



# Microscopic and Macroscopic Investigation of Simultaneous Swelling and Migration of Clays on Rock Permeability During Smart Water Injection

Mehran Karami<sup>1</sup>, Behnam Sedaee<sup>2\*</sup> and Ali Nakhaee<sup>2</sup>

1. Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran

2. Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

sedaee@ut.ac.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5031.3253

Received: February/22/2023

Accepted: April/30/2023

## Introduction

In many studies, the negative effect of the presence of clay minerals on the reduction of reservoir parameters such as porosity and permeability has been reported. Changes in chemical, physical and thermodynamic conditions inside the reservoir can lead to all kinds of formation damage. There are various causes for swelling and migration of clay particles, incompatibility of injection fluid and reservoir fluid, rock-fluid interaction, blockage of flow path, collapse. The formation, thermal stress, dissolution reactions of organic and mineral substances, the effect of pore deformation due to layer stress, wettability change, changes in the properties and structure of the pore surface and mechanical properties have been expressed [1-5]. The most of oil reservoirs contain clay minerals. which were either deposited during the initial sedimentation stages (clastic clays) or deposited from the flow of fluids inside the reservoir rock (in situ clays) [6-7]. These two types of sedimentation can cause the loss of permeability with different mechanisms. The reaction of water with clay minerals causes two phenomena of clay migration and swelling, and failure to control these effects can cause damage to the formation by reducing the permeability of the reservoir rock. In other words, formation damage is a problematic and costly operational issue that occurs during oil and gas production operations, drilling, hydraulic fracturing, well repair operations, or flooding, and the implementation of EOR methods,

and the main approach of petroleum engineering; It is to prevent such damages. The formation damage in the vicinity of the well is due to the decrease in permeability caused by the entry of foreign fluid into the reservoir rock. This damage is caused by many factors, including the mineral composition of the rock and the effect of injected water on the swelling of the clay, which prevents more oil from being swept away. Formations that have large amounts of autogenic clays in pores such as kaolinite, Illite, smectite, chlorite and mixed layer minerals sensitive to aqueous solutions are prone to formation damage. Clay minerals are classified into three groups: kaolinite, Smectite and Illite.

The most of researches, the mechanism of swelling and migration clays has been investigated separately with static or dynamic tests limited to micro-models or flooding, but in this research, swelling and migration phenomena are simultaneously designed and conducted in a regular series of micro-scale experiments. and macro (micro model and core) were investigated and combination of smart water for injection and appropriate pattern of injection were extracted from the test results of both systems. In the oil industry, conducting such studies or similar researches can help in reducing or eliminating formation damage caused by swelling and migration of clays due to the sensitivity of clays to water by identifying the appropriate injection fluid composition in order to reduce the risk of intelligent water injection. It is

very useful for the design of fluids, drilling, and well stimulation in choosing the appropriate additions that control formation damage due to swelling or migration of clays in the invasion area. The main purpose of this work is to investigate the simultaneous and separate effect of swelling and migration of clays in the reservoir rock on the deviation from the initial permeability as an indicator of formation damage due to intelligent water injection, and the expected results are to modify and optimize the composition of the injected fluid and provide a suitable model. In smart water injection, it is to reduce or eliminate structural damages.

### Materials and Methods

In this research, the field data of a reservoir in the southern region of Iran were used. The characteristics, type and amount of clays in the reservoir rock were obtained by conducting and interpreting descriptive XRD and SEM tests, and based on the results, smectite and kaolinite clays with a mixture of 5 and 10% were used in the experiments. Swelling index tests were conducted to evaluate the swelling of clays in the studied reservoir rock (kaolinite and smectite) in the vicinity of formation water and seawater with different concentrations. Finally, formation water, sea water, formation water diluted 40 times, sea water diluted 20 times, nanofluids and the combination of sea water diluted 20 times and one percent zirconium oxychloride were selected for the design of micromodel and flooding experiments. Micromodel and flooding tests were designed and implemented by injecting the designed water composition using the results of swelling index tests in the vicinity of kaolinite and smectite clays. Micromodel equipment consists of four parts including injection syringe, micromodel glass, imaging system and pressure transmitter.

