گچ‌دار حاکی از آن است که با افزایش مدت‌زمان آب‌شویی گچ، پارامترهای مقاومت برشی خاک کاهش چشمگیری پیدا می‌کند (Razouki et al., 2007). با مطالعه تأثیر درصد گچ و شیب هیدرولیکی بر میزان انحلال‌پذیری خاک‌های رسی گچی نیز می‌توان دریافت که با افزایش درصد گچ میزان انحلال آن در خاک افزایش می‌یابد (Afsharian et al., 2017).

در نهایت با بررسی رفتار نشست‌پذیری خاک‌های گچی به روش‌های برجا، با استفاده از حفر گمانه‌هایی با عمق ۵-۱ متر که در آن‌ها آزمایش‌های SPT و PLT انجام شده، مشخص گردید نشست خاک‌های گچی در شرایط خشک کمتر از خاک‌های مشابه است چنانچه خاک ماسه‌ای با محتوای گچ ٪۶۰، مقدار ۰/۳ میلی‌متر نشست داشته لیکن همان خاک در شرایط اشباع کوتاه‌مدت ۳۴/۴۱ میلی‌متر نشست می‌کند (Al-Obaidi and Al-Mafragei, 2016).

بنابراین با توجه به مقدمه و پیشینه ارائه‌شده از خاک‌های گچی می‌توان هم به‌صورت یک مشکل، و هم به‌صورت یک معما (Casby-Horton et al., 2015) نام برد که ارزیابی ویژگی‌های مهندسی آن‌ها به هرکدام از روش‌های آزمایشگاهی و برجا چالش خاص خود را دارد که در این پژوهش به‌منظور مطالعه رفتار دقیق نشست پذیری این نوع خاک‌ها، بدون خطای دست‌خوردگی و بررسی تاثیر فرایند آب‌شویی و انحلال در

نشست این نوع خاک‌ها، در محدوده پتروشیمی مسجدسلیمان از روش آزمایش برجای بارگذاری صفحه‌ای (PLT) در شرایط خشک و اشباع استفاده گردید.

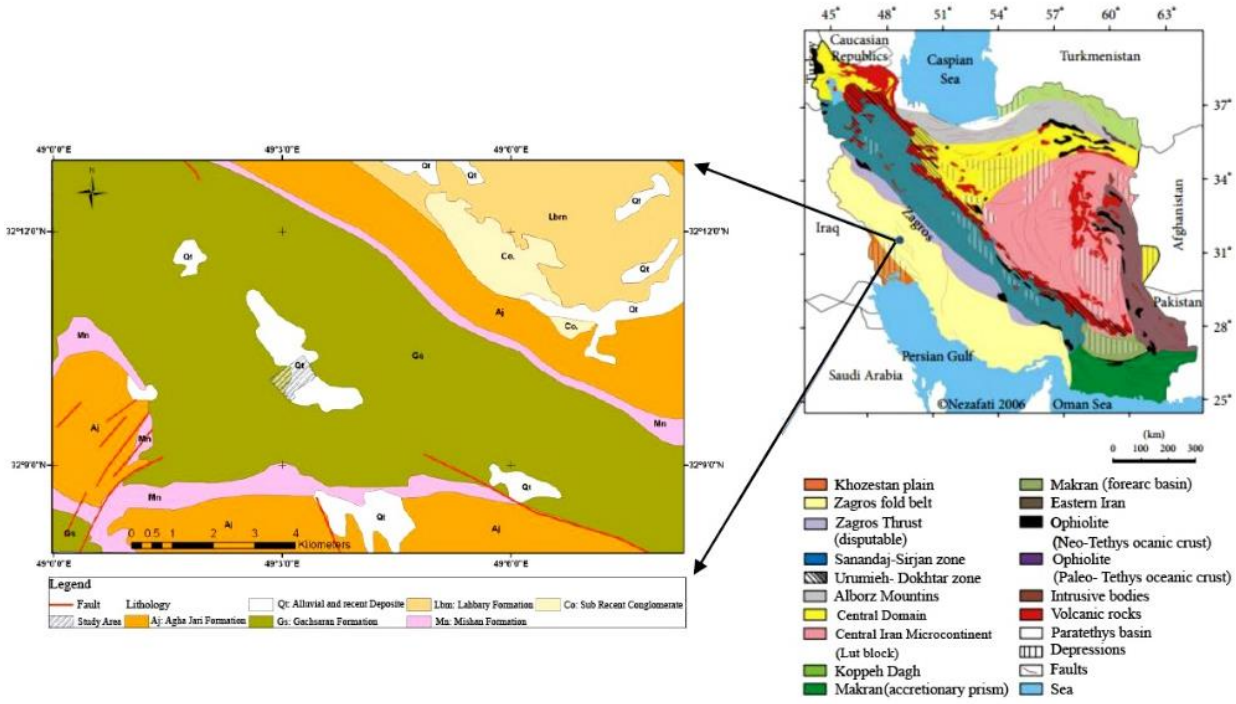
۲-زمین‌شناسی

۲ـ ۱ـ زمین‌شناسی عمومی

مجتمع پتروشیمی اوره و آمونیاک مسجدسلیمان با مساحت حدود ۵۱۰ هزار مترمربع در منطقه‌ای با طول جغرافیایی ۴۹/۰۵ و عرض جغرافیایی۳۲/۱۶ در سی‌وپنج کیلومتری شمال غربی شهرستان مسجدسلیمان در استان خوزستان، در مجاورت روستای هفت شهیدان واقع‌شده است.

۲ـ۲ ـ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۱ در پهنه زمین‌شناسی فروافتادگی دزفول و بر روی سازند گچساران (حاوی خاک‌های ریزدانه گچ‌دار و سنگ‌های تبخیری) و نهشته‌های کواترنری قرارگرفته است. در این منطقه رشته‌کوه‌های زاگرس هماهنگ با عناصر ساختاری اصلی این پهنه زمین‌ساخت در راستای شمال غرب، جنوب شرق کشیده شده‌اند. شیب توپوگرافی دامنه‌ها و دیواره‌ی آبراهه‌ها متأثر از وجود سازندهای ضعیف گچساران در منطقه عموماً کم است. تکتونیک منطقه به همراه عملکرد پدیده‌های فرسایش، از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در ریخت‌شناسی منطقه هستند.



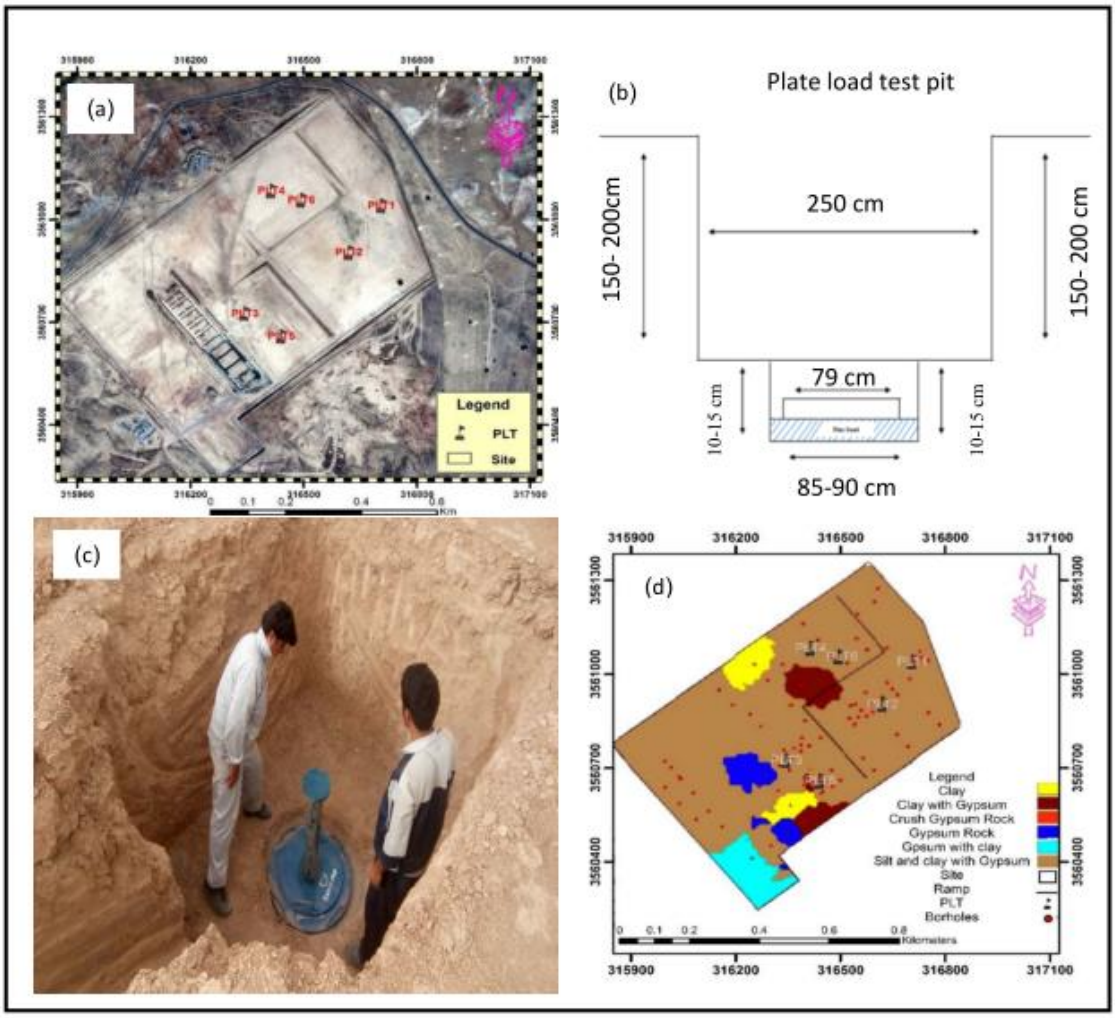
شکل ۱- موقعیت و نقشه زمین‌شناسی سایت پتروشیمی مسجدسلیمان

Fig. 1. Location and geological map of Masjed Soleyman petrochemical site

۳- روش تحقیق

در این پژوهش جهت ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و نشست‌پذیری خاک‌های گچی سازند گچساران در شرایط خشک و اشباع با توجه به مکان‌یابی صورت گرفته جهت استقرار مخازن و سازه‌های حساس پتروشیمی مسجدسلیمان (شکل-2 a) تعداد ۶ چاهک با عمق حدود ۱/۵ تا ۲ متر و طول و عرض ۲/۵ متر که درون آن‌ها نیز چاهک کوچک‌تری به عمق ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۸۵ تا ۹۰ سانتی‌متر جهت قرارگیری صفحه بارگذاری ایجادشده بود، مطابق شکل 2-b طراحی و در لایه سیلت و رس گچ دار سازند گچساران حفر و اجرا گردید (شکل‌های 2-c,d) سپس به‌منظور ارزیابی اثر آب‌شویی و انحلال گچ به روش‌های خشک و اشباع تحت بار بالغبر۴۰ تن (جهت شبیه‌سازی مخازن پتروشیمی) آزمایش بارگذاری صفحه‌ای PLT بر اساس استاندارد ASTM D1195 صورت پذیرفت. این آزمایش اگرچه از هزینه‌ی بالایی برخوردار بوده و وقت‌گیر می‌باشد ولی به نتایج دقیق‌تری در مسئله نشست منتهی

می‌شود (Bolouri Bazaz et al., 2011). به‌منظور اجرای آزمایش در محیط اشباع بعد از اتمام آزمایش در حالت خشک، به وسیله یک تانکر در محل، به مدت ۱۲ ساعت آب به‌آرامی در اطراف صفحه بارگذاری جریان یافته تا جایگزین هوا مابین ذرات خاک گردد و خاک زیر و اطراف صفحه، با اندازه‌گیری محتوای رطوبت، کاملاً زیر آب اشباع شوند. سربار اعمالی در این آزمایش حدود ۴۰ تن بوده است و حداکثر تنش اعمال‌شده در این آزمایش‌ها 816 kN/m2 بوده است که در شکل‌های 3-a,b آماده‌سازی، جاگذاری و تنظیم سربارها با کمک جرثقیل در محل چاهک‌ها و اعمال سربار نهایی (شکل 3-c) و نصب کرنش‌سنج‌ها (شکل 3-d) و انجام آزمایش در شرایط خشک (شکل 3-e) و اشباع (شکل 3-f) قابل‌مشاهده است.



