



Research Paper

Petroleum Research

Petroleum Research, 2026 (February-March), Vol. 35, No. 145, 22-24

DOI: 10.22078/pr.2025.5679.3519

Investigation of the Behavior of Bentonite and Kaolinite Clays Against Low Salinity Water Flooding at High Temperature Using a Micro-model

Farshad Mostakhdemin hosseini, Yousef Rafiei and Mohammad Sharifi

Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

y.rafiei@aut.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5679.3519

Received: May 12, 2025

Modify Date: August 14, 2025

Accepted: September 03, 2025

Introduction

The continuous increase in global energy demand, coupled with the progressive depletion of easily recoverable hydrocarbon reserves, has necessitated the development of advanced Enhanced Oil Recovery (EOR) strategies to maximize extraction from existing fields. Among various EOR techniques, Low Salinity Water Flooding (LSWF) has garnered substantial attention due to its cost-effectiveness, environmental compatibility, and promising field results [1]. LSWF operates by modifying the physicochemical interactions between reservoir rock, brine, and crude oil, thereby facilitating improved displacement efficiency. However, despite its potential, the success of LSWF is highly contingent upon several factors, including the mineralogical composition of the reservoir, the chemistry of the injected water, and the prevailing temperature and pressure conditions. Clay minerals, predominantly bentonite and kaolinite, are ubiquitous in sandstone and carbonate reservoirs. Their presence introduces significant challenges during LSWF operations. These minerals can swell or migrate under altered salinity conditions, leading to pore throat constriction, reduction in permeability, and subsequent formation damage [2,3]. Particularly at elevated temperatures, the swelling behavior of bentonite becomes more pronounced, while kaolinite is primarily prone to detachment and migration. Such phenomena can severely compromise the intended benefits of LSWF and, in some cases, deteriorate reservoir performance rather than enhance it [4].

Previous experimental investigations, largely based on core flooding tests, have elucidated fundamental aspects of clay-fluid interactions [5]. However, a comprehensive and visual understanding under high-temperature conditions reflective of actual reservoir environments remains limited [6]. Furthermore, conventional core flooding techniques often lack the ability to directly visualize pore-scale mechanisms in real time [7]. Furthermore, to address these knowledge gaps, the present study employs glass micromodels, which offer the dual advantages of replicating the pore structure of reservoir rocks and enabling real-time visualization of fluid-rock interactions. By incorporating a custom-designed microfluidic oven to maintain reservoir-representative temperatures, and by systematically varying the ionic composition of the injected brines, this study aims to delineate the coupled effects of ion type and temperature on clay swelling, migration, and the resultant formation damage during LSWF processes. The outcomes are intended to provide actionable insights for the design and optimization of LSWF schemes in clay-rich, high-temperature reservoirs.

Material and Methods

A systematic experimental workflow was established to investigate the behavior of bentonite and kaolinite clays under low salinity water flooding (LSWF) at elevated temperatures. Custom-fabricated glass micromodels were employed to simulate the porous architecture of sandstone reservoirs. Each micromodel

was etched with a triple-layer homogeneous pattern representing different pore throat distributions to mimic the heterogeneity typically observed in subsurface formations. The internal surfaces of the micromodels were coated with either bentonite or kaolinite clays using a controlled suspension injection technique, ensuring consistent and homogeneous coverage. Subsequently, the micromodels underwent a thermal curing process to stabilize the clay layers onto the glass substrate. Moreover, to simulate reservoir thermal conditions, a specially designed microfluidic oven, capable of maintaining precise temperature control while allowing optical access, was utilized to maintain a constant temperature of 70 °C throughout the experiments. Five synthetic formation waters with a salinity of 60,000 ppm were prepared, differing in their dominant cation compositions: NaCl, KCl, CaCl₂, NaCl+CaCl₂, and KCl+CaCl₂. Each brine was injected into the micromodels to establish ionic equilibrium with the clay surfaces, thereby replicating initial reservoir conditions. Following equilibration, distilled water was injected at a controlled flow rate to induce a low-salinity environment. High-resolution digital images were acquired at regular one-hour intervals throughout the flooding process. Advanced digital image processing techniques, including grayscale thresholding, cluster labeling, and quantitative pixel analysis, were applied using MATLAB software to extract porosity, effective porosity, and infer permeability variations over time. In addition, the permeability calculations were based on the Carman-Kozeny equation adapted for micromodel structures. This approach allowed for real-time, pore-scale observation of clay swelling and migration phenomena, enabling a detailed understanding of formation damage mechanisms under realistic operational conditions.

Results and Discussion

The experimental observations revealed distinct behavioral differences between bentonite and kaolinite clays in response to low salinity water flooding at high temperatures. In the bentonite-coated micromodels, exposure to low-salinity conditions triggered both swelling and particle migration phenomena. The presence of sodium ions significantly intensified these effects, leading to severe pore throat blockage, a marked decline in effective porosity, and a substantial reduction in permeability. Notably, the combination of potassium and calcium ions demonstrated a synergistic mitigation effect, effectively stabilizing clay structures and minimizing formation damage. The porosity and permeability reductions in the KCl+CaCl₂ system were considerably less severe compared to the NaCl or NaCl+CaCl₂ systems. In the kaolinite-coated micromodels, swelling was absent due to the mineral's structural properties. However, migration of kaolinite particles posed a major threat to the continuity of

flow pathways. As with bentonite, sodium-dominated brines exacerbated particle detachment and migration, resulting in significant formation damage. The combined use of potassium and calcium ions substantially curtailed clay particle mobility, maintaining higher levels of porosity and permeability throughout the flooding process. Temporal analysis indicated that clay swelling predominantly occurred during the early stages of flooding (first 4–6 hours), whereas particle migration effects became more pronounced in the later stages, corresponding to the progressive dilution of ionic strength within the micromodels. These findings collectively highlight the critical influence of ionic composition on the extent and nature of clay-induced formation damage during LSWF. Moreover, they underscore the necessity of incorporating reservoir-specific clay mineralogy and thermal conditions into the design of optimized injection water formulations.

Conclusions

This study provides a comprehensive experimental investigation into the behavior of bentonite and kaolinite clays under low salinity water flooding (LSWF) at elevated temperatures using micromodel visualization techniques. Through systematic variation of ionic compositions and controlled thermal conditions, critical insights into the pore-scale mechanisms of formation damage were obtained. The results unequivocally demonstrate that the ionic composition of the injected water significantly influences the extent of clay swelling, migration, and overall formation damage. Sodium-dominated systems were found to exacerbate both swelling (in bentonite) and detachment/migration (in kaolinite), leading to severe pore throat blockage and substantial permeability impairment. Conversely, the combined use of potassium and calcium ions proved to be highly effective in stabilizing clay particles, thereby minimizing both swelling and migration phenomena. Furthermore, in bentonite-coated micromodels, the synergistic effect of potassium in controlling swelling and calcium in suppressing particle migration was particularly pronounced. For kaolinite, where swelling is absent, the control of particle detachment was critical, and again, the potassium-calcium combination outperformed other ionic configurations. Importantly, the experimental approach employing glass micromodels at 70 °C enabled direct observation of these processes, highlighting the critical impact of temperature on intensifying clay-induced damage mechanisms. The thermal environment not only accelerated ion exchange dynamics but also amplified swelling and migration tendencies, emphasizing the need to consider reservoir temperature when designing LSWF operations. Overall, the findings of this study underline the necessity of carefully tailoring the chemical composition of injection waters based on

specific reservoir mineralogy and thermal conditions. The incorporation of optimal ionic species, particularly potassium and calcium, offers a viable pathway to mitigate formation damage risks and enhance oil recovery efficiency. This work provides a valuable framework for future design and field implementation of LSWF projects, contributing toward more robust and sustainable EOR strategies.

References

1. Bazvand, P., Ahmadpour, K., Niknam, M.R., Nosrat Panah, B., and Daryasafar, A. (2022). A comprehensive review of smart water injection in carbonate and sandstone reservoirs with a special focus at carbonate reservoirs in South of Iran. *Journal of Petroleum Research*. 32, 124–145. 10.22078/pr.2022.4460.3027.
2. Villero-Mandon, J., Askar, N., Pourafshary, P., and Riazi, M. (2024). Importance of fluid/fluid interactions in enhancing oil recovery by optimizing low-salinity waterflooding in sandstones. *Energies* 17. 10.3390/en17133315.
3. Srivastava, V.R., Sarma, H.K., and Gupta, S.K. (2024). Offshore Basin: A Pilot Study Analysis with Laboratory and. *Energies* 17.
4. Tong, C.-Y., Yang, Y.-F., Zhang, Q., Imani, G., Zhang, L., Sun, H., Zhong, J.-J., Zhang, K., and Yao, J. (2024). Pore-scale fluid distribution and remaining oil during tertiary low-salinity waterflooding in a carbonate. *Journal of Petroleum Science*. 21, 4130–4140. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2024.09.008>.
5. Bovard, S., Abbasi, S., Shahrabadi, A., Talebi, A., and Hosseini, S. (2024). A laboratory study on the effect of low salinity water injection on recovery factor in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Research*. 34, 36–55. 10.22078/pr.2024.5316.3364.
6. Kashiri, R., Kalantariasl, A., Parsaei, R., Ghaedi, M., and Mahdiyar, H. (2020). Experimental investigation of kaolinite clay role in low salinity water flooding: a micromodel study. *Journal of Petroleum Research* 30, 72–83. 10.22078/pr.2020.3890.2772.
7. Mehdizad, A., Sedaee, B., and Pourafshary, P. (2022). Visual investigation of the effect of clay-induced fluid flow diversion on oil recovery, as a low-salinity water flooding mechanism. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 209, 109959. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109959>.

بررسی رفتار رس های بنتونیت و کائولینیت در برابر سیلاب زنی با شور آب رقیق در دمای بالا با استفاده از میکرومدل

فرشاد مستخدمین حسینی، یوسف رفیعی* و محمد شریفی

دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ تاریخ تغییر: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

چکیده

در این پژوهش، تأثیر مهاجرت و تورم کانی‌های رسی بنتونیت و کائولینیت بر آسیب سازند طی تزریق شور آب رقیق در شرایط دمایی بالا بررسی شد. به منظور شبیه‌سازی محیط متخلخل ماسه‌سنگی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای پوشش داده شده با رس و آون میکروفلوئیدیکی در دمای 70°C برای برقراری شرایط دمایی مخزن استفاده گردید. پنج نوع آب سازندی با ترکیبات مختلف یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم تهیه شد و پس از برقراری تعادل یونی با محیط، تزریق آب مقطر به عنوان شور آب رقیق انجام پذیرفت. تغییرات تخلخل، تخلخل مؤثر و تراوایی به کمک پردازش تصاویر ثبت شده طی زمان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نوع یون‌های موجود در سیال تزریقی نقش تعیین کننده‌ای در شدت تورم و مهاجرت رس‌ها دارد. در میکرومدل‌های پوشیده شده با بنتونیت، ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم به طور مؤثری تورم و مهاجرت رس را کنترل نمود، در حالی که در نمونه‌های کائولینیتی نیز این ترکیب کمترین افت در پارامترهای مخزنی را نشان داد چرا که در میکرومدل حاوی بنتونیت، نوسانات تراوایی نسبت به مقدار اولیه آن در حضور سدیم بین $0/9$ تا $1/35$ و در حضور ترکیب پتاسیم و کلسیم بین $0/83$ تا $1/03$ بوده است. در میکرومدل حاوی کائولینیت نیز این نوسانات در حضور سدیم $0/8$ تا $1/1$ و در حضور ترکیب پتاسیم و کلسیم $0/8$ تا 1 ثبت شد. کمتر بودن این نوسانات بیانگر کنترل بهتر آسیب سازند ناشی از تورم و مهاجرت رس‌ها توسط ترکیب پتاسیم و کلسیم است. این تحقیق اهمیت لحاظ نمودن فاکتور دما و نوع کاتیون‌های محیطی در پیش‌بینی آسیب سازندی طی فرآیند تزریق شور آب رقیق را برجسته کرده و چارچوبی عملی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های ازدیاد برداشت فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: تزریق شور آب رقیق، تورم رس، مهاجرت رس، آسیب سازند، میکرومدل.

*مسئول مکاتبات

y.rafi@aut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5679.3519)

مقدمه

رسانی کنند. در عین حال وجود کانی‌های رسی در سنگ مخزن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی فرآیند تزریق شورآب رقیق داشته باشد. کانی‌های رسی نظیر کائولینیت و اسمکتیت ممکن است در طی فرآیند تزریق آب متورم شده و مهاجرت کنند، که این امر می‌تواند منجر به کاهش تراوایی و آسیب سازند گردد [۸، ۹]. با کاهش شوری آب سازندی به کمتر از مقدار بحرانی غلظت نمک^۱، نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی بین سطح سنگ مخزن و کانی‌های رسی تضعیف می‌شوند. این تضعیف منجر به جداسدگی و جابه‌جایی ذرات ریز می‌گردد. علاوه بر این، از طریق سازوکار تورم اسمزی، کانی‌های رسی می‌توانند متورم شده و باعث آسیب به سازند شوند [۱۰].

جداسدگی ذرات ریز از سطح سنگ ناشی از غلبه نیروهای دافعه بر نیروهای جاذبه و از بین رفتن تعادل میان این نیروها است؛ پدیده‌ای که با استفاده از نظریه DLVO قابل تبیین است. این نظریه به ویژگی‌های سیال مانند pH، شوری، ترکیب شیمیایی و همچنین دما وابسته است و تغییر در هر یک از این عوامل می‌تواند بر پایداری سیستم و میزان جداسدگی و مهاجرت ذرات تأثیرگذار باشد [۱۱، ۱۲]. دما نقش بسیار مهمی در کارایی فرآیند تزریق شورآب رقیق و میزان آسیب به سازند ایفا می‌کند. دماهای بالاتر می‌توانند انحلال‌پذیری مواد معدنی و تحرک یون‌ها را افزایش دهند که این امر ممکن است به بهبود برداشت نفت منجر شود. با این حال، افزایش دما می‌تواند اثرات تورم و مهاجرت کانی‌های رسی را تشدید کرده و در نتیجه باعث افزایش آسیب به سازند گردد [۱۳]. دما بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی که در طی فرآیند تزریق شورآب رقیق رخ می‌دهند تأثیرگذار است و در نتیجه، کارایی کلی این فرآیند را تحت تأثیر

تقاضای جهانی برای نفت همچنان در حال افزایش است، در حالی که نفت ذخایری که به‌راحتی قابل دسترس هستند، با سرعت زیادی رو به کاهش می‌باشند. این وضعیت منجر به افزایش توجه به روش‌های ازدیاد برداشت نفت شده است؛ روش‌هایی که با هدف استخراج نفت بیشتر از مخازنی که پیش‌تر به‌طور جزئی توسط روش‌های متداول تخلیه شده‌اند، به کار گرفته می‌شوند. در میان این روش‌ها، تزریق شورآب رقیق^۱ به دلیل پتانسیل بالای آن در بهبود نرخ برداشت نفت، به‌ویژه در مخازنی با ویژگی‌های زمین‌شناسی پیچیده، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱]. با کاهش ذخایر متعارف نفت، صنعت نفت با چالشی اساسی در زمینه‌ی بهینه‌سازی برداشت از میادین موجود مواجه است. روش‌های سنتی معمولاً مقدار قابل توجهی از نفت را در مخزن باقی می‌گذارند، امری که ضرورت توسعه‌ی روش‌های پیشرفته‌ی ازدیاد برداشت نفت را دوچندان می‌کند؛ روش‌هایی که قادر باشند بازدهی برداشت را افزایش داده و در عین حال اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند [۲].

تزریق شورآب رقیق شامل تزریق آبی با میزان شوری کمتر از آب سازندی به درون مخازن نفتی است. این روش بر پایه‌ی چندین سازوکار مختلف استوار است که همگی در جهت افزایش برداشت نفت عمل می‌کنند. از جمله مهمترین این سازوکارها می‌توان به: تغییر ترشوندگی [۳]، تبادل یونی چند جزئی^۲ [۴]، اسمز [۵]، مهاجرت ذرات [۶] و انبساط لایه دوگانه الکتریکی^۳ [۷] اشاره نمود. وجود کانی‌های رسی اغلب به‌عنوان یکی از شرایط ضروری برای بروز اثرات مثبت تزریق شورآب رقیق در نظر گرفته می‌شود چرا که آن‌ها به‌عنوان یک تبادل کننده کاتیونی عمل کرده و در اثر مهاجرتشان می‌توانند با تغییر جهت جریان سیال تزریقی به تولید نفت‌های جاروب نشده یاری

1. Low Salinity Waterflooding (LSWF)
2. Multi Component Ion Exchange
3. Electrical Double Layer
4. Critical Salt Concentration (CSC)

این مقدمه آورده شد، به صورت آزمایش سیلاب‌زنی انجام گرفته‌اند [۲۱]. اگرچه روش سیلاب‌زنی مغزه به دلیل دقت بالاتر و شبیه‌سازی واقعی‌تر شرایط میدان، از اعتبار بیشتری برخوردار است، اما روش‌های نوینی همچون استفاده از میکرومدل‌ها به دلیل ماهیت قابل‌مشاهده‌ی خود، مزایایی را ارائه می‌دهند که سیلاب‌زنی، قادر به فراهم کردن آن‌ها نیست. اما همچنان مطالعات میکرومدلی صورت گرفته بر روی آسیب‌سازند ناشی از کانی‌های رسی، این پدیده را در دمای محیط بررسی نموده‌اند که با توجه به اطلاعات اشاره شده در همین مقدمه نمی‌توان نتایج آن‌ها را کاملاً مشابه شرایط واقعی دانست چراکه دما فاکتوری بسیار مهم و تاثیرگذار در این فرایند می‌باشد [۲۲-۲۵]. در سال‌های اخیر، استفاده از میکرومدل‌ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بررسی فرآیندهای جریان و تغییرات در محیط‌های متخلخل گسترش یافته است. با وجود آنکه دما به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر رفتار سیستم‌های متخلخل و واکنش‌های شیمیایی درون آن‌ها داشته باشد، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های اخیر، آزمایش‌های خود را در دمای محیط انجام داده‌اند. به‌عنوان نمونه، مطالعه‌ای بر عملکرد نانوسیالات پلیمری در جابه‌جایی کربن دی‌اکسید در محیط متخلخل، کلیه آزمایش‌ها را در دمای محیط انجام داده است [۲۶]. همچنین، پژوهشی دیگر که رویکرد نوینی برای کمی‌سازی انحلال معدنی در مقیاس منفذ ارائه کرده است، از میکرومدل‌های دوبعدی واکنشی در شرایط محیطی استفاده کرده است [۲۷]. این موارد نشان می‌دهد که حتی در تحقیقات پیشرفته، انتخاب دمای محیط به‌عنوان شرایط آزمون، رویکردی رایج و پذیرفته شده است در حالی که در این پژوهش ما تاثیر دما در بررسی‌های میکرومدلی را نیز لحاظ نموده‌ایم.