For the flooding test, the reservoir rock sample was pulverized using mesh number 200, and in order to ensure the homogeneity of the particles, the sieving process was performed simultaneously and in several stages. To simulate the reservoir rock sample, a certain amount of kaolinite and smectite minerals were added to the rock powder. The slurry was prepared by mixing rock powder and formation water. Then it was poured into the chamber, which has a small mesh (15 microns) on both sides. Finally, it was pressurized to 3500 psi to prepare the artificial core.

### Results and Discussion

In order to investigate the effect of smart water composition and the effect of the injection pattern on the swelling and migration of clays in the reservoir rock, 8 experimental groups were designed and carried out in two micro-model and flooding systems. Formation damage index was expressed as FDEI to better describe permeability changes compared to initial permeability (as seen in the following Equation):

$$FDEI\% = \frac{K_i - K_n}{K_i} \times 100 \quad (1)$$

$K_n$ : permeability in the presence of clay at each stage of the test with the injection of different fluids and  $K_i$ : the initial permeability of the micro model is equivalent to 334 MD and the artificial core sample is 50 MD

In the micro model and core flooding tests design were performed in four different flow rates and by installing two transmitters with an good accuracy, the flow pressure difference in the entry and exit routes were recorded. The general result of the comparison of injection patterns, considering that the amount of permeability and the selection of the amount and type of clays are followed from a carbonate reservoir rock, and in carbonate rocks the permeability is much lower than sandstone reservoirs. If the migration of non-swelling clays is intensified by reducing the salinity and flow speed, and the swelling of swelling clays is controlled at the same time, there will be enough space for the clays to move and leave the system and as a result, the efficiency of the formation damage control process will improve. but if the migration is delayed after swelling, it will cause the moving clays to be trapped in the bottlenecks and block the flow path, resulting in disruption of effective permeability, the comparison of different injection patterns for two weight volumes of 5% and 10% mixture in the tests with different methods and combinations of fluids, which shows that the order of fluid injection sequences FW-SI-DFW-DSW or in other words priority. The beginning of injection of swelling control fluid in both 5% and 10% clay mixture in reducing formation damage caused by the effect of the simultaneous mechanism of swelling and migration in the reservoir rock by 10 to 20% reduces the formation damage index. And from the combination of the results of the tests of both the micro model and the core flood systems, it can be said that the removal of the migration control fluid or in other words migration led to the release of clays and was suitable in damage control.

### Conclusions

- 1) The results of Swelling index tests showed that nanoparticles were not able to control smectite swelling due to their larger size compared to the distance between clay layers, but zirconium oxychloride is highly effective as a swelling inhibitor.
- 2) The migration and exit of kaolinite clay particles in the micro model reduces formation damage, and on the contrary, smectite clay increases formation damage.
- 3) Injecting control fluids at the right time is very important. Injecting nanofluid to control migration at the right time will improve the effect and using it at the wrong time or priority will cause sedimentation of clays in the flow paths and obstruction.
- 4) Removal of the migration control fluid by prioritizing the injection of the swelling control fluid

in the composition of the injection fluid for both 5 and 10% density of the clay mixture with the simultaneous effect of the swelling and migration mechanism of the clays in the reservoir rock sample caused a 10-20% reduction in the damage of the formation index.

5) The gradual reduction of formation water salinity and the priority of injection of swelling control fluid in the composition of injection fluid with the effect of the simultaneous mechanism of swelling and migration of clays in the micromodel caused a 5 to 10% reduction in the damage index.

6) At the time of smart water injection, despite the simultaneous phenomena of migration and swelling, swollen clays have a greater effect on formation damage.

7) If the migration is delayed after swelling, it will cause the moving clays to be trapped in the bottlenecks and block the flow path and disrupt the effective permeability.