شکل ۲- ابعاد و موقعیت آزمایش PLT. (a) موقعیت چاهک‌های PLT در سایت پتروشیمی بعد از عملیات تسطیح، (b) ابعاد چاهک‌های PLT، (c) اجرای چاهک‌های PLT، و (d) موقعیت چاهک‌های PLT در سایت پتروشیمی در نقشه زمین‌شناسی سازند گچساران (بر اساس اطلاعات حفر بالغبر ۱۱۳ گمانه (Zamin Physic Pooya Company, 2015)).

Fig. 2. PLT test dimensions and position (a) The Location of PLT pits at the petrochemical site after grading operations, (b) Dimensions of PLT pits, (c) Execution of PLT pits, and (d) Location of PLT wells at the petrochemical site on the geological map of the Gachsaran Formation (based on drilling data from 113 boreholes (Zamin Physic Pooya Company, 2015)



شکل ۳- مراحل انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (a) آماده‌سازی و جاگذاری سربارها در محل چاهک مورد آزمایش، (b) آماده‌سازی و تنظیم سربارها با کمک جرثقیل، (c) سربار اعمالی نهایی با وزن ۴۰ تن، (d) گیج‌های اندازه‌گیری کرنش، (e) انجام آزمایش در شرایط خشک و (f) انجام آزمایش در شرایط اشباع

Fig. 3. Steps to Perform a Plate Load Test (a) Preparation and placement of overhead equipment at the test pit location, (b) Preparation and adjustment, of overheads with the help of a crane, (c) Final applied overhead weighing 40 tons, (d) Strain gauges, (e) Conducting the test in dry conditions, and (f) Conducting the test in saturated conditions.

در ادامه به‌منظور ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی آن‌ها از محل انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، نمونه‌برداری صورت پذیرفت و خصوصیات بافتی خاک با استفاده از روش‌های یونیفاید و طبقه‌بندی وزارت کشاورزی ایالات‌متحده (USDA) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با انجام آزمایش‌های، تعیین وزن واحد حجم طبیعی خاک (CMW) با استفاده از پارافین، درصد رطوبت نمونه‌ها (در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد) (ASTM D2216-19)، دانه‌بندی به روش الک (ASTMD422-87) و هیدرومتری (ASTMD421-58)، چگالی ویژه خاک (ASTM D854-87)، حدود اتربرگ (ASTMD4318) و تراکم استاندارد (ASTM D698-12) جهت تعیین حداکثر وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها (MDW) و رطوبت بهینه (OMC) نمونه‌ها، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

علاوه بر آن خصوصیات کانی‌شناسی رسی، میکروسکوپی و میکرومورفولوژی خاک با تهیه مقاطع نازک از خاک به کمک رزین پتروپاکسی اشباع‌شده مورد بررسی قرار گرفت. درصد گچ نمونه‌ها نیز به روش‌های کدورت سنجی (Hassani, 2013) و تجربی (Al-Mufty and Nashat, 2000) اندازه‌گیری گردید. در روش اول، عصاره خاک طی ۵ مرتبه سانتریفیوژ محلول الکل و خاک (شکل 4-a) و استفاده از دستگاه لرزنده رفت و برگشتی (شکل 4-b) جمع‌آوری و با کمک کاغذ صافی، صاف گردید و پس از کامل شدن عصاره‌گیری و ساخت محلول استاندارد با کمک دستگاه کدورت سنجی (شکل 4-c) اندازه‌گیری گردید (Hassani, 2013). در روش دوم نیز به کمک روابط ۱ و ۲ مقدار گچ نمونه ها به روش تجربی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Al-Mufty and Nashat, 2000).

$$X_{caso4.\varepsilon H2O}=\frac{W_{S,45}-W_d}{W_{S,45}}\times\frac{136+18\varepsilon}{36}\times 10 \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\varepsilon=\frac{2(W_{S,45}-W_d)}{W_{S,45}-W_d} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این روابط WS,45: وزن نمونه که به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۵ درجه قرار داده‌شده است، W,S,45: وزن نمونه پس‌ازآنکه با آب مقطر مستغرق و سپس در دمای ۴۵ درجه به

مدت ۲۴ ساعت قرار داده‌شده باشد است، Wd: وزن نمونه که به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه قرار داده‌شده است، ε: تعداد مولکول آب هیدراته در شبکه کلسیم سولفات و X : محتوای گچ، می‌باشد.

سپس ارتباط نتایج آزمایشگاهی با نتایج آزمایش برجای PLT مورد ارزیابی قرار گرفت و فروریزشی بودن خاک‌ها با استفاده از روابط وزنی حجمی (Opukumo et al., 2022)، تحت عنوان معیارهای Priklonskij (۱۹۵۲)، Clevenger (۱۹۸۵)، Feda (۱۹۶۴) و نمودارهای برازش و همبستگی مقادیر نسبت پوکی اولیه، وزن واحد حجم خشک اولیه و درجه اشباع اولیه با پتانسیل فروریزش (حاصل نتایج تحکیم مضاعف ۳۳۹ نمونه) به‌دست‌آمده از پژوهش و مدل‌سازی Ashour و همکاران (۲۰۲۰) مورد بررسی و در نهایت نیز عوامل مرتبط با فروریزش خاک‌های گچی مورد تجزیه‌وتحلیل و جمع‌بندی قرار گرفت.

۴- یافته‌ها و نتایج

۴ ـ ۱ ـ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای PLT

به‌منظور بررسی بدترین احتمال نشست‌پذیری ممکن در محل پروژه، نخست آزمایش PLT در چاهک شماره ۱ به‌صورت خشک و اشباع به صورت مجزا انجام و نشست نهایی تقریباً ۲ برابری در شرایط اشباع نسبت به شرایط خشک اندازه‌گیری گردید. بنابراین باتوجه به حساسیت پروژه، جهت مطالعه و ارزیابی رفتار دقیق نشست‌پذیری خاک‌های گچی سازند گچساران در زمان قرارگیری مخازن بزرگ و حساس پتروشیمی و اندازه‌گیری بیشترین مقدار نشست در بدترین شرایط تحت تاثیر فرایندهای آب‌شویی و انحلال گچ، آزمایش برجا بارگذاری صفحه‌ای (PLT) در چاهک‌های شماره ۲، ۳، ۴ به‌صورت اشباع و در چاهک‌های شماره ۵ و ۶ به‌صورت خشک و اشباع ترکیبی انجام پذیرفت. در حالت خشک و اشباع ترکیبی آزمایش ابتدا در محیط خشک آغازشده و سپس هم‌زمان با چهارمین گام بارگذاری، بدون متوقف کردن آزمایش جهت اشباع کردن محیط، جریان آب در اطراف صفحه بارگذاری قرار گرفت و نشست نهایی مطابق جدول ۱ اندازه‌گیری گردید. درمجموع همان‌طور که از منحنی‌های فشار – نشست چاهک‌ها در شکل ۵ قابل‌مشاهده است، با اشباع شدن محیط نرخ نشست‌ها افزایش‌یافته است.



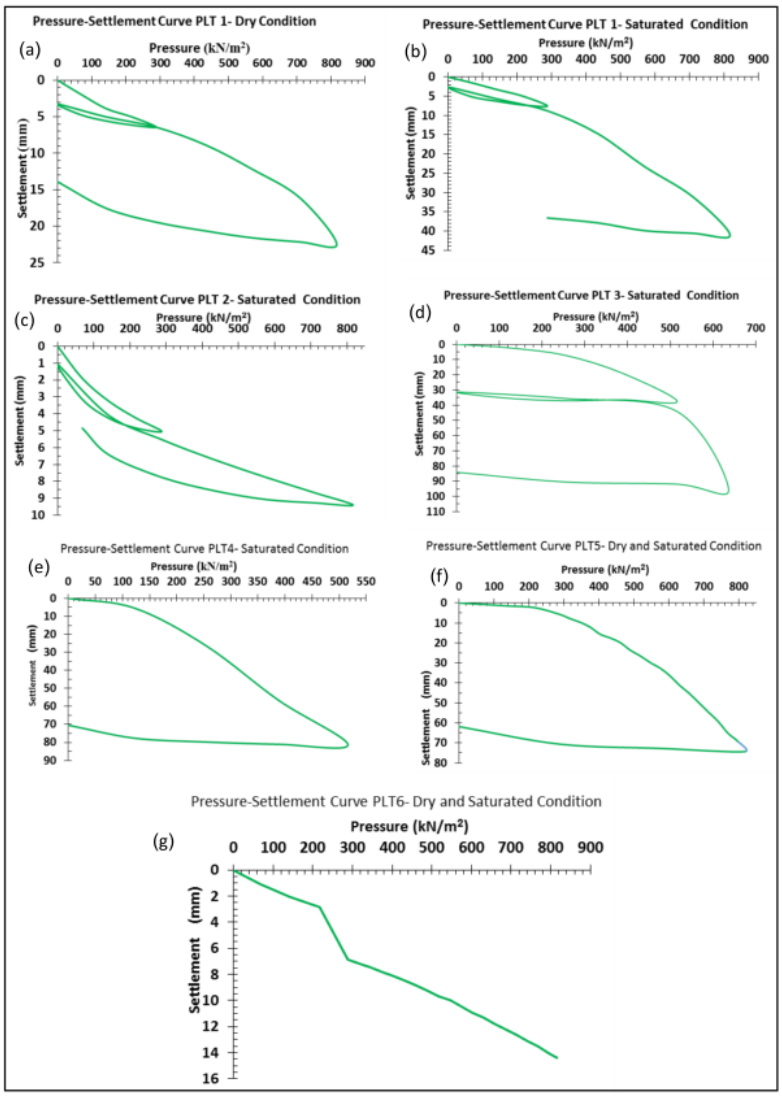
شکل ۴- دستگاه‌های مورد استفاده جهت اندازه‌گیری گچ در خاک. (a) دستگاه سانتریفیوژ، (b) دستگاه لرزاننده رفت و برگشتی، و (c) دستگاه کدورت‌سنج

Fig. 4. These instruments can be used to measure the amount of gypsum in soil: (a) centrifuge, (b) reciprocating shaker, and (c) turbidity meter

جدول ۱- مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع در چاهک‌های مختلف

Table 1. Ultimate settlement values were derived from PLT tests carried out in various pits under both saturated and dry conditions

PLT	Condition	Ultimate Settlement (mm)
PLT_1	Dry	23
PLT_1	Saturated	43
PLT_2	Saturated	9.4
PLT_3	Saturated	95
PLT_4	Saturated	84
PLT_5	Dry and Saturated	75
PLT_6	Dry and Saturated	14.5



شکل ۵- منحنی بار- نشست در حالت، (a) خشک PLT1، (b) اشباع PLT1، (c) اشباع PLT2، (d) اشباع PLT3، (e) اشباع PLT4، (f) خشک و اشباع PLT5 و (g) در حالت خشک و اشباع PLT6

Fig. 5. Pressure-settlement curve in state: (a) Dry PLT1, (b) Saturated PLT1, (c) Saturated PLT2, (d) Saturated PLT3, (e) Saturated PLT4, (f) Dry and saturated PLT5, and (g) Dry and saturated PLT6

۴ ـ ۲ ـ آزمایش‌های مکانیک خاک

بعد از نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های مکانیک خاک مطابق با استانداردهای ASTM، منحنی دانه‌بندی (شکل ۶)، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها و نسبت پوکی (در وزن واحد حجم خاک و در رطوبت بهینه تراکم) و درجه اشباع خاک با استفاده از روابط وزنی حجمی مکانیک خاک به شرح جداول ۳ و ۲ تعیین گردید. که بر اساس آنها می‌توان گفت خاک محدوده مورد مطالعه با توجه به آب‌وهوای منطقه عمدتاً خشک (با درصد رطوبت زیر ۵ درصد) و ریزدانه (CL , ML) با پلاستیسیته پایین بوده که مطابق با طبقه‌بندی USDA درصد سیلت بین ٪ ۶۵-۵۰ و درصد پوکی خاک نیز بین ٪ ۶۲ -۴۴ متغیر است

۴ ـ ۳ ـ تعیین اکسیدها و کانی‌شناسی رسی خاک

به‌منظور شناسایی اکسیدهای تشکیل‌دهنده خاک، ۲ نمونه از طریق آزمایش فلورسانس اشعه ایکس توسط آنالیز X-Ray مورد ارزیابی قرار گرفتند که با توجه به نتایج (جدول ۴) بالاترین ترکیب نمونه، اکسیدهای SiO2 و CaO گزارش گردید.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نمونه‌ها.