در این پژوهش، برای نخستین بار آسیب‌سازند ناشی از تورم و مهاجرت کانی‌های رسی در شرایط

قرار می‌دهد [۱۴]. در حالیکه در دماهای بالا، پتانسیل تورم برخی از کانی‌های رسی ممکن است افزایش یابد، که این امر می‌تواند موجب انسداد شدیدتر منافذ سنگ مخزن شود [۱۵، ۱۶]. نتایج آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه انجام‌شده در دماهای بالا (تا ۱۵۰ °C) با استفاده از مغزه‌های ماسه‌سنگی حاوی کانی‌های رسی نشان داد که نیروی دافعه لایه‌ی دوگانه الکتریکی بیشترین تاثیر را در آسیب به سازند به‌دلیل تغییرات دمایی داشته است [۱۷]. در مطالعه دیگری مشخص شده است که جابه‌جایی ذرات ریز به‌طور قابل توجهی تابعی از دما و pH است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش pH و دما، پتانسیل زتا منفی‌تر می‌شود، که این امر نشان‌دهنده تقویت نیروهای دافعه بین ذرات رسی و سطح سنگ مخزن است؛ حتی در دماهایی که اندکی بالاتر از دمای محیط هستند [۱۸]. از طرفی دیگر وابستگی فشار تورمی بنتونیت به دما، پیچیده بوده و تحت تاثیر عوامل ساختاری و محیطی قرار دارد؛ از این رو، برای درک کامل این تعاملات، انجام تحقیقات بیشتر ضروری است [۱۹]. بررسی‌های انجام‌شده در دماهای مختلف نشان داده‌اند که با افزایش دما، فشار تورمی بنتونیت افزایش می‌یابد [۲۰].

نیاز به روش‌هایی کارآمدتر و پایدارتر برای برداشت نفت، محرک اصلی در پژوهش و توسعه روش‌های نوین ازدیاد برداشت نظیر تزریق شورآب رقیق به شمار می‌رود. اگرچه این روش مزایای قابل توجهی را ارائه می‌دهد، اما برای دستیابی به نتایج بهینه در برداشت، باید اثرات حضور کانی‌های رسی و تاثیر دما بر آسیب به سازند با دقت بررسی شود. درک صحیح از این عوامل برای اجرای موفقیت‌آمیز فرآیند تزریق شورآب رقیق در شرایط مختلف مخزنی، به‌ویژه در سازندهای پیچیده کربناته و ماسه‌سنگی، از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر مطالعات انجام شده روی بحث تزریق شورآب رقیق و آسیب‌سازند ناشی از کانی‌های رسی در طی آن که بخشی از آنها هم در

نمک‌هایی با شوری بالا و با ترکیبات مختلف به درون میکرومدل تزریق شدند و پس از پایدار شدن شرایط، آب مقطر جهت القای آسیب سازند تزریق گردید. در فواصل زمانی مشخص یک ساعت یکبار، از میکرومدل تصویربرداری شد تا نتایج مورد نظر حاصل گردد. کلیه آزمایش‌ها در دمای 70°C انجام شدند.

میکرومدل

میکرومدل شیشه‌ای برای انجام آزمایش‌ها آماده‌سازی شد. برای بازنمایی ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل، یک الگوی سه‌لایه بر روی سطح شیشه حکاکی گردید. فرآیند ساخت و آماده‌سازی میکرومدل‌ها از طریق مراحل زیر انجام شد:

• الگو میکرومدل توسط نرم‌افزار CorelDraw طراحی شد.

• دو عدد شیشه با طول ۱۶ cm، عرض ۸ cm و ضخامت ۶ mm بریده و آماده شدند.

• با استفاده از لیزر الگو طراحی شده روی یکی از این شیشه‌ها حک شد.

• شیشه لیزر شده با برس فلزی تمیز و به مدت ۱۰ min در حمام فراصوت قرار گرفت تا عاری از هرگونه خرده شیشه شود.

• با استفاده از مته، مسیرهای ورودی و خروجی روی همین شیشه به‌وجود آورده شد.

• با استفاده از حلال‌های شیمیایی هردو شیشه‌ها شسته شد.

• این دو شیشه روی هم قرار داده و به کوره منتقل شدند تا در دمای 700°C به یکدیگر بچسبند.

• سوزن‌های ورودی و خروجی به وسیله چسب به میکرومدل متصل شدند.

• طرح میکرومدل، که مجموعه‌ای از حفرات و گلوگاه‌هاست در شکل ۱ آورده شده است.

واقعی دمای مخزن (70°C) با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از آون میکروفلوئیدیکی شفاف، امکان تصویربرداری مداوم و دقیق در حین آزمایش را بدون تغییر شرایط دمایی فراهم کرده و دقت نتایج را به طور قابل توجهی افزایش داده است، در حالی که مطالعات پیشین در دمای محیط و با خارج کردن میکرومدل از محیط آزمایش انجام شده‌اند. در این کار، اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها به صورت کمی و در مقیاس حفره‌ای پایش شده و تأثیر انواع کاتیون‌ها شامل سدیم، پتاسیم و کلسیم و ترکیبات آن‌ها بر رفتار دو نوع رس بنتونیت و کائولینیت در دمای بالا به طور نظام‌مند مقایسه شده است. نتایج این بررسی منجر به شناسایی ترکیب بهینه کاتیون‌ها (پتاسیم و کلسیم) برای کنترل مؤثر تورم و مهاجرت و در نتیجه کاهش حداکثری آسیب سازند گردیده که تصویری روشن و بی‌سابقه از سازوکار های آسیب در شرایط دمایی واقعی ارائه می‌دهد.

روش کار

در مطالعه حاضر، یک فرایند آزمایشگاهی با هدف بررسی شدت آسیب‌های سازندی مرتبط با کانی‌های رسی نظیر تورم و مهاجرت، در طی تزریق شورآب رقیق در دمای مخزن طراحی شد. برای شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر محیط متخلخل ماسه‌سنگی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای پوشش‌داده‌شده با کائولینیت^۱ و بنتونیت^۲ استفاده گردید. به‌منظور اعمال دما بر روی میکرومدل، از یک آون میکروفلوئیدیکی استفاده شد که توسط شرکت Poreflowtech در ایران طراحی شده است. این دستگاه نه‌تنها شرایط دمایی مورد نیاز را فراهم می‌نماید، بلکه به دلیل شفاف بودن، امکان تصویربرداری از میکرومدل را بدون خارج کردن آن از آون فراهم می‌سازد و در نتیجه، شرایط دمایی ثابت حفظ می‌گردد. برای رسیدن به حالت پایدار بین رس و آب سازندی و برقرار نمودن شرایط اولیه مخزنی، آب

1. Kaolinite
2. Bentonite

عملیات رس پوشی تعداد پیکسل‌های مشکی درون میکرومدل که نماینده رس‌ها هستند شمارش شد تا در تمامی آزمایش‌ها یکسان و دقت بالایی بتوان به بررسی آسیب سازند پرداخت.

سیالات

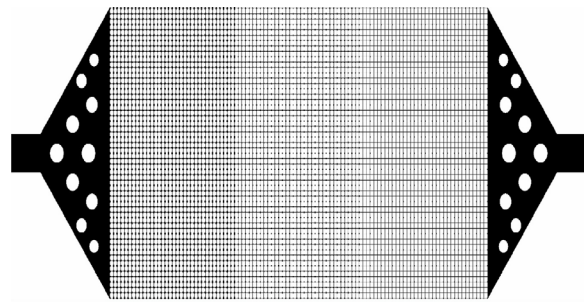
نوع کاتیون‌های موجود در آب می‌تواند بر شدت آسیب سازندی القاشده در طی فرآیند تزریق شورآب رقیق تأثیرگذار باشد. به‌منظور بررسی اثر پدیده‌های تورم و جابه‌جایی کانی‌های رسی در شدت‌های مختلف و دمای مخزن، مجموعه‌ای از نمک‌ها با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی نظیر KCl ، NaCl و CaCl_2 انتخاب شدند تا پنج شورآب غلیظ تهیه گردد که به‌عنوان آب سازندی مورد استفاده قرار گیرند. با افزودن مقادیر مشخصی از این نمک‌ها به آب مقطر، آب سازندی مصنوعی با شوری 60000 ppm تهیه شد. ترکیب این آب‌های سازندی در **جدول ۱** ارائه شده است. برای اعمال شدیدترین شرایط آسیب سازندی، آب مقطر به عنوان شورآب رقیق برای تزریق به درون میکرومدل انتخاب شد.

جدول ۱ ترکیب آب‌های سازندی استفاده شده در این پژوهش.
Table 1 Composition of used formation waters used in this study.

| No. | Composition | Salinity (g/L) |
|-----|-------------------------------|----------------|
| 1 | NaCl | 60 |
| 2 | KCl | 60 |
| 3 | CaCl_2 | 60 |
| 4 | $\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ | 30+30 |
| 5 | $\text{KCl} + \text{CaCl}_2$ | 30+30 |

تجهیزات و روش انجام آزمایش

تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه شامل یک دوربین دیجیتال DSLR با وضوح بالا و لنز ماکرو (دوربین Canon EOS ۲۰۰۰ D به همراه لنز ماکرو Sigma ۱۰۵ mm که تصاویری با رزولوشن ۶۰۰۰ در ۴۰۰۰ پیکسل ثبت می‌کند) برای ثبت تصاویر در فواصل نزدیک، یک پمپ سرنگی دقیق با قابلیت تزریق سیالات در دبی‌های بسیار پایین، یک سیستم



شکل ۱ الگو میکرومدل طراحی و استفاده شده در این پژوهش.
Fig. 1 Schematic of designed micromodel in this study.

الگوی طراحی شده شامل سه لایه‌ی همگن با اندازه منافذ متفاوت و عرض گلوگاه یکسان است که به‌صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. از چپ به راست، لایه‌ی اول دارای قطر منافذ 0.45 mm است؛ در لایه‌ی دوم یا میانی، اندازه منافذ به 0.3 mm کاهش می‌یابد و در لایه‌ی سوم، اندازه منافذ 0.2 mm می‌باشد. عرض گلوگاه در سراسر الگو به‌صورت یکنواخت برابر با 0.1 mm در نظر گرفته شده است.

رس پوشی میکرومدل

دو نوع کانی رسی برای این مطالعه انتخاب شدند: کائولینیت به‌عنوان عامل مهاجرت و بنتونیت به‌عنوان عاملی برای هر دو پدیده تورم و مهاجرت. پودرهای کائولینیت و بنتونیت با درجه خلوص آزمایشگاهی از شرکت دکتر مجللی تهیه گردیدند. پس از آماده‌سازی میکرومدل، قبل از انجام آزمایش‌ها نیاز است، سطوح داخلی خلل و فرج میکرومدل رس پوشی شود. برای اینکار ابتدا محلول 15000 ppm از آب نمک سدیم کلرید آماده می‌شود. حدود 4 mL از این آب نمک به درون میکرومدل تزریق می‌شود. سپس سوسپانسیون 20% درصد وزنی از رس و آب نمک سدیم کلرید آماده و به درون میکرومدل تزریق می‌شود. برای مرحله آخر میکرومدل حاوی سوسپانسیون به درون آون انتقال داده شده تا به مدت 1 h در دمای 140°C باقی بماند. پس از سپری شدن این زمان، رس‌ها کاملاً به سطح شیشه متصل خواهند شد و میکرومدل آماده انجام آزمایش می‌باشد. پس از هر

مهاجرت رس مشاهده می‌شود به خاطر برهم خوردن شرایط تعادلی غلظت یون‌ها می‌باشد و نه عامل دیگری. پس از به تعادل رسیدن یون‌ها با رس موجود در میکرومدل با استفاده از پمپ سرنگی به درون میکرومدل به مدت ۱۲ h با دبی ۰/۴۴ mL/h که معادل حجم فضای حفرات میکرومدل می‌باشد، آب مقطر تزریق شد تا به مرور زمان غلظت یون‌های درون فضای متخلخل کاهش یابد و تورم و مهاجرت رس‌ها رخ بدهد. هر یک ساعت یکبار از میکرومدل تصویربرداری انجام شد تا تغییرات در تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار گیرد. پس از انجام آزمایش، به صورت دستی و با دبی و فشار بالا آب مقطر داغ به درون میکرومدل تزریق شد تا تمامی رس‌ها شسته شده و دوباره عملیات رس پوشی برای آزمایش بعدی انجام شود. تمامی این ۵ آزمایش برای هر کدام از رس‌های کائولینیت و بنتونیت تکرار شد.

پردازش تصاویر

در اولین قدم، تصاویر گرفته شده از میکرومدل در حین انجام آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار Lightroom روتوش می‌شوند تا پردازش آنها با دقت بیشتری انجام شود. فضای خالی حفرات و قسمت لیزر نشده شیشه که نماینده ماتریکس سنگ می‌باشد، به رنگ سفید مشاهده می‌شوند و رس‌ها به رنگ مشکی. لذا قبل از پردازش تصاویر، پوشش‌دهی ماتریکس میکرومدل به رنگ مشکی باید انجام شود. اینکار در نرم‌افزار CorelDraw به دقت انجام می‌شود تا خطای اندازه‌گیری تخلخل به حداقل برسد. با انجام این مراحل عکس آماده پردازش با نرم‌افزار Matlab می‌باشد. کد نوشته شده برای به دست آوردن پارامتر تخلخل، عکس وارد شده را در مقیاس خاکستری یا Greyscale به صورت ماتریسی با درایه‌هایی به تعداد پیکسل‌های موجود در عکس خواهد شناخت. هر درایه از این ماتریس مقداری بین ۰ (کاملاً مشکی) تا ۲۵۵ (کاملاً سفید) خواهد داشت. از نرم‌افزار خواسته می‌شود

رایانه‌ای برای کنترل دوربین و ذخیره‌سازی تصاویر، همچنین یک آون میکروفلوئیدیکی می‌باشد. این اجاق امکان قرارگیری میکرومدل در داخل آن را فراهم کرده و به سیستم نورپردازی داخلی و کنترل‌کننده دما مجهز است تا دمای میکرومدل را در شرایط پایدار حفظ کند. تصویری از این چیدمان در شکل ۲ ارائه شده است.



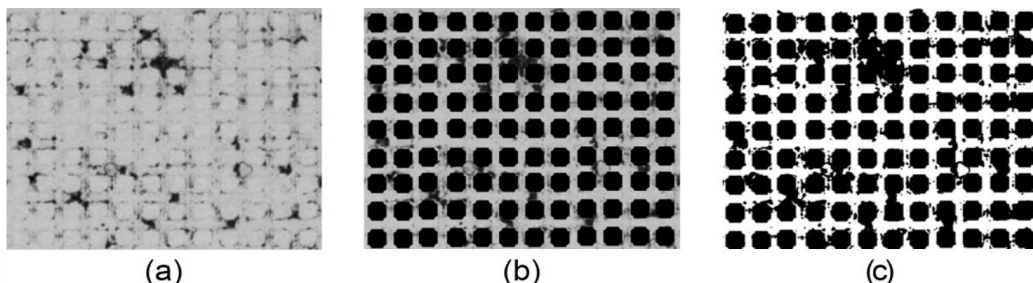
شکل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش.
Fig. 2 Laboratory setup used in this study.

در آزمایش‌ها از ترکیب نمک‌هایی که بالاتر گفته شد، ۵ ترکیب متفاوت با شوری بالا ابتدا هر کدام به صورت جداگانه و مختص به آزمایش مورد نظر به درون میکرومدل به عنوان آب سازندی تزریق می‌شود و به میکرومدل به مدت چندین ساعت زمان داده می‌شود تا رس‌ها با آب سازندی و یون‌های موجود در آن به تعادل برسند. تزریق به صورت دستی با دبی بالا انجام می‌شود تا از خروج رس‌های آزاد که مقدار بسیار حداقلی دارند، که خود نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن عملیات رس پوشی می‌باشد، اطمینان حاصل کنیم. با انجام اینکار مطمئن می‌شویم، اگر در طی آزمایش اگر

عملیات برچسب‌گذاری را انجام می‌دهد بر روی یک تصویر صفر و یک شده به کار می‌رود. به این ترتیب که از سمت چپ بالا رو به پایین حرکت می‌کند تا به اولین پیکسلی که سفید رنگ است برسد و این پیکسل را به عنوان اولین خوشه در نظر می‌گیرد. سپس این کار را ادامه می‌دهد در ستون بعد به اولین مقدار ۱ که رسید همسایه‌های چهارگانه آن را نگاه می‌کند، اگر بین پیکسلی که قبلاً برچسب‌گذاری کرده بودیم و پیکسلی که اکنون به آن رسیدیم مسیری وجود داشت، این دو پیکسل هر دو از یک خوشه هستند، پس به این پیکسل نیز برچسب همان پیکسل قبلی را می‌زند. این کار ادامه پیدا می‌کند تا جایی که به پیکسلی می‌رسد که در همسایگی چهارگانه آن، پیکسلی که برچسب ۱ به خود گرفته وجود ندارد به این ترتیب پیکسل مورد نظر برچسب ۲ به خود می‌گیرد و بدین ترتیب تا پایان پیش می‌رود و هر کدام از تکه‌های عکس را یک برچسب جدا قرار می‌دهد و اصطلاحاً این تکه‌ها را خوشه‌بندی یا Cluster می‌کند. در نهایت خوشه‌های ایزوله را از عکس حذف کرده و با روشی که برای محاسبه تخلخل استفاده شد، تخلخل موثر را محاسبه می‌نماید. خلاصه‌ای از این اقدامات در شکل ۴ آورده شده است.

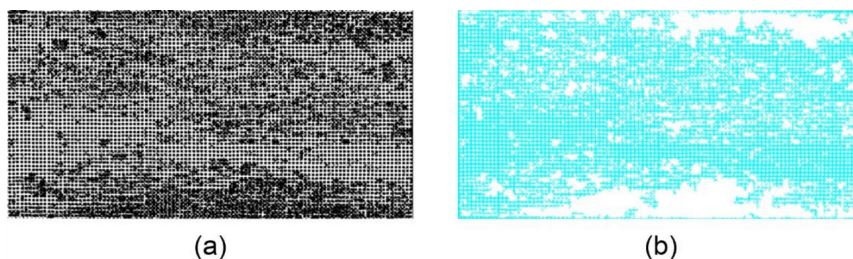
تا Histogram مربوط به عکس را رسم کرده که نمودار تعداد پیکسل‌های مربوط به هر مقدار از درایه‌هاست. با استفاده از این نمودار می‌توان عملیات آستانه‌گیری یا Thresholding را انجام داد. آستانه عددی است که با استفاده از آن می‌توان عملیات Binary یا صفر و یک کردن عکس را انجام داد. با مشخص شدن مقدار آستانه، نرم‌افزار مقدار هر درایه را با آستانه مقایسه نموده و اگر این مقدار بیشتر مساوی از آستانه باشد به آن مقدار ۱ داده و آن پیکسل را سفید در نظر خواهد گرفت و اگر مقدار درایه از آستانه کمتر بود به آن مقدار ۰ داده و آن را مشکی در نظر می‌گیرد. شکل ۳ به عنوان خلاصه از این مراحل آورده شده است. پس از انجام تمامی این اقدامات، با شمارش تعداد پیکسل‌های سفید که نماینده فضای خالی محیط متخلخل هستند و تقسیم آن بر تعداد کل پیکسل‌های تصویر می‌توان تخلخل را محاسبه نمود.

از آن جایی که فقط تخلخل‌های به هم پیوسته یا به عبارتی آن دسته از خلل و فرج‌هایی که ایزوله نیستند در تعیین تراوایی مطلق مؤثر می‌باشند، بایستی تخلخل موثر را بیابیم و در صورتی که تخلخل ایزوله وجود داشته باشد باید آنها را حذف کنیم. برای این کار در نرم‌افزار Matlab عملیات برچسب‌گذاری یا Labeling انجام گرفت. تابعی که



شکل ۳ خلاصه‌ای از صفر و یک کردن تصاویر میکرومدل (a) تصویر رتوش شده، (b) تصویر میکرومدلی که ماتریکس آن با رنگ مشکی پوشانده شده و (c) تصویر صفر و یک شده میکرومدل.

Fig. 3 Summary of binarizing the micromodel images (a) Retouched image, (b) Micromodel image with masked matrix and (c) Binarized micromodel image.