## References

1. Al-Mohammad, A. M., Al-Khaldi, M. H. & Al-Yami, I. S. (2012). Seawater injection into clastic formations: formation damage investigation using simulation and coreflood studies. In SPE International Production and Operations Conference & Exhibition, OnePetro, doi.org/10.2118/157113-MS.
2. Mikhailov, N., & Chirkov, M. (2010). Formation damage kinetics and its effect on oil reservoir productivity, In SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, 128403, doi.org/10.2118/128403-MS.
3. Bedrikovetsky, P. G., Nguyen, T. K., Hage, A., Ciccarelli, J. R., ab Wahab, M., Chang, G., & Furtado, C. A. (2011). Taking advantage of injectivity decline for improved recovery during waterflood with horizontal wells, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(2), 288-303, doi.org/10.1016/j.petrol.2011.05.020.
4. Mojarad, R. S., & Settari, A. (2005, October). Multidimensional velocity-based model of formation permeability damage: validation, damage characterization, and field application. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition?, SPE-97169, doi.org/10.2118/97169-MS.
5. Scott, H. E., Patey, I. T. M., & Byrne, M. T. (2007, May). Return permeability measurements—Proceed with caution. In SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, SPE-107812, SPE, doi.org/10.2118/107812-MS.
6. Berry, S. L., Boles, J. L., Brannon, H. D., & Beall, B. B. (2008, February). Performance evaluation of ionic liquids as a clay stabilizer and shale inhibitor, In SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, SPE-112540, Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/112540-MS.
7. Mohan, K. K., Fogler, H. S., Vaidya, R. N., & Reed, M. G. (1993). Water sensitivity of sandstones containing swelling and non-swelling clays, In *Colloids in the Aquatic Environment*, 237-254, Elsevier, doi.org/10.1016/B978-1-85861-038-2.50020-6.

# بررسی میکروسکوپی و ماکروسکوپی اثر همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر نفوذپذیری سنگ در تزریق آب هوشمند

مهران کرمی<sup>۱</sup>، بهنام صدائی<sup>۲\*</sup> و علی نخعی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی نفت، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران

۲- انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

## چکیده

در سال‌های اخیر، تزریق آب هوشمند به‌عنوان یک روش اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای افزایش ضریب بازیافت نفت مورد توجه مهندسين صنعت قرار گرفته است. از طرفی پدیده‌های مهاجرت و تورم رس‌های موجود در سنگ مخزن در اثر کاهش شوری و تغییر محیط یونی، باعث تغییرات قابل توجه نفوذپذیری مخازن ماسه‌سنگی/کربناته می‌شود، که عامل آسیب سازند معرفی می‌گردد. در این مطالعه ابتدا، آزمایشات استاتیک برای تعیین میزان و نوع خاک رس با استفاده از آزمایشات XRD و SEM بر روی نمونه مغزه سنگ و آزمایشات تورم سنج برای مطالعه اثر مایعات مختلف بر تورم رس‌های مورد شناسایی (کائولینیت و اسمکتیت) انجام شد. با استفاده از نتایج آزمایشات تورم سنج برای آزمایش‌های میکرومدل و سیلاب‌زنی به‌ترتیب سیالات تزریقی آب سازند، آب دریا، آب سازند ۴۰ بار رقیق، آب دریا ۲۰ بار رقیق، نانوسیالات و ترکیب آب دریا ۲۰ بار رقیق و ۱٪ زیرکونیوم اکسی کلراید طراحی و انتخاب شدند. سپس آزمایشات مدل دینامیک جدید در دو محیط رسی میکرومدل و سیلاب‌زنی ساخته شده مطابق مشخصات سنگ مخزن واقعی طراحی و انجام شد. در این تحقیق شاخص آسیب سازند برای بیان تأثیر همزمان یا مجزای تورم و مهاجرت رس‌های تورمی و غیرتورمی مطابق شواهد مشاهده‌ای تغییرات نفوذپذیری در میکرومدل به‌همراه تفسیر و مقایسه محاسبات کمیتی آزمایشات سیلاب‌زنی در فعل و انفعالات آب نمک/خاک رس ارائه شد. نتیجه مشترک این آزمایشات نشان داد که کاهش تدریجی شوری آب سازند و اولویت تزریق سیال کنترل‌ی تورم در ترکیب سیال تزریقی با اثر مکانیسم همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها در میکرومدل سبب ۵ تا ۱۰٪ کاهش شاخص آسیب می‌گردد. همچنین، حذف سیال کنترل مهاجرت با الویت تزریق سیال کنترل تورم در ترکیب سیال تزریقی برای هر دو تراکم ۵ و ۱۰٪ مخلوط رس‌ها با اثر مکانیسم همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها در نمونه سنگ مخزن سبب ۱۰ تا ۲۰٪ کاهش آسیب شاخص سازند می‌گردد. درضمن، ترکیب ۱٪ زیرکونیوم اکسی کلراید در آب دریای ۲۰ بار رقیق به‌عنوان سیال تزریقی مناسب کنترل تورم معرفی می‌گردد. با این دست‌آورد در الگوی تزریق آب هوشمند به‌عنوان یک روش ازدیاد برداشت که در صنعت نفت مورد توجه می‌باشد با حذف یا کنترل آسیب سازند به‌دلیل حضور سیال ناسازگار با ماهیت سنگ مخزن حداکثر ضریب برداشت حاصل خواهد شد.