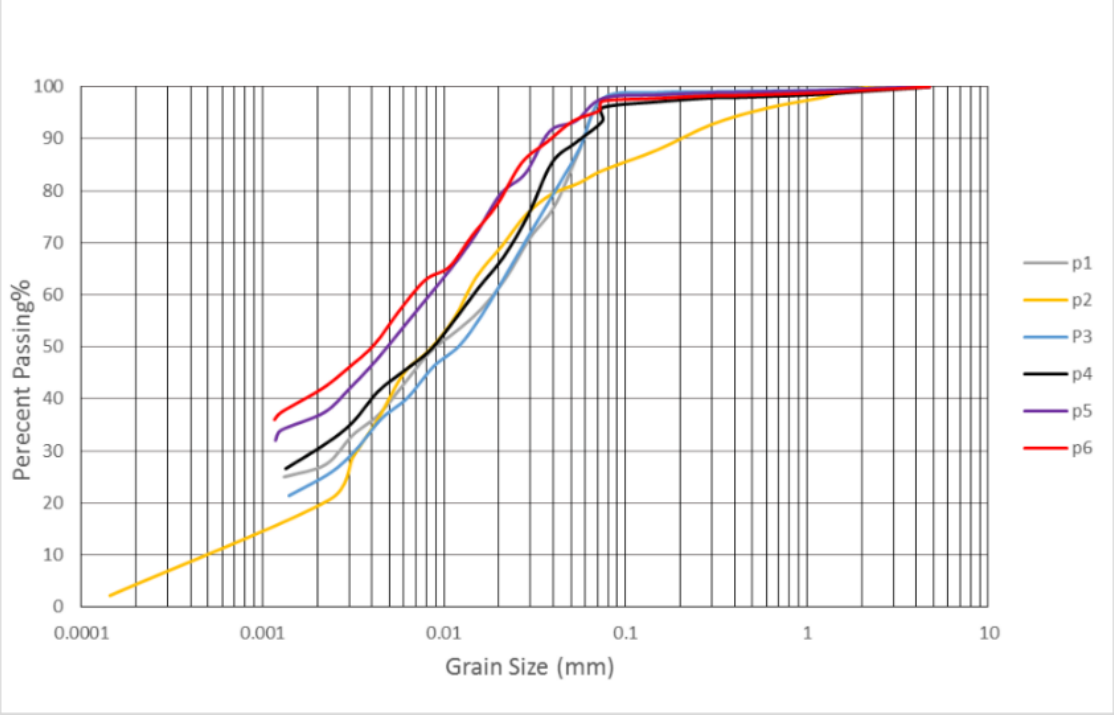
Table 2. The physical characteristics of the samples

Soil Class (Unified)	LL %' (Cone Penetration)	PI %	PL %	LL %	Soil Class (USDA)	Sand Percent %	Clay Percent %	Silt Percent %	w %	PLT
CL	36.3	14.9	22.9	37.8	Silty Clay Loam	14.5	27.15	58.35	2.6	P_1
CL	30.9	9.3	22	31.3	Silty Loam	19.85	19.3	60.85	2.4	P_2
ML	41.4	7.97	33.3	41.3	Silty Loam	16.1	21.5	62.4	3.2	P_3
ML	34.8	8	25.4	33.4	Silty Clay Loam	10	31.3	58.7	3.3	P_4
CL	37	15	23.5	38.5	Silty Clay Loam	6.3	37.45	56.25	2.5	P_5
CL	39.4	18.1	20.2	38.3	Silty Clay	5.85	42.35	51.8	2	P_6

جدول ۳- مشخصات مکانیکی نمونه‌ها

Table 3. The mechanical properties of samples

S %	e % (at O.M.C)	e. %	(kN/m^3)γ_d	OMC (%)	Gs	MDW (kN/m^3)	CMW (kN/m^3)	PLT
12.96	47.26	52.15	16.76	15.50	2.6	17.32	17.2	P_1
12.86	33.7	44.80	16.26	12.00	2.4	17.61	16.65	P_2
13.33	49.68	62.43	15.70	17.94	2.6	17.04	16.2	P_3
18.09	44.26	45.60	16.84	17.00	2.5	17	17.4	P_4
14.12	41.07	46.05	17.46	16.60	2.6	18.08	17.9	P_5
10.52	46.70	49.81	17.156	16.70	2.62	17.52	17.5	P_6



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها

Fig. 6. Samples grading curve

جدول ۴- نتایج آنالیز XRF بر روی نمونه‌های P_1 و P_2

Table 4. The results of the XRF analysis, samples P_1 and P_2

P_2 (%)	P_1 (%)	Oxides
17.15	21.32	LOI
0.308	0.339	Na2O
4.011	4.319	MgO
6.763	9.593	AL2O3
23.288	35.037	SiO2
15.006	0.111	SO3
0.071	0.142	P2O5
1.177	1.453	K2O
28.895	24.804	CaO
0.369	0.6	TiO2
2.753	4.053	Fe2O3
0.172	0.038	Sr
0.037	0.018	Zr

همچنین به‌منظور کانی‌شناسی نمونه‌ها آنالیز Clay-XRD بر روی دو نمونه P1 و P2 پس از جدایش کانی‌های رسی از سنگ‌های تخریبی، کربناته، سولفاته و حذف مواد آلی خالص‌سازی صورت گرفت و پس از اشباع‌شدگی آن‌ها، اثر دادن گلیکول و تیمار دما در هر دو نمونه کانی‌های رسی کلریت و ایلیت – میکا با توجه به یکسان بودن طیف میکا و ایلیت تشخیص داده شد (شکل۷).

۴ ـ ۴ ـ تعیین درصد گچ و کربنات خاک

برای تعیین گچ در نمونه‌های سطحی از دو معیار روش عصاره‌گیری متوالی با آب (کدورت سنجی) و روش تجربی (روابط ۱ و ۲) استفاده گردید. همچنین ازآنجاکه کربنات کلسیم یکی از مهم‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده رسوبات و خاک است، لذا از دستگاه کلسیمتر برنارد که واکنش اسید و کربنات را در یک محیط بسته انجام می‌دهد به‌منظور تعیین درصد کربنات نمونه‌ها استفاده گردید. نتایج پس از سه بار انجام و میانگین‌گیری در جدول ۵ قابل‌مشاهده است. با توجه به آزمایش‌هایی صورت گرفته مقدار گچ تنها در ۲ نمونه P2 و P3 بالاتر از ۵ درصد بوده و مقدار کربنات نمونه‌ها نیز به صورت یکنواخت بین ۲۸-۲۶ درصد بود.

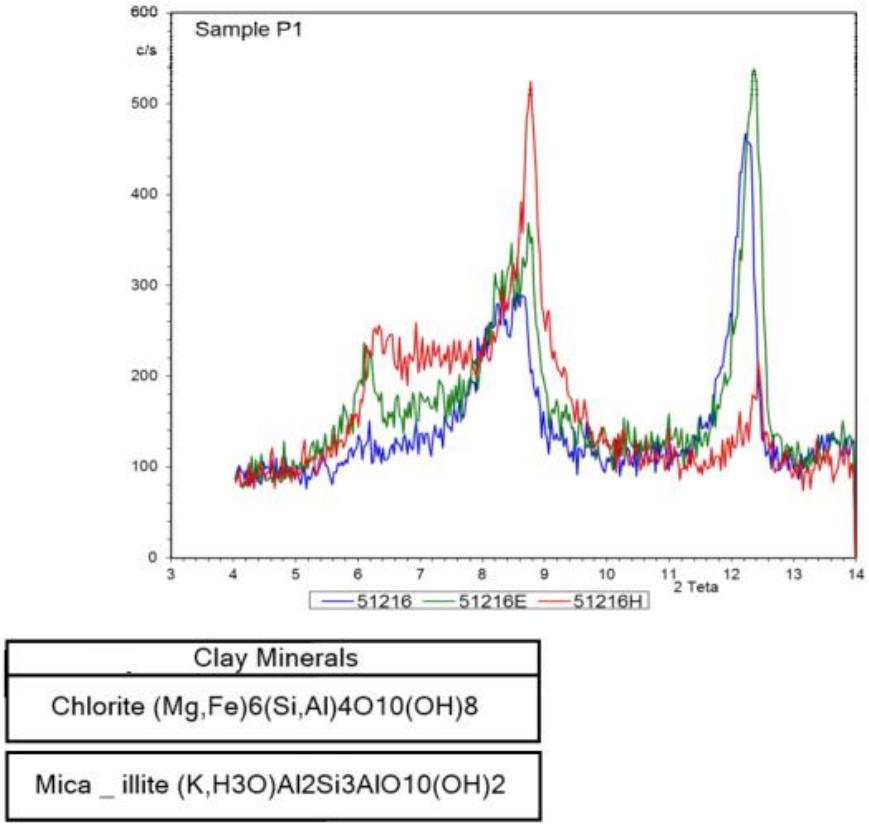
۴ ـ ۵ ـ بررسی میکرومورفولوژی خاک

با توجه به گزارش مقدار گچ پایین در نمونه‌ها و پوکی بالای نمونه‌ها که حتی در کلوخه‌های دستی نیز به‌وضوح قابل‌مشاهده بود (شکل ۸) جهت مطالعات دقیق‌تر میکرومورفولوژی خاک از نمونه‌ها مقاطع نازک تهیه گردید.

بدین منظور، بعد از برداشت کلوخه‌های دست‌نخورده از افق‌های خاک، توسط رزین پتروپاکسی اشباع‌شده و بعد از خشک شدن، برش داده‌شده و تا حد ۳۰ میکرون ساییده شدند. مقاطع به‌دست‌آمده توسط میکروسکوپ پلاریزان با استفاده از دو نور ساده (PPL) و متقاطع (XPL) در بزرگنمایی‌های (10X) و متقاطع (40X) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

به علت نزدیکی محل برداشت نمونه‌ها به همدیگر و عدم تکامل زیاد خاک‌ها محدوده مورد مطالعه مشخصات میکرومورفولوژیکی نمونه‌ها تقریباً مشابه همدیگر بود. در نمونه‌ها مقادیر زیادی از کانی‌های اولیه‌ای نظیر کلسیت، کوارتز و فلدسپار با زمینه گل کربناته دیده شد (شکل ۹). از دیگر پدیده‌های شکل‌گرفته در خاک‌ها پرشدگی خلل‌وفرج به‌صورت متراکم و گاهی غیر متراکم از گچ ثانویه می‌باشد. خلل‌وفرج خاک بیشتر در بین خاکدانه‌ها بر اساس اطلس میکرومورفولوژی خاک (Verrecchia and Trombino, 2021) به‌صورت واگی (Vuggy) نامنظم و غیر کشیده می‌باشند. همچنین فراوان‌ترین شکل کریستال‌های گچ، فرم عدسی شکل گوشه‌دار بود که به‌احتمال زیاد به دلیل حضور آهک (جدول ۵) در افق‌های خاک می‌باشد (Buck and Van Hoesen, 2002). درواقع به نظر می‌رسد که افزایش گچ به خاک منجر به تشکیل بلورهای دانه‌ای و عدسی گچ به‌موازات سطح خاک شده، درحالی‌که افزایش آهک با کاهش تبلور گچ به شکل‌های عدسی شده و ریزبلورین را با آرایش تصادفی به وجود می‌آورد (Jafarzadeh and Burnham, 1992). درمجموع بررسی نمونه‌ها حاکی از آن بود که خاک در چندین مرحله رسوب‌گذاری و آب‌شویی درگذشته

تشکیل‌شده است. چنانچه تبلور خوبی از بلورهای نسبتاً ضخیم گچ در نواحی با فرسایش پایین همچون نمونه P2 به‌صورت شکل پرشدگی رسوب دیده شد درصورتی‌که در نواحی با پوکی بالا مانند نمونه‌های P3 و P1، رواناب یا حضور آب زیرزمینی به‌عنوان یک سیستم هیدرولوژی منجر به شستشو خاک و انتقال رسوبات و تشکیل حفرات نامنظم شده است. بنابراین به نظر می‌رسد در طی دوره‌های خشک، تجمع مواد گچی در خاک پدیده غالب بوده و در دوره‌های مرطوب ناشی از رواناب سطحی یا کیفیت و نوسانات آب زیرزمینی، آب‌شویی املاح و آهک به‌صورت پدیده غالب ظاهر می‌گردد. یافته‌های این پژوهش در خصوص تاثیر آب بر میکرومورفولوژی خاک گچی با نتایج Honarjo و Jalalian (۲۰۰۸) و Hashemi و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد.



