

Experimental Study on the Swelling Behavior of Mudstone from the Bakhtiari Formation

Amin Baghbanzadeh Dezfouli¹, Hossein Javaheri Koupaei^{2✉}, Kaveh Ahangari³

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: h.javaheri@iau.ac.ir

3. Department of Mining Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 29 July 2026

Accepted 3 September 2026

Keywords:

Mudstone, Swelling pressure, Montmorillonite, Wetting–drying cycles, Bakhtiari Formation.

ABSTRACT

The Bakhtiari Formation mudstones are considered problematic geological materials for underground projects in southwestern Iran due to their swelling clay mineral content. This study investigated the swelling behaviour of mudstones collected from the Masjed Soleyman underground powerhouse cavern through free-swell, zero-strain swelling pressure and wetting–drying cycle tests on intact and reconstituted specimens. The mineralogical composition and microstructure of the specimens were characterised using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The intact specimens, with a natural water content of 5–7%, exhibited free-swell strains of 12–19% and swelling pressures of 0.10–0.19 MPa. In contrast, the corresponding values for the reconstituted specimens were 26.6% and approximately 0.32–0.33 MPa, respectively. Over 70% of the total swelling of the intact specimens occurred within the first 6 hours, and during wetting–drying cycles, the swelling pressure of the intact specimens decreased by around 10% after two cycles before stabilising. In contrast, the reconstituted specimens showed a reduction of around 50% by the eleventh cycle. These results suggest that there is no direct correlation between free swell and swelling pressure, indicating that free swell alone is insufficient for estimating swelling pressure. Furthermore, the evolution of swelling pressure during wetting–drying cycles depended on the initial conditions and structural state of the specimens. Overall, the swelling behaviour of Bakhtiari Formation mudstone should be evaluated by considering the initial conditions and structural state of the material.

Introduction

Mudstones are among the most widespread sedimentary rocks, accounting for over 60% of sedimentary sequences. They are frequently encountered in civil engineering and mining projects, particularly in underground structures (Jeremias and Cripps, 2023). However, their sensitivity to water, which is mainly associated with the presence of swelling clay minerals, can lead to swelling, deformation and stability issues in engineering structures (Doostmohammadi et al., 2009). The Bakhtiari Formation in southwestern Iran contains mudstone layers susceptible to swelling, which may pose challenges to underground construction in the Masjed Soleiman region.

The swelling behaviour of mudstones is influenced by mineralogical composition, natural fabric, initial moisture content and stress history (Mesri et al., 1994). Smectite, particularly montmorillonite, plays a major role in swelling, whereas non-swelling minerals such as quartz and calcite can limit swelling potential by contributing to the rock framework (Madsen and Müller-Vonmoos, 1989; Al-Mukhtar et al., 2012).

Previous studies have also demonstrated that initial moisture content, dry unit weight and the quantity of expansive clay minerals impact both free swelling and swelling pressure (Erguler and Ulusay, 2003). The reported changes in swelling pressure during repeated wetting–drying cycles are inconsistent. Some mudstones, including the Bakhtiari mudstone of Masjed Soleiman (Doostmohammadi et al., 2009), have been reported to show increases followed by stabilisation, whereas other studies have observed a gradual reduction in swelling potential (Dif and Bluemel, 1991; Subba Rao and Satyadas, 1987; Yazdandoust and Yasrobi, 2010; Shahsavani et al., 2020). These discrepancies imply that the evolution of swelling pressure may be heavily influenced by the initial moisture and structural conditions of the material.

Despite previous investigations, there have been few systematic studies on the swelling behaviour of carbonate-rich Bakhtiari mudstone under different initial and structural conditions. Therefore, this study investigates the mineralogical composition,

Cite this article: Baghbanzadeh Dezfouli, A., Javaheri Koupaei, H., Ahangari, K. (2026). Experimental Study on the Swelling Behavior of Mudstone from the Bakhtiari Formation. *Journal of Engineering Geology*, 20 (2), 148–166. <https://doi.org/10.22034/jeg.2026.137862.1004>

microstructure and swelling behaviour of Bakhtiari mudstone collected from the Masjed Soleiman powerhouse cavern. The swelling behaviour of intact and reconstituted specimens was evaluated through free swelling and zero-strain swelling pressure tests, followed by repeated wetting–drying cycles. The relationship between free swelling and swelling pressure was also examined, with particular emphasis on the influence of initial moisture content and natural fabric on swelling pressure evolution.

Materials and Methods

Mudstone samples were collected from the roof of the Masjed Soleiman Dam Powerhouse Cavern (Bakhtiari Formation) and preserved immediately by wrapping them in wax-impregnated fabric. Two types of specimen were prepared: (1) undisturbed specimens with a natural water content of 5–7% and a bulk density of 2.26–2.34 g/cm³, trimmed to a diameter of 50 mm and a thickness of 20 mm using a saw and drilling jig; and (2) reconstituted specimens, which were prepared by compacting five layers of powdered mudstone within an oedometer ring using a custom hydraulic press, achieving a dry density of 1.9 g/cm³ with zero initial moisture. The mineralogical composition was determined using XRD (Panalytical X'Pert Pro, 40 kV, 30 mA, 2 θ : 5–90°) and the microstructure was examined using FE-SEM (TESCAN MIRA2). The Atterberg limits and particle density were also measured. Free swelling tests were performed under 1 kPa vertical stress in accordance with ASTM D4546 and ISRM guidelines. Swelling pressure was measured under zero-strain conditions in accordance with ASTM D4829 and ISRM. Wetting–drying cycle tests were conducted by alternately inundating and drying the specimens while monitoring the swelling pressure.

Results and Discussion

XRD analysis identified calcite as the dominant mineral (44–45%), followed by quartz (approximately 20%), dolomite (3–9%), montmorillonite (10–12%), illite (8–10%), feldspar (4–6%) and chlorite (3–6%). The carbonate phases limit swelling by cementing the matrix, whereas montmorillonite and illite are the primary swelling minerals (Mesri et al., 1994; Rao et al., 2021). Atterberg limits indicated a liquid limit of 40–47%, a plastic limit of 19–23%, and a plasticity index of 21–24%. Specimens containing higher percentages of active clay minerals exhibited greater plasticity. FE-SEM images revealed lamellar clay aggregates in flocculated and dispersed arrangements with interconnected macro- and micro-pores. This is consistent with smectite-illite clay microstructures, confirming the mineralogical findings. Free swelling tests under 1 kPa showed that undisturbed specimens exhibited strains of 12–19%, with over 70% of swelling occurring within the first six hours, reflecting

an initial rapid phase followed by a slower secondary stage (Mesri et al., 1994). Variations in sampling orientation relative to natural bedding are responsible for scatter among undisturbed specimens despite similar mineralogy (Wang et al., 2024). Reconstituted specimens exhibited substantially higher free swelling strains (26.6%), reflecting the destruction of natural inter-particle bonds and particle rearrangement (Chen, 1975; Gens and Alonso, 1992). Swelling pressure tests revealed that undisturbed specimens generated pressures of between 0.10 and 0.19 MPa, whereas reconstituted specimens generated pressures of between 0.32 and 0.33 MPa — approximately three times higher. Natural discontinuities in undisturbed specimens partially accommodate expansion, reducing the measured pressure. A critical finding was that free swelling and swelling pressure were not directly correlated; higher free swelling strain did not necessarily correspond to higher swelling pressure. Wetting–drying cycle tests showed that undisturbed specimens stabilised after two cycles, with a reduction in swelling pressure of approximately 10% (from 0.12 to 0.10 MPa). This was attributed to the buffering role of natural discontinuities (Dif and Bluemel, 1991; Shahsavani et al., 2020). In contrast, the swelling pressure of the reconstituted specimens gradually decreased by around 50% over eleven cycles, from 0.33 to 0.174 MPa. This may be due to continuous particle rearrangement (Yazdandoust and Yasrobi, 2010; Subba Rao and Satyadas, 1987). This contrasts with the increasing trend reported by Doostmohammadi et al. for initially dry specimens, confirming that the evolution of swelling pressure during wetting-drying cycling is sensitive to the initial moisture state and structural condition.

Conclusions

The swelling behaviour of Bakhtiari Formation mudstones from the Masjed Soleiman powerhouse cavern is governed by the interplay of mineralogical composition, natural fabric and initial moisture content. XRD analysis revealed the presence of montmorillonite (10–12%) and illite (8–10%) as the primary swelling minerals within a carbonate-rich matrix (calcite: 44–45%), which moderates the formation's overall swelling potential. Free swelling and swelling pressure are not directly correlated and cannot be used interchangeably. Direct measurement of swelling pressure under zero-strain conditions is essential for engineering design. The natural structural state critically controls both the magnitude of swelling and the number of cycles needed to reach equilibrium during wetting and drying. A geotechnical assessment of underground structures in the Bakhtiari Formation must therefore account for both the structural state of the specimen and the initial moisture conditions. Relying solely on free swelling results to estimate swelling pressures introduces significant uncertainty.

مطالعه آزمایشگاهی رفتار تورمی گل سنگ سازند بختیاری

امین باغبانزاده دزفولی^۱، حسین جواهری کوپایی^۲، کاوه آهنگری^۳

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: h.javaheri@iau.ac.ir

۳. گروه مهندسی معدن، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلیدواژه‌ها:

گل سنگ‌های سازند بختیاری به دلیل حضور کانی‌های رسی متورم شونده، از واحدهای مسئله ساز در پروژه‌های زیرزمینی جنوب غرب ایران به شمار می‌روند. در این پژوهش، رفتار تورمی گل سنگ‌های برداشت شده از مغار نیروگاه مسجدسلیمان با انجام آزمایش‌های تورم آزاد، فشار تورمی در شرایط کرنش صفر و چرخه‌های تر - خشک بر روی نمونه‌های بکر و بازسازی شده بررسی شده است. همچنین، ترکیب کانی‌شناسی و ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از SEM و XRD مورد بررسی قرار گرفته شده است. نمونه‌های بکر با رطوبت طبیعی ۵ تا ۷ درصد، کرنش تورمی آزاد ۱۲ تا ۱۹ درصد و فشار تورمی ۰/۱ تا ۰/۱۹ مگاپاسکال را نشان دادند، در حالی که این مقادیر در نمونه‌های بازسازی شده به ترتیب به ۲۶/۶ درصد و حدود ۰/۳۳ تا ۰/۳۳ مگاپاسکال رسیده است. بیش از ۷۰ درصد تورم نمونه‌های بکر در ۶ ساعت نخست رخ داده است. در چرخه‌های تر - خشک، فشار تورمی نمونه‌های بکر پس از دو چرخه حدود ۱۰ درصد کاهش یافته و سپس پایدار شده است، در حالی که در نمونه‌های بازسازی شده کاهش حدود ۵۰ درصدی تا چرخه یازدهم مشاهده شده است. نتایج نشان می‌دهد، بین تورم آزاد و فشار تورمی رابطه مستقیمی وجود ندارد و تورم آزاد به تنهایی معیار کافی برای برآورد فشار تورمی نیست. همچنین، روند تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک به شرایط اولیه و وضعیت ساختاری نمونه وابسته بوده است. در مجموع، ارزیابی رفتار تورمی گل سنگ سازند بختیاری نیازمند توجه همزمان به وضعیت ساختاری و شرایط اولیه نمونه است.