**کلمات کلیدی:** تورم، مهاجرت رس‌ها، آب هوشمند، آسیب سازند، نفوذپذیری

\*مسئول مکاتبات

sedace@ut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2023.5031.3253)

## مقدمه

در بسیاری از مطالعات تأثیر منفی وجود کانی‌های رس بر کاهش پارامترهای مخزن مانند تخلخل و تراوایی گزارش شده است. تغییرات در شرایط شیمیایی، فیزیکی و ترمودینامیکی درون مخزن می‌تواند منجر به انواع آسیب سازند شود. برای مکانیسم‌های آسیب سازند، دلایل مختلف تورم و مهاجرت ذرات خاک رس، ناسازگاری سیال تزریقی و سیال مخزن، برهم‌کنش سنگ و سیال، انسداد مسیر جریان، فروپاشی سازند، تنش حرارتی، واکنش‌های انحلال مواد آلی و معدنی، اثر تغییر شکل منافذ در اثر تنش لایه‌ها، تغییر ترشوندگی، تغییرات در خواص و ساختار سطح منافذ و خواص مکانیکی بیان شده است [۵-۱]. تقریباً عمده مخازن نفتی، حاوی مواد معدنی رسی هستند که یا در طول مراحل رسوب‌گذاری اولیه رسوب کرده‌اند (رس‌های آواری) و یا از جریان سیالات داخل سنگ مخزن ته‌نشین شده‌اند (رس‌های درجا‌زا). این دو نوع رسوب‌گذاری می‌تواند با مکانیسم‌های مختلفی باعث از بین رفتن نفوذپذیری شوند [۶ و ۷]. واکنش آب با مواد معدنی رسی باعث دو پدیده مهاجرت و تورم خاک رس می‌شود و عدم کنترل این اثرات می‌تواند سبب آسیب سازند با کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن شود [۸]. به بیان دیگر، آسیب سازند یک مسئله عملیاتی مشکل‌ساز و پرهزینه است که در حین عملیات تولید نفت و گاز، حفاری، شکستگی هیدرولیک، عملیات تعمیر چاه‌ها و یا سیلاب‌زنی و اجرای روش‌های ازدیاد برداشت رخ می‌دهد و رویکرد اصلی مهندسی نفت جلوگیری از چنین آسیب‌هایی است [۹]. آسیب سازند در مجاورت چاه به دلیل کاهش نفوذپذیری ناشی از ورود سیال خارجی به سنگ مخزن است. این آسیب ناشی از عوامل زیادی از جمله ترکیب کانی سنگ و تأثیر آب تزریقی بر تورم خاک رس است که از جارو شدن بیشتر نفت جلوگیری می‌کند [۱۰ و ۱۱]. سازندهایی که دارای مقادیر زیادی رس‌های اتوزنیک درون منافذ