شکل ۴ خلاصه‌ای از حذف حفرات ناپیوسته (a) تصویر صفر و یک شده تمام میکرومدل، (b) تصویر میکرومدلی که حفرات ناپیوسته آن که با رنگ سفید نشان داده شده حذف و حفرات به هم پیوسته آن به رنگ آبی نشان داده شده است.

Fig. 4 Summary of removing discontinuous pores (a) Binarized image of entire micromodel and (b) Image of the micromodel with discontinuous pores, shown in white and removed and also connected pores shown in blue.

همین ترتیب و با همین ترکیب آب‌های سازندی در میکرومدل پوشش داده شده با کائولینیت انجام شد. در ادامه به بررسی نتایج این ۱۰ آزمایش پرداخته شده است.

آزمایش‌های رس بنتونیت

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص می‌باشد، در نمودار شکل ۵ الف روند تغییرات تخلخل و تخلخل موثر در ساعات‌های مختلف تزریق آب مقطر به درون میکرومدل پوشش داده شده با بنتونیت و اشباع شده با آب شور آب غلیظ سدیم کلرید، نسبت به مقدار اولیه آنها آورده شده است.

در نمودار شکل ۵ ب نیز روند تغییرات تراوایی میکرومدل در آزمایش اول نسبت به زمان آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ الف می‌توان مشاهده کرد، در ۴ ساعت اولیه تزریق آب مقطر به درون میکرومدل در طی آزمایش ۱، نسبت تخلخل که با خط چین خاکستری مشخص شده، تغییرات حداقلی را نشان می‌دهد و نسبتاً ثابت مانده است، ولی در همین زمان نمودار تخلخل موثر که با خط مشکی مشخص شده است در ۳ h اول روندی نزولی و پس از آن تا ۴ h روندی افزایشی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی کاهش تخلخل را در نمودار به واسطه تورم رس و افزایش آن را می‌توان به دلیل مهاجرت رس‌ها به خارج از میکرومدل مربوط دانست.

برای محاسبه تراوایی از معادله کارمن-کوزنی^۱ که در معادله ۱ مشاهده می‌شود استفاده می‌کنیم [۲۸].

$$K = C \frac{\phi^3}{S^2} \quad (1)$$

در این معادله K تراوایی میکرومدل، ϕ تخلخل موثر میکرومدل، S مساحت سطح ویژه و C فاکتور کوزنی^۲ که با استفاده از معادله ۲ و تخلخل موثر قابل محاسبه است، می‌باشند [۲۹].

$$C = \frac{1}{4 \cos\left(\frac{1}{3} \arccos(2\phi - 1) + \frac{4}{3} \pi\right) + 4} \quad (2)$$

مساحت سطح ویژه، نسبت سطح داخلی سنگ به حجم آن می‌باشد که برای فضای متخلخلی با حفراتی با سطح مقطع مستطیل شکل، می‌تواند توسط معادله ۳ که در آن a همان بازشدگی گلوگاه، معادل $100 \mu\text{m}$ می‌باشد، محاسبه شود [۳۰].

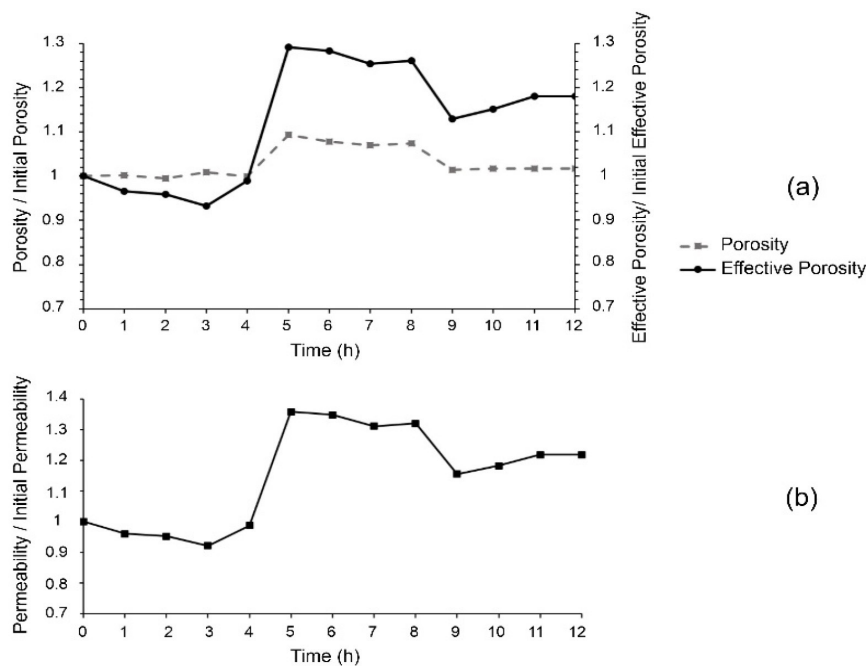
$$S = \frac{4\phi}{a} \quad (3)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر از این توضیح داده شد، تعداد ۱۰ آزمایش به صورت تزریق شور آب رقیق (آب مقطر) به درون میکرومدل‌های پوشش داده شده با بنتونیت و کائولینیت انجام شد. آزمایش‌های ۱ تا ۵ در میکرومدل پوشش داده شده با بنتونیت و اشباع شده با آب‌های سازندی مصنوعی با شوری ۶۰۰۰۰ ppm، به ترتیب با نمک‌های سدیم کلرید، پتاسیم کلرید، کلسیم کلرید، ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید و در نهایت ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید، انجام شد. آزمایش‌های ۶ تا ۱۰ به

1. Carman-Kozeny

2. Kozney Factor



شکل ۵ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۱ (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان. Fig. 5 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride brine in experiment 1, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

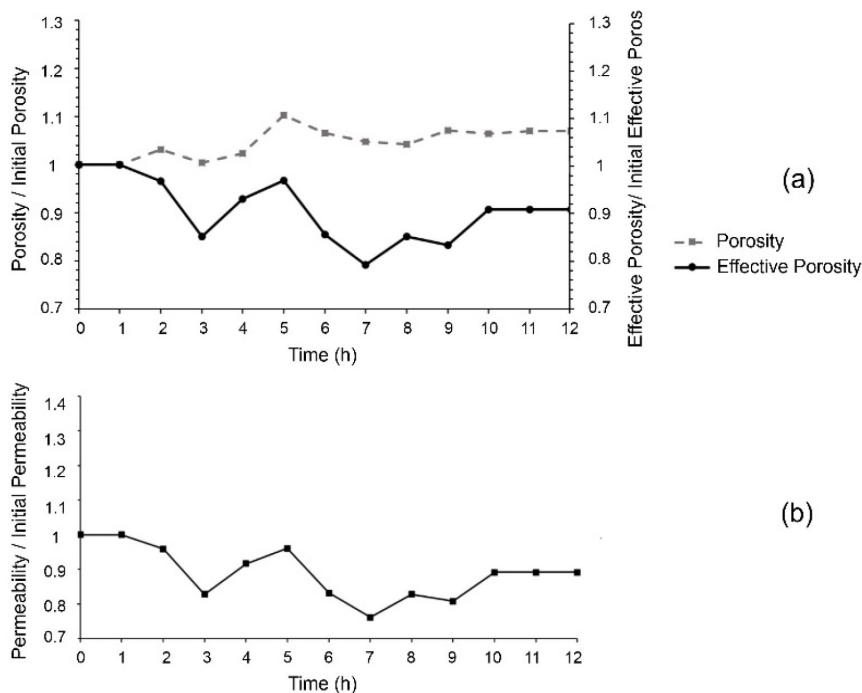
تخلخل مشخص می‌باشد. از ۳ تا ۵ h شاهد روند افزایشی در دو نمودار هستیم که نشان‌دهنده شدت یافتن مهاجرت رس‌ها نسبت به تورم می‌باشد. به همین دلیل است که تخلخل تا مقدار ۱/۱ برابر و تخلخل موثر تا مقدار ۱/۳ برابر مقدار اولیه خود افزایش داشته‌اند. اما بعد از ساعت ۵ تا ۹ h می‌توان در هر دو نمودار روندی کاهشی را مشاهده نمود که نشانه‌ای از بیشترین مقدار تورم رس در این ناحیه هستیم که بر اثرات مهاجرت رس‌ها به خارج از میکرومدل فائق آمده و مقادیر پارامتر هارا کاهش داده است. پس از ساعت ۹ تا انتهای آزمایش می‌توان گفت تنها اتفاقی که در میکرومدل در حال رخ دادن می‌باشد، مهاجرت رس‌هاست و تورم دیگر بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود در ۹ h متوقف شده است. نمودار شکل ۵ ب که مربوط به تراوایی میکرومدل در آزمایش ۱ می‌باشد، هم تمامی این اتفاقات قابل مشاهده می‌باشد و مشاهدات گفته شده را تایید می‌کند.

این ادعاها و مشاهدات در خصوص کاهش تخلخل در اثر تورم و افزایش آن در اثر خروج رس‌ها از میکرو منطبق بر تجربیات و مشاهدات موجود در پژوهش‌های مشابه و پیشین می‌باشد [۲۲، ۳۱، ۳۲]. کاهش تخلخل موثر را به دلیل گرفتگی گلوگاه‌ها توسط تورم و مهاجرت رس‌ها و افزایش آن را به می‌توان مربوط به بازشدگی گلوگاه‌ها دانست. بین ۴ و ۵ h، هر دو نمودار روندی افزایشی را طی می‌کنند و پس از آن تا ۹ h روندی کاهشی را در آنها شاهد هستیم. با توجه به کاهش شوری آب درون فضای متخلخل حاوی بنتونیت به صورت پیوسته از ابتدای شروع آزمایش می‌توان انتظار داشت که هم تورم بنتونیت و هم مهاجرت آن شروع شده باشد. با توجه به روندی که نمودارهای تخلخل و تخلخل موثر از خود نمایش داده‌اند می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در ۳ h ابتدایی تزریق شورآب رقیق، اثرات افزایشی خروج رس‌ها از میکرومدل در نتیجه مهاجرت توسط اثرات کاهشی تورم رس‌ها خنثی شده است که در روند نسبتاً ثابت نمودار

بیرون آن در آزمایش اول می‌باشد.

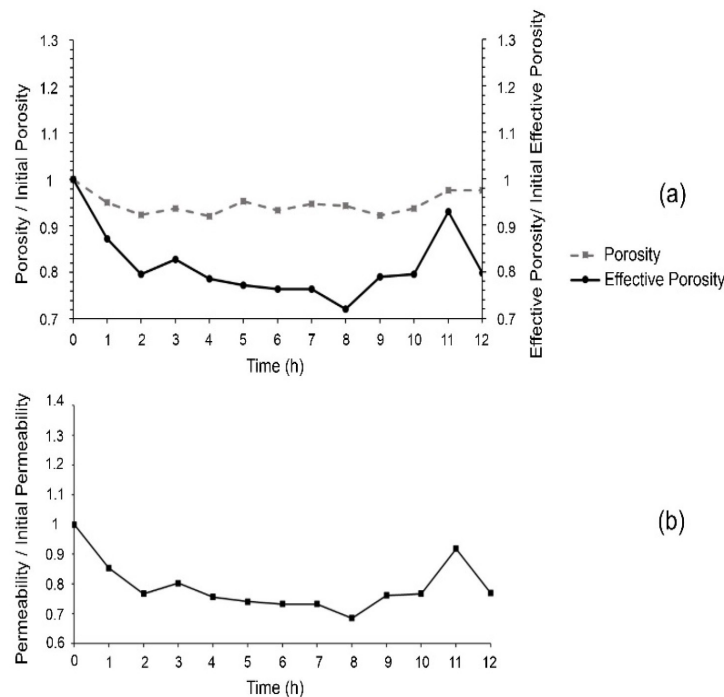
در شکل ۷ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۳ می‌باشد. با مقایسه عملکرد یون کلسیم در آزمایش شماره ۳ با یون پتاسیم در آزمایش شماره ۲، می‌توان مشاهده نمود که یون کلسیم در کنترل مهاجرت موفقتر عمل نموده تا تورم چراکه در نمودارهای این آزمایش آن افزایش‌ها در اثر خروج رس‌ها از میکرومدل دیده نمی‌شود ولی از همان ساعات‌های ابتدایی اثرات منفی تورم بر روی تمامی پارامترهای بررسی شده قابل مشاهده است. برای همین است که عدد تغییرات پارامتری همچون تراوایی از اعداد مربوط به همین پارامتر در آزمایش شماره ۲ پایین‌تر می‌باشد.

در شکل ۶ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۲ می‌باشد. مشابه آزمایش قبلی باز هم می‌توان مشاهده نمود که تا ۵ h تزریق شورآب رقیق مهاجرت رس‌ها تاثیر بیشتری از تورم داشته و از ساعت ۵ تا ۷ تورم به حداکثر خود رسیده و پس از متوقف شده و تنها مهاجرت رس‌ها به خارج میکرومدل قابل مشاهده می‌باشد. در مقایسه با آزمایش قبلی می‌توان ادعا کرد که یون پتاسیم نسبت به سدیم در تورم مهاجرت و تورم رس بنتونیت موفق‌تر عمل نموده است. درست است که مقادیر پارامترهای بررسی شده در آزمایش اول، بزرگتر از آزمایش دوم می‌باشد اما به علت بهتر بودن عملکرد یون سدیم نسبت به پتاسیم نمی‌باشد بلکه به علت مهاجرت شدید مقادیر زیادی از رس‌های موجود در میکرومدل به



شکل ۶ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۲، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثر نسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 6 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride brine in experiment 2, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۷ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۳، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

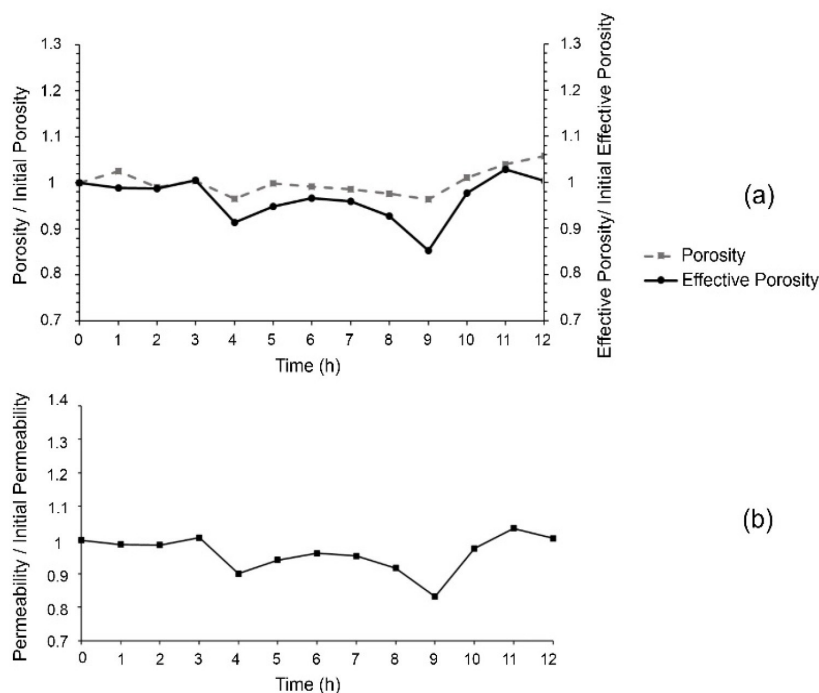
Fig. 7 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated calcium chloride brine in experiment 3, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

کرده هم یون کلسیم مهاجرت را و مزایای استفاده از هردو این یون‌ها مشهود می‌باشد.

آزمایش‌های رس کائولینیت

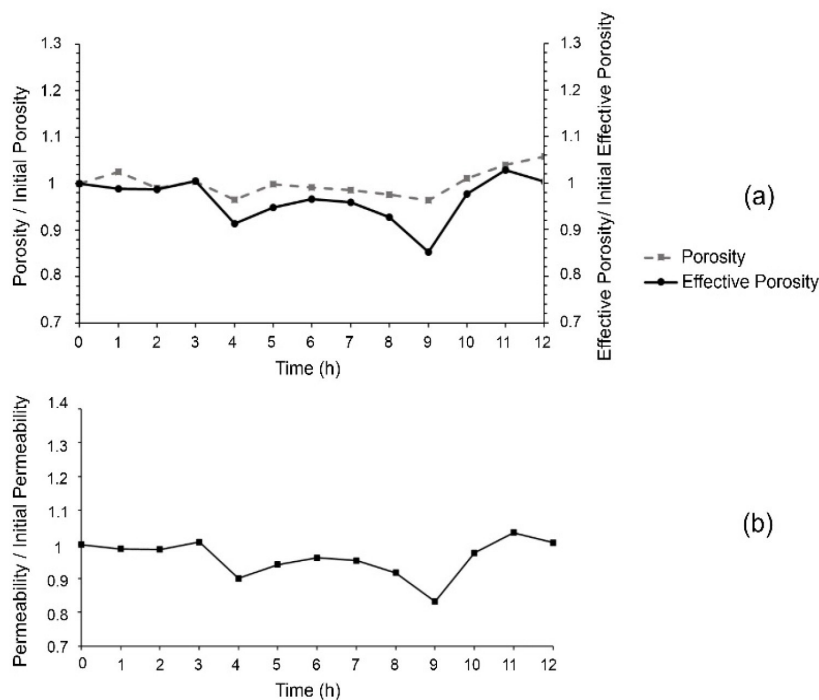
شکل ۱۰ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۶ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای این آزمایش می‌توان مشاهده نمود که در ساعت‌های ابتدایی تزریق شورآب رقیق، مهاجرت رس‌ها شروع شده و با توجه به روند افزایشی مشاهده شده می‌توان نتیجه گرفت که کائولینیت از میکرومدل خارج می‌شود. بعد از گذشت ۴ h از آزمایش در ادامه می‌توان روند شدید کاهش تخلخل موثر را مشاهده نمود که به واسطه گرفتگی گلوگاه‌های میکرومدل توسط رس‌های مهاجرت کرده اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه کائولینیت فاقد پتانسیل تورم می‌باشد، انتظار نداریم که در نمودار تخلخل شاهد روند کاهش باشیم اما این امر در نمودار شکل ۱۰ الف مشهود است.