مقدمه

با لایه‌های گل سنگ مستعد تورم، از جمله مناطقی است که اجرای پروژه‌های زیرزمینی در آن با چالش‌های ناشی از تورم همراه بوده است (Doostmohammadi et al., 2009). سازند بختیاری در این منطقه شامل لایه‌های متغیری از سیلت سنگ و رس سنگ با حضور کلسیت و دولومیت است که رفتار تورمی آن‌ها تاکنون به طور جامع بررسی نشده است.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رفتار تورمی گل سنگ‌ها تابعی از ترکیب کانی شناسی، ساختار طبیعی، شرایط رطوبتی و تاریخچه تنش و رطوبت است (Mesri et al., 1994). در این میان، کانی‌های گروه اسمکتیت (به ویژه مونتوریلونیت) به عنوان مهم‌ترین عامل کنترل کننده تورم شناخته می‌شوند، چرا که این کانی‌ها به دلیل ساختار لایه‌ای و بار منفی سطحی، قابلیت جذب لایه‌های دوگانه

گل سنگ‌ها به عنوان یکی از فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی، با تشکیل بیش از ۶۰ درصد از توالی‌های رسوبی، سهم قابل توجهی از واحدهای زمین شناسی در پروژه‌های عمرانی و معدنی به ویژه در فضاهای زیرزمینی را به خود اختصاص می‌دهند (Jeremias and Cripps, 2023). این سنگ‌های ریزدانه، به دلیل حضور کانی‌های رسی فعال و ساختار ویژه خود، در مواجهه با رطوبت رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند که می‌تواند منجر به بروز مشکلات جدی ژئوتکنیکی نظیر تورم، ناپایداری شیب‌ها، تغییر شکل سازه‌های زیرزمینی و کاهش کارایی عملیات معدنی شود (Doostmohammadi et al., 2009).

منطقه مسجدسلیمان در جنوب غرب ایران، به دلیل شرایط اقلیمی خاص با دوره‌های خشک و مرطوب متناوب و وجود سازند بختیاری

استناد: باغبانزاده دزفولی، ا.، جواهری کوپایی، ح.، آهنگری، ک. (۱۴۰۵). مطالعه آزمایشگاهی رفتار تورمی گل سنگ سازند بختیاری. مجله زمین شناسی مهندسی، ۲۰

(۲)، ۱۴۸-۱۶۶. <https://doi.org/10.22034/jeg.2026.137862.1004>

ویژه وضعیت رطوبتی و ساختاری آن، و شرایط آزمایش در تعیین جهت و میزان این تغییرات نقش مهمی دارند.

با این حال، بیشتر پژوهش‌های انجام شده بر روی خاک‌های رسی متمرکز بوده و مطالعات سیستماتیک بر روی گل‌سنگ‌های توده‌ای با زمینه کربناته، به ویژه در مناطق نیمه خشک ایران، بسیار محدود است. هرچند پژوهش دوست‌محمدی و همکاران بر روی گل‌سنگ‌های مسجدسلیمان انجام شده، اما آن مطالعه بیشتر بر روی نمونه‌های خشک (با رطوبت اولیه صفر) و با تأکید بر افزایش تورم در اثر چرخه‌های تر - خشک متمرکز بوده است (Doostmohammadi et al., 2009). تحقیق حاضر، با هدف بررسی جامع رفتار تورمی گل‌سنگ سازند بختیاری در محدوده مغار نیروگاه سد مسجدسلیمان انجام شده است. در این راستا، نخست ترکیب کانی شناسی و ویژگی‌های ریز ساختاری نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های XRD و SEM شناسایی و بررسی شده است. سپس، رفتار تورمی نمونه‌های بکر و بازسازی‌شده با استفاده از آزمایش‌های تورم آزاد و فشار تورمی در شرایط کرنش صفر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته شده تا نقش ساختار طبیعی نمونه در میزان تورم و فشار ایجاد شده مشخص شود. در ادامه، با انجام چرخه‌های متوالی تر - خشک، تغییرات فشار تورمی در نمونه‌های بکر و بازسازی‌شده بررسی شده و روند تکامل آن‌ها در چرخه‌های متوالی مورد مقایسه قرار گرفته شده است. همچنین، با مقایسه تورم آزاد و فشار تورمی، رابطه میان این دو شاخص و میزان قابلیت استفاده از تورم آزاد برای ارزیابی فشار تورمی بررسی شده است. در نهایت، نقش شرایط اولیه، به ویژه وضعیت رطوبتی و ساختاری نمونه، در روند تغییرات فشار تورمی طی چرخه‌های تر - خشک مورد توجه قرار گرفته شده است. این بررسی‌ها با هدف ارائه درک دقیق‌تر از عوامل کنترل کننده رفتار تورمی گل‌سنگ بختیاری و فراهم کردن مبنایی مناسب‌تر برای ارزیابی رفتار آن در پروژه‌های زیرزمینی آن منطقه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

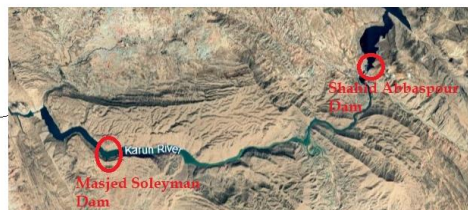
موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

نمونه‌های این پژوهش از لایه‌های گل‌سنگ سازند بختیاری از قطعات حفاری شده این مصالح از محل سقف مغار نیروگاه سد

آب و گسترش بین‌لایه‌ای را دارند (Madsen and Müller- Vonmoos, 1989) در مقابل، کانی‌های غیر تورمی مانند کوارتز و کلسیت با ایجاد اسکلت مقاوم، پتانسیل تورم را کاهش می‌دهند (Al-Mukhtar et al., 2012). مرسی و همکاران در مطالعه‌ی کلاسیک خود بر روی گل‌سنگ تیلور نشان دادند که فشار تورمی را نباید به صورت یک مقدار ثابت در نظر گرفت، بلکه باید به صورت تابعی از نسبت تخلخل و درجه بازشدگی ناپیوستگی‌ها تعریف شود (Mesri et al., 1994). الگولار و یویسای نیز نشان دادند که رطوبت اولیه، وزن واحد خشک و مقدار رس تورم‌پذیر، مهم‌ترین عوامل کنترل کننده تورم آزاد و فشار تورمی هستند (Erguler and Ulusay, 2003). مطالعات شبیه‌سازی ملکولی نیز نشان داده است که موقعیت بار لایه‌ای در رس‌های اسمکتیتی تأثیر قابل توجهی بر ساختار بین لایه‌ای و میزان تورم دارد (Teich-McGoldrick et al., 2015).

در خصوص رفتار فشار تورمی طی چرخه‌های تر - خشک، نتایج مطالعات پیشین یکسان نیست. برخی پژوهش‌ها روند افزایشی فشار تورمی را در چرخه‌های ابتدایی و سپس رسیدن آن به یک مقدار پایدار گزارش کرده‌اند. برای نمونه، دوست‌محمدی و همکاران در بررسی نمونه‌هایی با رطوبت اولیه صفر نشان دادند که فشار تورمی در چرخه‌های نخست افزایش می‌یابد و پس از آن به وضعیت نسبتاً پایدار می‌رسد (Teich-McGoldrick et al., 2015). در مقابل، در برخی مطالعات کاهش تدریجی پتانسیل تورمی با تکرار چرخه‌های تر - خشک مشاهده شده است. دیف و بلومل در مطالعه خاک‌های متورم‌شونده نشان دادند که تکرار چرخه‌های رطوبتی موجب کاهش تدریجی پتانسیل تورم می‌شود (Dif and Bluemel, 1991). ساباراتو و ساتیاداس نیز کاهش ظرفیت تورمی را با افزایش تعداد چرخه‌ها گزارش کردند (Subba Rao and Satyadas, 1987). یزدان دوست و یسربی همچنین شهسوایی و همکاران برای نمونه‌های رسی، روند کاهش و سپس تثبیت رفتار تورمی را مشاهده کردند (Yazdandoust and Yasrobi., 2010). تفاوت میان این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک را نمی‌توان به یک روند عمومی و ثابت نسبت داد و احتمالاً شرایط اولیه نمونه، به

مسجدسلیمان اخذ شده‌اند (شکل ۱). این نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت، بسته بندی شده‌اند. سنگ‌های گلی موجود در این منطقه شامل سیلت سنگ‌ها و رس سنگ‌هایی با ویژگی‌های متغیر هستند که دارای کلسیت و دولومیت می‌باشند (Doostmohammadi et al., 2009).



شکل ۱. موقعیت برداشت نمونه‌های گل سنگ از سقف مغار نیروگاه سد مسجدسلیمان

Fig. 1. Location of mudstone sampling site in the Masjed Soleyman dam area



شکل ۲. نمونه گل سنگ استخراج شده از لایه‌های سازند بختیاری

Fig. 2. Extracted mudstone sample from the Bakhtiari Formation layers

پارامترهایی مانند دانسیته و رطوبت اولیه را به صورت کنترل شده فراهم می‌آورد. مقایسه رفتار این دو گروه، امکان تفکیک تأثیر ساختار طبیعی از ترکیب کانی شناسی و شرایط فیزیکی را بر رفتار تورمی فراهم می‌کند.

نمونه‌های بکر

برای تهیه نمونه بکر، ابتدا سنگ با اره به آرامی به ورقه‌های ۲/۵ تا ۳ سانتیمتری بریده شده و سپس با یک مته مخصوص، نمونه‌هایی با قطر حدود ۵/۵ سانتیمتر از آن تهیه شده است. در مرحله بعد با تراشیدن، نمونه‌هایی به قطر ۵ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر

انواع نمونه‌های آزمایش

در این تحقیق از دو نوع نمونه بکر و بازسازی شده استفاده شده است. هدف از تهیه و مقایسه این دو نوع نمونه، بررسی تأثیر ساختار طبیعی و تاریخچه تنش و رطوبت بر رفتار تورمی گل سنگ است. نمونه‌های بکر، دارای ساختار طبیعی، پیوندهای دیاژنتیکی و ناپیوستگی‌ها موجود در سنگ هستند و رفتار آن‌ها نمایانگر پاسخ واقعی سنگ در محل پروژه می‌باشد. در مقابل، نمونه‌های بازسازی شده، با حذف پیوندهای طبیعی و بازآرایی مجدد ذرات، ساختاری جدید و نسبتاً همگن دارند که امکان بررسی تأثیر

استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک (ساخته شده توسط نویسندگان) فشرده گردیده، به گونه‌ای که جرم واحد حجم (دانسیته) $1/9$ گرم بر سانتیمتر مکعب حاصل شود. این دانسیته با هدف شبیه سازی شرایط متراکم شده و حذف اثر ساختار طبیعی بررسی شده است. نمونه‌های بازسازی شده با رطوبت اولیه صفر (خشک) تهیه شدند تا حساسیت آن‌ها به جذب آب در شرایط کنترل شده ارزیابی شود خصوصیات نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش تورم آزاد با بار ثابت و فشار تورمی در جدول (۱) ارائه شده است.