مانند کائولینیت، ایلیت، اسمکتیت، کلریت و مواد معدنی لایه‌ای مخلوط حساس به محلول‌های آبی هستند، مستعد آسیب‌های سازندی می‌باشند. مواد معدنی خاک رس به سه گروه کائولینیت، اسمکتیت و ایلیت طبقه‌بندی می‌شوند [۱۵-۱۲]. اسکو و همکاران، آزمایشات سیلاب‌زنی را با هدف مقایسه رس‌های تورمی (اسمکتیت) و غیرتورمی (کائولینیت) در تغییر نفوذپذیری نسبت به زمان برای اندازه، مقدار و نوع رس‌ها بر روی مخلوط نمونه مصنوعی سنگ مخزن طراحی و مخلوط کانی‌های رس را قبل و بعد از اشباع توسط میکرو توموگرافی کامپیوتری<sup>۱</sup> بررسی کردند تا اطلاعاتی در مورد تغییرات مورفولوژیکی دانه‌های رس و میزان تغییر کمیت حجم و تورم به دست آورند و در نهایت مدل روابط تخلخل و نفوذپذیر را برای درک میزان کاهش نفوذپذیری ناشی از تورم در نمونه‌های طبیعی با تخلخل‌های مختلف ارائه کردند [۱۶]. بهوی و همکاران، به منظور مطالعه پدیده تورم و درک مکانیسم تبادل یونی رس اسمکتیت در مجاورت آب شور با غلظت‌های مختلف NaCl و CaCl<sub>2</sub>، طراحی کردند و تزریق آب هوشمند<sup>۲</sup> را برای مخازن رس لادن عربستان در آزمایش سیلاب‌زنی آب با شوری کم مد نظر قرار دادند و نتیجه گرفتند بسته به نوع رس موجود در مخزن نفتی، کاتیون‌های تعادل‌کننده بارهای الکتریکی نسبت به غلظت، برای مهاجرت رس‌ها و تغییر میزان ترشوندگی در بهبود میزان بازیافت نفت، اهمیت بیشتری دارد [۱۷]. بنابراین، استفاده از تثبیت‌کننده به عنوان افزایه در مجاورت آب شیرین می‌تواند مانع از تورم و یا مهاجرت رس‌ها شود [۱۸]. ثامن و همکاران از میکرومدل‌های شیشه‌ای برای مطالعه اثر نانوذرات استفاده کردند و گزارش کردند که نانوذرات در کنترل تورم مفید نیستند زیرا نمی‌توانند به فاصله بین لایه‌های ساختار رس نفوذ کنند اما می‌توانند مهاجرت را کنترل کنند.

1. Micro Computed Tomography (Micro-CT)

2. Smart Water

عدم پیچیدگی، سازگاری با محیط زیست و هزینه کم، این روش مورد توجه صنعت قرار گرفته است. به عبارت دیگر، تزریق آب با شوری کم به مخازن باعث بهبود راندمان جابه جایی میکروسکوپی در مقایسه با تزریق آب با شوری بالا (HSW) شده و به منظور کاهش خطر آسیب ناشی از پدیده های تورم و مهاجرت رس ها، انتخاب ترکیب سیال تزریقی اصلاحی مناسب و مطالعات بیشتر در زمینه مکانیسم تغییرات رس ها مورد نیاز است. تورم و مهاجرت خاک رس نقش کلیدی در موفقیت پروژه های LSW خواهد داشت. در این روش EOR می توان با انتخاب ترکیب آب مناسب برای کاهش خطر آسیب سازند، ضریب بازیافت را تا ۳۰٪ نفت درجا بهبود داد [۲۷-۲۴]. تحقیقات و آزمایشات نشان می دهد با افزایش قدرت یونی سیال تزریقی میزان مهاجرت ذرات کاهش می یابد. نمک های دو ظرفیتی نیز به دلیل افزایش قدرت یونی باعث کاهش میزان مهاجرت ذرات می گردد، ولی اثر آن ها در قدرت های یونی یکسان نبوده و رفتاری متفاوت نشان می دهند تا حدی که حضور هم زمان یون های دو ظرفیتی در سیال تزریقی حتی باعث افزایش شدت مهاجرت ذرات می گردد [۲۸]. در سال های اخیر، محققان متعددی تأثیر تورم و مهاجرت رس را بر کیفیت سنگ مخزن مورد مطالعه قرار دادند که در اینجا تعدادی از آنها ذکر گردید، در عمده این تحقیقات مکانیسم تورم و مهاجرت رس ها با آزمایشات استاتیک و یا دینامیک محدود به میکرو مدل و یا سیلاب زنی به صورت مجزا بررسی شده است اما در این تحقیق پدیده های تورم و مهاجرت به صورت هم زمان با طراحی و انجام سلسله منظم آزمایشات در مقیاس میکرو و ماکرو (میکرو مدل و مغزه) مورد بررسی قرار گرفت و ترکیب آب هوشمند تزریقی و الگوی مناسب تزریق از نتایج آزمایشات هر دو سیستم استخراج گردید.