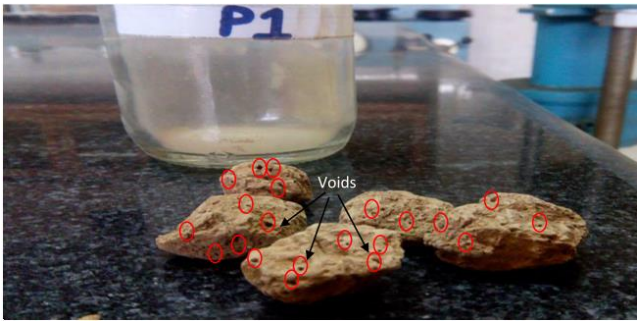
شکل ۷- آنالیز کانی‌شناسی رسی، نمونه P_1

Fig. 7. Analysis of clay mineralogy, sample P_1

جدول ۵- درصد گچ و کربنات نمونه‌ها

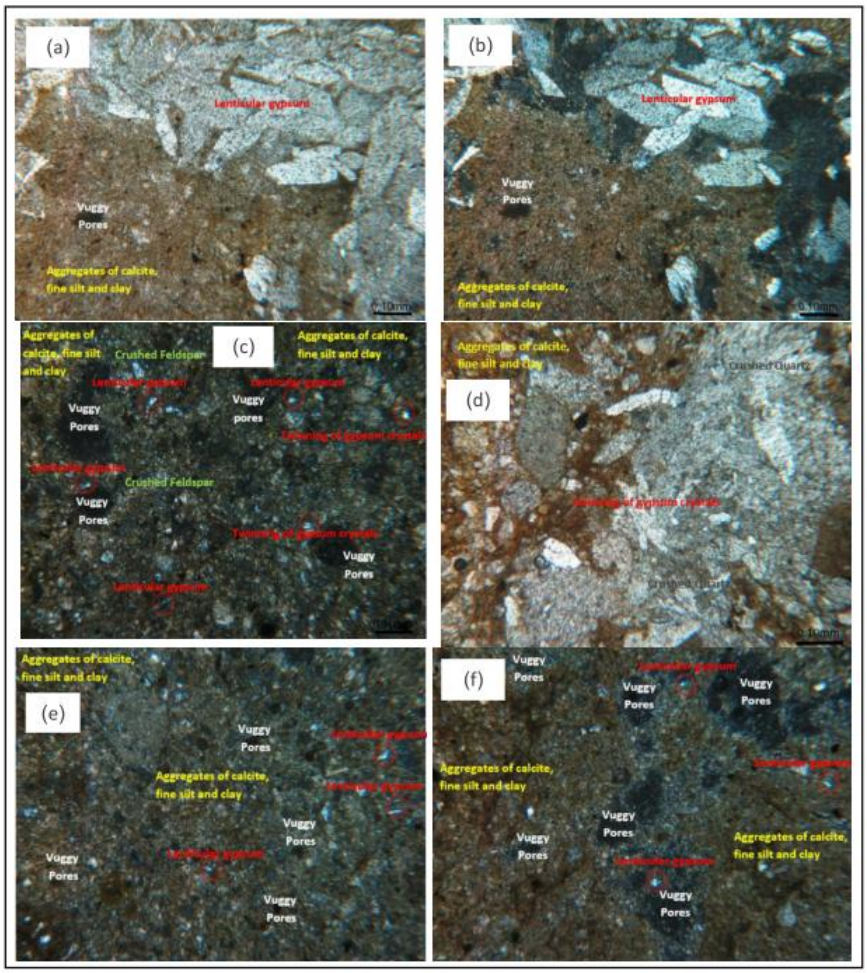
Table 5. The percentage that contains both gypsum and carbonate in the samples

Gypsum per Hundred Grams of Soil	Gypsum Percent Al-Mufty and Nashat (2000)	Carbonate Percentage%	Location
2.03	3.38	28.81	P_1
16.49	22.26	26.85	P_2
5.42	6.72	27.4	P_3
2.52	4.34	27.41	P_4
2.16	3.38	27.26	P_5
0.64	2.65	27.08	P_6



شکل ۸- وجود حفرات و منافذ در نمونه P_1

Fig. 8. Presence of voids and pores, sample P_1



شکل ۹- میکرومورفولوژی نمونه‌های خاک در محدوده مورد مطالعه. (a) حضور تجمعی از بلورهای عدسی شکل ژیپس نمونه (PPL) P2، (b) حضور تجمعی از بلورهای عدسی شکل ژیپس نمونه (XPL) P2، (c) حضور بلورهای عدسی شکل، دوقلو و هم‌رشد ژیپس به همراه بلورهای ژیپس و فلدسپار خورد شده در اطراف حفرات واگی و نامنظم، نمونه (XPL) P1، (d) حضور بلورهای عدسی شکل ژیپس به همراه بلورهای کوارتز خورد شده، نمونه (PPL) P6، (e) حضور بلورهای عدسی کوچک ژیپس در زمینه گل کربناته و حفرات واگی شکل (XPL) P5 و (f) حضور بلورهای گچ کوچک و از بین رفته در کنار حفرات بزرگ واگی و نامنظم (XPL) P3

Fig. 9. Micromorphology of Soil Samples in the Study Area (a) Cumulative presence of lenticular gypsum crystals, sample P2 (PPL), (b) Cumulative presence of lenticular gypsum crystals, sample P2 (XPL), (c) Presence of lenticular, twinned and co-grown gypsum crystals along with crushed gypsum and feldspar crystals around irregular and vagal cavities, sample (XPL) P1, (d) Presence of lenticular gypsum crystals along with crushed quartz crystals, sample P6 (PPL), (e) Presence of small lenticular gypsum crystals in the carbonate mud background and vuggy-shaped cavities P5 (XPL), and (f) Presence of small and destroyed gypsum crystals next to large vuggy - shaped and irregular cavities P3 (XPL)

۴ ـ ۶ ـ ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی منطقه

نفوذ آب، نوسانات سطح آب (عمل موییننگی) و رواناب همگی روش‌هایی برای حذف املاح محلول مانند گچ از قسمت خاک تحت فرایند آب‌شویی هستند (Hassan and Albusoda, 2022). با از دست رفت رفتن اتصال و سیمان بین ذرات خاک تحت رخدادهای بارندگی یا پدیده نفوذ در خاک عمل فروریزش اتفاق می‌افتد (Burciaga, 2020). در واقع در حالی که آب نفوذ می‌کند، انحلال گچ حفره‌های کوچکی را در ماتریکس خاک ایجاد می‌کند. ازاین‌رو، یکپارچگی ساختاری را در سطح ریزساختارها تضعیف می‌کند. تغییرات کرنش ناشی از این فرایند بسیار سریع است (Al-Riahi et al., 2024) چون انحلال‌پذیری ژیپس در آب مقطر ۲/۴ gr/lit می‌باشد درحالی‌که انحلال‌پذیری کلسیت و دولومیت کمتر از ۰/۱ gr/lit است (Al-Saoudi et al., 2013)، و پتانسیل فروریزش خاک گچی از ۱٪ پس از نیم ساعت خیساندن، به حدود ۸٪ پس از دو هفته خیساندن می‌رسد (Mahmood et al., 2020). بنابراین در ارتباط انحلال گچ می‌توان به‌جای مقیاس زمان زمین‌شناسی، از مقیاس زمانی انسانی نام برد (Gutierrez et al., 2008a; Gutierrez et al., 2008b). در این پژوهش برای تعیین حضور آب در منطقه و توجیه فرایند آب‌شویی طبیعی صورت گرفته و نسبت پوکی بالای خاک به بررسی وضعیت آب زیرزمینی منطقه به عنوان تنها شاهد قابل‌اندازه‌گیری حضور آب در منطقه پرداخته و ارتباط آن‌ها با موقعیت چاهک‌های محل انجام آزمایش PLT در منطقه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در بالغبر ۶۳ گمانه ۴۰-۲۰ متر که در جهت آزمایش SPT در منطقه حفرشده بودند سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری گردید و نقشه تراز سطح آب زیرزمینی ((Under Ground Water Level Contour, (UGWLC) (شکل 10-a) و جهت جریان آب زیرزمینی ((Under Ground Water Flow Direction, (UGWFD) (شکل 10-b) در منطقه ترسیم گردید. همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل‌مشاهده است میانگین سطح آب زیرزمینی در زمان اندازه‌گیری در منطقه در حدود ۱۰-۹ متر بود. بنابراین علاوه بر حضور فعال و پررنگ آب در منطقه، سطح آب زیرزمینی بالا می باشد با ترسیم ۴ پروفیل (A,B,C,D) تغییرات سطح آب زیرزمینی در زیر سطح چاهک‌های مورد آزمایش PLT مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاکی از آن بود که در سطح آب زیرزمینی در زیر چاهک‌های PLT1 تا PLT6 به ترتیب در عمق‌های ۱۰، ۷، ۱۰/۵، ۱۲، ۱۰/۵ و ۱۱/۵ متر می باشد و همچنین اکثر موقعیت‌های چاهک مورد آزمایش به خصوص PLT2 در مسیر جهت جریان آب زیرزمینی می‌باشد.

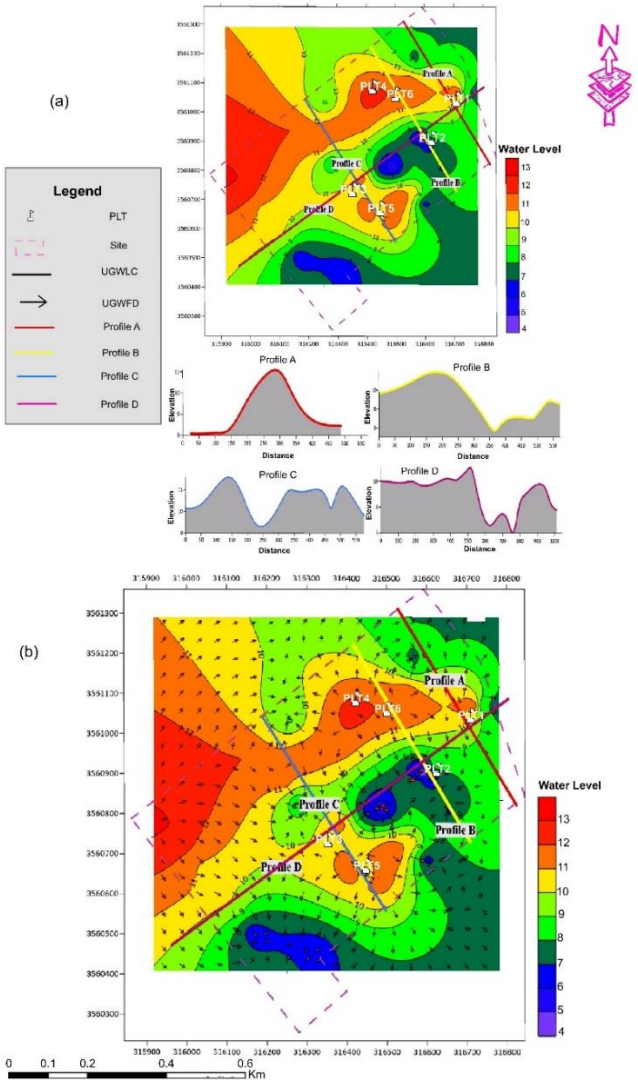
۴ ـ ۷ ـ بررسی هم‌خوانی نتایج نشست نهایی آزمایش PLT با داده‌های آزمایشگاهی