جهت استفاده در دستگاه ادمتر تهیه شده است. لازم به ذکر است که این گل سنگ بسیار ترد است و بسیاری از نمونه‌ها در فرایند آماده سازی شکسته شده است. نمونه‌های بکر، دارای رطوبت طبیعی در محدوده ۵ تا ۷ درصد و دانسیته در محدوده $2/26$ تا $2/34$ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده‌اند.

نمونه‌های بازسازی شده

برای ساخت نمونه‌های بازسازی شده، ابتدا سنگ پودر شده و پودر حاصل در ۵ لایه داخل رینگ دستگاه ادمتر ریخته شده و با

جدول ۱. مشخصات هندسی، وزن، دانسیته و رطوبت طبیعی نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش‌های تورم آزاد و فشار تورمی

Table 1. Geometric characteristics, weight, density, and natural water content of specimens prepared for free swell and swelling pressure tests

Sample name	test	سنگ	Height (mm)	Diameter (mm)	Weight (gr)	$\rho(\text{gr}/\text{cm}^3)$	Natural water content (%)
MS01	تورم آزاد با بار ثابت - بکر	1	21.4	48.8	93.18	2.33	6
MS02	تورم آزاد با بار ثابت - بکر	1	19.7	49.8	86.6	2.26	6
MS03	تورم آزاد با بار ثابت - بکر	1	19.8	49.5	87	2.28	6
MS04	تورم آزاد با بار ثابت - بکر	2	21.4	49.1	93.18	2.3	5
MS05	تورم آزاد با بار ثابت - بکر	3	20	49.3	89.19	2.34	7
MS06	تورم آزاد با بار ثابت - بازسازی شده	-	20.05	49.8	74.29	1.9	0
MS07	تورم آزاد با بار ثابت - بازسازی شده	-	20	49.7	73.86	1.9	0
MP01	فشار تورمی - بکر	1	20	49.5	86.69	2.25	6
MP02	فشار تورمی - بکر	2	21.4	49.1	93.38	2.3	5
MP03	فشار تورمی - بکر	3	21	48.6	88.97	2.28	7
MP04	فشار تورمی - بازسازی شده	-	20	49.6	73.75	1.91	0
MP05	فشار تورمی - بازسازی شده	-	20	49.7	73.86	1.9	0

مقیاس نانومتر را فراهم می‌آورد. نمونه‌های کوچک (به ابعاد تقریبی $1 \times 1 \times 0.5$ سانتیمتر) ابتدا به وسیله دستگاه اسپاتر کواتر با لایه‌ای نازک از طلا پوشش‌دهی شدند تا هدایت الکتریکی آن‌ها افزایش یافته و از تجمع بار بر سطح نمونه جلوگیری شود. تصاویر در مقیاس‌های ۱۰ میکرومتر، ۵ میکرومتر، ۲ میکرومتر، ۱ میکرومتر، ۵۰۰ نانومتر و ۲۰۰ نانومتر، با استفاده از آشکار ساز الکترون‌های ثانویه تهیه شده‌اند.

دستگاه ادمتر (Oedometer)

برای انجام آزمایش‌های تورم آزاد و فشار تورمی، از سلول ادمتر استاندارد با قطر داخلی ۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰ میلیمتر استفاده شده است. این دستگاه مجهز به ساعت اندازه‌گیری با دقت 0.01

دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD)

برای شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه‌ها، از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل Panalytical X'Pert Pro در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر استفاده شد. نمونه‌ها در محدوده زاویه 2θ از ۵ تا ۹۰ درجه با گام 0.01 درجه اسکن شده است.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی ریز ساختار، بافت، نوع تماس ذرات و توزیع حفرات در نمونه‌های گل سنگ، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل TESCAN MIRA2 ساخت شرکت TESCAN استفاده شده است. این دستگاه به دلیل قدرت تفکیک بالا در ولتاژهای پایین، امکان مشاهده جزئیات ریز ساختاری در

میلیمتر است که تغییر شکل محوری نمونه را در طول زمان ثبت شده است.

دستگاه پرس هیدرولیک

برای ساخت نمونه‌های بازساخته، از یک دستگاه پرس هیدرولیک دستی با قابلیت اعمال بار تا ۱۰ تن (ساخته‌شده توسط نویسندگان) استفاده شد. نمونه‌ها در ۵ لایه درون رینگ ادومتر با استفاده از این دستگاه متراکم شده است.

روش‌های آزمایش

آزمایش تورم آزاد تحت بار ثابت

برای اندازه‌گیری کرنش تورمی در شرایط بار ثابت، از روش استاندارد ASTM D4546 و همچنین روش پیشنهادی ISRM پیروی شد (ASTM D4546-14, 2014; ISRM, 1979). این روش به طور متداول برای تعیین پتانسیل تورمی خاک‌ها و سنگ‌های رسی به کار می‌رود. در این آزمایش، نمونه درون سلول ادومتر قرار داده شده و تحت یک بار عمودی ثابت، امکان جذب آب پیدا می‌کند. تغییرات کرنش نمونه در طول زمان ثبت و منحنی تورم مربوطه ترسیم می‌شود (شکل ۳). این آزمایش در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی کاربرد فراوانی دارد و در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با گل‌سنگ‌های متورم شونده مورد استفاده قرار گرفته است (Jeremias and Cripps, 2023).

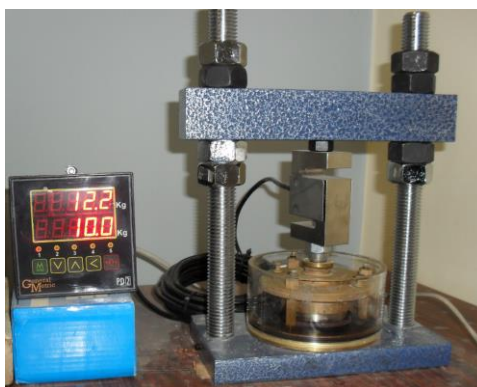


شکل ۳. دستگاه ادومتر مورد استفاده برای اندازه‌گیری تورم آزاد با بار ثابت

Fig. 3. Oedometer apparatus used for free swell measurement under constant load

معتبر بین‌المللی ASTM D4829 برای خاک‌های متورم شونده (ASTM D4829-11, 2011) و روش‌های پیشنهادی ISRM برای آزمایش‌های مکانیکی سنگ انجام شده است (ISRM, 1979). در پروژه‌های ژئوتکنیکی، به ویژه در تحلیل پایداری سازه‌ها در برابر تورم، این آزمایش کاربرد گسترده‌ای دارد (Chen, 1975). در پژوهش حاضر، از دستگاه ساخته شده توسط نویسندگان (شکل ۴) برای اندازه‌گیری فشار تورمی نمونه‌های بکر و بازسازی شده استفاده شده است.

آزمایش تعیین فشار تورمی تحت شرایط بدون تغییر شکل
آزمایش اندازه‌گیری فشار تورمی به منظور تعیین حداکثر فشاری انجام می‌شود که برای مهار تورم یک نمونه گل‌سنگ در هنگام اشباع شدن لازم است. در این روش، نمونه درون یک سلول اشباع قرار گرفته و تغییر حجم آن به طور کامل محدود می‌شود. با افزایش جذب آب، فشار داخلی نمونه افزایش یافته و تا زمانی که به تعادل برسد، ثبت می‌گردد. فشار تورمی نهایی، نمایانگر پتانسیل انبساطی نمونه در شرایط مهندسی است. این آزمایش بر اساس استانداردهای



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری فشار تورمی در شرایط کرنش صفر

Fig. 4. Apparatus for swelling pressure measurement under zero strain condition

نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، کلسیت با ۴۴ تا ۴۵ درصد، کانی غالب در تمامی نمونه‌ها است. کوارتز با میانگین حدود ۲۰ درصد به عنوان دومین فاز اصلی شناسایی شد. کانی‌های رسی مونتموریلونیت (۱۰ تا ۱۲ درصد) و ایلیت (۸ تا ۱۰ درصد) به عنوان کانی‌های فعال تورم‌زا شناسایی شدند. همچنین کانی‌های فرعی شامل فلدسپار (۴ تا ۶ درصد) و کلریت (۳ تا ۶ درصد) نیز مشاهده شده‌اند. حضور کلسیت و کوارتز به عنوان فازهای بدون تورم، نقش مؤثری در کاهش پتانسیل تورم ایفا می‌کنند، در حالی که مونتموریلونیت و ایلیت منابع اصلی تورم محسوب می‌شوند (Mesri et al., 1994; Rao et al., 2021).

بررسی فشار تورمی برای سیکل‌های تر و خشک

برای انجام سیکل‌های تر و خشک، پس از رسیدن به حداکثر فشار در هر سیکل، آب اضافه شده به سلول کاملاً خارج شده و اجازه داده می‌شود تا در شرایط دمای طبیعی، رطوبت داخلی نمونه کاهش یابد. این امر پس از گذشت چند روز از حذف آب، با کاهش فشار تورمی قابل مشاهده است. پس از رسیدن فشار تورمی به نزدیک صفر در هر سیکل، دوباره آب اضافه شده و این سیکل تکرار شده است.

نتایج و بحث

کانی شناسی - نتایج آزمایش XRD

جدول ۲. نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های گل‌سنگ

Table 2. X-Ray Diffraction (XRD) analysis results for mineralogical composition of mudstone samples

کانی	فرمول شیمیایی	سنگ ۱	سنگ ۲	سنگ ۳	نمونه بازسازی شده
		(%) درصد	(%) درصد	(%) درصد	(%) درصد
کلسیت (Calcite)	CaCO_3	45	45	44	45
دولومیت (Dolomite)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	8	5	9	3
کوارتز (Quartz)	SiO_2	20	20	18	20
اسمکتیت (Smectite Group, Montmorillonite)	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	10	12	10	10
ایلیت (Illite)	$(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	8	10	8	10
فلدسپار (Feldspar)	KAlSi_3O_8	5	5	6	5
کانولینیت (Kaolinite)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	<1	<1	<1	<1
کلریت (Chlorite)	$(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	4	3	5	6

تغییرات ویژگی‌های خمیری نمونه‌ها بیشتر به ترکیب کانی شناسی، به ویژه درصد اسمکتیت و ایلیت، وابسته است. نمونه‌هایی که میزان بیشتری از این کانی‌های رسی فعال دارند، شاخص خمیری بالاتری از خود نشان می‌دهند و ظرفیت بیشتری برای جذب رطوبت و تغییر شکل پلاستیک دارند. این روند با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز هم‌خوانی دارد (Erguler and Ulusay, 2003; Rao et al., 2021).