در شکل ۸ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۴ می‌باشد. با مقایسه نتایج آزمایش ۴ و آزمایش ۳ می‌توان مشاهده کرد که باز هم شاهد افزایش‌های شدید در نمودار پارامترهای بررسی شده هستیم که به واسطه موجود بودن یون سدیم می‌باشد که باعث مهاجرت رس به خارج از میکرومدل شده است. علت شدید نبودن روند کاهش در اثر تورم در ساعت ابتدایی نسبت به آزمایش قبلی هم به همین دلیل است چرا که مهاجرت رس‌ها به خارج میکرومدل کمی اثرات تورم را خنثی نموده است. در شکل ۹ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۵ می‌باشد. با مقایسه نتایج این آزمایش با آزمایش‌های قبلی می‌تواند دید که بهترین عملکرد را این آزمایش از خود نشان داده است چراکه هم یون پتاسیم، تورم را به خوبی کنترل



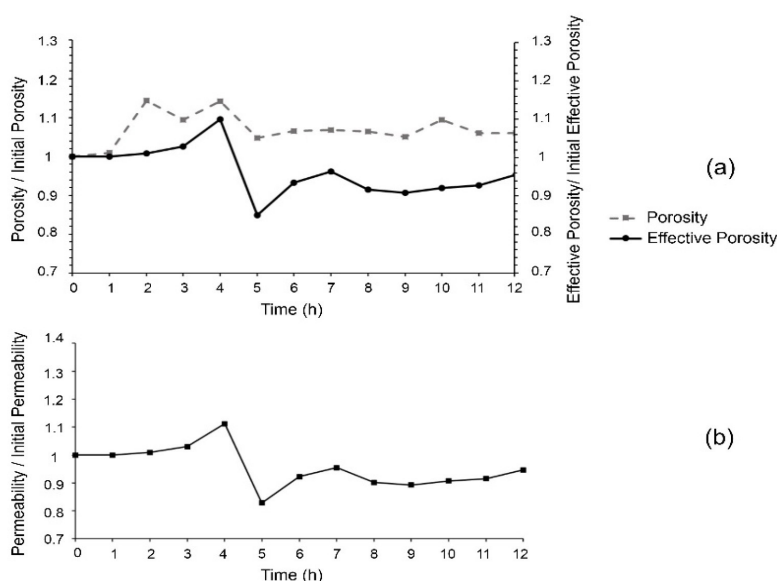
شکل ۸ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۴، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 8 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride and calcium chloride brine in experiment 4, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۹ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۵، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 9 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride and calcium chloride brine in experiment 5, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۰ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۶، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

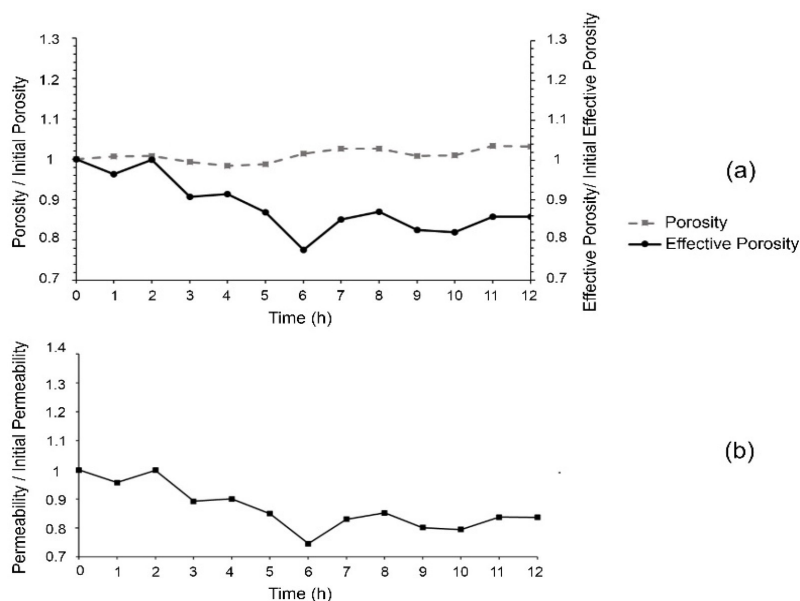
Fig. 10 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride brine in experiment 6, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

گرفتگی گلوگاه‌های میکرومدل شود. **شکل ۱۲** نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۸ را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش ۷ می‌توان مشاهده نمود که یون کلسیم نسبت به پتاسیم بهتر توانسته مهاجرت را کنترل کند، چراکه مقادیر پارامترهای بررسی شده کمتر از آزمایش شماره ۷ کاهش داشته‌اند.

شکل ۱۳ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۹ را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج این آزمایش می‌توان اثرات مخرب حضور یون سدیم را در کنترل مهاجرت مجدد مشاهده نمود. این امر هم در مقادیر پارامترها مشهود می‌باشد، هم در روند پیوسته باز و بسته شدن گلوگاه‌های میکرومدل.

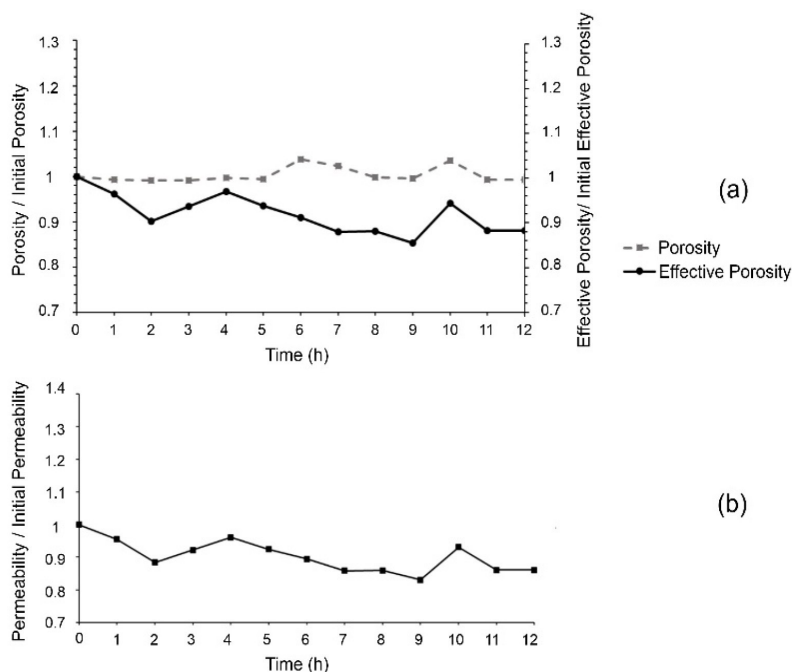
دلیل این اتفاق طبیعت ۲ بعدی پردازش تصاویر برای محاسبه تخلخل می‌باشد. در مواردی ممکن رس‌ها روی هم در عمق میکرومدل انباشته شوند و کد نوشته شده فقط قسمت بالایی این رس‌ها را تشخیص دهد و پس از گذشت زمان از آزمایش و شروع مهاجرت این رس‌های انباشته شده روی هم در سطح میکرومدل پخش شوند و کد پردازش تصاویر رس‌های بیشتری را در فضای متخلخل میکرومدل تشخیص دهد که باعث مشاهده شدن روند نزولی در تخلخل شود.

شکل ۱۱ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این آزمایش و نمودار تخلخل مشخص است، مهاجرت کائولینیت توسط یون پتاسیم به خوبی و تا حد زیادی کنترل شده است، اما باز هم از نمودار تخلخل موثر و تراوایی می‌تواند مشاهده کرد که حتی همین مقادیر کم از مهاجرت رس‌ها هم توانسته باعث



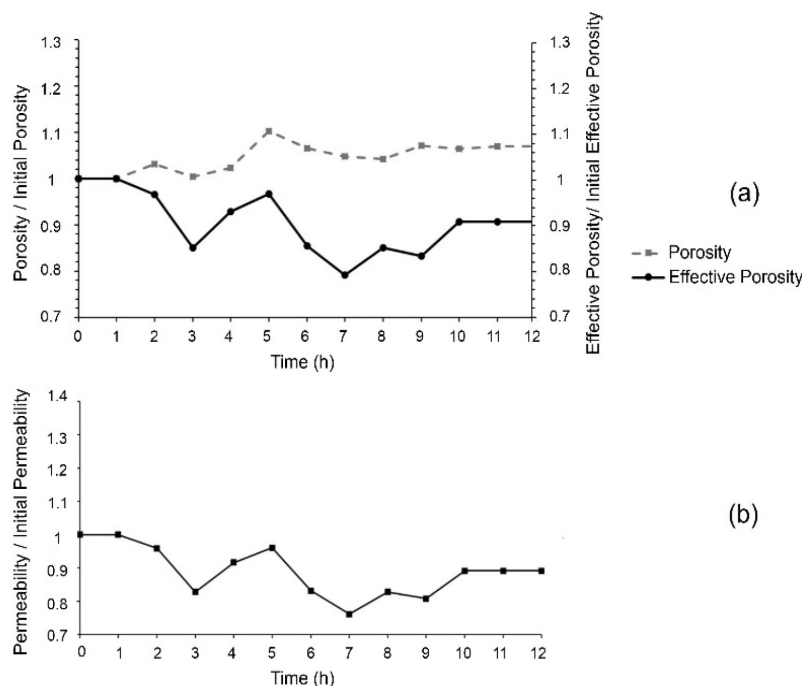
شکل ۱۱ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۷، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 11 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride brine in experiment 7, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۲ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۸، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 12 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated calcium chloride brine in experiment 8, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۳ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۹، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

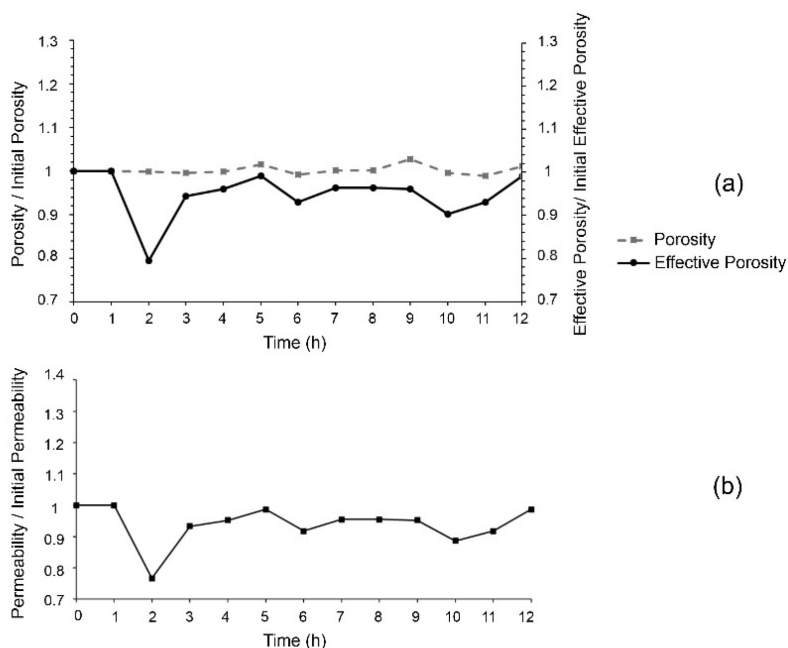
Fig. 13 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride and calcium chloride brine in experiment 9, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

۰/۸ تا ۱/۱ و ترکیب پتاسیم و کلسیم در آزمایش ۱۰ دامنه ۰/۸ تا ۱ را نشان داد. این الگوها با تغییرات همزمان تخلخل و تخلخل مؤثر سازگار است و کاهش تخلخل عمدتاً به تورم رس‌ها و افزایش آن بیشتر به مهاجرت و خروج رس‌ها نسبت داده می‌شود. بر این مبناء، گزینش آب تزریقی حاوی کاتیون‌های پتاسیم و کلسیم می‌تواند نوسانات هیدرودینامیکی را کاهش داده و پایداری جریان را در مقیاس مخزنی بهبود بخشد.

در تزریق شورآب رقیق، ترکیب و غلظت یون‌های موجود در آب تزریقی اثر قابل توجهی بر تغییر ترشوندگی، مهاجرت ذرات رسی، انحراف جهت جریان و انبساط لایه دوگانه الکتریکی دارد و این عوامل می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر آسیب سازند اثرگذار باشند. کاهش کاتیون سدیم موجب انبساط لایه دوگانه و تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوست می‌شود، اما در مخازن رسی حساس می‌تواند باعث تورم و مهاجرت ذرات و کاهش تراوایی گردد.

شکل ۱۴ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۱۰ را نشان می‌دهد. مشابه آزمایش ۵ مربوط به میکرومدل حاوی بنتونیت این جا هم می‌توان مشاهده نمود که ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم باز هم بهترین عملکرد را کنترل مهاجرت رس‌ها و آسیب سازند در مقایسه با سایرین داشته است.

تحلیل نتایج نشان داد که نوع رس و ترکیب یونی آب تزریقی نقش تعیین کننده‌ای در پایداری تخلخل و تراوایی دارند. در نمونه‌های بنتونیتی، آب حاوی سدیم نوسانات بزرگ‌تری ایجاد کرد و دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه در آزمایش ۱ حدود ۰/۹ تا ۱/۳۵ بود، در حالی که ترکیب پتاسیم و کلسیم دامنه نوسانات را محدود کرد و در آزمایش ۵ حدود ۰/۸۳ تا ۱/۰۳ ثبت شد. در نمونه‌های کائولینیتی نیز همین الگو مشاهده شد؛ سدیم در آزمایش ۶ دامنه



شکل ۱۴ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۱۰، (a) نمودارهای تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) نمودار تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 14 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride and calcium chloride brine in experiment 10, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

رس ها استفاده شد. پس از تزریق آبهای سازندی با ترکیبات یونی مختلف و برقراری تعادل یونی، آب مقطر به عنوان شورآب رقیق به درون میکرومدل ها تزریق گردید و تغییرات تخلخل، تخلخل مؤثر و تراوایی به دقت پایش و تحلیل شد. هدف از این کار، تعیین نقش نوع کاتیون های موجود در سیال بر شدت آسیب های سازندی و ارائه راهکارهای بهینه برای کاهش این آسیب ها در شرایط دمایی واقعی بود. مهم ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

- در آزمایش های بنتونیتی، آب حاوی سدیم دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه را از ۰/۹ تا ۱/۳۵ در آزمایش ۱ ایجاد کرد، در حالی که محلول پتاسیم-کلسیم این دامنه را به ۰/۸۳ تا ۱/۰۳ در آزمایش ۵ محدود نمود.

- در آزمایش های کائولینیتی، آب حاوی سدیم دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه را از ۰/۸ تا ۱/۱ در آزمایش ۶ ایجاد کرد، در حالی که محلول پتاسیم-کلسیم این دامنه را به ۰/۸ تا ۱ در آزمایش ۱۰

کاتیون های پتاسیم و کلسیم با پایدارسازی ساختار رس ها، تورم و مهاجرت را کاهش داده و از افت تراوایی جلوگیری می کنند، هرچند اثر محدودتری بر تغییر ترشوندگی و انحراف جریان دارند. به طور کلی، یون های تک ظرفیتی مانند سدیم اثر قوی تری بر تغییر ترشوندگی و انحراف جریان دارند ولی ریسک آسیب سازند بالاتری ایجاد می کنند، در حالی که یون های پایدارکننده مانند پتاسیم و کلسیم جریان یکنواخت و پایدار را حفظ کرده و خطر آسیب را کاهش می دهند. انتخاب ترکیب یونی مناسب نیازمند برقراری تعادل میان مزایای ازدیاد برداشت و کنترل آسیب سازند است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، با هدف بررسی تأثیر تورم و مهاجرت کانی های رسی بنتونیت و کائولینیت بر آسیب سازند طی تزریق شورآب رقیق در دمای مخزن (۷۰ °C)، از میکرومدل های شیشه ای پوشش داده شده با این

- کاهش داد.
- ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم عملکرد برتری در کنترل همزمان تورم و مهاجرت رس‌های بنتونیت و کائولینیت از خود نشان داد.
- بنتونیت در حضور یون‌های سدیم بیشترین میزان تورم و مهاجرت ذرات رسی را تجربه کرده و افت قابل توجهی در تراوایی ایجاد نمود.
- در میان یون‌های آزمایش شده، مشاهده شد که یون پتاسیم در کنترل تورم و یون کلسیم در کنترل مهاجرت بسیار اثر گذار بوده‌اند.
- حضور یون کلسیم به تنهایی توانست مهاجرت ذرات را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد، اگرچه کنترل تورم نیازمند حضور یون‌های پتاسیم نیز می‌باشد.
- استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای همراه با ثبت تصویری دقیق در شرایط دمایی بالا، امکان تحلیل کیفی و کمی سازوکارهای آسیب‌سازندی را فراهم ساخت و اعتبار بالایی به نتایج آزمایشگاهی بخشید چراکه اثرات دما نیز در این مطالعه لحاظ شده است.

مراجع

- [1]. Bazvand, P., Ahmadpour, K., Niknam, M.R., Nosrat Panah, B., and Daryasafar, A. (2022). A comprehensive review of smart water injection in carbonate and sandstone reservoirs with a special focus at carbonate reservoirs in South of Iran. *Journal of Petroleum Research*, 32, 124–145. 10.22078/pr.2022.4460.3027.
- [2]. Mwakipunda, G. C., Jia, R., Mgimba, M. M., Ngata, M. R., Mmbuji, A. O., Said, A. A., & Yu, L. (2023). A critical review on low salinity waterflooding for enhanced oil recovery: Experimental studies, simulations, and field applications. *Geoenergy Science and Engineering*, 227, 211936. doi: 10.1016/j.geoen.2023.211936.
- [3]. Maghsoudian, A., Izadpanahi, A., Bahmani, Z., Avvali, A. H., & Esfandiarian, A. (2025). Utilizing deterministic smart tools to predict recovery factor performance of smart water injection in carbonate reservoirs. *Scientific Reports*, 15(1), 537. doi.org/10.1038/s41598-024-84402-3.
- [4]. Moghadasi, R., Rostami, A., Hemmati-Sarapardeh, A., & Motie, M. (2019). Application of Nanosilica for inhibition of fines migration during low salinity water injection: Experimental study, mechanistic understanding, and model development. *Fuel*, 242, 846-862. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119300547>.
- [5]. Arain, A. H., Negash, B. M., Yekeen, N., Farooqi, A. S., & Alshareef, R. S. (2024). Synergising nanoparticles and low salinity waterflooding for enhanced oil recovery: A state-of-the-art review. *Journal of Molecular Liquids*, 400, 124495. doi: 10.1016/j.molliq.2024.124495.
- [6]. Mehdizad, A., Sedae, B., & Pourafshary, P. (2022). Visual investigation of the effect of clay-induced fluid flow diversion on oil recovery, as a low-salinity water flooding mechanism. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109959. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521015734>.
- [7]. Yue L, Pu W, Zhao S, Zhang S, Ren F & Xu D. (2020). Insights into mechanism of low salinity water flooding in sandstone reservoir from interfacial features of oil/brine/rock via intermolecular forces. *J Mol Liq* . 313:113435. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016773221936876X>.
- [8]. Villero-Mandon, J., Askar, N., Pourafshary, P., & Riazi, M. (2024). Importance of Fluid/Fluid interactions in enhancing oil recovery by optimizing Low-Salinity waterflooding in sandstones. *Energies*, 17(13), 3315. doi.org/10.3390/en17133315.
- [9]. Srivastava, V. R., Sarma, H. K., & Gupta, S. K. (2024). Low-Salinity Waterflooding for EOR in Field A of Western Offshore Basin: A Pilot Study Analysis with Laboratory and Simulation Studies—Early Observations. *Energies*, 17(9), 2149. doi.org/10.3390/en17092149.
- [10]. Ligeiro, T. S., Vaz, A., & Chequer, L. (2022). Forecasting the impact of formation damage on relative permeability during low-salinity waterflooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109500. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521011414>.
- [11]. Muneer, R., Pourafshary, P., & Hashmet, M. R. (2023). An integrated modeling approach to predict critical flow rate for fines migration initiation in sandstone reservoirs and water-bearing formations. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 121462. doi: 10.1016/j.molliq.2023.121462.
- [12]. Ghobadi, H., Riahi, S., & Nakhaee, A. (2021). An investigation and determination of different salinity, ion type and phs effect on fine migration in sandstone reservoirs. *Journal Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2021.4524.3039.
- [13]. Tong, C.Y., Yang, Y.F., Zhang, Q., Imani, G., Zhang, L., Sun, H., Zhong, J.J., Zhang, K. and Yao, J.,