با کنار هم گذاشتن نتایج نشست نهایی آزمایش برجا PLT و داده های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک، می‌توان گفت لایه‌های سطحی خاک سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه در ابتدای تشکیل خاک دارای مقدار بالایی از املاح و کانی‌های تبخیری همچون ژیپس و انیدریت بوده‌اند. لیکن به دلیل انحلال‌پذیری بالای ژیپس و کانی‌های تبخیری در طول زمان، با توجه به وجود آب در منطقه، نتایج میکرومورفولوژی خاک و درصد پوکی بالای نمونه‌ها، دچار آب‌شویی طی زمان انسانی شده‌اند. و ذرات گچ از داخل خاک شسته شده و قسمتی از جرم خاک طی این فرایند از دست رفت است. با شدت گرفتن آب‌شویی طبیعی خاک به دلیل تضعیف پیوندهای سیمانی و شکسته شدن زنجیره‌های پیوندهای بین مولکولی خاک یک نوع بافت متخلخل با فضای خالی بالا در اسکلت خاک همچون غار، شکل یافته و شکاف بین ذرات افزایش‌یافته است. که این پدیده منجر به تغییر حجم عظیم، فروپاشی و فرونشست در هنگام مرطوب و اشباع شدن خاک شده‌است. که این نتیجه با پژوهش‌های Hassan و Al Busoda (۲۰۲۲) و Al-Riahi و همکاران (۲۰۲۴) در شرایط آزمایشگاه همخوانی دارد.

به نظر می‌رسد فرایند انحلال گچ و شسته‌شدن آن از نمونه خاک، نقطه پایانی مشخصی ندارد (Karkush et al., 2008) و هیچ‌گاه حتی تحت گرادیان های بسیار کوچک نیز متوقف نمی‌شود (Terleskaya and matonidze, 1988). ولی در خاک‌های بیش تحکیم یافته گچی (OCR>1) نسبت پوکی با انحلال گچ افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت برسد و بعدازآن کرنش ناشی از آب‌شویی با انحلال گچ افزایش پیدا می‌کند (Al-Badran et al., 2018). در واقع می‌توان گفت با شدت گرفتن آب‌شویی و از دست رفت مواد انحلال‌پذیر، خاک گچی به سمت رمبندگی می‌رود که دو برابر شدن نشست نهایی نمونه PLT1 در شرایط اشباع نسبت به شرایط خشک در منطقه و همچنین نشست نهایی بین ۹-۷ سانتی‌متر نمونه‌های P3 تا P5 حاکی از

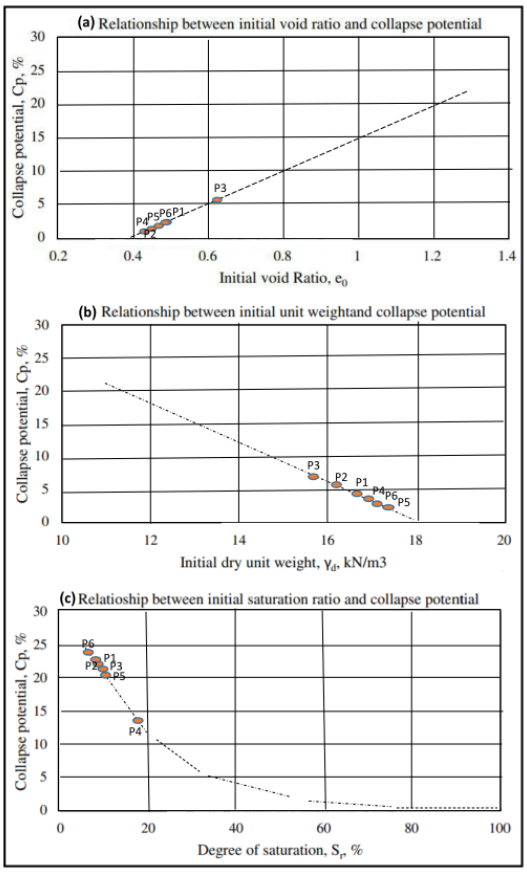
این ماجرا است. همچنین تخلخل اولیه بالای ۴۰ درصد (یا نسبت پوکی اولیه بالاتر از ۶۶ درصد) به عنوان تخلخل بحرانی فروریزش خاک در نظر گرفته می‌شود (Feda, 1966) که با توجه به جداول ۱ و ۳ نمونه P3 که بالاترین نشست نهایی در شرایط اشباع را داشته نزدیک‌ترین مقدار نسبت پوکی را به نسبت پوکی بحرانی داشته است.

با ارزیابی معیارهای تشخیص خاصیت فروریزشی در خاک‌ها با استفاده از پارامترهای وزنی حجمی می‌توان گفت تمامی نمونه‌ها رمبنده با نشست کم می‌باشند. همچنین با توجه به نمودارهای برازش و همبستگی مقادیر نسبت پوکی اولیه، وزن واحد حجم خشک اولیه و درجه اشباع اولیه با پتانسیل فروریزش (حاصل نتایج تحکیم مضاعف ۳۳۹ نمونه) به‌دست‌آمده از پژوهش و مدل‌سازی Ashour و همکاران (۲۰۲) با توجه به شکل ۱۱، می‌توان گفت پتانسیل فروریزش برای نمونه‌ها براساس نسبت پوکی اولیه و وزن واحد حجم خشک اولیه بین ۲-۷ درصد (فروریزش متوسط تا شدیداً متوسط) می‌باشد. که نمونه P3 با بالاترین مقدار نشست نهایی در آزمایش PLT در شرایط اشباع، بیشترین پتانسیل فروریزش را دارا می‌باشد و براساس درجه اشباع اولیه نیز پتانسیل فروریزش نمونه‌ها بین ۱۰-۲۵ درصد (فروریزش شدید) به دلیل دارا بودن اشباع جزئی اولیه به عنوان پیش‌نیاز رمبندگی می‌باشد.



شکل ۱۰- وضعیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه. (a) نقشه تراز سطح آب زیرزمینی، و (b) نقشه جهت جریان آب زیرزمینی

Fig. 10. Status of groundwater in the study area (a) Groundwater level map, and (b) Map of the direction of groundwater flow



شکل ۱۱- ارزیابی پتانسیل فروریزش نمونه‌ها براساس نمودارهای برازش Ashour و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس (a) نسبت پوکی اولیه، (b) وزن واحد حجم خشک اولیه و (c) درجه اشباع اولیه

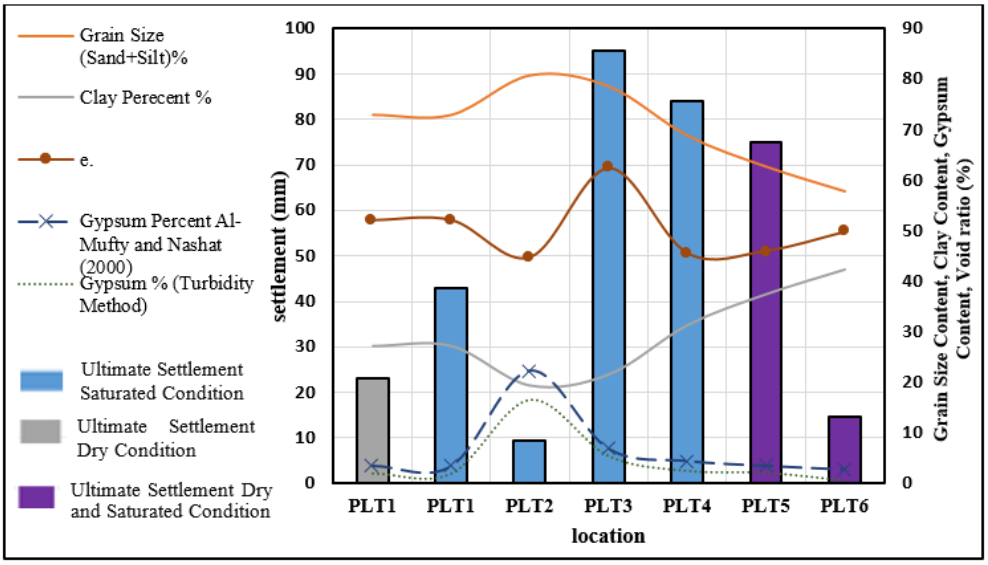
Fig. 11. Assessment of the collapse potential of samples based on the fitting criteria Ashour et al. (2020), based on (a) initial void ratio, (b) initial dry unit weight, and (c) initial degree of saturation

۴ ـ ۸ ـ بررسی عوامل موثر بر نشست‌پذیری و فروریزش خاک‌های گچی

درنهایت با کنار هم گذاشتن نتایج نشست نهایی حاصل آزمایش برجا PLT و داده‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها می‌توان عوامل موثر بر نشست‌پذیری و فروریزش خاک‌های گچی در منطقه را مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار دارد.

۴ ـ ۸ ـ۱ ـ بافت خاک

با توجه به جداول ۱،۲،۳،۵ و بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با بافت خاک همراه با نسبت پوکی اولیه و محتوای گچ نمونه‌ها (شکل ۱۲)، می‌توان دریافت در خاک‌های با محتوای گچ پایین به دلیل شدت آب‌شویی اتفاق افتاده و از دست رفت مواد انحلال‌پذیر خاک، رفتار خاک مشابه حالت رمبندگی می‌باشد. به‌نحوی‌که بیشترین مقدار نشست و فروریزش در نمونه‌های P_3 و P_4 با محتوای بالاتر ذرات درشت‌دانه (ماسه و سیلت) به ترتیب ۷۸/۵ و ۶۸/۷ درصد و با طبقه‌بندی بافتی ML اتفاق افتاده است و نمونه P_6 به دلیل دارا بودن محتوای ذرات ریزدانه بالا (۴۲/۳۵ درصد) حتی با اشباع خاک، نشست کمتری را گزارش می‌کند. چراکه ذرات ماسه و سیلت چسبندگی پایین‌تری در مقایسه با ذرات رسی داشته و در این نوع خاک‌ها ذرات توسط پیوندهای رسی یا سیلتی به یکدیگر چسبیده‌اند و ساختمان متخلخلی شکل‌گرفته است و با اشباع خاک، دانه‌های ماسه و سیلت در اثر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می‌لغزند و در فضای خالی بین دانه‌ای (با توجه به نسبت پوکی بالای این نوع خاک‌ها) فرو می‌ریزند و درنتیجه خاک کاهش حجم پیدا می‌کند. این نتیجه با پژوهش Petrukhin (۱۹۹۳) در خصوص نقش بافت خاک و آب‌شویی در رمبندگی خاک‌های گچی پس از اشباع شدن و پژوهش‌های Barden و همکاران (۱۹۶۹) و Dudley (۱۹۷۰) در خصوص خاک‌های فروریزشی همخوانی دارد.