خواص خمیری و دانسیته

مقدار حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، شاخص خمیری (PI) و دانسیته (ρ) نمونه‌های گل‌سنگ در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، حد روانی نمونه‌ها بین ۴۰ تا ۴۷ درصد، حد خمیری بین ۱۹ تا ۲۳ درصد و شاخص خمیری بین ۲۱ تا ۲۴ درصد متغیر است. دانسیته نمونه‌ها نیز در محدوده ۲/۵۷ تا ۲/۶۲ گرم بر سانتیمتر مکعب قرار دارد. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که

جدول ۳. خواص خمیری (حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری) و دانسیته نمونه‌های گل‌سنگ

Table 3. Consistency limits (liquid limit, plastic limit, plasticity index) and density of mudstone samples

Sample	LL(%)	PL(%)	PI	P(gr/cm^3)
سنگ ۱	40	19	21	2.57
سنگ ۲	47	23	24	2.62
سنگ ۳	41	20	21	2.58
بازسازی‌شده	45	22	23	1.9

پایین صفحه، خوشه‌ای از نانو ذرات کروی تجمع یافته را مشخص می‌کند که بر روی سطح ذره رسی قرار گرفته‌اند. پیکان سبز (۵) در پایین - چپ تصویر، نیز به ذرات ریز پراکنده در حاشیه صفحه بزرگ اشاره دارد.

در شکل (۵) (مقیاس 10 μm)، نمای گسترده‌تری از ساختار کلی خاک رس خام را نشان می‌دهد. کادر قرمز (۱) در قسمت بالا - چپ تصویر ناحیه‌ای را مشخص می‌کند که تراکم ذرات در آن کمتر بوده و فضاهای تاریک متعددی مشاهده می‌شود. پیکان زرد (۲) در مرکز - راست تصویر به یک صفحه درشت و نسبتاً مجزا اشاره دارد که در میان ذرات کوچک‌تر اطراف قابل تشخیص است. پیکان آبی (۳) توده‌ای درشت‌دانه را در بالا - راست تصویر نشان می‌دهد که سطحی ناهموار داشته و ذرات کوچک‌تری نیز بر روی آن قرار گرفته‌اند. پیکان نارنجی (۴) در پایین - چپ تصویر ناحیه‌ای از ماتریکس ریزدانه را مشخص می‌کند که ذرات آن به صورت نسبتاً یکنواخت و متراکم در کنار هم قرار گرفته‌اند. دایره سبز (۵) در پایین - مرکز تصویر نیز خوشه‌ای نسبتاً گرد را نشان می‌دهد که از تجمع و درهم تنیدگی ذرات ریز تشکیل شده و دارای مرزهای نسبتاً مشخصی است.

در شکل (۵) (مقیاس 5 μm)، ساختار کلی توده‌های رسی و تخلخل میان آن‌ها آشکارتر می‌شود. دایره قرمز (۱) یک ماکروپور بزرگ و

ریزساختار - نتایج تصاویر SEM

در شکل (۵) (مقیاس 200 nm)، این تصویر نانو ذرات را همراه با اندازه گیری‌های مستقیم روی آن‌ها نشان می‌دهد. پیکان زرد (۱) در سمت چپ تصویر به ساختارهای میله‌ای نانومتری اشاره دارد. دایره قرمز (۲) خوشه‌ای از نانو ذرات کروی را مشخص می‌کند که برای آن‌ها اندازه گیری‌های $D2 = 47.59 \text{ nm}$ و $D3 = 47.19 \text{ nm}$ ثبت شده است. پیکان آبی (۳) در بالا - راست تصویر، به خوشه دانه‌ای برجسته اشاره دارد. پیکان سبز (۴) نیز اندازه‌گیری $D1 = 34.18 \text{ nm}$ را برای یک نانو ذره کوچک‌تر در بخش بالایی تصویر نشان می‌دهد. بر اساس این اندازه‌گیری‌ها، قطر نانو ذرات کروی در محدوده ۳۴ تا ۴۸ نانومتر قرار دارد.

در شکل (۵) (مقیاس 500 nm)، یک صفحه بزرگ رسی با جزئیات بیشتری قابل مشاهده است. کادر زرد بزرگ (۱) سطح اصلی این صفحه را مشخص می‌کند که با نانو ذرات کروی و ساختارهای میله‌ای کوچک‌تر پوشیده شده است. پیکان قرمز (۲) به ساختارهای میله‌ای نانومتری روی سطح این صفحه اشاره دارد که با جهت گیری‌های مختلف پراکنده شده‌اند. پیکان نارنجی (۳) در سمت راست تصویر، گروهی از میله‌های بلند را نشان می‌دهد که در امتداد لبه صفحه بزرگ قابل مشاهده هستند. دایره آبی (۴) در بخش

کشیده و میله‌ای شکل است که در بخش‌های مختلف میدان دید پراکنده شده‌اند. پیکان (۲) به یک میله بلند در بخش مرکزی تصویر اشاره دارد که با زاویه‌ای مایل از میان صفحه بزرگ رسی عبور کرده است. پیکان نارنجی (۳) نیز ساختار میله‌ای دیگری را در کنار این صفحه نشان می‌دهد که با جهت‌گیری مایل‌تری قرار گرفته است. پیکان قرمز (۴) به یک میله کوتاه‌تر و درخشان‌تر در قسمت بالا - راست تصویر، اشاره دارد. دایره آبی (۵) در گوشه بالا - چپ، یک خوشه رسی از نوع booklet را مشخص می‌کند که در آن صفحات رسی به صورت کتاب مانند روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و توده‌ای متراکم با لبه‌های مشخص تشکیل داده‌اند. همچنین، پیکان سبز (۶) در پایین - چپ تصویر، به ناحیه‌ای از ذرات ریز پراکنده اشاره دارد که در فضای میان صفحات بزرگ‌تر توزیع شده‌اند.

تفسیر ریزساختار و ارتباط آن با رفتار تورمی

تصاویر SEM در شکل (۵) نشان می‌دهند که ریزساختار نمونه از توده‌های ورقه‌ای رس در مقیاس میکرونی تشکیل شده است که در میان حفرات نامنظم و فضاهای خالی ریز قرار گرفته‌اند. آرایش درهم تنیده صفحات رسی درون حفرات و بین دانه‌های درشت‌تر، با ساختار گزارش شده برای رس‌های اسمکتیتی - ایلیتی متراکم مطابقت دارد و به عنوان یکی از ویژگی‌های رس‌های متورم شناخته شده است. در اطراف دانه‌های سخت‌تر مانند کوارتز و کربنات نیز صفحات رسی به صورت پوسته‌های نازک و با تماس لبه - لبه - سطح و سطح - به - سطح دیده می‌شوند. این ساختارها می‌توانند در ایجاد مرزهای ناهمگن و تمرکز تنش در ریزساختار نقش داشته باشند (Huang et al., 1986).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییر بافت فلوکوله به پراکنده تحت تأثیر فشار و رطوبت، یکی از ساز و کارهای مؤثر در تغییر حجم رس‌های متورم است (Subba Rao and Satyadas, 1987; Huang et al., 1986). همچنین، پیچیدگی و ناهمگنی توزیع حفرات در رس‌های حاوی اسمکتیت، سطح تماس آب و ذرات جامد و در نتیجه حساسیت نمونه به تغییرات مکش، تورم و جمع‌شدگی

مشخص را در ناحیه مرکز - راست تصویر احاطه کرده است. این فضای خالی میان توده‌های رسی قرار گرفته و دارای مرزهای نسبتاً مشخصی است. کادر زرد (۲) در سمت چپ تصویر، توده‌ای از صفحات رسی را نشان می‌دهد که به صورت لایه‌لایه و با تراکم بالا روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و با تیرگی بیشتری نسبت به اطراف دیده می‌شوند. پیکان آبی (۳) در بالا - راست تصویر، به لبه یک صفحه رسی بزرگ اشاره دارد که در امتداد آن لایه‌های داخلی صفحه قابل تشخیص هستند. پیکان نارنجی (۴) در بخش بالایی تصویر پراکندگی ذرات ریز در فضای میان توده‌های بزرگ‌تر را نشان می‌دهد. همچنین، پیکان سبز (۵) در پایین - چپ تصویر، به ناحیه‌ای از ماتریکس ریزدانه نسبتاً یکنواخت اشاره دارد که بخش قابل توجهی از میدان دید را پوشش می‌دهد.

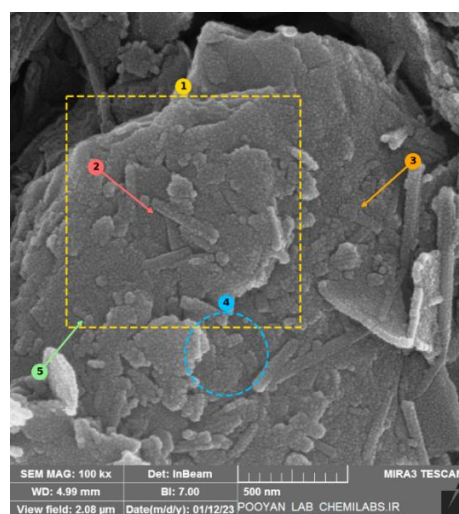
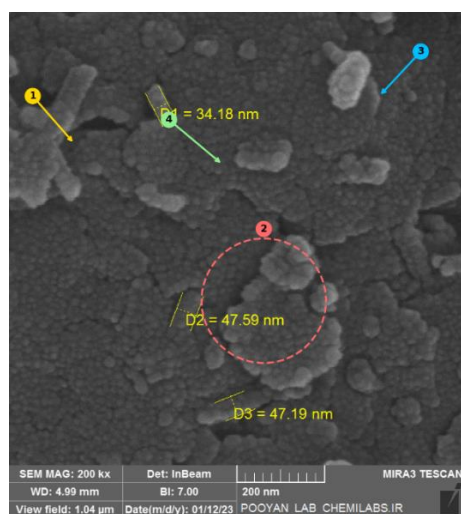
در شکل (۵) (مقیاس $2\ \mu\text{m}$)، نمای وسیع‌تری از میکرو ساختار خاک رس خام قابل مشاهده است. دو پیکان زرد (۱) و (۲) هر کدام، به یک میله بلند کریستالی در بخش بالایی تصویر اشاره دارند که با جهت‌گیری‌های متفاوت در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و با درخشندگی بیشتری نسبت به زمینه رسی دیده می‌شوند. کادر آبی (۳) در گوشه بالا - چپ، خوشه‌ای متراکم از صفحات رسی را مشخص می‌کند که در آن صفحات با جهت‌گیری‌های مختلف در کنار هم قرار گرفته و بافتی ناهموار و چند لایه ایجاد کرده‌اند. پیکان قرمز (۴) به یک صفحه بزرگ در بخش مرکز - چپ تصویر، اشاره دارد که سطحی نسبتاً صاف‌تر از خوشه‌های متراکم اطراف دارد. پیکان سبز (۵) یک فضای متخلخل باز را در مرکز - راست تصویر نشان می‌دهد که میان دو خوشه بزرگ قرار گرفته است. همچنین، پیکان نارنجی (۶) در پایین - چپ تصویر، به ناحیه‌ای از ماتریکس ریزدانه اشاره دارد که در آن ذرات کوچک‌تر به صورت متراکم و بدون نظم مشخص در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