2024. Pore-scale fluid distribution and remaining oil during tertiary low-salinity waterflooding in a carbonate. *Petroleum Science*, 21(6), 4130-4140. doi.org/10.1016/j.petsci.2024.09.008.
- [14]. Uetani, T., Takeya, M., & Yogarajah, E. (2026). Exploring the Limit of Low-Salinity Waterflooding in a Carbonate Reservoir with Low Total Acid Number Oil. *SPE Journal*, 1-16. doi.org/10.2118/221302-MS.
- [15]. Saghandali, F., Salehi, M.B., Pahlevani, H., Taghikhani, V., Riahi, S., Ebrahimi, M., Saviz, S. and Roomi, A., 2024. Fabrication of a hydrogel reinforced with titanium nanoparticles to reduce fine migration and remediation of formation damage during low-salinity waterflooding. *Geoenergy Science and Engineering*, 241, p.213173. doi: 10.1016/j.geoen.2024.213173.
- [16]. Hosseini, A., Almasiyan, P., & Mahani, H. (2024). A triple-layer based surface complexation model for oil-brine interface in low-salinity waterflooding: Effect of sulphate interaction with carboxylic and basic groups, pH and temperature. *Journal of Molecular Liquids*, 402, 124730. 10.1016/j.molliq.2024.124730.
- [17]. Musharova, D. A., Mohamed, I. M., & Nasr-El-Din, H. A. (2012, February). Detrimental effect of temperature on fines migration in sandstone formations. In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control* (pp. SPE-150953). doi.org/10.2118/150953-MS.
- [18]. Schembre, J. M., Tang, G. Q., & Kovscek, A. R. (2006). Interrelationship of temperature and wettability on the relative permeability of heavy oil in diatomaceous rocks. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 9(03), 239-250. https://doi.org/10.2118/93831-PA.
- [19]. Ruan K, Wang H, Komine H & Ito D. (2022). Experimental study for temperature effect on swelling pressures during saturation of bentonites. *Soils Found*.62(6):101245. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080622001536.
- [20]. Bag, R., & Rabbani, A. (2017). Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil. *Applied Clay Science*, 136, 1-7. doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.043.
- [21]. Bovard, S., Abbasi, S., Shahrabadi, A., Talebi, A., and Hosseini, S. (2024). A Laboratory Study on the Effect of Low Salinity Water Injection on Recovery Factor in Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Research*. 34, 36-55.10.22078/pr.2024.5316.3364.
- [22]. Karami, M., Sedae, B., & Nakhaee, A. (2023). Microscopic and macroscopic investigation of simultaneous swelling and migration of clays on rock permeability during smart water injection. *Journal Petroleum Research* doi: 10.22078/pr.2023.5031.3253.
- [23]. Kashiri, R., Kalantariasl, A., Parsaei, R., Ghaedi, M., and Mahdiyar, H. (2020). Experimental investigation of kaolinite clay role in low salinity water flooding: a micromodel study. *Journal of Petroleum Research* 30, 72-83. 10.22078/pr.2020.3890.2772.
- [24]. Song, W., & Kovscek, A. R. (2015). Functionalization of micromodels with kaolinite for investigation of low salinity oil-recovery processes. *Lab on a Chip*, 15(16), 3314-3325. doi.org/10.1039/C5LC00544B.
- [25]. Song, W., & Kovscek, A. R. (2016). Direct visualization of pore-scale fines migration and formation damage during low-salinity waterflooding. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 1276-1283. doi: 10.1016/j.jngse.2016.07.055.
- [26]. Singh, A., Hembram, B. K., Iglauer, S., Keshavarz, A., & Sharma, T. (2025). Pore-scale micromodel experiments for performance evaluation of polymeric nanofluids in CO₂ flow through porous media for carbon utilization and storage. *Journal of Molecular Liquids*, 426, 127358. doi: 10.1016/j.molliq.2025.127358.
- [27]. Musabbir Rahman, R., Niemur, E., Blois, G., Kazemifar, F., Kim, M., & Li, Y. (2025). A novel microfluidic approach to quantify pore-scale mineral dissolution in porous media. *Scientific Reports*, 15(1), 6342.
- [28]. Bear, J. (2013). *Dynamics of fluids in porous media*. Courier Corporation. https://books.google.com/books?id=lurrmlFGhTEC.
- [29]. Mortensen, J., Engstrøm, F., & Lind, I. (1998). The relation among porosity, permeability, and specific surface of chalk from the Gorm field, Danish North Sea. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(03), 245-251. doi.org/10.2118/31062-PA.
- [30]. Hussaini, S. R., & Dvorkin, J. (2021). Specific surface area versus porosity from digital images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107773. doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107773.
- [31]. Mehdizad, A., Pourafshary, P., & Sedae, B. (2022). Visual investigation of simultaneous clay swelling and migration mechanisms and formation damage consequences using micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214, 110561. doi: 10.1016/j.petrol.2022.110561.
- [32]. Sharifipour, M., Nakhaee, A., & Pourafshary, P. (2019). Model development of permeability impairment due to clay swelling in porous media using micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 728-742. doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.082.

بررسی رفتار رس های بنتونیت و کائولینیت در برابر سیلاب زنی با شور آب رقیق در دمای بالا با استفاده از میکرومدل

فرشاد مستخدمین حسینی، یوسف رفیعی* و محمد شریفی

دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ تاریخ تغییر: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

چکیده

در این پژوهش، تأثیر مهاجرت و تورم کانی‌های رسی بنتونیت و کائولینیت بر آسیب سازند طی تزریق شور آب رقیق در شرایط دمایی بالا بررسی شد. به منظور شبیه‌سازی محیط متخلخل ماسه‌سنگی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای پوشش داده شده با رس و آون میکروفلوئیدیکی در دمای 70°C برای برقراری شرایط دمایی مخزن استفاده گردید. پنج نوع آب سازندی با ترکیبات مختلف یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم تهیه شد و پس از برقراری تعادل یونی با محیط، تزریق آب مقطر به عنوان شور آب رقیق انجام پذیرفت. تغییرات تخلخل، تخلخل مؤثر و تراوایی به کمک پردازش تصاویر ثبت شده طی زمان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نوع یون‌های موجود در سیال تزریقی نقش تعیین کننده‌ای در شدت تورم و مهاجرت رس‌ها دارد. در میکرومدل‌های پوشیده شده با بنتونیت، ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم به طور مؤثری تورم و مهاجرت رس را کنترل نمود، در حالی که در نمونه‌های کائولینیتی نیز این ترکیب کمترین افت در پارامترهای مخزنی را نشان داد چرا که در میکرومدل حاوی بنتونیت، نوسانات تراوایی نسبت به مقدار اولیه آن در حضور سدیم بین $0/9$ تا $1/35$ و در حضور ترکیب پتاسیم و کلسیم بین $0/83$ تا $1/03$ بوده است. در میکرومدل حاوی کائولینیت نیز این نوسانات در حضور سدیم $0/8$ تا $1/1$ و در حضور ترکیب پتاسیم و کلسیم $0/8$ تا 1 ثبت شد. کمتر بودن این نوسانات بیانگر کنترل بهتر آسیب سازند ناشی از تورم و مهاجرت رس‌ها توسط ترکیب پتاسیم و کلسیم است. این تحقیق اهمیت لحاظ نمودن فاکتور دما و نوع کاتیون‌های محیطی در پیش‌بینی آسیب سازندی طی فرآیند تزریق شور آب رقیق را برجسته کرده و چارچوبی عملی برای بهینه‌سازی استراتژی‌های ازدیاد برداشت فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: تزریق شور آب رقیق، تورم رس، مهاجرت رس، آسیب سازند، میکرومدل.

*مسئول مکاتبات

y.rafiei@aut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5679.3519)

مقدمه

رسانی کنند. در عین حال وجود کانی‌های رسی در سنگ مخزن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کارایی فرآیند تزریق شورآب رقیق داشته باشد. کانی‌های رسی نظیر کائولینیت و اسمکتیت ممکن است در طی فرآیند تزریق آب متورم شده و مهاجرت کنند، که این امر می‌تواند منجر به کاهش تراوایی و آسیب سازند گردد [۸، ۹]. با کاهش شوری آب سازندی به کمتر از مقدار بحرانی غلظت نمک^۱، نیروهای جاذبه الکترواستاتیکی بین سطح سنگ مخزن و کانی‌های رسی تضعیف می‌شوند. این تضعیف منجر به جداسدگی و جابه‌جایی ذرات ریز می‌گردد. علاوه بر این، از طریق سازوکار تورم اسمزی، کانی‌های رسی می‌توانند متورم شده و باعث آسیب به سازند شوند [۱۰].

جداسدگی ذرات ریز از سطح سنگ ناشی از غلبه نیروهای دافعه بر نیروهای جاذبه و از بین رفتن تعادل میان این نیروها است؛ پدیده‌ای که با استفاده از نظریه DLVO قابل تبیین است. این نظریه به ویژگی‌های سیال مانند pH، شوری، ترکیب شیمیایی و همچنین دما وابسته است و تغییر در هر یک از این عوامل می‌تواند بر پایداری سیستم و میزان جداسدگی و مهاجرت ذرات تأثیرگذار باشد [۱۱، ۱۲]. دما نقش بسیار مهمی در کارایی فرآیند تزریق شورآب رقیق و میزان آسیب به سازند ایفا می‌کند. دماهای بالاتر می‌توانند انحلال‌پذیری مواد معدنی و تحرک یون‌ها را افزایش دهند که این امر ممکن است به بهبود برداشت نفت منجر شود. با این حال، افزایش دما می‌تواند اثرات تورم و مهاجرت کانی‌های رسی را تشدید کرده و در نتیجه باعث افزایش آسیب به سازند گردد [۱۳]. دما بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی که در طی فرآیند تزریق شورآب رقیق رخ می‌دهند تأثیرگذار است و در نتیجه، کارایی کلی این فرآیند را تحت تأثیر

تقاضای جهانی برای نفت همچنان در حال افزایش است، در حالی که نفت ذخایری که به‌راحتی قابل دسترس هستند، با سرعت زیادی رو به کاهش می‌باشند. این وضعیت منجر به افزایش توجه به روش‌های ازدیاد برداشت نفت شده است؛ روش‌هایی که با هدف استخراج نفت بیشتر از مخازنی که پیش‌تر به‌طور جزئی توسط روش‌های متداول تخلیه شده‌اند، به کار گرفته می‌شوند. در میان این روش‌ها، تزریق شورآب رقیق^۱ به دلیل پتانسیل بالای آن در بهبود نرخ برداشت نفت، به‌ویژه در مخازنی با ویژگی‌های زمین‌شناسی پیچیده، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱]. با کاهش ذخایر متعارف نفت، صنعت نفت با چالشی اساسی در زمینه‌ی بهینه‌سازی برداشت از میادین موجود مواجه است. روش‌های سنتی معمولاً مقدار قابل توجهی از نفت را در مخزن باقی می‌گذارند، امری که ضرورت توسعه‌ی روش‌های پیشرفته‌ی ازدیاد برداشت نفت را دوچندان می‌کند؛ روش‌هایی که قادر باشند بازدهی برداشت را افزایش داده و در عین حال اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند [۲].

تزریق شورآب رقیق شامل تزریق آبی با میزان شوری کمتر از آب سازندی به درون مخازن نفتی است. این روش بر پایه‌ی چندین سازوکار مختلف استوار است که همگی در جهت افزایش برداشت نفت عمل می‌کنند. از جمله مهمترین این سازوکارها می‌توان به: تغییر ترشوندگی [۳]، تبادل یونی چند جزئی^۲ [۴]، اسمز [۵]، مهاجرت ذرات [۶] و انبساط لایه دوگانه الکتریکی^۳ [۷] اشاره نمود. وجود کانی‌های رسی اغلب به‌عنوان یکی از شرایط ضروری برای بروز اثرات مثبت تزریق شورآب رقیق در نظر گرفته می‌شود چرا که آن‌ها به‌عنوان یک تبادل کننده کاتیونی عمل کرده و در اثر مهاجرتشان می‌توانند با تغییر جهت جریان سیال تزریقی به تولید نفت‌های جاروب نشده یاری

1. Low Salinity Waterflooding (LSWF)
2. Multi Component Ion Exchange
3. Electrical Double Layer
4. Critical Salt Concentration (CSC)

این مقدمه آورده شد، به صورت آزمایش سیلاب‌زنی انجام گرفته‌اند [۲۱]. اگرچه روش سیلاب‌زنی مغزه به دلیل دقت بالاتر و شبیه‌سازی واقعی‌تر شرایط میدان، از اعتبار بیشتری برخوردار است، اما روش‌های نوینی همچون استفاده از میکرومدل‌ها به دلیل ماهیت قابل‌مشاهده‌ی خود، مزایایی را ارائه می‌دهند که سیلاب‌زنی، قادر به فراهم کردن آن‌ها نیست. اما همچنان مطالعات میکرومدلی صورت گرفته بر روی آسیب‌سازند ناشی از کانی‌های رسی، این پدیده را در دمای محیط بررسی نموده‌اند که با توجه به اطلاعات اشاره شده در همین مقدمه نمی‌توان نتایج آن‌ها را کاملاً مشابه شرایط واقعی دانست چراکه دما فاکتوری بسیار مهم و تاثیرگذار در این فرایند می‌باشد [۲۲-۲۵]. در سال‌های اخیر، استفاده از میکرومدل‌ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای بررسی فرآیندهای جریان و تغییرات در محیط‌های متخلخل گسترش یافته است. با وجود آنکه دما به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر رفتار سیستم‌های متخلخل و واکنش‌های شیمیایی درون آن‌ها داشته باشد، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های اخیر، آزمایش‌های خود را در دمای محیط انجام داده‌اند. به‌عنوان نمونه، مطالعه‌ای بر عملکرد نانوسیالات پلیمری در جابه‌جایی کربن دی‌اکسید در محیط متخلخل، کلیه آزمایش‌ها را در دمای محیط انجام داده است [۲۶]. همچنین، پژوهشی دیگر که رویکرد نوینی برای کمی‌سازی انحلال معدنی در مقیاس منفذ ارائه کرده است، از میکرومدل‌های دوبعدی واکنشی در شرایط محیطی استفاده کرده است [۲۷]. این موارد نشان می‌دهد که حتی در تحقیقات پیشرفته، انتخاب دمای محیط به‌عنوان شرایط آزمون، رویکردی رایج و پذیرفته شده است در حالی که در این پژوهش ما تأثیر دما در بررسی‌های میکرومدلی را نیز لحاظ نموده‌ایم.

در این پژوهش، برای نخستین بار آسیب‌سازند ناشی از تورم و مهاجرت کانی‌های رسی در شرایط

قرار می‌دهد [۱۴]. در حالیکه در دماهای بالا، پتانسیل تورم برخی از کانی‌های رسی ممکن است افزایش یابد، که این امر می‌تواند موجب انسداد شدیدتر منافذ سنگ مخزن شود [۱۵، ۱۶]. نتایج آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه انجام‌شده در دماهای بالا (تا ۱۵۰ °C) با استفاده از مغزه‌های ماسه‌سنگی حاوی کانی‌های رسی نشان داد که نیروی دافعه لایه‌ی دوگانه الکتریکی بیشترین تأثیر را در آسیب به سازند به‌دلیل تغییرات دمایی داشته است [۱۷]. در مطالعه دیگری مشخص شده است که جابه‌جایی ذرات ریز به‌طور قابل توجهی تابعی از دما و pH است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش pH و دما، پتانسیل زتا منفی‌تر می‌شود، که این امر نشان‌دهنده تقویت نیروهای دافعه بین ذرات رسی و سطح سنگ مخزن است؛ حتی در دماهایی که اندکی بالاتر از دمای محیط هستند [۱۸]. از طرفی دیگر وابستگی فشار تورمی بنتونیت به دما، پیچیده بوده و تحت تأثیر عوامل ساختاری و محیطی قرار دارد؛ از این رو، برای درک کامل این تعاملات، انجام تحقیقات بیشتر ضروری است [۱۹]. بررسی‌های انجام‌شده در دماهای مختلف نشان داده‌اند که با افزایش دما، فشار تورمی بنتونیت افزایش می‌یابد [۲۰].

نیاز به روش‌هایی کارآمدتر و پایدارتر برای برداشت نفت، محرک اصلی در پژوهش و توسعه روش‌های نوین ازدیاد برداشت نظیر تزریق شورآب رقیق به شمار می‌رود. اگرچه این روش مزایای قابل توجهی را ارائه می‌دهد، اما برای دستیابی به نتایج بهینه در برداشت، باید اثرات حضور کانی‌های رسی و تأثیر دما بر آسیب به سازند با دقت بررسی شود. درک صحیح از این عوامل برای اجرای موفقیت‌آمیز فرآیند تزریق شورآب رقیق در شرایط مختلف مخزنی، به‌ویژه در سازندهای پیچیده کربناته و ماسه‌سنگی، از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر مطالعات انجام شده روی بحث تزریق شورآب رقیق و آسیب‌سازند ناشی از کانی‌های رسی در طی آن که بخشی از آنها هم در

نمک‌هایی با شوری بالا و با ترکیبات مختلف به درون میکرومدل تزریق شدند و پس از پایدار شدن شرایط، آب مقطر جهت القای آسیب سازند تزریق گردید. در فواصل زمانی مشخص یک ساعت یکبار، از میکرومدل تصویربرداری شد تا نتایج مورد نظر حاصل گردد. کلیه آزمایش‌ها در دمای 70°C انجام شدند.

میکرومدل

میکرومدل شیشه‌ای برای انجام آزمایش‌ها آماده‌سازی شد. برای بازنمایی ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل، یک الگوی سه‌لایه بر روی سطح شیشه حکاکی گردید. فرآیند ساخت و آماده‌سازی میکرومدل‌ها از طریق مراحل زیر انجام شد:

- الگو میکرومدل توسط نرم‌افزار CorelDraw طراحی شد.
- دو عدد شیشه با طول ۱۶ cm، عرض ۸ cm و ضخامت ۶ mm بریده و آماده شدند.
- با استفاده از لیزر الگو طراحی شده روی یکی از این شیشه‌ها حک شد.
- شیشه لیزر شده با برس فلزی تمیز و به مدت ۱۰ min در حمام فراصوت قرار گرفت تا عاری از هرگونه خرده شیشه شود.
- با استفاده از مته، مسیرهای ورودی و خروجی روی همین شیشه به‌وجود آورده شد.
- با استفاده از حلال‌های شیمیایی هردو شیشه‌ها شسته شد.
- این دو شیشه روی هم قرار داده و به کوره منتقل شدند تا در دمای 700°C به یکدیگر بچسبند.
- سوزن‌های ورودی و خروجی به وسیله چسب به میکرومدل متصل شدند.
- طرح میکرومدل، که مجموعه‌ای از حفرات و گلوگاه‌هاست در شکل ۱ آورده شده است.

واقعی دمای مخزن (70°C) با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از آون میکروفلوئیدیکی شفاف، امکان تصویربرداری مداوم و دقیق در حین آزمایش را بدون تغییر شرایط دمایی فراهم کرده و دقت نتایج را به طور قابل توجهی افزایش داده است، در حالی که مطالعات پیشین در دمای محیط و با خارج کردن میکرومدل از محیط آزمایش انجام شده‌اند. در این کار، اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها به صورت کمی و در مقیاس حفره‌ای پایش شده و تأثیر انواع کاتیون‌ها شامل سدیم، پتاسیم و کلسیم و ترکیبات آن‌ها بر رفتار دو نوع رس بنتونیت و کائولینیت در دمای بالا به طور نظام‌مند مقایسه شده است. نتایج این بررسی منجر به شناسایی ترکیب بهینه کاتیون‌ها (پتاسیم و کلسیم) برای کنترل مؤثر تورم و مهاجرت و در نتیجه کاهش حداکثری آسیب سازند گردیده که تصویری روشن و بی‌سابقه از سازوکار های آسیب در شرایط دمایی واقعی ارائه می‌دهد.