شکل ۱۲- بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با بافت خاک همراه با نسبت پوکی اولیه و محتوای گچ نمونه‌ها

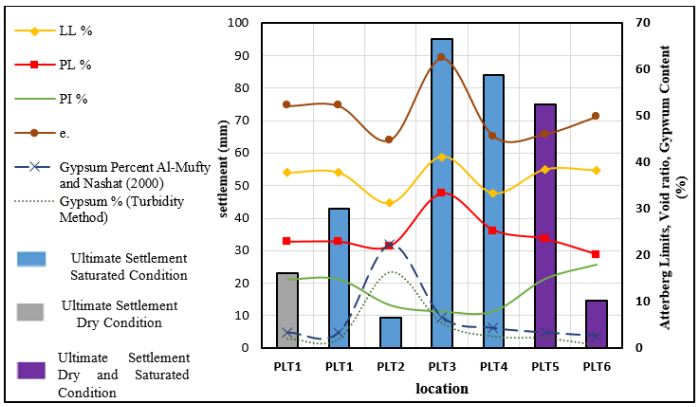
Fig. 12. Examining the correlation between the ultimate settlement values measured in dry and saturated conditions through the PLT test and the soil class, initial void ratio, and gypsum content of the samples

۴ ـ ۸ ـ ۲ ـ حدود اتربرگ

با توجه به جداول ۱،۲،۳،۵ و بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با حدود اتربرگ خاک همراه با نسبت پوکی اولیه و محتوای گچ نمونه‌ها (شکل ۱۳)، می‌توان دریافت حدود روانی و خمیری خاک و همچنین نشانه خمیری خاک بر روی مقدار فروریزش خاک‌های گچی تاثیر گذار هستند. زیرا حد روانی نشان‌دهنده مقدار رطوبتی است که خاک حالت مایع به خود می‌گیرد و در این حالت خاک مستعد تغییرشکل و کاهش حجم است. به نحوی که در نمونه P3 با بالاترین مقدار حدود روانی و خمیری (به ترتیب ۴۱/۳ و ۳۳/۳ درصد)، بیشترین مقدار فروریزش خاک در شرایط اشباع اتفاق افتاده است که این نتیجه با پژوهش Dudley (۱۹۷۰) همخوانی دارد. همچنین نتایج حاکی از نقش محتوای گچ بر روی حدود اتربرگ بود به‌نحوی‌که، در نمونه P2 با مقدار گچ حدود ۱۹ درصد (میانگین محتوای گچ روش کدورت سنجی و تجربی)، حدود روانی و خمیری خاک، به دلیل تبادل یونی و افزایش فولکوله شدن کانی‌های رسی و تشکیل کلسیم سیلیکا هیدرات و ترکیبات کلسیم آلومینات هیدرات کاهش می‌یابد که این نتیجه با پژوهش‌های Afsharian و همکاران (۲۰۱۷)، Jha و Sivapullaiah (۲۰۱۴)، Kargar و همکاران (۲۰۱۱)، Al-Gabri و همکاران (۲۰۰۳) و Petrokhin (۱۹۹۳) همخوانی دارد.

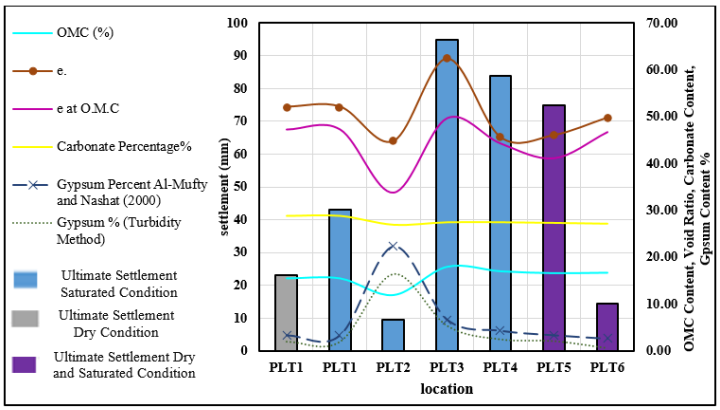
۴ ـ ۸ ـ ۳ ـ نسبت پوکی

با توجه به جداول ۱،۲،۳،۵ و بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با نسبت پوکی اولیه و در رطوبت بهینه (ناشی از خروج هوا)، محتوای گچ نمونه‌ها (شکل‌های ۱۲ و ۱۴) می‌توان دریافت حضور گچ در خاک بر روی نسبت پوکی خاک تأثیرگذار است. به‌نحوی‌که در محتوای گچ بالا، همچون نمونه P2 به دلیل عدم آب‌شویی و انحلال، نسبت پوکی اولیه و نسبت پوکی در رطوبت بهینه (ناشی از خروج هوا) به ترتیب ۴۴/۸۰ و ۳۳/۷۰ درصد می‌باشد و درنتیجه مقدار نشست نهایی خاک حتی در شرایط اشباع، کم (۹/۴ میلیمتر) می‌باشد. در سایر نمونه‌ها به دلیل انحلال و آب‌شویی گچ، خاک پوک‌تر شده و نسبت پوکی اولیه و مقدار فروریزش خاک افزایش پیدا می‌کند چنانچه نمونه P3 به دلیل دارا بودن نسبت پوکی بالا (۶۲/۴۴ درصد) بیشترین مقدار نشست را در شرایط اشباع (۹۵ میلیمتر) دارد که این نتیجه با پژوهش‌های Al-Riahi و همکاران (۲۰۲۴)، Hassan و Al Busoda (۲۰۲۲) و Fattah و Dawood (۲۰۲۰) در شرایط آزمایشگاهی و مصنوعی همخوانی دارد.



شکل ۱۳- بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با حدود اتربرگ خاک همراه با نسبت پوکی اولیه و محتوای گچ نمونه‌ها

Fig. 13. Examining the correlation between the ultimate settlement values measured in dry and saturated conditions through the PLT test and the Atterberg limits of the soil, as well as the initial void ratio and gypsum content of the samples



شکل ۱۴- بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با نسبت پوکی اولیه و نسبت پوکی در رطوبت بهینه تراکم، درصد کربنات، محتوای گچ نمونه‌ها

Fig. 14. Correlation analysis of the ultimate settlement values from PLT tests under dry and saturated conditions with initial void ratio, void ratio at optimal moisture content, carbonate percentage, and gypsum content of the samples.

۴ ـ ۸ ـ ۴ ـ محتوای گچ

با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت ارزیابی محتوای گچ نمونه در دو روش کدورت سنجی (Hassani, 2013) و روش تجربی (Al-Mufty and Nashat, 2000) همخوانی خوبی از خود نشان می‌دهند و همچنین با توجه به جداول ۱,۲,۳,۵ گچ تا زمان خشک بودن محیط همچون سیمان در خاک عمل می‌کند. خاک در این شرایط مقدار نشستی همچون سایر خاک‌ها از خود نشان می‌دهد اما با حضور گچ خاک وارد چرخه آب‌شویی شده به نحوی که در نمونه P1 در شرایط اشباع (۴۳ میلیمتر) نشست خاک نسبت به شرایط خشک (۲۳ میلیمتر)، تقریباً دو برابر می‌شود و با ادامه فرایند آب‌شویی، محتوای گچ و سایر مواد انحلال‌پذیر خاک شسته شده و با افزایش نسبت پوکی، خاک به سمت رمبندگی می‌رود. چنانچه در نمونه P2 با محتوای گچ بالا (حدود ۱۹ درصد)، شدت آب‌شویی و درنتیجه نسبت پوکی (۴۴/۸ درصد) و مقدار فروریزش خاک کم بوده و در نمونه P3 این حالت برعکس است. در واقع انتظار می‌رود با افزایش شدت آب‌شویی و حذف مواد انحلال‌پذیر خاک، نمونه P2 نیز به سرانجام نمونه P3 دچار گردد که این نتیجه با پژوهش‌های Fattah و همکاران (۲۰۲۵)، Fattah و Dawood (۲۰۲۰)، Afsharian و همکاران (۲۰۱۷) و Day (۲۰۰۵) همخوانی دارد.

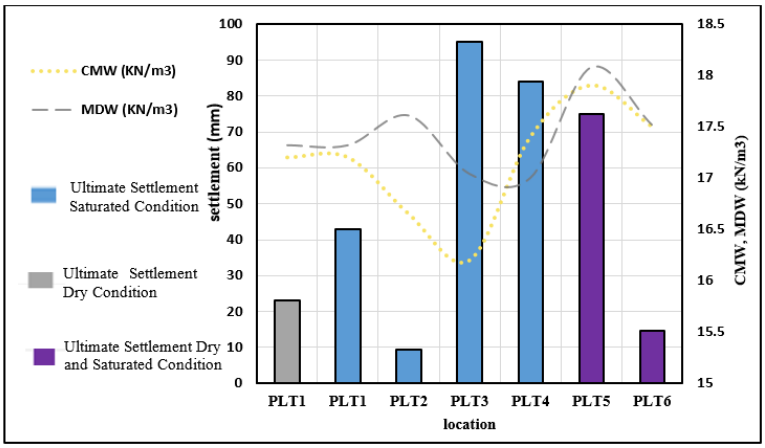
۴ ـ ۸ ـ ۵ ـ محتوای کربنات

حضور کربنات در خاک به دلیل انجام واکنش تبادلی کوتاه‌مدت و افزایش جاذبه بین ذرات رس و فولکوله شدن خاک و همچنین

انجام واکنش‌های پوزولانی بلند مدت و پیدایش عناصر پایداری همچون سیلیکات‌های کلسیم و آلومینت های کلسیم باعث بهبود خصوصیات مهندسی خاک می‌گردد. بنابراین تغییرات آن مهم می‌باشد ولی با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۴، درصد کربنات نمونه‌ها یکنواخت (۲۸-۲۶ درصد) می‌باشد و نمی‌توان ارزیابی دقیقی در این خصوص انجام داد.

۴ ـ ۸ ـ ۶ ـ تراکم خاک

با توجه به اینکه چگالی ذرات جامد برای اغلب خاک‌ها بین ۲/۶۵ تا ۲/۸۰ واحد تغییر می‌کند، افزایش ذرات گچ با چگالی ۲/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک باعث می‌شود که چگالی ذرات خاک کاهش یابد ولی حضور گچ به دلیل آب‌شویی و انحلال در خاک ثابت نیست. بنابراین در ارتباط با تراکم خاک‌های گچی و تغییرات حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک و رطوبت بهینه (تراکم لایه‌های گچی) نظریه‌ها متفاوت است. چنانچه برخی از پژوهشگران گزارش کردند با افزایش محتوای گچ، حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک افزایش (AL-Heeti, 1990; Al-Gabri, 2003; Najah et al., 2013) و برخی دیگر گزارش کردند که کاهش (Subhi, 1987; Al-shalhomi, 2000; Al-hadithy, 2001; Al-Numani, 2010; Kargar et al., 2011; Al-Daood et al., 2014) می‌یابد و برخی دیگر نیز گزارش کردند که متغیر می‌باشد (Al-Kattab, 1986; Dilaimy, 1989). این وضعیت در ارتباط با رطوبت بهینه نیز به همین صورت می‌باشد چنانچه برخی از پژوهشگران گزارش کردند با افزایش محتوای گچ رطوبت بهینه کاهش (AL-Layla and Al-Obaydi, 1993; AL-Gabri, 2003)، و برخی دیگر گزارش کردند که افزایش می‌یابد (Kalf Subhi, 1987; Kargar et al., Shoshtari et al., 2017 (2011; Al-Daood et al., 2014; و برخی دیگر نیز گزارش کردند تغییرات رطوبت بهینه متغیر می‌باشد (Al-shalhomi, 2000; Al-hadithy, 2001; Al-Numani, 2010). این موضوع از آنجا حائز اهمیت می‌باشد که نمونه P2 با محتوای گچ بالای ۲۰ درصد، تحت فرایند آب‌شویی طبیعی کمتری قرارگرفته که با بالا بودن حداکثر وزن واحد حجم خشک (MDW) آن نمونه و همچنین مقدار پوکی پایین آن (شکل‌های ۱۵و ۱۴) می‌توان دریافت وضعیت خاک در آن موقعیت متراکم بوده، چون هر چه تراکم خاک بیشتر باشد، به دلیل کاهش فضاهای بینابینی بین ذرات خاک، نفوذپذیری کمتری دارد و این به نوبه خود باعث کاهش شسته شدن از طریق کاهش نفوذ آب می‌شود و در نتیجه کاهش تخلخل و پوکی خاک می‌شود. که این نتیجه با پژوهش Al-Riahi و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد و این یافته می‌تواند یکی از چالش‌های مربوط به حفظ پایداری زمین و کاهش نشست در مناطقی با خاک‌های دارای محتوای گچ بالا را برطرف کند. همچنین با توجه به شکل ۱۴ می‌توان گفت محتوای رطوبت بهینه نمونه‌ها به دلیل آب‌شویی گچ تقریباً روند یکنواختی داشته است و تنها در نمونه P2 با محتوای گچ حدود ۱۹ درصد، محتوای رطوبت بهینه و مقدار نشست نهایی در شرایط اشباع پایین (۹/۴ میلیمتر) می‌باشد.