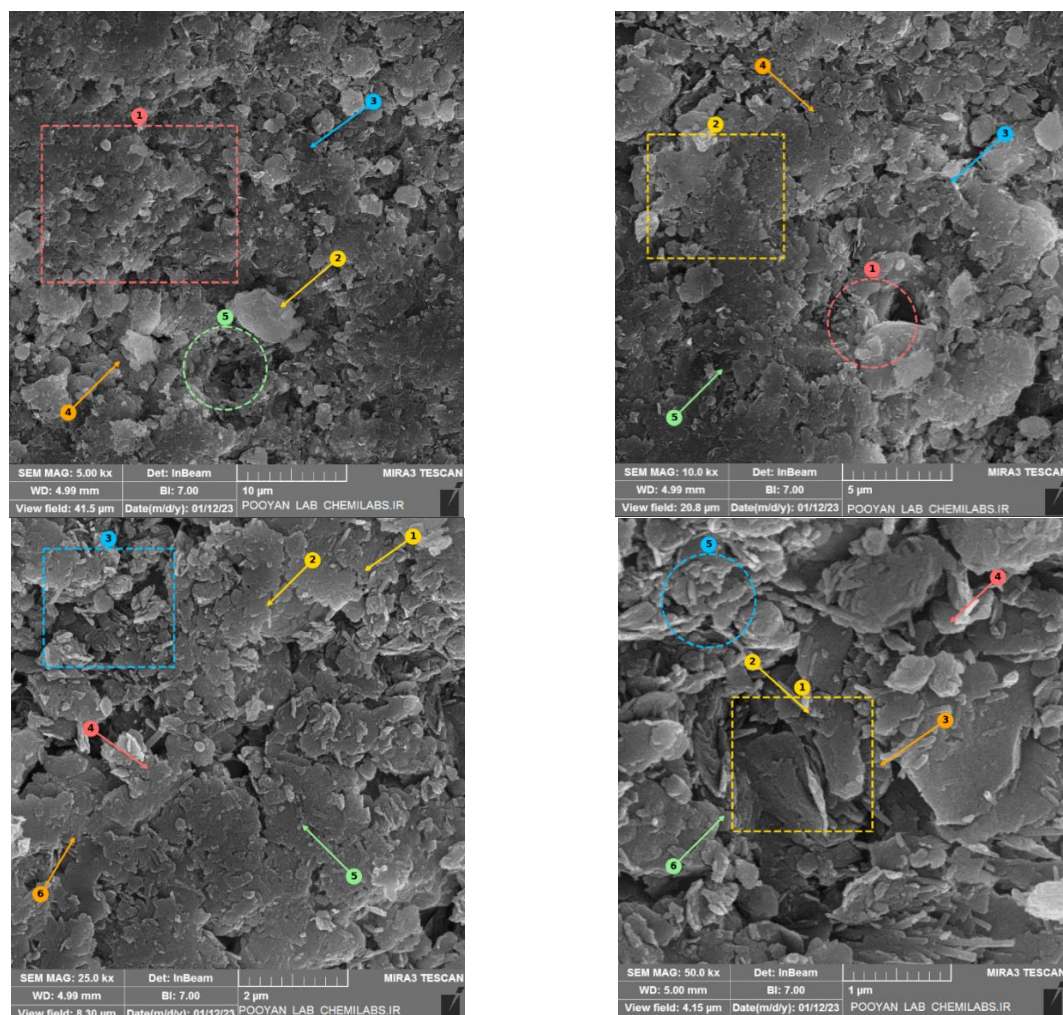
در شکل (۵) (مقیاس $1\ \mu\text{m}$)، میکرو ساختار خاک رس خام تنوع مورفولوژیکی قابل توجهی را نشان می‌دهد. کادر زرد (۱) ناحیه‌ای از سطح را مشخص می‌کند که در آن یک صفحه بزرگ رسی در وضعیت رو به دوربین قرار گرفته است. سطح این صفحه تیره و نسبتاً صاف بوده و فاقد پوشش متراکم ذرات ثانویه است. مشخص‌ترین ویژگی تصویر، حضور ساختارهای

در چرخه‌های تر و خشک را افزایش می‌دهد (Gens and Alonso, 1992). مقایسه تصاویر SEM با نتایج XRD و داده‌های تورم این پژوهش نشان می‌دهد که حضور اسمکتیت در نتایج XRD، همراه با فضاهای خالی ریز بین ورقه‌های موازی و توده‌های فلوکوله در تصاویر SEM، با رفتار تورمی مشاهده شده سازگار است. در چرخه‌های تر و خشک، بازآرایی فضاهای ریز، ورود و خروج آب بین لایه‌ها و تغییر ضخامت لایه‌های آب جذب شده می‌تواند در ایجاد تورم نقش داشته باشد (Huang et al., 1986; Subba Rao and Satyadas, 1987). همچنین، دانه‌های کوارتز و فلدسپار در شبکه رسی به صورت فازهای سخت عمل کرده و مرزهایی بین این دانه‌ها و زمینه رسی ایجاد می‌کنند که می‌تواند بر تمرکز تنش، ترک خوردگی و یکنواختی تورم در مقیاس میکروسکوپی اثرگذار باشد (Jeremias and Cripps, 2023; Huang et al., 1986).

در چرخه‌های تر و خشک را افزایش می‌دهد (Gens and Alonso, 1992). مقایسه تصاویر SEM با نتایج XRD و داده‌های تورم این پژوهش نشان می‌دهد که حضور اسمکتیت در نتایج XRD، همراه با فضاهای خالی ریز بین ورقه‌های موازی و توده‌های فلوکوله در تصاویر SEM، با رفتار تورمی مشاهده شده سازگار است. در چرخه‌های تر و خشک، بازآرایی فضاهای ریز، ورود و خروج آب بین لایه‌ها و تغییر ضخامت لایه‌های آب جذب شده می‌تواند در ایجاد تورم نقش داشته باشد (Huang et al., 1986; Subba Rao and Satyadas, 1987).

همچنین، دانه‌های کوارتز و فلدسپار در شبکه رسی به صورت فازهای سخت عمل کرده و مرزهایی بین این دانه‌ها و زمینه رسی ایجاد می‌کنند که می‌تواند بر تمرکز تنش، ترک خوردگی و یکنواختی تورم در مقیاس میکروسکوپی اثرگذار باشد (Jeremias and Cripps, 2023; Huang et al., 1986).





شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه بکر در مقیاس ۱ µm، ۲ µm، ۵ µm، ۱۰ µm، ۵۰۰ nm و ۲۰۰ nm
 Fig. 5. Scanning electron microscope (SEM) images of the undisturbed sample at scales of 1 µm, 2 µm, 5 µm, 10 µm, 500 nm, and 200 nm

مرحله‌ای در تورم اشاره کرده‌اند که با یافته این پژوهش هم‌خوانی دارد (Mesri et al., 1994).

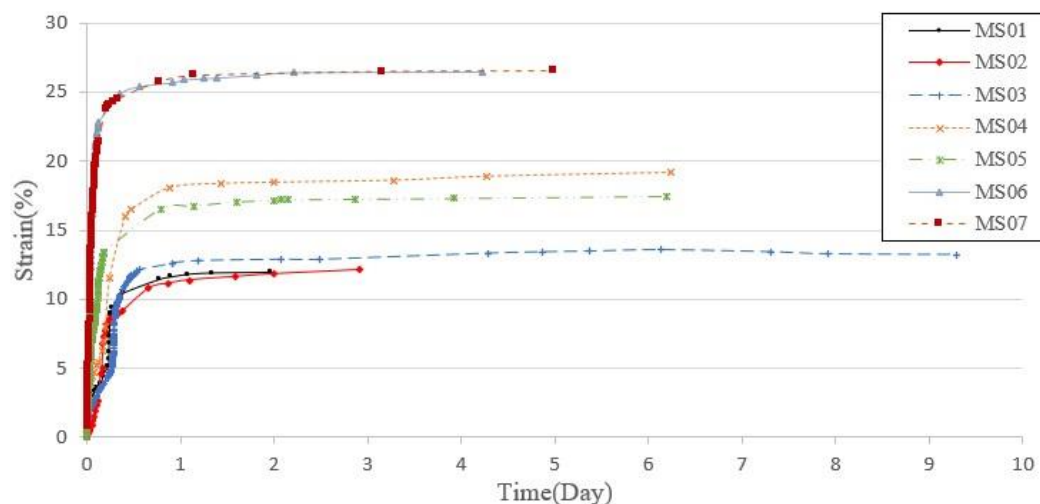
با توجه به مشابهت ترکیب کانی‌شناسی و نزدیکی رطوبت اولیه نمونه‌های بکر (جدول ۳)، پراکندگی قابل توجه در کرنش نهایی (۱۲ تا ۱۹/۱۸ درصد) مشاهده می‌شود که این یکسان نبودن نتایج عمدتاً ناشی از جهت نمونه‌گیری نسبت به لایه‌بندی طبیعی گل‌سنگ است. وانگ و همکاران نیز در مطالعاتی بر روی گل‌سنگ قرمز چین نشان دادند که در گل‌سنگ‌های لایه‌ای، مسیرهای نفوذ آب و گسترش تورم در نمونه‌های موازی با لایه‌بندی با نمونه‌های عمود بر آن تفاوت اساسی دارد و این عامل اصلی پراکندگی نتایج در نمونه‌های بکر است (wang et al., 2024).

نتایج تورم آزاد تحت بار قائم ثابت

آزمایش‌های تورم آزاد بر روی نمونه‌های بکر و بازسازی‌شده گل‌سنگ مسجدسلیمان تحت تنش قائم ۱ کیلوپاسکال انجام شد و تغییر شکل محوری نمونه‌ها در طول زمان ثبت گردید (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که حداکثر کرنش تورمی در نمونه‌های بکر بین ۱۲ تا ۱۹/۱۸ درصد متغیر است. نمونه MS05 با حدود ۱۹/۱۸ درصد و نمونه MS01 با حدود ۱۲ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین کرنش را در این گروه نشان دادند. بیش از ۷۰ درصد کرنش نهایی در ۶ ساعت اول رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تورم اولیه سریع و سپس تورم ثانویه با نرخ بسیار کند است. مرسی و همکاران نیز در مطالعه کلاسیک خود بر روی گل‌سنگ تیلور به همین الگوی دو

این افزایش چشمگیر ناشی از بازآرایی ذرات و از بین رفتن پیوندهای طبیعی است (Chen, 1975; Gens and Alonso, 1992).