روش کار

در مطالعه حاضر، یک فرایند آزمایشگاهی با هدف بررسی شدت آسیب‌های سازندی مرتبط با کانی‌های رسی نظیر تورم و مهاجرت، در طی تزریق شورآب رقیق در دمای مخزن طراحی شد. برای شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر محیط متخلخل ماسه‌سنگی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای پوشش‌داده‌شده با کائولینیت^۱ و بنتونیت^۲ استفاده گردید. به‌منظور اعمال دما بر روی میکرومدل، از یک آون میکروفلوئیدیکی استفاده شد که توسط شرکت Poreflowtech در ایران طراحی شده است. این دستگاه نه‌تنها شرایط دمایی مورد نیاز را فراهم می‌نماید، بلکه به دلیل شفاف بودن، امکان تصویربرداری از میکرومدل را بدون خارج کردن آن از آون فراهم می‌سازد و در نتیجه، شرایط دمایی ثابت حفظ می‌گردد. برای رسیدن به حالت پایدار بین رس و آب سازندی و برقرار نمودن شرایط اولیه مخزنی، آب

1. Kaolinite
2. Bentonite

عملیات رس پوشی تعداد پیکسل‌های مشکی درون میکرومدل که نماینده رس‌ها هستند شمارش شد تا در تمامی آزمایش‌ها یکسان و دقت بالایی بتوان به بررسی آسیب سازند پرداخت.

سیالات

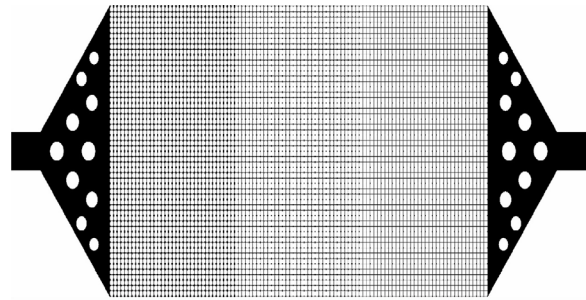
نوع کاتیون‌های موجود در آب می‌تواند بر شدت آسیب سازندی القاشده در طی فرآیند تزریق شورآب رقیق تأثیرگذار باشد. به‌منظور بررسی اثر پدیده‌های تورم و جابه‌جایی کانی‌های رسی در شدت‌های مختلف و دمای مخزن، مجموعه‌ای از نمک‌ها با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی نظیر KCl، NaCl و CaCl_2 انتخاب شدند تا پنج شورآب غلیظ تهیه گردد که به‌عنوان آب سازندی مورد استفاده قرار گیرند. با افزودن مقادیر مشخصی از این نمک‌ها به آب مقطر، آب سازندی مصنوعی با شوری ۶۰۰۰۰ ppm تهیه شد. ترکیب این آب‌های سازندی در جدول ۱ ارائه شده است. برای اعمال شدیدترین شرایط آسیب سازندی، آب مقطر به عنوان شورآب رقیق برای تزریق به درون میکرومدل انتخاب شد.

جدول ۱ ترکیب آب‌های سازندی استفاده شده در این پژوهش.
Table 1 Composition of used formation waters used in this study.

| No. | Composition | Salinity (g/L) |
|-----|-----------------------|----------------|
| 1 | NaCl | 60 |
| 2 | KCl | 60 |
| 3 | CaCl_2 | 60 |
| 4 | NaCl+ CaCl_2 | 30+30 |
| 5 | KCl+ CaCl_2 | 30+30 |

تجهیزات و روش انجام آزمایش

تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه شامل یک دوربین دیجیتال DSLR با وضوح بالا و لنز ماکرو (دوربین Canon EOS ۲۰۰۰ D به همراه لنز ماکرو Sigma ۱۰۵ mm که تصاویری با رزولوشن ۶۰۰۰ در ۴۰۰۰ پیکسل ثبت می‌کند) برای ثبت تصاویر در فواصل نزدیک، یک پمپ سرنگی دقیق با قابلیت تزریق سیالات در دبی‌های بسیار پایین، یک سیستم



شکل ۱ الگو میکرومدل طراحی و استفاده شده در این پژوهش.
Fig. 1 Schematic of designed micromodel in this study.

الگوی طراحی شده شامل سه لایه‌ی همگن با اندازه منافذ متفاوت و عرض گلوگاه یکسان است که به‌صورت عمودی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. از چپ به راست، لایه‌ی اول دارای قطر منافذ ۰/۴۵ mm است؛ در لایه‌ی دوم یا میانی، اندازه منافذ به ۰/۳ mm کاهش می‌یابد و در لایه‌ی سوم، اندازه منافذ ۰/۲ mm می‌باشد. عرض گلوگاه در سراسر الگو به‌صورت یکنواخت برابر با ۰/۱ mm در نظر گرفته شده است.

رس پوشی میکرومدل

دو نوع کانی رسی برای این مطالعه انتخاب شدند: کائولینیت به‌عنوان عامل مهاجرت و بنتونیت به‌عنوان عاملی برای هر دو پدیده تورم و مهاجرت. پودرهای کائولینیت و بنتونیت با درجه خلوص آزمایشگاهی از شرکت دکتر مجللی تهیه گردیدند. پس از آماده‌سازی میکرومدل، قبل از انجام آزمایش‌ها نیاز است، سطوح داخلی خلل و فرج میکرومدل رس پوشی شود. برای اینکار ابتدا محلول ۱۵۰۰۰ ppm از آب نمک سدیم کلرید آماده می‌شود. حدود ۴ mL از این آب نمک به درون میکرومدل تزریق می‌شود. سپس سوسپانسیون ۲۰ درصد وزنی از رس و آب نمک سدیم کلرید آماده و به درون میکرومدل تزریق می‌شود. برای مرحله آخر میکرومدل حاوی سوسپانسیون به درون آون انتقال داده شده تا به مدت ۱ h در دمای ۱۴۰ °C باقی بماند. پس از سپری شدن این زمان، رس‌ها کاملاً به سطح شیشه متصل خواهند شد و میکرومدل آماده انجام آزمایش می‌باشد. پس از هر

مهاجرت رس مشاهده می‌شود به خاطر برهم‌خوردن شرایط تعادلی غلظت یون‌ها می‌باشد و نه عامل دیگری. پس از به تعادل رسیدن یون‌ها با رس موجود در میکرومدل با استفاده از پمپ سرنگی به درون میکرومدل به مدت ۱۲ h با دبی ۰/۴۴ mL/h که معادل حجم فضای حفرات میکرومدل می‌باشد، آب مقطر تزریق شد تا به مرور زمان غلظت یون‌های درون فضای متخلخل کاهش یابد و تورم و مهاجرت رس‌ها رخ بدهد. هر یک ساعت یکبار از میکرومدل تصویربرداری انجام شد تا تغییرات در تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار گیرد. پس از انجام آزمایش، به صورت دستی و با دبی و فشار بالا آب مقطر داغ به درون میکرومدل تزریق شد تا تمامی رس‌ها شسته شده و دوباره عملیات رس پوشی برای آزمایش بعدی انجام شود. تمامی این ۵ آزمایش برای هر کدام از رس‌های کائولینیت و بنتونیت تکرار شد.

پردازش تصاویر

در اولین قدم، تصاویر گرفته شده از میکرومدل در حین انجام آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار Lightroom روتوش می‌شوند تا پردازش آنها با دقت بیشتری انجام شود. فضای خالی حفرات و قسمت لیزر نشده شیشه که نماینده ماتریکس سنگ می‌باشد، به رنگ سفید مشاهده می‌شوند و رس‌ها به رنگ مشکی. لذا قبل از پردازش تصاویر، پوشش‌دهی ماتریکس میکرومدل به رنگ مشکی باید انجام شود. اینکار در نرم‌افزار CorelDraw به دقت انجام می‌شود تا خطای اندازه‌گیری تخلخل به حداقل برسد. با انجام این مراحل عکس آماده پردازش با نرم‌افزار Matlab می‌باشد. کد نوشته شده برای به دست آوردن پارامتر تخلخل، عکس وارد شده را در مقیاس خاکستری یا Greyscale به صورت ماتریسی با درایه‌هایی به تعداد پیکسل‌های موجود در عکس خواهد شناخت. هر درایه از این ماتریس مقداری بین ۰ (کاملاً مشکی) تا ۲۵۵ (کاملاً سفید) خواهد داشت. از نرم‌افزار خواسته می‌شود

رایانه‌ای برای کنترل دوربین و ذخیره‌سازی تصاویر، همچنین یک آون میکروفلوئیدیکی می‌باشد. این اجاق امکان قرارگیری میکرومدل در داخل آن را فراهم کرده و به سیستم نورپردازی داخلی و کنترل‌کننده دما مجهز است تا دمای میکرومدل را در شرایط پایدار حفظ کند. تصویری از این چیدمان در شکل ۲ ارائه شده است.



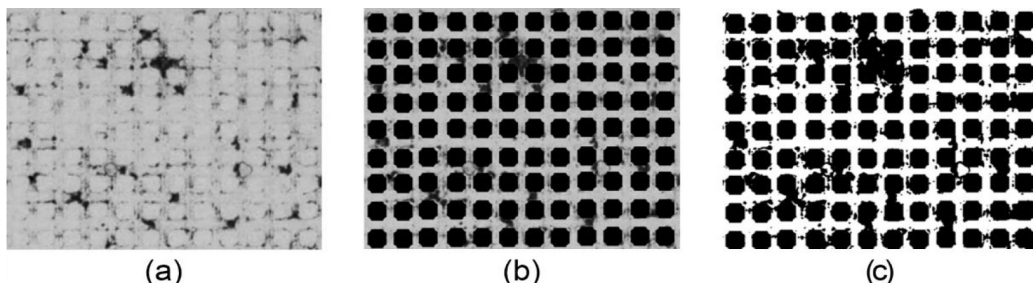
شکل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش.
Fig. 2 Laboratory setup used in this study.

در آزمایش‌ها از ترکیب نمک‌هایی که بالاتر گفته شد، ۵ ترکیب متفاوت با شوری بالا ابتدا هر کدام به صورت جداگانه و مختص به آزمایش مورد نظر به درون میکرومدل به عنوان آب سازندی تزریق می‌شود و به میکرومدل به مدت چندین ساعت زمان داده می‌شود تا رس‌ها با آب سازندی و یون‌های موجود در آن به تعادل برسند. تزریق به صورت دستی با دبی بالا انجام می‌شود تا از خروج رس‌های آزاد که مقدار بسیار حداقلی دارند، که خود نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن عملیات رس پوشی می‌باشد، اطمینان حاصل کنیم. با انجام اینکار مطمئن می‌شویم، اگر در طی آزمایش اگر

عملیات برچسب‌گذاری را انجام می‌دهد بر روی یک تصویر صفر و یک شده به کار می‌رود. به این ترتیب که از سمت چپ بالا رو به پایین حرکت می‌کند تا به اولین پیکسلی که سفید رنگ است برسد و این پیکسل را به عنوان اولین خوشه در نظر می‌گیرد. سپس این کار را ادامه می‌دهد در ستون بعد به اولین مقدار ۱ که رسید همسایه‌های چهارگانه آن را نگاه می‌کند، اگر بین پیکسلی که قبلاً برچسب‌گذاری کرده بودیم و پیکسلی که اکنون به آن رسیدیم مسیری وجود داشت، این دو پیکسل هر دو از یک خوشه هستند، پس به این پیکسل نیز برچسب همان پیکسل قبلی را می‌زند. این کار ادامه پیدا می‌کند تا جایی که به پیکسلی می‌رسد که در همسایگی چهارگانه آن، پیکسلی که برچسب ۱ به خود گرفته وجود ندارد به این ترتیب پیکسل مورد نظر برچسب ۲ به خود می‌گیرد و بدین ترتیب تا پایان پیش می‌رود و هر کدام از تکه‌های عکس را یک برچسب جدا قرار می‌دهد و اصطلاحاً این تکه‌ها را خوشه‌بندی یا Cluster می‌کند. در نهایت خوشه‌های ایزوله را از عکس حذف کرده و با روشی که برای محاسبه تخلخل استفاده شد، تخلخل موثر را محاسبه می‌نماید. خلاصه‌ای از این اقدامات در شکل ۴ آورده شده است.

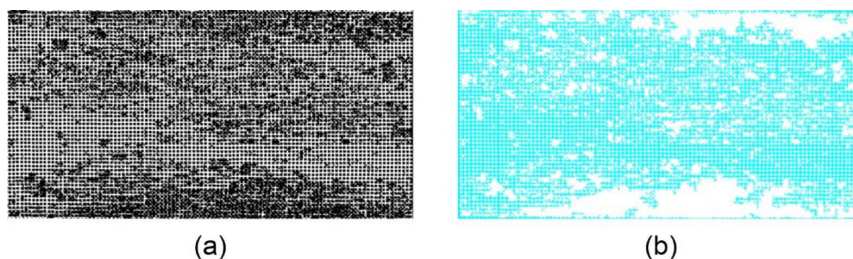
تا Histogram مربوط به عکس را رسم کرده که نمودار تعداد پیکسل‌های مربوط به هر مقدار از درایه‌هاست. با استفاده از این نمودار می‌توان عملیات آستانه‌گیری یا Thresholding را انجام داد. آستانه عددی است که با استفاده از آن می‌توان عملیات Binary یا صفر و یک کردن عکس را انجام داد. با مشخص شدن مقدار آستانه، نرم‌افزار مقدار هر درایه را با آستانه مقایسه نموده و اگر این مقدار بیشتر مساوی از آستانه باشد به آن مقدار ۱ داده و آن پیکسل را سفید در نظر خواهد گرفت و اگر مقدار درایه از آستانه کمتر بود به آن مقدار ۰ داده و آن را مشکی در نظر می‌گیرد. شکل ۳ به عنوان خلاصه از این مراحل آورده شده است. پس از انجام تمامی این اقدامات، با شمارش تعداد پیکسل‌های سفید که نماینده فضای خالی محیط متخلخل هستند و تقسیم آن بر تعداد کل پیکسل‌های تصویر می‌توان تخلخل را محاسبه نمود.

از آن جایی که فقط تخلخل‌های به هم پیوسته یا به عبارتی آن دسته از خلل و فرج‌هایی که ایزوله نیستند در تعیین تراوایی مطلق مؤثر می‌باشند، بایستی تخلخل موثر را بیابیم و در صورتی که تخلخل ایزوله وجود داشته باشد باید آنها را حذف کنیم. برای این کار در نرم‌افزار Matlab عملیات برچسب‌گذاری یا Labeling انجام گرفت. تابعی که



شکل ۳ خلاصه‌ای از صفر و یک کردن تصاویر میکرومدل (a) تصویر رتوش شده، (b) تصویر میکرومدلی که ماتریکس آن با رنگ مشکی پوشانده شده و (c) تصویر صفر و یک شده میکرومدل.

Fig. 3 Summary of binarizing the micromodel images (a) Retouched image, (b) Micromodel image with masked matrix and (c) Binarized micromodel image.



شکل ۴ خلاصه‌ای از حذف حفرات ناپیوسته (a) تصویر صفر و یک شده تمام میکرومدل، (b) تصویر میکرومدلی که حفرات ناپیوسته آن که با رنگ سفید نشان داده شده حذف و حفرات به هم پیوسته آن به رنگ آبی نشان داده شده است.

Fig. 4 Summary of removing discontinuous pores (a) Binarized image of entire micromodel and (b) Image of the micromodel with discontinuous pores, shown in white and removed and also connected pores shown in blue.

همین ترتیب و با همین ترکیب آب‌های سازندی در میکرومدل پوشش داده شده با کائولینیت انجام شد. در ادامه به بررسی نتایج این ۱۰ آزمایش پرداخته شده است.

آزمایش‌های رس بنتونیت

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص می‌باشد، در نمودار شکل ۵ الف روند تغییرات تخلخل و تخلخل موثر در ساعت‌های مختلف تزریق آب مقطر به درون میکرومدل پوشش داده شده با بنتونیت و اشباع شده با آب شور آب غلیظ سدیم کلرید، نسبت به مقدار اولیه آنها آورده شده است.

در نمودار شکل ۵ ب نیز روند تغییرات تراوایی میکرومدل در آزمایش اول نسبت به زمان آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ الف می‌توان مشاهده کرد، در ۴ ساعت اولیه تزریق آب مقطر به درون میکرومدل در طی آزمایش ۱، نسبت تخلخل که با خط چین خاکستری مشخص شده، تغییرات حداقلی را نشان می‌دهد و نسبتاً ثابت مانده است، ولی در همین زمان نمودار تخلخل موثر که با خط مشکی مشخص شده است در ۳ h اول روندی نزولی و پس از آن تا ۴ h روندی افزایشی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی کاهش تخلخل را در نمودار به واسطه تورم رس و افزایش آن را می‌توان به دلیل مهاجرت رس‌ها به خارج از میکرومدل مربوط دانست.

برای محاسبه تراوایی از معادله کارمن-کوزنی^۱ که در معادله ۱ مشاهده می‌شود استفاده می‌کنیم [۲۸].

$$K = C \frac{\phi^3}{S^2} \quad (1)$$

در این معادله K تراوایی میکرومدل، ϕ تخلخل موثر میکرومدل، S مساحت سطح ویژه و C فاکتور کوزنی^۲ که با استفاده از معادله ۲ و تخلخل موثر قابل محاسبه است، می‌باشند [۲۹].

$$C = \frac{1}{4 \cos\left(\frac{1}{3} \arccos(2\phi - 1) + \frac{4}{3} \pi\right) + 4} \quad (2)$$

مساحت سطح ویژه، نسبت سطح داخلی سنگ به حجم آن می‌باشد که برای فضای متخلخلی با حفراتی با سطح مقطع مستطیل شکل، می‌تواند توسط معادله ۳ که در آن a همان بازشدگی گلوگاه، معادل $100 \mu\text{m}$ می‌باشد، محاسبه شود [۳۰].