شکل ۱۵- بررسی ارتباط مقادیر نشست نهایی حاصل از آزمایش PLT در شرایط خشک و اشباع با وزن واحد حجم طبیعی و حداکثر وزن واحد حجم خشک نمونه‌ها

Fig. 15. Examining the correlation between ultimate settlement values from PLT tests conducted in dry and saturated conditions and the natural and maximum dry unit weights of the samples.

۴ ـ ۸ ـ ۷ ـ حضور آب در منطقه

اگرچه شدت نفوذ آب در خاک‌های گچی به شدت سریع بوده، چنانچه سرعت آبگذری، بر حسب بافت خاک و نوع و اندازه‌های گچ حداقل ۰/۱۵ تا ۸ متر در روز گزارش‌شده است (Kargar et al., 2011). ولی این پژوهش نشان داد که بررسی سطح آب زیرزمینی و یا نفوذپذیری در فرایند آب‌شویی به‌تنهایی کفایت نمی‌کند. چنانچه در محل نمونه P2 سطح آب زیرزمینی بالاتر از سایر نمونه‌ها در عمق ۷ متری بود و بنابراین انتظار می‌رفت به دلیل پدیده نفوذ، تحت تاثیر آب‌شویی طبیعی بیشتری قرارگرفته باشد ولی محتوای گچ نمونه از سایر نمونه‌ها بالاتر بود که با ترسیم نقشه جهت جریان آب زیرزمینی (شکل ۱۰) مشخص گردید سطح آب به دلیل تجمع جهت جریان آب زیرزمینی بالا بوده و نه به خاطر فرایند نفوذ آب، چون که مقدار نسبت پوکی نمونه نیز از سایر نمونه‌ها پایین‌تر می‌باشد و بنابراین مقدار آب‌شویی کمتری رخداده است ولی با توجه به تجمع جهت جریان آب زیرزمینی در آن موقعیت می‌توان انتظار کارست‌های گچی را در زیر لایه های سطحی داشت.

۴ ـ ۸ ـ ۸ ـ درجه اشباع اولیه

با توجه به جدول ۳ و شکل 11-C درجه اشباع اولیه خاک رابطه معکوسی با پتانسیل فروریزش دارد. هرچه خاک در ابتدا همچون نمونه P6 خشک‌تر و کم‌تر اشباع باشد، احتمال و شدت فروریزش آن به دلیل نقش کشش مویینگی در خاک های غیر اشباع و کاهش آن هنگام اشباع شدن، بیشتراست. همچنین خاک‌هایی که دارای درجه اشباع اولیه بیشتری هستند، همچون نمونه P4 با درجه اشباع اولیه ۱۸ درصد، کمتر دچار فروریزش می‌شوند که این نتیجه با پژوهش Fattah و Dawood (۲۰۲۰) و Khodabandeh و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد.

۵- نتایج

خاک‌های گچی پیچیده‌ترین گروه خاک‌های مسئله‌دار می‌باشند که رفتار مشخصی به دلایل انحلال‌پذیری و آب‌شویی آن‌ها، گستردگی عوامل مرتبط با آب‌شویی و اندرکنش آن‌ها با همدیگر و نبود دستورالعمل‌های مشخص در مورد نحوه مطالعه و بررسی رفتار مهندسی آن‌ها، وجود ندارد و مطالعات صورت گرفته در این زمینه بر روی خاک مصنوعی و شرایط دست‌خورده آزمایشگاهی تحت شرایط کنترل‌شده مشخص صورت گرفته است بنابراین ارزیابی رفتار واقعی این خاک‌ها با توجه به گسترش وسیع آن‌ها در کشور و پیچیدگی‌های رفتاری آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، به جهت پیش‌گیری از دست‌خوردگی، انحلال‌پذیری و آب‌شویی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاه و ارزیابی مقدار نشست نهایی این نوع خاک‌ها به خصوص در شرایط اشباع، در زمان اجرای پروژه‌های سنگین مهندسی همچون پتروشیمی از آزمایش برجای PLT استفاده گردید که نتایج حاکی از نشست دو برابری نمونه‌ها در زمان اشباع شدن نسبت به حالت خشک و نشست نهایی بین ۹-۷ سانتی متر در شرایط اشباع نمونه‌ها بود.

با کنار هم گذاشتن نتایج نشست نهایی آزمایش برجای PLT و داده های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک خاک، مشخص گردید لایه‌های سطحی خاک سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه در ابتدای تشکیل خاک دارای مقدار بالایی از املاح و کانی‌های تبخیری همچون ژیپس و انیدریت بوده‌اند. ولی به دلیل انحلال‌پذیری بالای ژیپس و کانی‌های تبخیری در طول زمان، با توجه به وجود آب در منطقه، نتایج میکرومورفولوژی خاک و درصد پوکی بالای نمونه‌ها، دچار آب‌شویی طی زمان انسانی شده و ذرات گچ از داخل خاک شسته‌شده و قسمتی از جرم خاک طی این فرایند از دست رفته است. با شدت گرفتن آب‌شویی طبیعی خاک به دلیل تضعیف پیوندهای سیمانی و شکسته شدن زنجیره‌های پیوندهای بین مولکولی خاک یک نوع بافت متخلخل با فضای خالی بالا در اسکلت خاک همچون غار، شکل یافته و شکاف بین ذرات افزایش‌یافته که این پدیده نقطه پایان مشخصی ندارد. در واقع انتظار می‌رود با گذشت زمان افزایش پیداکرده و رفتار خاک وابسته به بافت خاک، نسبت پوکی، حدود اتربرگ، محتوای گچ، محتوای کربنات، تراکم خاک، حضور آب و درجه اشباع اولیه از انحلال‌پذیری به سمت رمبندگی سوق داده‌شده و منجر به تغییر حجم عظیم، فروپاشی و فرونشست در هنگام مرطوب و اشباع شدن خاک گردد. با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان گفت مستعدترین خاک نسبت به فروریزش و نشست پذیری در منطقه خاک سیلت گچ‌دار با محتوای ذرات درشت دانه (سیلت و ماسه) ۷۸ درصد و درجه اشباع اولیه و حد روانی به ترتیب ۱۳ و ۴۱ درصد بوده که تحت تاثیر فرایند آب‌شویی طبیعی (فرایند نفوذ یا تغییرات سطح آب زیرزمینی) قرارگرفته و میزان نسبت پوکی اولیه آن بالاتر از ۶۰ درصد شده است. همچنین در زمان مواجهه با لایه‌های گچی ضروری است علاوه بر نقشه‌های سطح آب زیرزمینی، نقشه جهت جریان آب زیرزمینی

منطقه و تراکم لایه‌های زمین‌شناسی نیز مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت نیز با توجه به حضور گچ، انحلال‌پذیری، رمبندگی و فرسایش‌پذیری سایت پتروشیمی، تثبیت لایه سطحی با مواد افزودنی همچون آهک با کمک ماشین‌آلات مخلوط‌کن و عبور ماشین در منطقه و شمع‌کوبی جهت پیشگیری از خطر کارست‌های گچی سازند گچساران در عمق پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و شرکت زمین فیزیک پویا که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

Abbasi, N., Afsharian, A.A., 2018. The Effects of Some Peripheral Conditions on the Solubility of Gypiferous Soils. Journal of Water and Soil Science 22(1), 1-13 (In Persian). https://doi.org/10.29252/ jstnar.22.1.

Abbaspour, S., Daavi, H., Feli, J., 2008. Operational method of constructed canals of irrigation and dranage network in gypsum soils. In the 1st National Seminar of Geotechnical Problems of Irrigation and Drainage Networks (In Persian). https://civilica.com.

Abdalhusein, M., Akhtarpour, A. Mahmood, M., 2020. Behavior Study of the Gypsiferous Sand Soil of AlNajaf City with Presence of Matric Suction Using Unsaturated Triaxial Device. Amirkabir Journal of Civil Engineering 52(10), 2435-2450 (In Persian). https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16339.6194.

Afsharian, A., Abbasi, N., Khosrojerdi, A., Sedghi, H., 2017. Investigating the effect of Gypsum content and Hydraulic gradient on solubility Gypsum clay soils. Iranian Journal of Soil and Water Research 48(4), 689-699 (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.217870.667552.

Ahmad, F., Said, M.A., Najah, L., 2012. Effect of leaching and gypsum content on properties of gypseous soil. International Journal of Scientific and Research Publications 2(9), 1-5. https://www.ijsrp.org.

Al-Badran, Y., Al-Mufty, A.A., Nashat, I.H., NCCL, B., 2018. Leaching behavior of gypseous soils. Journal of Engineering and Sustainable Development 22(2), 119-126. https://doi.org/10.31272/jeasd.2018.2.73.

Al-Dabbas, M.A., Schanz, T., Yassen, M.J., 2010. Comparison of gypsiferous soils in Samara and Karbala areas, Iraq. Iraqi Bulletin of Geology and Mining 6(2), 115-126. https://doi.org/10.1007/s12517-010-0183-5.

Aldaood, A., Bouasker, M., Al-Mukhtar, M., 2014. Geotechnical properties of lime-treated gypseous soils. Applied Clay Science 88, 39-48. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.015.

Al-Dilaimy, F.H., 1989. Effect of Gypsum Content on Strength and Deformation of Remolded Clayey Soil. M.Sc. Thesis. University of Salahddin, Iraq. http://su.edu.krd.

Al-Gabri, M.K.A., 2003. Collapsibility of Gypseous Soils Using Three Different Methods, M.Sc. Thesis. Building and Construction Engineering Department, University of Technology, Baghdad. https://uotechnology.edu.iq.

Al-Hadithy, D.K., 2001. Compressibility of saline soils treated with cement. M.Sc. Thesis. Department of Building and Construction, University of Technology, Baghdad. https://uotechnology.edu.iq.

Al-Heeti, A.A.H., 1990. The Engineering Properties of Compacted Gypsified Soil. M.Sc. Thesis. Civil Engineering Department, University of Baghdad. https://en.uobaghdad.edu.iq.

Al-Layla, M.T., Al-Obaydi, M.A., 1993. Lime stabilization of Gypseous soil, Proceedings of the 5th Arab Conference of Structural Engineering, Civil Engineering Department, Al-Fateh University, Tripoli (2), 1001-10130. https://www.researchgate.net.

Al-Mufty, A.A., Nashat, I.H., 2000. Gypsum content determination in Gypseous soils and rocks, 3rd International Jordanian Conference on Mining, Amman (3), 500-506. https://www.researchgate.net.

Al-Mufty, A., 1997. Effect of gypsum dissolution on the mechanical behavior of gypseous soils. Ph.D. Thesis. University of Baghdad. https://en.uobaghdad.edu.iq.

Al-Obaidi, A.A., Al-Mafragei, I.H., 2016. Settlement and collapse of gypseous soils. Tikrit Journal of Engineering Sciences 23(1), 20-31. https://doi.org/10.25130/tjes.23.1.03.

Al-Obaidi, M., 2007. Gypseferous Soil Behavior by Finite Element Method. Ph.D. Thesis. University of Baghdad. https://en.uobaghdad.edu.iq.

Al-Riahi, S.M.H., Pauzi, N.I.M., Fattah, M.Y., 2023. Compressibility characteristics of collapsible gypseous soil: A review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1205(1), 012068. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1205/1/012068.

Al-Riahi, S.M.H., Pauzi, N.I.M., Fattah, M.Y., Abbas, H.A., 2024. Leaching-induced alterations in the geotechnical and microstructural attributes of clayey gypseous soils. Ain Shams Engineering Journal 15(7), 102865. https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102865.

Al-Sauodi, N., Al-Khafaji, A., Al-Mosawi, M., 2013. Challenging Problems of Gypseous Soils in Iraq. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (p. 479-482). Paris, France. https://www.issmge.org.

Al-Shalhomi, A.Y., 2000. Effect of Phosphogypsum on the engineering characteristics of clayey soil. M.Sc. Thesis. Civil Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul. https://uomosul.edu.iq.