در نمونه‌های بازسازی شده MS06 و MS07 با دانسیته ۱/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب و رطوبت صفر، حداکثر کرنش تورمی به ۲۶/۶ درصد می‌رسد که به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های بکر است.

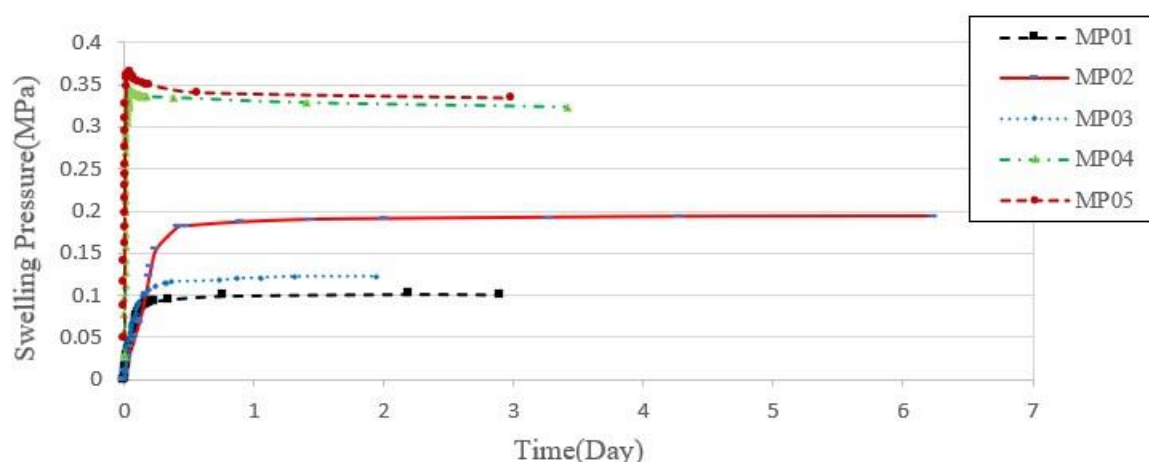


شکل ۶. منحنی‌های کرنش تورمی بر حسب زمان برای نمونه‌های بکر و بازسازی شده تحت بار ثابت ۱ کیلوپاسکال
Fig. 6. Swelling strain versus time curves for undisturbed and remolded specimens under constant load of 1 kPa

ذرات و از بین رفتن ساختار طبیعی بر افزایش فشار تورمی است. زو و همکاران نیز با بررسی مکانیسم‌های تورم گل سنگ در اثر برهم‌کنش آب - سنگ نشان دادند که بازسازی نمونه با حذف ساختار طبیعی، باعث افزایش فشار تورمی می‌شود که با یافته این پژوهش همخوان است (Zuo et al., 2025). از دیدگاه کیفی، نمونه‌های بکر با حفظ ساختار طبیعی و ناپیوستگی‌ها، بخشی از انبساط را در ناپیوستگی‌ها و ریز ترک‌ها مستهلک کرده و فشار تورمی کمتری تولید می‌کنند، در حالی که نمونه‌های بازسازی شده با ساختاری همگن و فاقد ناپیوستگی، فشار تورمی بیشتری ایجاد می‌کنند (Mesri et al., 1994; Erguler and Ulusay, 2003).

فشار تورمی در کرنش صفر

نتایج آزمایش‌های فشار تورمی در شرایط کرنش صفر (شکل ۷) نشان می‌دهد که فشار تورمی در نمونه‌های بکر بین ۰/۱۰ تا ۰/۱۹ مگاپاسکال متغیر است. این اختلاف در فشار تورمی، با توجه به مشابهت ترکیب کانی‌شناسی و نزدیکی رطوبت اولیه نمونه‌ها، همان‌طور که در بخش قبلی نیز بیان شد، عمدتاً ناشی از جهت نمونه‌گیری نسبت به لایه‌بندی طبیعی گل سنگ است. در مقابل، نمونه‌های بازسازی شده MP04 و MP05 فشار تورمی به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۳۳ مگاپاسکال تولید کردند که حدود سه برابر نمونه‌های بکر است. این افزایش چشمگیر نشان دهنده تأثیر مستقیم بازآرایی



شکل ۷. نتایج آزمایش فشار تورمی در شرایط کرنش صفر برای نمونه‌های بکر و بازسازی شده
Fig. 7. Swelling pressure test results under zero strain condition for undisturbed and remolded specimens

و فشار تورمی را نمی‌توان در گل‌سنگ بختیاری دو شاخص معادل یا تابع ساده‌ای از یکدیگر در نظر گرفت. به این منظور پایین بودن یکی از این شاخص‌ها در این سازند، نمی‌تواند دلیلی بر پایین بودن شاخص دیگر باشد. این موضوع اهمیت تفکیک میان پتانسیل تغییر شکل تورمی و توانایی ایجاد فشار تورمی را در ارزیابی گل‌سنگ بختیاری نشان می‌دهد.

این رفتار را می‌توان با توجه به تفاوت در شرایط اولیه و وضعیت ساختاری نمونه‌ها و تفسیر کرد. در نمونه‌های بکر پژوهش حاضر، ساختار طبیعی و آرایش اولیه ذرات و فضاهای خالی حفظ شده است. در شرایط تورم آزاد، بخشی از پتانسیل تورمی می‌تواند از طریق تغییر شکل و افزایش حجم نمونه آزاد شود، در حالی که در شرایط مقید، تنها بخشی از همین پتانسیل می‌تواند به فشار تورمی تبدیل شود. از این دیدگاه، وضعیت ساختاری نمونه می‌تواند در تعیین نحوه بروز پتانسیل تورمی، یعنی به صورت تغییر شکل یا فشار، نقش داشته باشد. نقش ساختار و ناپیوستگی‌های موجود در کنترل پاسخ تورمی سنگ‌های رسی و گل‌سنگ‌ها نیز در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است (Mesri et al., 1994).

از دیدگاه مهندسی، این یافته اهمیت مستقیمی برای ارزیابی رفتار گل‌سنگ بختیاری در سازه‌های زیرزمینی دارد. نتایج آزمایش تورم آزاد می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره پتانسیل تغییر شکل فراهم کند، اما استفاده مستقیم از این نتایج برای برآورد فشار وارد بر پوشش یا سازه نگهدارنده، بدون در نظر گرفتن شرایط مقید و

عدم هم‌جهتی تورم آزاد و فشار تورمی در گل‌سنگ بختیاری

یکی از فرض‌های رایج در ارزیابی ژئوتکنیکی سنگ‌های متورم شونده این است که ظرفیت تغییر شکل تورمی و توانایی ایجاد فشار در شرایط مقید، روند مشابهی داشته باشند؛ به این معنا که نمونه‌ای با کرنش تورمی بیشتر، در شرایط مقید نیز فشار تورمی بالاتری ایجاد کند. نتایج پژوهش حاضر و مقایسه آن با داده‌های موجود برای سازند بختیاری نشان می‌دهد که این دو پارامتر الزاماً هم‌جهت نیستند و نمی‌توان تورم آزاد را شاخص مستقیمی برای برآورد فشار تورمی در نظر گرفت.

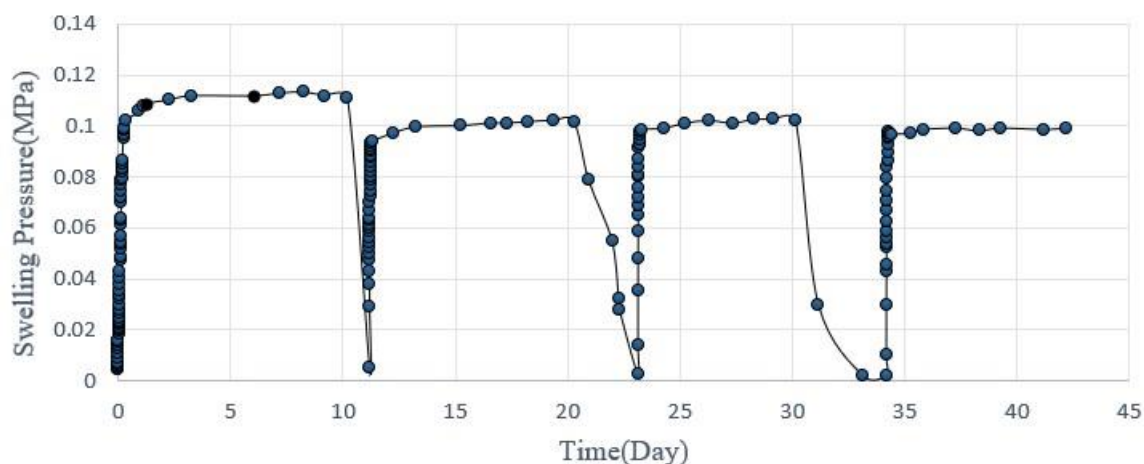
در پژوهش حاضر، نمونه‌های بکر با رطوبت طبیعی ۵ تا ۷ درصد، تحت بار ثابت ۱ کیلوپاسکال، کرنش تورمی بین ۱۲ تا ۱۹ درصد را در آزمایش تورم آزاد نشان دادند؛ در حالی که فشار تورمی این نمونه‌ها در محدوده ۰/۱ تا ۰/۱۹ مگاپاسکال قرار داشت. در مقابل، دوست‌محمدی و همکاران در مطالعه‌ای بر روی نمونه‌های گل‌سنگ سازند بختیاری، آزمایش تورم را تحت بار ثابت ۵ کیلوپاسکال انجام دادند و برای یکی از نمونه‌ها، در چرخه نخست، کرنش تورمی حدود ۰/۵ درصد و فشار تورمی حدود ۰/۶ مگاپاسکال را گزارش کردند. با توجه به تفاوت بار اعمال شده در دو مطالعه، مقایسه مستقیم و کمی مقادیر کرنش تورمی آن‌ها مناسب نیست؛ با این حال، قرار دادن این نتایج در کنار یکدیگر نشان می‌دهد که کرنش تورمی بیشتر، لزوماً با فشار تورمی بیشتر همراه نیست. به عبارت دیگر، تورم آزاد

نشان‌دهنده انعطاف پذیری بالای ساختار طبیعی در برابر چرخه‌های رطوبتی است. در نمونه‌های بکر، ناپیوستگی‌های طبیعی، فضای کافی برای جذب انبساط و توزیع تنش فراهم می‌کنند و از کاهش شدید فشار جلوگیری می‌نمایند. دیف و بلومل نیز در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های متورم نشان دادند که نمونه‌های با ساختار طبیعی، به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها، سریع‌تر به تعادل می‌رسند و کاهش فشار در آن‌ها محدود است (Dif and Bluemel, 1991). همچنین، شهسوایی و همکاران با مطالعه ریزساختاری خاک‌های رسی متورم‌شونده نشان دادند که ساختار طبیعی با داشتن ناپیوستگی‌ها، از تخریب سریع ساختار جلوگیری کرده و تغییرات فشار را به حداقل می‌رساند (Shahsavani et al., 2020).