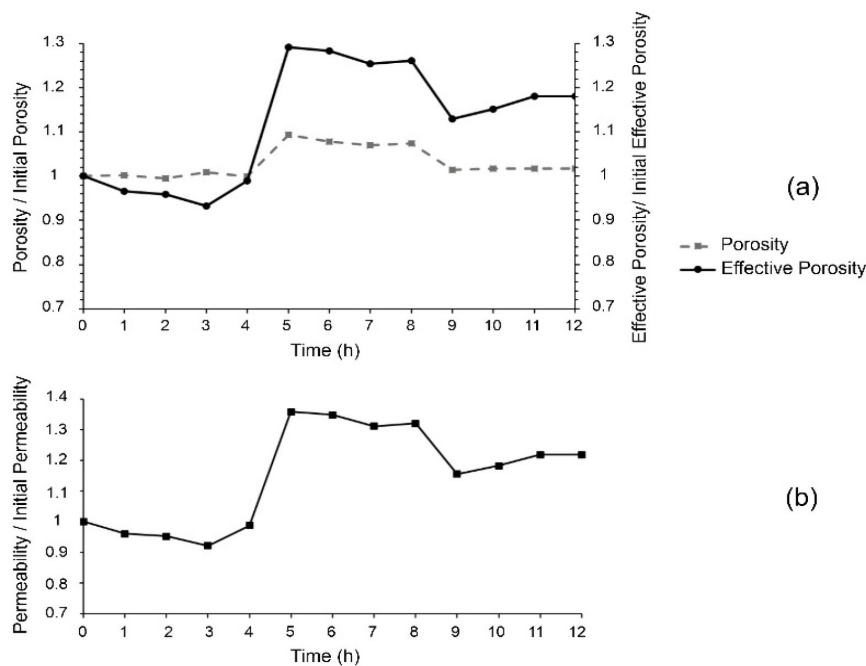
$$S = \frac{4\phi}{a} \quad (3)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر از این توضیح داده شد، تعداد ۱۰ آزمایش به صورت تزریق شور آب رقیق (آب مقطر) به درون میکرومدل‌های پوشش داده شده با بنتونیت و کائولینیت انجام شد. آزمایش‌های ۱ تا ۵ در میکرومدل پوشش داده شده با بنتونیت و اشباع شده با آب‌های سازندی مصنوعی با شوری ۶۰۰۰۰ ppm، به ترتیب با نمک‌های سدیم کلرید، پتاسیم کلرید، کلسیم کلرید، ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید و در نهایت ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید، انجام شد. آزمایش‌های ۶ تا ۱۰ به

1. Carman-Kozeny

2. Kozney Factor



شکل ۵ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۱ (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان. Fig. 5 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride brine in experiment 1, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

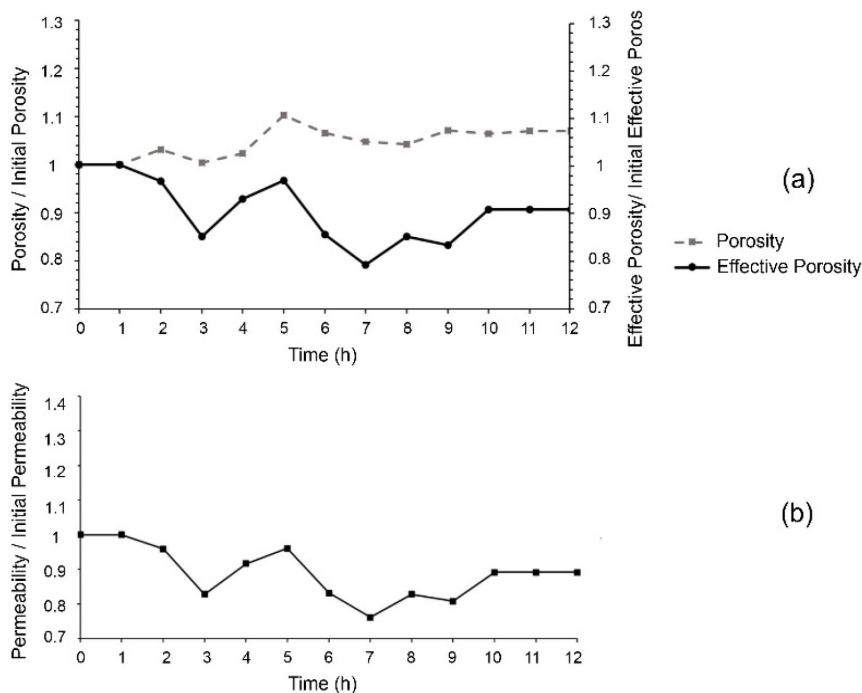
تخلخل مشخص می‌باشد. از ۳ تا ۵ h شاهد روند افزایشی در دو نمودار هستیم که نشان‌دهنده شدت یافتن مهاجرت رس‌ها نسبت به تورم می‌باشد. به همین دلیل است که تخلخل تا مقدار ۱/۱ برابر و تخلخل موثر تا مقدار ۱/۳ برابر مقدار اولیه خود افزایش داشته‌اند. اما بعد از ساعت ۵ تا ۹ h می‌توان در هر دو نمودار روندی کاهشی را مشاهده نمود که نشانه‌ای از بیشترین مقدار تورم رس در این ناحیه هستیم که بر اثرات مهاجرت رس‌ها به خارج از میکرومدل فائق آمده و مقادیر پارامتر هارا کاهش داده است. پس از ساعت ۹ تا انتهای آزمایش می‌توان گفت تنها اتفاقی که در میکرومدل در حال رخ دادن می‌باشد، مهاجرت رس‌هاست و تورم دیگر بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود در ۹ h متوقف شده است. نمودار شکل ۵ ب که مربوط به تراوایی میکرومدل در آزمایش ۱ می‌باشد، هم تمامی این اتفاقات قابل مشاهده می‌باشد و مشاهدات گفته شده را تایید می‌کند.

این ادعاها و مشاهدات در خصوص کاهش تخلخل در اثر تورم و افزایش آن در اثر خروج رس‌ها از میکرو منطبق بر تجربیات و مشاهدات موجود در پژوهش‌های مشابه و پیشین می‌باشد [۲۲، ۳۱، ۳۲]. کاهش تخلخل موثر را به دلیل گرفتگی گلوگاه‌ها توسط تورم و مهاجرت رس‌ها و افزایش آن را به می‌توان مربوط به بازشدگی گلوگاه‌ها دانست. بین ۴ و ۵ h، هر دو نمودار روندی افزایشی را طی می‌کنند و پس از آن تا ۹ h روندی کاهشی را در آنها شاهد هستیم. با توجه به کاهش شوری آب درون فضای متخلخل حاوی بنتونیت به صورت پیوسته از ابتدای شروع آزمایش می‌توان انتظار داشت که هم تورم بنتونیت و هم مهاجرت آن شروع شده باشد. با توجه به روندی که نمودارهای تخلخل و تخلخل موثر از خود نمایش داده‌اند می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در ۳ h ابتدایی تزریق شورآب رقیق، اثرات افزایشی خروج رس‌ها از میکرومدل در نتیجه مهاجرت توسط اثرات کاهشی تورم رس‌ها خنثی شده است که در روند نسبتاً ثابت نمودار

بیرون آن در آزمایش اول می‌باشد.

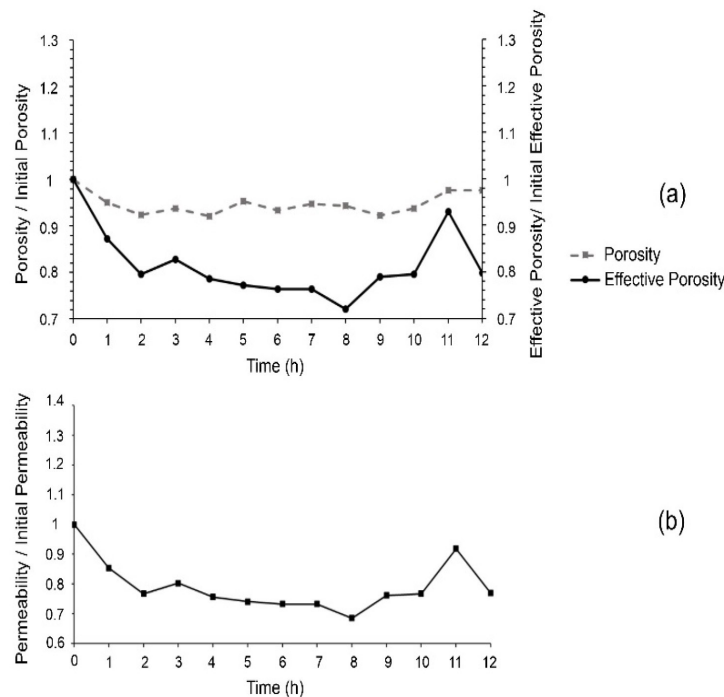
در شکل ۷ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۳ می‌باشد. با مقایسه عملکرد یون کلسیم در آزمایش شماره ۳ با یون پتاسیم در آزمایش شماره ۲، می‌توان مشاهده نمود که یون کلسیم در کنترل مهاجرت موفقتر عمل نموده تا تورم چراکه در نمودارهای این آزمایش آن افزایش‌ها در اثر خروج رس‌ها از میکرومدل دیده نمی‌شود ولی از همان ساعت‌های ابتدایی اثرات منفی تورم بر روی تمامی پارامترهای بررسی شده قابل مشاهده است. برای همین است که عدد تغییرات پارامتری همچون تراوایی از اعداد مربوط به همین پارامتر در آزمایش شماره ۲ پایین‌تر می‌باشد.

در شکل ۶ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۲ می‌باشد. مشابه آزمایش قبلی باز هم می‌توان مشاهده نمود که تا ۵ h تزریق شورآب رقیق مهاجرت رس‌ها تاثیر بیشتری از تورم داشته و از ساعت ۵ تا ۷ تورم به حداکثر خود رسیده و پس از متوقف شده و تنها مهاجرت رس‌ها به خارج میکرومدل قابل مشاهده می‌باشد. در مقایسه با آزمایش قبلی می‌توان ادعا کرد که یون پتاسیم نسبت به سدیم در تورم مهاجرت و تورم رس بنتونیت موفق‌تر عمل نموده است. درست است که مقادیر پارامترهای بررسی شده در آزمایش اول، بزرگتر از آزمایش دوم می‌باشد اما به علت بهتر بودن عملکرد یون سدیم نسبت به پتاسیم نمی‌باشد بلکه به علت مهاجرت شدید مقادیر زیادی از رس‌های موجود در میکرومدل به



شکل ۶ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۲، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثر نسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 6 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride brine in experiment 2, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۷ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۳، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

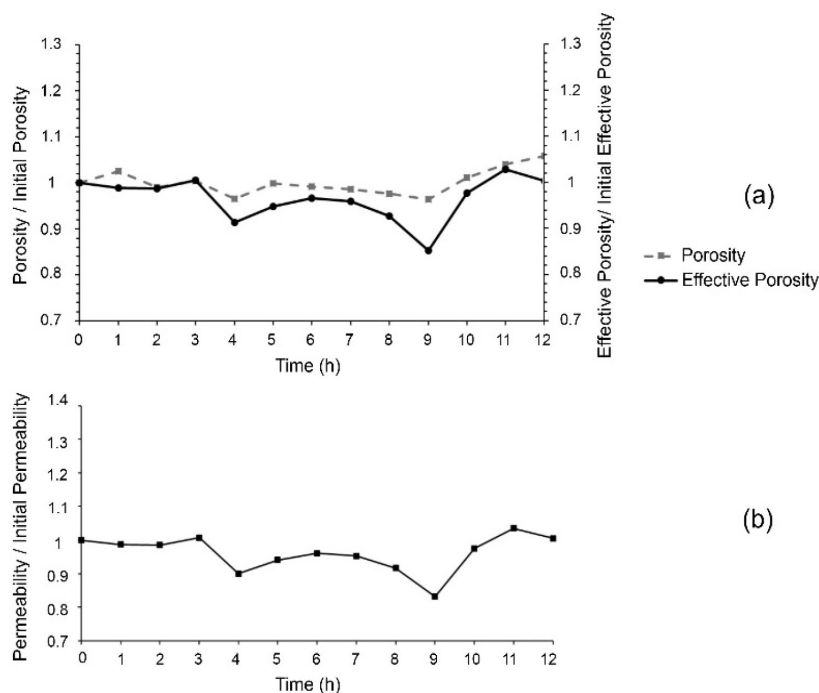
Fig. 7 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated calcium chloride brine in experiment 3, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

کرده هم یون کلسیم مهاجرت را و مزایای استفاده از هردو این یون‌ها مشهود می‌باشد.

آزمایش‌های رس کائولینیت

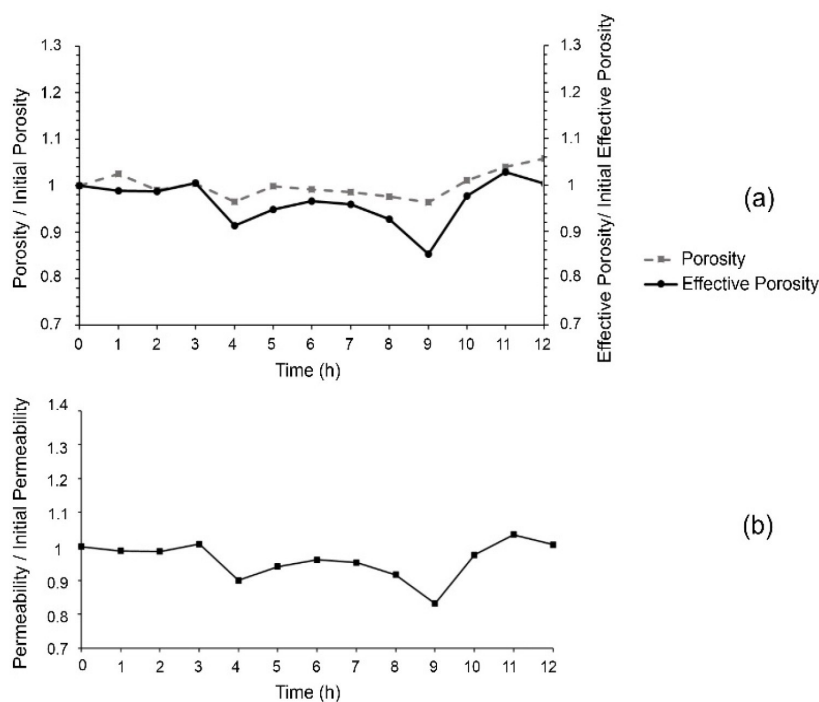
شکل ۱۰ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۶ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای این آزمایش می‌توان مشاهده نمود که در ساعت‌های ابتدایی تزریق شورآب رقیق، مهاجرت رس‌ها شروع شده و با توجه به روند افزایشی مشاهده شده می‌توان نتیجه گرفت که کائولینیت از میکرومدل خارج می‌شود. بعد از گذشت ۴ h از آزمایش در ادامه می‌توان روند شدید کاهش تخلخل موثر را مشاهده نمود که به واسطه گرفتگی گلوگاه‌های میکرومدل توسط رس‌های مهاجرت کرده اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه کائولینیت فاقد پتانسیل تورم می‌باشد، انتظار نداریم که در نمودار تخلخل شاهد روند کاهش باشیم اما این امر در نمودار شکل ۱۰ الف مشهود است.

در شکل ۸ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۴ می‌باشد. با مقایسه نتایج آزمایش ۴ و آزمایش ۳ می‌توان مشاهده کرد که باز هم شاهد افزایش‌های شدید در نمودار پارامترهای بررسی شده هستیم که به واسطه موجود بودن یون سدیم می‌باشد که باعث مهاجرت رس به خارج از میکرومدل شده است. علت شدید نبودن روند کاهش در اثر تورم در ساعت ابتدایی نسبت به آزمایش قبلی هم به همین دلیل است چرا که مهاجرت رس‌ها به خارج میکرومدل کمی اثرات تورم را خنثی نموده است. در شکل ۹ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۵ می‌باشد. با مقایسه نتایج این آزمایش با آزمایش‌های قبلی می‌تواند دید که بهترین عملکرد را این آزمایش از خود نشان داده است چراکه هم یون پتاسیم، تورم را به خوبی کنترل



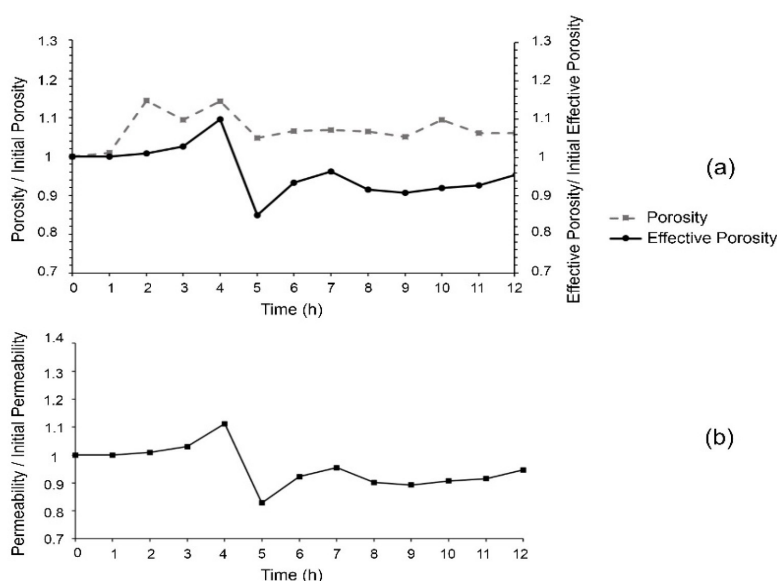
شکل ۸ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۴، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 8 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride and calcium chloride brine in experiment 4, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۹ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش بنتونیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۵، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 9 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the bentonite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride and calcium chloride brine in experiment 5, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۰ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ سدیم کلرید در آزمایش ۶، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 10 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride brine in experiment 6, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

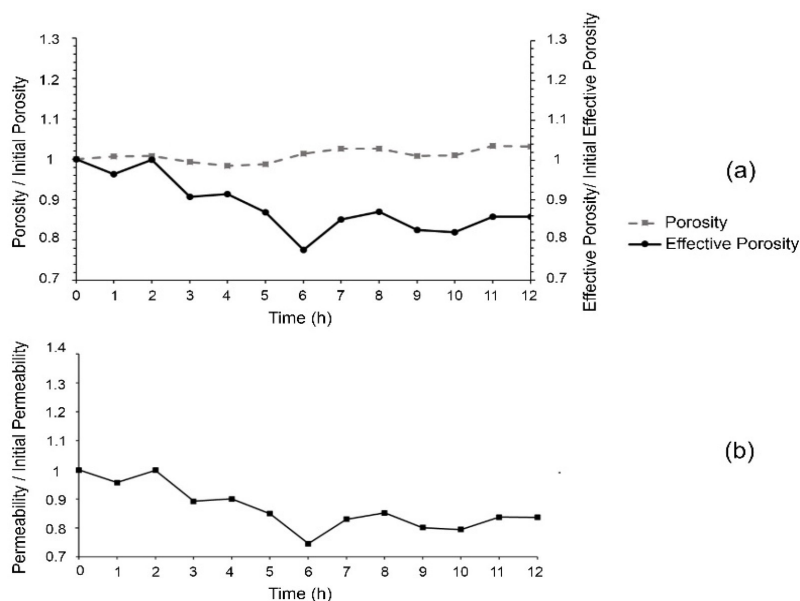
گرفتگی گلوگاه‌های میکرومدل شود.

شکل ۱۲ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۸ را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش ۷ می‌توان مشاهده نمود که یون کلسیم نسبت به پتاسیم بهتر توانسته مهاجرت را کنترل کند، چراکه مقادیر پارامترهای بررسی شده کمتر از آزمایش شماره ۷ کاهش داشته‌اند.

شکل ۱۳ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۹ را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج این آزمایش می‌توان اثرات مخرب حضور یون سدیم را در کنترل مهاجرت مجدد مشاهده نمود. این امر هم در مقادیر پارامترها مشهود می‌باشد، هم در روند پیوسته باز و بسته شدن گلوگاه‌های میکرومدل.

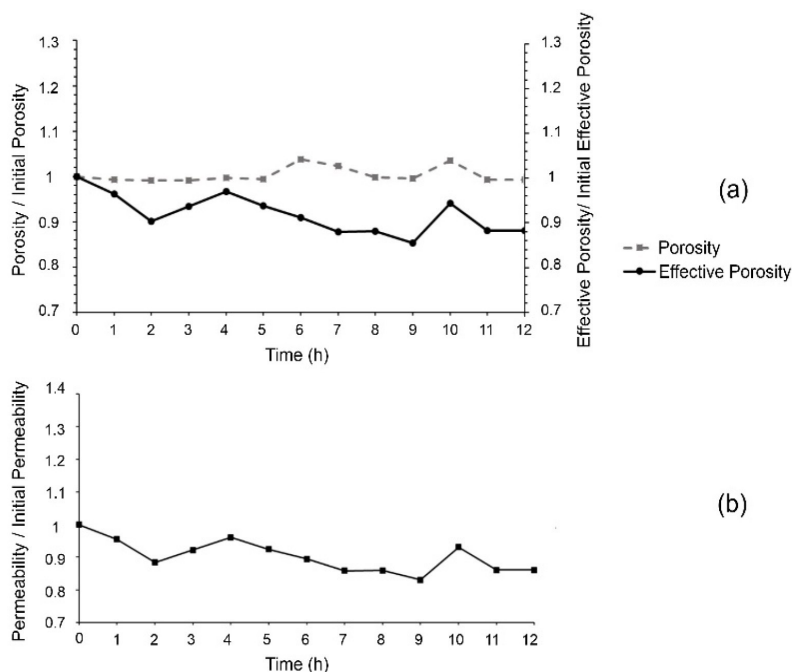
دلیل این اتفاق طبیعت ۲ بعدی پردازش تصاویر برای محاسبه تخلخل می‌باشد. در مواردی ممکن رس‌ها روی هم در عمق میکرومدل انباشته شوند و کد نوشته شده فقط قسمت بالایی این رس‌ها را تشخیص دهد و پس از گذشت زمان از آزمایش و شروع مهاجرت این رس‌های انباشته شده روی هم در سطح میکرومدل پخش شوند و کد پردازش تصاویر رس‌های بیشتری را در فضای متخلخل میکرومدل تشخیص دهد که باعث مشاهده شدن روند نزولی در تخلخل شود.