Al-Zgry, E., 1993. The effect of leaching on lime stabilized gypseous soil. M.Sc. Thesis. Civil Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul. https://uomosul.edu.iq.

Ashour, M., Abbas, A., Altahrany, A., Alaaeldin, A., 2020. Modelling the behavior of inundated collapsible soils. Engineering Reports 2(4), e12156. https://doi.org/10.1002/eng2.12156.

ASTM (D421-58), Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

ASTM (D422-87), Standard Test Method for Particle Size Analysis. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

ASTM (D4318-87), Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

ASTM (D698-12), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m^3)). American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

ASTM (D854-87), Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

ASTM, (D2216-19). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. American Society for Testing and Materials (p. 1-5). https://www.astm.org.

ASTM (D1195), Standard Test Method for Repetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. American Society for Testing and Materials. https://www.astm.org.

Barden, L., Madedor, A.O., Sides, G.R., 1969. Volume change calculations of unsaturated clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers 95(1), 33-51. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001226.

Bolouri Bazaz, J., Mollahasani, A., Hosseini, S.M., 2011. A comparative study on determination soil deformation modulus. Using in-situ and laboratory plate load tests. Journal of Civil Engineering 22(1), 45-62 (In Persian). https://civil-ferdowsi.um.ac.ir.

Buck, B.J., Van Hoesen, J.G., 2002. Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum, Southern New Mexico, USA. Journal of Arid Environments 51(4), 469-487. https://doi.org/10.1006/jare.2001.0849.

Burciaga, U.M., 2020. Sustainability assessment in housing building organizations for the design of strategies against climate change. HighTech and Innovation Journal 1(4), 136-147. https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-04-01.

Casby-Horton, S., Herrero, J., Rolong, N.A., 2015. Gypsum soils their morphology, classification, function and landscapes. Advances in agronomy 130, 231-290. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.002.

Clevenger, W.A., 1958. Experiences with loess as foundation material. Transactions of the American Society of Civil Engineers 123(1), 151-169. https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007546.

Cooper, A.H., Calow, R.C., 1998. Avoiding Gypsum Geohazards: Guidance for Planning and Construction (British Geological Survey Technical Report WC/98/5). British Geological Society. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/14146.

Day, R.W., 2005. Foundation engineering handbook: design and construction. American Society of Civil Engineers Press. McGraw-Hill. New York, USA. https://www.accessengineeringlibrary.com.

Dudley J., 1970. Review of collapsing soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Divisions 196(SM3), 925-947. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001426.

Fattah, M.Y., Al-Obaidi, A.A.H., Al-Dorry, M.K., 2025. Collapse and Volume Change of Unsaturated Gypseous Soil: A Model Study. Geotechnical and Geological Engineering 43(1), 1-13. https://doi.org/10.1007/s10706-024-03012-y.

Fattah, M.Y., Dawood, B.A., 2020. Time-dependent collapse potential of unsaturated collapsible gypseous soils. World Journal of Engineering 17(2), 283-294. https://doi.org/10.1108/WJE-09-2019-0276.

Feda, J., 1964. Colloidal activity, shrinking and swelling of some clays. Proceedings of Soil Mechanic Seminar (P. 531–546). Loda, Illinois. https://www.researchgate.net.

Feda, J., 1966. Structural stability of subsident loess soil from Praha-Dejvice. Engineering Geology 1(3), 201-219. http://doi.org/10.1016/0013-7952 (66)90032-9.

Gökkaya, E., Gutiérrez, F., Ferk, M., Görüm, T., 2021. Sinkhole development in the Sivas gypsum karst, Turkey. Geomorphology 386, 107746. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107746.

Gutierrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Ortı, F., Duran, J.J., Garay, P., 2008b, Geological and environmental implications of evaporite karst in Spain. Environmental Geology 53(5), 951–965. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0721-y.

Gutiérrez, F., Cooper, A.H., 2002. Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal and prevention. Natural Hazards 25(3), 259-288. https://doi.org/10.1023/A:1014807901461.

Gutierrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., 2008a, a genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain, Environmental Geology 53(5), 993–1006. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0727-5.

Hashemi, S.S., Baghernejad, M., Khademi, H., 2011. Micromorphology of gypsum crystals in southern Iranian soils under different moisture regimes. Journal of Agricultural Science and Technology 13, 273-288. https://jast.modares.ac.ir.

Hassan, S.M., AlBusoda, B.S., 2022. Mitigation of collapse characteristics of gypseous soils by activated carbon, sodium metasilicate, and cement dust: An experimental study. Journal of the mechanical behavior of materials 31(1), 631-638. https:// doi.org/10.1515/jmbm-2022-0065 .

Hassani, A., 2013. Using visible-infrared spectroscopy to estimate soil chemical properties in gypsum soils, Ph.D. thesis. Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (In Persian). https://modares.ac.ir.

Herrero, J., Porta, J., 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. Geoderma 96(1-2), 47-61. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00003-3.

Honarjo, N., Jalalian, A., 2008. How soils evolve and develop in the lands of Khorasgan Islamic Azad University. Journal of Research on Crop Ecophysiology 4(2), 254-266 (In Persian). https://sanad.iau.ir.

AL-Numani, H.N.T., 2010. Improvement of the mechanical properties of gypseous soil by additives. Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences 3(3), 383-392. https://www.iraqoaj.net.

Jafarzadeh, A.A., Burnham, C.P., 1992. Gypsum crystals in soils. Journal of soil science 43(3), 409-420. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00147.x.

Jha, A.K., Sivapullaiah, P.V., 2014. Role of gypsum on microstructure and strength of soil. Environmental Geotechnics 3(2), 78-89. https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00084.

Jowkar, M.H., khamechian, M.A. Nikudel, M., 2019. Evaluating Erodibility of gupsiferous soils of Masjed Soleyman petrochemical plant site with emphasiss on dispersive and solubility. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology 12(1), 75-92 (In Persian). https://www.jiraeg.ir.

Kargar, S., Raeisi, A., Rahimi, H., 2011. An Investigation of the Effect of in-Soil Present Gypsum and its Leaching on the Strength Properties in Clay Soils. Iranian Journal of Soil and Water Research 41(2), 251-256 (In Persian). https://ijswr.ut.ac.ir.

Karkush, M.O., Al-Shakarchi, Y.J., Al-Jorany, A.N., 2008. Theoretical modeling and experimental investigation of leaching behavior of salty soils. In Conference on Construction and Building Technology (p. 123-138). https://www.researchgate.net.

Kattab, S.A., 1986. Effect of Gypsum Content on Strength of Granular Soils for Soaked and Unsoaked Specimens, M.Sc. Thesis. Civil Engineering Department, University of Mosul. https://uomosul.edu.iq.

Khalf Shoshtari, M., Khayat, N., Nazarpour, A., 2017. Investigating Parameters Affecting the Settlement of Gypsum Soils. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research 17(67), 81-94 (In Persian). https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109602.

Khodabandeh, M., Keramati, M., Hosseini, S., Nokandeh, S., 2019. Effect of Leachate pH on the Collapse Potential and Shear Strength Parameters of Collapsible Soils. Amirkabir Journal of Civil Engineering 51(1), 45-58. https://doi.org/10.22060/ceej.2018.12963.5301.

Mahmood, M.S., Akhtarpour, A., Almahmodi, R., Husain, M.M.A., 2020. Settlement assessment of gypseous sand after time-based soaking. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 737(1), 012080. https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012080.

Makvendi, A., Etezadi, P., 2011. Application of geosynthetic insulation (HDPE geomembranes for covering irrigation and drainage canals (Shahid Chamran Canal). 1st International and 3rd National Conference on Dams and hydropower (In Persian). https://civilica.com.

Mansouri Kia, M.T., Kiamanesh, H., Shahrokh, B., 2000. Construction of irrigation canals in gypsum soils, limitations and solutions, Technical-specialized workshop on construction of canals, limitations and solutions (In Persian). https://civilica.com.

Muayad, A., Al- sharrad, A., 2007. Leaching effects on some properties of sandy gypseous of soil, Iraqi Journal of Civil Engineering 4(8), 79-89. https://doi.org/10.37650/ijce.2007.14142.

Najah. L, Ahmad. F, Said. M.D., Jayed. A., 2013. Effect of additive soils on some geotechnical properties of gypseous soil, International Journal of Scientific and Engineering Research 4(5), 2282-2286. ISSN 2229-5518.

Naseri, H.R., Nikghojagh, Y., 2012. The role of gypsum karst in contaminant transportation from Agh Darreh tailing dam in Iran. Journal of Environment Studies 38(61), 41-48. https://doi.org/10.22059/JES.2012.29010.

Opukumo, A.W., Davie, C.T., Glendinning, S., Oborie, E., 2022. A review of the identification methods and types of collapsible soils. Journal of Engineering and Applied Science 69(1), 1-21. https://doi.org/10.1186/s44147-021-00064-2.

Pearson, M.J., Monteith, S.E., Ferguson, R.R., Hallmark, C.T., Hudnall, W.H., Monger, H.C., West, L.T., 2015. A method to determine particle size distribution in soils with gypsum. Geoderma 237, 318-324. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.016.

Petrukhin, V.P., 1993. Construction of Structures on Saline Soils. Balkema Publication. ISBN 90-5410-213-6.

Pourmehr, B., Dargahi, J., 2002. Channel Dredging to Deal with Problematic Soil, Case Study: Khodaafrin Canal. 2nd Irrigation and Drainage Network Management National Conference, Ahvaz (In Persian). https://civilica.com

Priklonskij, V.A., 1952. Gruntovenedie-utoraiva chast. Gosgeolizdat, Moscow. P. 371. https://www researchgate.net.

Rahimi, H. Yoosefi, A., 1995. Failure of underground water storage at Hengam Island due to being founded on salt Dome. Technical Report, Hormozgan Regional Water Board, Iran (In Persian). https://hrrw.ir.

Rahimi, H., Tatlari, S., Pouyannejad, H.A., 1998. Evaluation of some physical and chemical characteristics of gypsum soils and its comparison with standard conventional methods, Iranian Journal of Agricultural Sciences 29(1), 117-129 (In Persian). https://jijas.ut.ac.ir.

Razouki, S.S., Kuttah, D.K., Al-Damluji, O.A., Nashat, I.H., 2007. Strength erosion of a fine-grained gypsiferous soil during soaking. Arabian Journal for Science and Engineering 32(1B), 147-152. https://www researchgate.net.

Razouki, S.S., Kuttah, D.K., NASHAT, I.H., 2008. Using gypsiferous soil for embankments in hot desert areas. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction materials 161(2), 63-71. https://doi.org/10.1680/coma.2008.161.2.63.

Subhi, R.K., 1987. Properties of Salt Contaminated Soils and their Influence the Performance of Roads in Iraq. Ph.D. Thesis. Queen Mary College, University of London. https://www.qmul.ac.uk.

Terleskaya, M.N. Matonidze, N.V., 1988. Seepage strength of gypsinate foundations of hydraulic structures. Hydrotech Constr 21(12), 690-691. https://doi.org/10.1007/BF01436260.

Toomanian, N .2011. Gypsiferous soils (properties and applications). Pelk press. P. 199 (In Persian). http://pelkbook.ir.

Verrecchia, E.P., Trombino, L., 2021. A visual atlas for soil micromorphologists. Springer Nature. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-67806-7

Waltham, T., 2008. Sinkhole Hazard Case Histories in Karst Terrains. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 41(3), 291-300. https://doi.org/10.1144/1470-9236/07-211.

Wittke, W., 1990. Rock mechanics, theory and applications with case histories. Springer, Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-88109-1.

Yaghmaeian Mahabadi, N., Givi, J., 2008. Comparision of Different Methods of Gypsum Determination in Selected Soils from Isfahan. Journal of Water and Soil Science 11 (42), 565-576 (In Persian). https://jstnar.iut.ac.ir.

Yilmaz, I., 2001. Gypsum/Anhydrite: Some Engineering Problems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 59, 227-230. https://doi.org/10.1007/s100640000071.

Zamin Physic Pooya Company, 2015. Soil Investigation of MIS Fertilizer Project. Final Soil Investigation Report. P. 145.