وضعیت اولیه نمونه، می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد. بنابراین، در مواردی که هدف اصلی ارزیابی بار تورمی وارد بر سازه است، اندازه‌گیری مستقیم فشار تورمی در شرایط مقید و با توجه به وضعیت ساختاری و شرایط اولیه نمونه در این سازند ضروری است.

رفتار چرخه‌ای تر - خشک فشار تورمی نمونه‌های بکر

نتایج چرخه‌های تر - خشک بر روی نمونه‌های بکر (شکل ۸) نشان می‌دهد که فشار تورمی در چرخه اول ۰/۱۱۲ مگاپاسکال است. این مقدار در چرخه دوم به ۰/۱۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد و در چرخه‌های سوم و چهارم نیز در همین محدوده باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، پس از دو چرخه، فشار تورمی تقریباً به حالت پایدار می‌رسد و کاهش کلی آن حدود ۱۰ درصد است. این تثبیت سریع



شکل ۸. تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های متوالی تر و خشک برای نمونه بکر

Fig. 8. Swelling pressure variations during successive wetting and drying cycles for undisturbed specimen

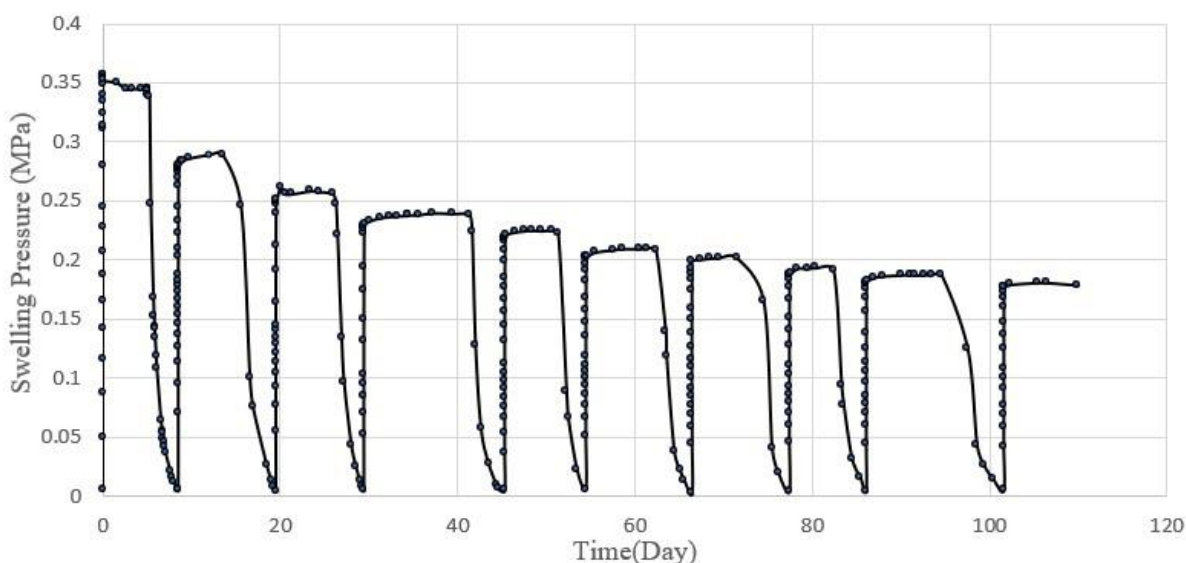
حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در نمونه‌های بازسازی‌شده، به دلیل نبود ساختار طبیعی و بازآرایی تدریجی ذرات، تعداد سیکل‌های بیشتری برای رسیدن به تعادل مورد نیاز است. در این نمونه‌ها، با حذف ناپیوستگی‌ها، تورم به طور کامل در ماتریس رسی متمرکز می‌شود و هر چرخه تر - خشک، بخشی از ذرات را باز آرایشی کرده و پیوندهای جدیدی ایجاد می‌کند. این فرایند تا زمانی که ساختار جدید به تعادل برسد ادامه می‌یابد و به همین دلیل، کاهش فشار در این گروه چشمگیرتر است. یزدان دوست و یثربی در بررسی خاک‌های رسی تثبیت شده با پلیمر نشان دادند که نمونه‌های

نمونه‌های بازسازی‌شده

در نمونه‌های بازسازی‌شده (شکل ۹)، فشار تورمی در چرخه اول ۰/۳۳ مگاپاسکال است که به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های بکر می‌باشد. این مقدار در چرخه دوم به ۰/۲۹ مگاپاسکال، در چرخه سوم به ۰/۲۶ مگاپاسکال، در چرخه چهارم به ۰/۲۴ مگاپاسکال، در چرخه پنجم به ۰/۲۳ مگاپاسکال و در چرخه ششم به ۰/۲۱ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. از چرخه ششم به بعد، فشار تورمی به محدوده ۰/۱۷۴ مگاپاسکال در سیکل یازدهم می‌رسد. به عبارت دیگر، فشار تورمی در نمونه‌های بازسازی‌شده پس از یازده چرخه

دوست‌محمدی و همکاران نیز در مطالعه‌ای بر روی گل‌سنگ‌های سازند بختیاری مسجدسلیمان، به تأثیر ساختار اولیه بر تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای تثبیت اشاره کرده‌اند (Doostmohammadi et al., 2009).

بازسازی‌شده برای تثبیت به سیکل‌های بیشتری نیاز دارند و کاهش فشار در آنها چشمگیرتر است (Yazdandoust and Yasrobi, 2010). همچنین، سوبارائو و ساتیادس به تأثیر بازآرایی ذرات در کاهش تدریجی فشار تورمی اشاره کرده‌اند که با یافته این پژوهش هم‌خوانی دارد (Subba Rao and Satyadas, 1987).



شکل ۹. تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های متوالی تر و خشک برای نمونه بازسازی‌شده

Fig. 9. Swelling pressure variations during successive wetting and drying cycles for remolded specimen

به طوری که فشار تورمی از حدود ۰/۳۳ مگاپاسکال در چرخه نخست به حدود ۰/۱۷۴ مگاپاسکال در چرخه یازدهم کاهش یافت. در مجموع، برخلاف روند افزایش و سپس تثبیت گزارش شده در مطالعه دوست‌محمدی و همکاران، هر دو گروه نمونه در پژوهش حاضر روند کلی کاهش را نشان دادند.

یکی از عوامل محتمل برای تبیین این تفاوت، وضعیت رطوبتی اولیه نمونه‌ها است. نمونه‌های مطالعه دوست‌محمدی و همکاران دارای رطوبت اولیه صفر بوده‌اند، در حالی که نمونه‌های بکر پژوهش حاضر دارای رطوبت طبیعی حدود ۵ تا ۷ درصد بودند. این تفاوت می‌تواند وضعیت اولیه هیدراتاسیون کانی‌های رسی و نحوه پاسخ آن‌ها به نخستین مرحله تر شدن را تحت تأثیر قرار دهد. در نمونه‌ای که آزمایش از حالت کاملاً خشک آغاز می‌شود، آگیری اولیه کانی‌های رسی می‌تواند با تغییر در وضعیت ساختاری و هیدرو مکانیکی نمونه

تفاوت روند تکامل فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک و نقش شرایط اولیه نمونه

مطالعه دوست‌محمدی و همکاران نشان داد که فشار تورمی گل‌سنگ سازند بختیاری مسجدسلیمان، در چرخه‌های متوالی تر - خشک روند یکنواختی ندارد؛ به طوری که در چرخه‌های ابتدایی افزایش می‌یابد و سپس به محدوده‌ای نسبتاً پایدار نزدیک می‌شود (Doostmohammadi et al., 2009). این روند با رفتار مشاهده شده در پژوهش حاضر متفاوت است. در نمونه‌های بکر این مطالعه، فشار تورمی از ۰/۱۱۲ مگاپاسکال در چرخه نخست به ۰/۱ مگاپاسکال در چرخه دوم کاهش یافت و پس از آن تقریباً ثابت ماند؛ بنابراین، میزان کاهش فشار تورمی در این نمونه‌ها حدود ۱۰ درصد بود. در نمونه‌های بازسازی‌شده نیز کاهش فشار تورمی مشاهده شد؛

نمونه‌های بکر و بازسازی‌شده بررسی شد. نتایج XRD نشان داد که گل‌سنگ مورد مطالعه دارای زمینه کربناته با ۴۴ تا ۴۶ درصد کلسیت و کانی‌های رسی فعال شامل مونتموریلونیت (۱۰ تا ۱۲ درصد) و ایلیت (۸ تا ۱۰ درصد) است. فازهای کربناته با پرکردن منافذ و ایجاد زمینه سیمانی، پتانسیل تورم را محدود می‌کنند، در حالی که کانی‌های رسی فعال منابع اصلی ظرفیت تورمی هستند. تصاویر SEM نیز وجود بافت فلوکوله و پراکنده را نشان داد که با نتایج کانی‌شناسی و رفتار تورمی نمونه‌ها هم‌خوان است.

نمونه‌ها دارای حد روانی (LL) در محدوده ۴۰ تا ۴۷ درصد، حد خمیری (PL) در محدوده ۱۹ تا ۲۳ درصد، شاخص خمیری (PI) در محدوده ۲۱ تا ۲۴ درصد و وزن مخصوص گل‌سنگ در محدوده ۲/۵۷ تا ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند. نمونه‌های دارای درصد بالاتر کانی‌های رسی فعال، شاخص خمیری بالاتری نشان دادند که با یافته‌های پیشین هم‌خوان است.

در نمونه‌های بکر، حداکثر کرنش تورمی بین ۱۲ تا ۱۹/۱۸ درصد متغیر بود و بیش از ۷۰ درصد تورم در ۶ ساعت نخست رخ داد. با توجه به مشابهت نسبی کانی‌شناسی و رطوبت اولیه نمونه‌ها، پراکندگی نتایج این گروه عمدتاً به جهت نمونه‌گیری نسبت به لایه‌بندی طبیعی نسبت داده شد. در مقابل، حداکثر کرنش تورمی در نمونه‌های بازسازی‌شده به ۲۶/۶ درصد رسید که به طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های بکر بود. همین تفاوت در فشار تورمی نیز مشاهده شد؛ به طوری که نمونه‌های بکر فشار تورمی بین ۰/۱ تا ۰/۱۹ مگاپاسکال ایجاد کردند، در حالی که فشار تورمی نمونه‌های بازساخته حدود ۰/۳۲ تا ۰/۳۳ مگاپاسکال بود. افزایش هم‌زمان تورم آزاد و فشار تورمی در نمونه‌های بازسازی‌شده را می‌توان به تغییر ساختار اولیه، بازآرایی ذرات و از بین رفتن بخشی از پیوندهای طبیعی نسبت داد و نشان‌دهنده نقش ساختار طبیعی گل‌سنگ در محدود کردن ظرفیت تورمی آن است.