شکل ۱۱ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج این آزمایش و نمودار تخلخل مشخص است، مهاجرت کائولینیت توسط یون پتاسیم به خوبی و تا حد زیادی کنترل شده است، اما باز هم از نمودار تخلخل موثر و تراوایی می‌تواند مشاهده کرد که حتی همین مقادیر کم از مهاجرت رس‌ها هم توانسته باعث



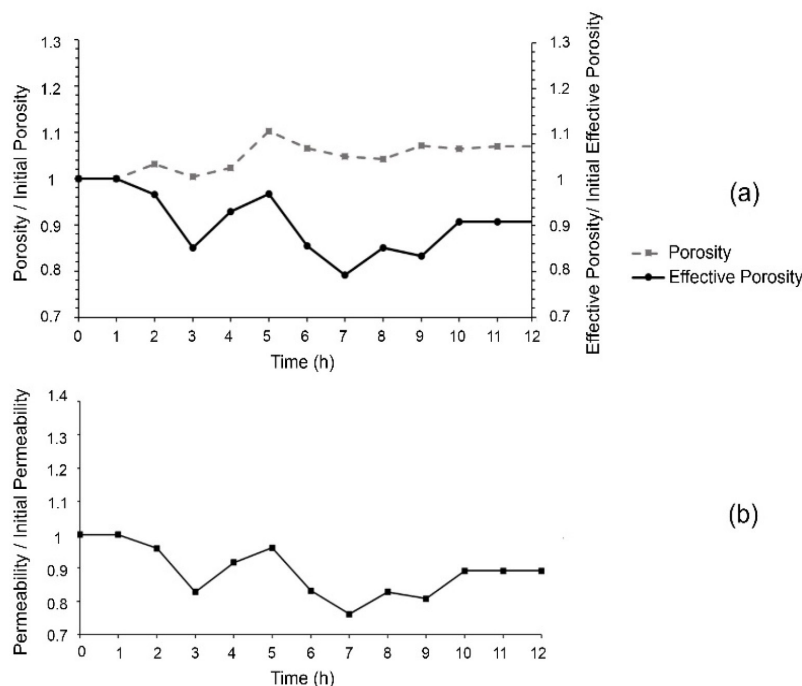
شکل ۱۱ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ پتاسیم کلرید در آزمایش ۷، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 11 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride brine in experiment 7, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۲ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ کلسیم کلرید در آزمایش ۸، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 12 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated calcium chloride brine in experiment 8, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.



شکل ۱۳ تغییرات تخلخل و تراوایی حین تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب سدیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۹، (a) تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

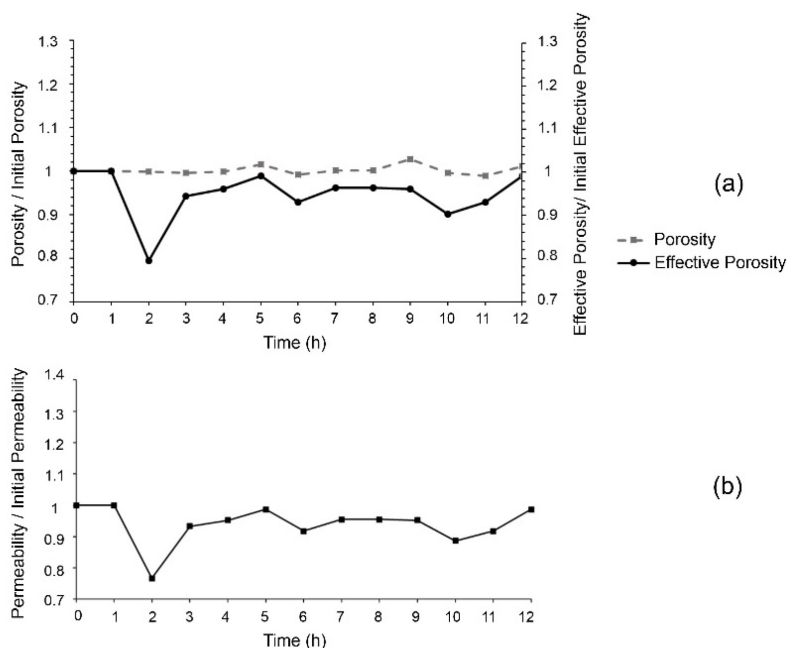
Fig. 13 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated sodium chloride and calcium chloride brine in experiment 9, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

۰/۸ تا ۱/۱ و ترکیب پتاسیم و کلسیم در آزمایش ۱۰ دامنه ۰/۸ تا ۱ را نشان داد. این الگوها با تغییرات همزمان تخلخل و تخلخل مؤثر سازگار است و کاهش تخلخل عمدتاً به تورم رس‌ها و افزایش آن بیشتر به مهاجرت و خروج رس‌ها نسبت داده می‌شود. بر این مبناء، گزینش آب تزریقی حاوی کاتیون‌های پتاسیم و کلسیم می‌تواند نوسانات هیدرودینامیکی را کاهش داده و پایداری جریان را در مقیاس مخزنی بهبود بخشد.

در تزریق شورآب رقیق، ترکیب و غلظت یون‌های موجود در آب تزریقی اثر قابل توجهی بر تغییر ترشوندگی، مهاجرت ذرات رسی، انحراف جهت جریان و انبساط لایه دوگانه الکتریکی دارد و این عوامل می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر آسیب سازند اثرگذار باشند. کاهش کاتیون سدیم موجب انبساط لایه دوگانه و تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوست می‌شود، اما در مخازن رسی حساس می‌تواند باعث تورم و مهاجرت ذرات و کاهش تراوایی گردد.

شکل ۱۴ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۱۰ را نشان می‌دهد. مشابه آزمایش ۵ مربوط به میکرومدل حاوی بنتونیت این جا هم می‌توان مشاهده نمود که ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم باز هم بهترین عملکرد را کنترل مهاجرت رس‌ها و آسیب سازند در مقایسه با سایرین داشته است.

تحلیل نتایج نشان داد که نوع رس و ترکیب یونی آب تزریقی نقش تعیین کننده‌ای در پایداری تخلخل و تراوایی دارند. در نمونه‌های بنتونیتی، آب حاوی سدیم نوسانات بزرگ‌تری ایجاد کرد و دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه در آزمایش ۱ حدود ۰/۹ تا ۱/۳۵ بود، در حالی که ترکیب پتاسیم و کلسیم دامنه نوسانات را محدود کرد و در آزمایش ۵ حدود ۰/۸۳ تا ۱/۰۳ ثبت شد. در نمونه‌های کائولینیتی نیز همین الگو مشاهده شد؛ سدیم در آزمایش ۶ دامنه



شکل ۱۴ نمودارهای مربوط به تزریق شورآب رقیق به درون میکرومدل با پوشش کائولینیت و اشباع شده با شورآب غلیظ ترکیب پتاسیم کلرید و کلسیم کلرید در آزمایش ۱۰، (a) نمودارهای تغییرات تخلخل و تخلخل موثرنسبت به حالت اولیه در طی زمان و (b) نمودار تغییرات نسبت تراوایی به تراوایی اولیه در طی زمان.

Fig. 14 Porosity and permeability changes during injection of low-salinity water into the kaolinite coated micromodel, saturated with concentrated potassium chloride and calcium chloride brine in experiment 10, (a) changes in porosity and effective porosity relative to their initial states over time and (b) changes in the ratio of permeability to its initial value over time.

رس ها استفاده شد. پس از تزریق آبهای سازندی با ترکیبات یونی مختلف و برقراری تعادل یونی، آب مقطر به عنوان شورآب رقیق به درون میکرومدل ها تزریق گردید و تغییرات تخلخل، تخلخل مؤثر و تراوایی به دقت پایش و تحلیل شد. هدف از این کار، تعیین نقش نوع کاتیون های موجود در سیال بر شدت آسیب های سازندی و ارائه راهکارهای بهینه برای کاهش این آسیب ها در شرایط دمایی واقعی بود. مهم ترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

- در آزمایش های بنتونیتی، آب حاوی سدیم دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه را از ۰/۹ تا ۱/۳۵ در آزمایش ۱ ایجاد کرد، در حالی که محلول پتاسیم-کلسیم این دامنه را به ۰/۸۳ تا ۱/۰۳ در آزمایش ۵ محدود نمود.

- در آزمایش های کائولینیتی، آب حاوی سدیم دامنه نسبت تراوایی به مقدار اولیه را از ۰/۸ تا ۱/۱ در آزمایش ۶ ایجاد کرد، در حالی که محلول پتاسیم-کلسیم این دامنه را به ۰/۸ تا ۱ در آزمایش ۱۰

کاتیون های پتاسیم و کلسیم با پایدارسازی ساختار رس ها، تورم و مهاجرت را کاهش داده و از افت تراوایی جلوگیری می کنند، هرچند اثر محدودتری بر تغییر ترشوندگی و انحراف جریان دارند. به طور کلی، یون های تک ظرفیتی مانند سدیم اثر قوی تری بر تغییر ترشوندگی و انحراف جریان دارند ولی ریسک آسیب سازند بالاتری ایجاد می کنند، در حالی که یون های پایدارکننده مانند پتاسیم و کلسیم جریان یکنواخت و پایدار را حفظ کرده و خطر آسیب را کاهش می دهند. انتخاب ترکیب یونی مناسب نیازمند برقراری تعادل میان مزایای ازدیاد برداشت و کنترل آسیب سازند است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، با هدف بررسی تأثیر تورم و مهاجرت کانی های رسی بنتونیت و کائولینیت بر آسیب سازند طی تزریق شورآب رقیق در دمای مخزن (۷۰ °C)، از میکرومدل های شیشه ای پوشش داده شده با این

- کاهش داد.
- ترکیب یون‌های پتاسیم و کلسیم عملکرد برتری در کنترل همزمان تورم و مهاجرت رس‌های بنتونیت و کائولینیت از خود نشان داد.
- بنتونیت در حضور یون‌های سدیم بیشترین میزان تورم و مهاجرت ذرات رسی را تجربه کرده و افت قابل توجهی در تراوایی ایجاد نمود.
- در میان یون‌های آزمایش شده، مشاهده شد که یون پتاسیم در کنترل تورم و یون کلسیم در کنترل مهاجرت بسیار اثر گذار بوده‌اند.
- حضور یون کلسیم به تنهایی توانست مهاجرت ذرات را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد، اگرچه کنترل تورم نیازمند حضور یون‌های پتاسیم نیز می‌باشد.
- استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای همراه با ثبت تصویری دقیق در شرایط دمایی بالا، امکان تحلیل کیفی و کمی سازوکارهای آسیب‌سازندی را فراهم ساخت و اعتبار بالایی به نتایج آزمایشگاهی بخشید چراکه اثرات دما نیز در این مطالعه لحاظ شده است.

مراجع

- [1]. Bazvand, P., Ahmadpour, K., Niknam, M.R., Nosrat Panah, B., and Daryasafar, A. (2022). A comprehensive review of smart water injection in carbonate and sandstone reservoirs with a special focus at carbonate reservoirs in South of Iran. *Journal of Petroleum Research*, 32, 124–145. 10.22078/pr.2022.4460.3027.
- [2]. Mwakipunda, G. C., Jia, R., Mgimba, M. M., Ngata, M. R., Mmbuji, A. O., Said, A. A., & Yu, L. (2023). A critical review on low salinity waterflooding for enhanced oil recovery: Experimental studies, simulations, and field applications. *Geoenergy Science and Engineering*, 227, 211936. doi: 10.1016/j.geoen.2023.211936.
- [3]. Maghsoudian, A., Izadpanahi, A., Bahmani, Z., Avvali, A. H., & Esfandiarian, A. (2025). Utilizing deterministic smart tools to predict recovery factor performance of smart water injection in carbonate reservoirs. *Scientific Reports*, 15(1), 537. doi.org/10.1038/s41598-024-84402-3.
- [4]. Moghadasi, R., Rostami, A., Hemmati-Sarapardeh, A., & Motie, M. (2019). Application of Nanosilica for inhibition of fines migration during low salinity water injection: Experimental study, mechanistic understanding, and model development. *Fuel*, 242, 846-862. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119300547>.
- [5]. Arain, A. H., Negash, B. M., Yekeen, N., Farooqi, A. S., & Alshareef, R. S. (2024). Synergising nanoparticles and low salinity waterflooding for enhanced oil recovery: A state-of-the-art review. *Journal of Molecular Liquids*, 400, 124495. doi: 10.1016/j.molliq.2024.124495.
- [6]. Mehdizad, A., Sedae, B., & Pourafshary, P. (2022). Visual investigation of the effect of clay-induced fluid flow diversion on oil recovery, as a low-salinity water flooding mechanism. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109959. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521015734>.
- [7]. Yue L, Pu W, Zhao S, Zhang S, Ren F & Xu D. (2020). Insights into mechanism of low salinity water flooding in sandstone reservoir from interfacial features of oil/brine/rock via intermolecular forces. *J Mol Liq*. 313:113435. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016773221936876X>.
- [8]. Villero-Mandon, J., Askar, N., Pourafshary, P., & Riazi, M. (2024). Importance of Fluid/Fluid interactions in enhancing oil recovery by optimizing Low-Salinity waterflooding in sandstones. *Energies*, 17(13), 3315. doi.org/10.3390/en17133315.
- [9]. Srivastava, V. R., Sarma, H. K., & Gupta, S. K. (2024). Low-Salinity Waterflooding for EOR in Field A of Western Offshore Basin: A Pilot Study Analysis with Laboratory and Simulation Studies—Early Observations. *Energies*, 17(9), 2149. doi.org/10.3390/en17092149.
- [10]. Ligeiro, T. S., Vaz, A., & Chequer, L. (2022). Forecasting the impact of formation damage on relative permeability during low-salinity waterflooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109500. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521011414>.
- [11]. Muneer, R., Pourafshary, P., & Hashmet, M. R. (2023). An integrated modeling approach to predict critical flow rate for fines migration initiation in sandstone reservoirs and water-bearing formations. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 121462. doi: 10.1016/j.molliq.2023.121462.
- [12]. Ghobadi, H., Riahi, S., & Nakhaee, A. (2021). An investigation and determination of different salinity, ion type and phs effect on fine migration in sandstone reservoirs. *Journal Petroleum Research*, doi: 10.22078/pr.2021.4524.3039.
- [13]. Tong, C.Y., Yang, Y.F., Zhang, Q., Imani, G., Zhang, L., Sun, H., Zhong, J.J., Zhang, K. and Yao, J.,

2024. Pore-scale fluid distribution and remaining oil during tertiary low-salinity waterflooding in a carbonate. *Petroleum Science*, 21(6), 4130-4140. doi.org/10.1016/j.petsci.2024.09.008.
- [14]. Uetani, T., Takeya, M., & Yogarajah, E. (2026). Exploring the Limit of Low-Salinity Waterflooding in a Carbonate Reservoir with Low Total Acid Number Oil. *SPE Journal*, 1-16. doi.org/10.2118/221302-MS.
- [15]. Saghandali, F., Salehi, M.B., Pahlevani, H., Taghikhani, V., Riahi, S., Ebrahimi, M., Saviz, S. and Roomi, A., 2024. Fabrication of a hydrogel reinforced with titanium nanoparticles to reduce fine migration and remediation of formation damage during low-salinity waterflooding. *Geoenergy Science and Engineering*, 241, p.213173. doi: 10.1016/j.geoen.2024.213173.
- [16]. Hosseini, A., Almasiyan, P., & Mahani, H. (2024). A triple-layer based surface complexation model for oil-brine interface in low-salinity waterflooding: Effect of sulphate interaction with carboxylic and basic groups, pH and temperature. *Journal of Molecular Liquids*, 402, 124730. 10.1016/j.molliq.2024.124730.
- [17]. Musharova, D. A., Mohamed, I. M., & Nasr-El-Din, H. A. (2012, February). Detrimental effect of temperature on fines migration in sandstone formations. In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control* (pp. SPE-150953). doi.org/10.2118/150953-MS.
- [18]. Schembre, J. M., Tang, G. Q., & Kovscek, A. R. (2006). Interrelationship of temperature and wettability on the relative permeability of heavy oil in diatomaceous rocks. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 9(03), 239-250. https://doi.org/10.2118/93831-PA.
- [19]. Ruan K, Wang H, Komine H & Ito D. (2022). Experimental study for temperature effect on swelling pressures during saturation of bentonites. *Soils Found*.62(6):101245. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080622001536.
- [20]. Bag, R., & Rabbani, A. (2017). Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil. *Applied Clay Science*, 136, 1-7. doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.043.
- [21]. Bovard, S., Abbasi, S., Shahrabadi, A., Talebi, A., and Hosseini, S. (2024). A Laboratory Study on the Effect of Low Salinity Water Injection on Recovery Factor in Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Research*. 34, 36-55.10.22078/pr.2024.5316.3364.
- [22]. Karami, M., Sedae, B., & Nakhaee, A. (2023). Microscopic and macroscopic investigation of simultaneous swelling and migration of clays on rock permeability during smart water injection. *Journal Petroleum Research* doi: 10.22078/pr.2023.5031.3253.
- [23]. Kashiri, R., Kalantariasl, A., Parsaei, R., Ghaedi, M., and Mahdiyar, H. (2020). Experimental investigation of kaolinite clay role in low salinity water flooding: a micromodel study. *Journal of Petroleum Research* 30, 72-83. 10.22078/pr.2020.3890.2772.
- [24]. Song, W., & Kovscek, A. R. (2015). Functionalization of micromodels with kaolinite for investigation of low salinity oil-recovery processes. *Lab on a Chip*, 15(16), 3314-3325. doi.org/10.1039/C5LC00544B.
- [25]. Song, W., & Kovscek, A. R. (2016). Direct visualization of pore-scale fines migration and formation damage during low-salinity waterflooding. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 1276-1283. doi: 10.1016/j.jngse.2016.07.055.
- [26]. Singh, A., Hembram, B. K., Iglauer, S., Keshavarz, A., & Sharma, T. (2025). Pore-scale micromodel experiments for performance evaluation of polymeric nanofluids in CO₂ flow through porous media for carbon utilization and storage. *Journal of Molecular Liquids*, 426, 127358. doi: 10.1016/j.molliq.2025.127358.
- [27]. Musabbir Rahman, R., Niemur, E., Blois, G., Kazemifar, F., Kim, M., & Li, Y. (2025). A novel microfluidic approach to quantify pore-scale mineral dissolution in porous media. *Scientific Reports*, 15(1), 6342.
- [28]. Bear, J. (2013). *Dynamics of fluids in porous media*. Courier Corporation. https://books.google.com/books?id=lurrmlFGhTEC.
- [29]. Mortensen, J., Engstrøm, F., & Lind, I. (1998). The relation among porosity, permeability, and specific surface of chalk from the Gorm field, Danish North Sea. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(03), 245-251. doi.org/10.2118/31062-PA.
- [30]. Hussaini, S. R., & Dvorkin, J. (2021). Specific surface area versus porosity from digital images. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107773. doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107773.
- [31]. Mehdizad, A., Pourafshary, P., & Sedae, B. (2022). Visual investigation of simultaneous clay swelling and migration mechanisms and formation damage consequences using micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214, 110561. doi: 10.1016/j.petrol.2022.110561.
- [32]. Sharifipour, M., Nakhaee, A., & Pourafshary, P. (2019). Model development of permeability impairment due to clay swelling in porous media using micromodels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 728-742. doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.082.