در چرخه‌های تر - خشک، نمونه‌های بکر پس از دو چرخه به وضعیت نسبتاً پایدار رسیدند و فشار تورمی حدود ۱۰ درصد کاهش یافت، در حالی که در نمونه‌های بازسازی‌شده کاهش فشار تورمی تا چرخه یازدهم ادامه داشت و کاهش کلی حدود ۵۰ درصد بود. این تفاوت نشان می‌دهد که وضعیت ساختاری نمونه می‌تواند بر شدت

همراه باشد؛ در حالی که در نمونه‌ای با رطوبت طبیعی، بخشی از فرایند آگیری، پیش از آغاز آزمایش رخ داده است. از این رو، تفاوت در وضعیت رطوبتی اولیه می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر پاسخ نمونه در نخستین چرخه و روند تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های بعدی باشد.

با این حال، تفاوت مشاهده شده را نمی‌توان تنها به رطوبت اولیه نسبت داد. نمونه‌های مورد بررسی در دو مطالعه از نظر ترکیب کانی‌شناسی، وضعیت ساختاری و شرایط آزمایش نیز تفاوت‌هایی دارند و سهم مستقل هر یک از این عوامل در مقایسه حاضر قابل تفکیک نیست. افزون بر این، در پژوهش حاضر نمونه‌های بکر و بازسازی‌شده، با وجود تفاوت در وضعیت ساختاری، هر دو روند کلی کاهش فشار تورمی را نشان دادند؛ هرچند شدت این کاهش در آن‌ها متفاوت بود. فشار تورمی نمونه‌های بکر حدود ۱۰ درصد کاهش یافت، در حالی که میزان کاهش در نمونه‌های بازسازی‌شده بعد از یازده سیکل به حدود ۵۰ درصد رسید. این تفاوت نشان می‌دهد که وضعیت ساختاری نمونه نیز می‌تواند در شدت تغییرات فشار تورمی طی چرخه‌های متوالی نقش داشته باشد.

بنابراین، اگرچه داده‌های موجود امکان تعیین سهم مستقل رطوبت اولیه، ساختار و کانی‌شناسی را فراهم نمی‌کنند، مقایسه دو مطالعه نشان می‌دهد که روند تکامل فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک را نمی‌توان رفتاری ثابت و عمومی برای گل‌سنگ سازند بختیاری در نظر گرفت. شرایط اولیه نمونه، از جمله وضعیت رطوبتی و ساختاری، می‌تواند بر جهت و شدت تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های متوالی اثرگذار باشد. این موضوع از نظر مهندسی اهمیت دارد، زیرا استفاده از نتایج یک آزمایش چرخه‌ای با شرایط اولیه مشخص برای پیش‌بینی رفتار بلند مدت گل‌سنگ در شرایط متفاوت می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد؛ بنابراین، لازم است شرایط اولیه نمونه در طراحی آزمایش و تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار تورمی گل‌سنگ‌های سازند بختیاری برداشت شده از مغار نیروگاه مسجدسلیمان با انجام آزمایش‌های تورم آزاد، فشار تورمی در شرایط کرنش صفر و چرخه‌های تر - خشک بر روی

وضعیت رطوبتی اولیه و ساختار طبیعی نمونه می‌توانند در نحوه تغییر فشار تورمی طی چرخه‌های متوالی نقش داشته باشند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار تورمی گل‌سنگ سازند بختیاری مسجدسلیمان حاصل برهم کنش ترکیب کانی شناسی، ساختار طبیعی، وضعیت رطوبتی اولیه و شرایط آزمایش است. تفاوت محسوس رفتار نمونه‌های بکر و بازسازی شده و همچنین تفاوت روند فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک نشان می‌دهد که شرایط اولیه نمونه نقش مهمی در نحوه بروز و تکامل پتانسیل تورمی دارد. از نظر مهندسی، این یافته‌ها نشان می‌دهند که برای ارزیابی فشارهای ناشی از تورم در سازه‌های زیرزمینی، استفاده از نتایج تورم آزاد به تنهایی کافی نیست و شرایط ساختاری و رطوبتی اولیه نمونه نیز باید در طراحی آزمایش و تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. بررسی کنترل شده اثر رطوبت اولیه، با ثابت نگه داشتن سایر متغیرها، می‌تواند در پژوهش‌های آینده به تفکیک نقش این عامل در تکامل فشار تورمی طی چرخه‌های تر - خشک کمک کند.

قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقای مهندس یعقوب عرب، مدیریت محترم بهره برداری و علاج بخشی سد مسجدسلیمان، به خاطر همکاری‌های صمیمانه و مساعدت‌های مؤثر ایشان در فراهم سازی زمینه‌های اجرایی این پژوهش، ابراز می‌دارند. بدون همراهی ایشان، انجام این پژوهش میسر نمی‌شد.

تغییرات فشار تورمی در اثر تکرار چرخه‌های رطوبتی تأثیرگذار باشد.

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعه دوست‌محمدی و همکاران، که بر روی گل‌سنگ سازند بختیاری در محدوده مسجدسلیمان انجام شده است، دو نکته مهم را آشکار می‌کند. نخست، تورم آزاد و فشار تورمی شاخص‌های معادل یکدیگر نیستند؛ به عبارت دیگر، پایین بودن مقدار یکی از این دو شاخص در گل‌سنگ سازند بختیاری، لزوماً به معنای پایین بودن شاخص دیگر نیست. این موضوع نشان می‌دهد که پتانسیل تغییر شکل ناشی از تورم و توانایی نمونه در ایجاد فشار تورمی، اگرچه هر دو تحت تأثیر ویژگی‌های تورم پذیری ماده قرار دارند، می‌توانند تحت تأثیر شرایط متفاوتی قرار گیرند. بنابراین، برای ارزیابی فشارهای ناشی از تورم در گل‌سنگ سازند بختیاری، اتکا به نتایج آزمایش تورم آزاد به تنهایی کافی نیست و تعیین مستقیم فشار تورمی اهمیت دارد. دوم، روند تغییرات فشار تورمی در چرخه‌های تر - خشک در دو پژوهش متفاوت است. دوست‌محمدی و همکاران برای گل‌سنگ سازند بختیاری مسجدسلیمان، روند افزایش و سپس تثبیت فشار تورمی را گزارش کردند، در حالی که در پژوهش حاضر، فشار تورمی در هر دو گروه نمونه‌های بکر و بازسازی شده با افزایش تعداد چرخه‌ها روند کاهشی را نشان داده است. این تفاوت در روند تغییرات، با توجه به تفاوت شرایط اولیه و وضعیت ساختاری نمونه‌ها در دو مطالعه، نشان می‌دهد که رفتار فشار تورمی طی چرخه‌های تر - خشک در این سازند را نمی‌توان مستقل از شرایط اولیه نمونه تفسیر کرد. به ویژه،

References

- ASTM D4546-14. (2014). Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4546-14>
- ASTM D4829-11. (2011). Standard Test Method for Expansion Index of Soils. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4829-11>
- Al-Mukhtar, M., Khatib, S., & Alcover, J.F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139-140, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Chen, F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company. <https://books.google.com/books?id=C30h1HpQvDUC>
- Doostmohammadi, R., Moosavi, M., Mutschler, T., & Osan, C. (2009). Influence of cyclic wetting and drying on swelling behavior of mudstone in south west of Iran. *Environmental Geology*, 58(5), 999-1009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1579-3>
- Dif, A. E., & Bluemel, W. F. (1991). Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, 14(1), 96-102. <https://doi.org/10.1520/GTJ10196J>
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2003). A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay. *Engineering Geology*, 67(3-4), 331-352. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00205-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00205-3)
- Gens, A., & Alonso, E. E. (1992). A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(6), 1013-1032. <https://doi.org/10.1139/t92-120>
- Huang, S. L., Aughenbaugh, N. B., & Rockaway, J. D. (1986). Swelling pressure studies of shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &*

- Geomechanics Abstracts, 23(5), 371-377. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90005-7)
- ISRM. (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16(2), 141-156. <https://w.isrm.net/page/show/1305>
- Jeremias, F. T., & Cripps, J. (2023). Laboratory testing and classification of mudrocks: a review. Geotechnics, 3(3), 781-807. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3030043>
- Madsen, F. T., & Müller-Vonmoos, M. (1989). The swelling behaviour of clays. Applied Clay Science, 4(2), 143-156. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0169-1317(89)90005-7)
- Mesri, G., Pakbaz, M. C., & Cepeda-Diaz, A. F. (1994). Meaning, measurement and field application of swelling pressure of clay shales. Géotechnique, 44(1), 129-145. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.1.129>
- Rao, B. H., Reddy, P. S., Mohanty, B., & Reddy, K. R. (2021). Combined effect of mineralogical and chemical parameters on swelling behaviour of expansive soils. Scientific Reports, 11(1), 16562. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95746-5>
- Subba Rao, K. S., & Satyadas, G. C. (1987). Swelling potential with cycles of swelling and partial shrinkage. Proceedings of the 6th International Conference on Expansive Soils, Vol. 1, New Delhi, India, 137-142. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19901940639>
- Shahsavani, S., Vakili, A. H., & Mokhberi, M. (2020). The effect of wetting and drying cycles on the swelling-shrinkage behavior of the expansive soils improved by nanosilica and industrial waste. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 79(9), 4765-4781. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01851-6>
- Teich-McGoldrick, S. L., Greathouse, J. A., Jove-Colon, C. F., & Cygan, R. T. (2015). Swelling properties of montmorillonite and beidellite clay minerals from molecular simulation: comparison of temperature, interlayer cation, and charge location effects. The Journal of Physical Chemistry C, 119(36), 20880-20891. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03253>
- Wang, Z., Song, J., Qiu, E., Peng, Z., Qu, M., Li, Y., Wan, X., Yan, Z., & Lu, J. (2024). Experimental study on anisotropic deformation behavior and microstructure evolution of red-bed mudstone. KSCE Journal of Civil Engineering, 28(12), 5480-5499. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0686-3>
- Yazdandoust, F., & Yasrobi, S. S. (2010). Effect of cyclic wetting and drying on swelling behavior of polymer-stabilized expansive clays. Applied Clay Science, 50(4), 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.09.006>
- Zuo, Q., Zhou, X., Chen, Z., Li, Z., Li, P., Deng, M., & Wang, B. (2025). Macro-micro mechanisms and damage modeling of mudstone swelling under water-rock interaction. Geotechnical and Geological Engineering, 43(8), 447. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03433-3>