رس های متورم مانند مونت موریلونیت ممکن است تا ۲۰ برابر حجم اولیه خود در حضور آب تزریق شده متورم شوند و حتی ممکن است مهاجرت کنند، که هر دو می تواند تداخل و نفوذپذیری سنگ مخزن را کاهش دهند [۱۹].

ژوان و همکاران در، اسیدهای آمینه مانند Poly L-Arginine و Poly L-Lysine را برای تثبیت رس مورد مطالعه قرار دادند. اسیدهای آمینه عملکرد مؤثری در تثبیت خاک رس نشان دادند زیرا از طریق پیوند هیدروژنی با مولکول های آب متصل می شوند و اثر متقابل آب با سطح رس را کاهش می دهند [۲۰ و ۲۱]. کواینو و همکاران نیز اثر برخی از اسیدهای آمینه از جمله آلانین، آرژنین و پرولین را بر کنترل تورم و پراکندگی خاک رس در سازند شیل غنی از بنتونیت بررسی کردند و پرولین با بهترین کارایی در کنترل تورم بیان شد [۲۲]. رزاقی کولایی و همکاران، از عصاره ریشه آکانتوفیلوم برای کنترل و کاهش تورم مونت موریلونیت در یک مغزه مصنوعی حاوی مقدار مشخصی خاک رس استفاده کردند. نتایج نشان داد که عصاره ریشه گیاه حاوی مولکول های ساپونین (نوعی مواد فعال سطحی) تورم مونت موریلونیت را کنترل کرده و از کاهش نفوذپذیری محیط جلوگیری می کند. آنها همچنین یک آزمایش میکرومدل انجام دادند که به صورت مشاهده ای کارایی مواد فعال سطحی<sup>۱</sup> طبیعی را در کنترل آسیب سازند ناشی از تورم خاک رس نشان می داد [۲۳]. نقش بسیار مهم تزریق آب در افزایش بازیافت نفت در اکثر مطالعات به اثبات رسیده است، اما ترکیب سنگ های مخزنی حاوی کانی های رس تحت تأثیر ترکیب آب تزریقی است که با مکانیسم های تورم و مهاجرت مسیرهای جریان هیدروکربن را مسدود کرده و نفوذپذیری را کاهش می دهد. از سوی دیگر، مطالعات بیشتر نشان می دهد که تزریق آب با شوری کم (LSW) استحصال نفت را در مقایسه با تزریق آب با شوری بالا افزایش می دهد و به دلیل

رس‌های اسمکتیت و کائولینیت با میزان مخلوط ۵ و ۱۰٪ در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت.

**ترکیب سیال تزریقی:** آزمایش‌های شاخص تورم<sup>۱</sup> برای ارزیابی میزان تورم رس‌های موجود در سنگ مخزن مورد مطالعه (کائولینیت و اسمکتیت) در مجاورت آب سازند و آب دریا با غلظت‌های متفاوت انجام شد (شکل ۱).



شکل ۱ روند تورم اسمکتیت در آزمایش شاخص تورم

در نهایت برای طراحی آزمایش‌های میکرومدل و سیلاب‌زنی به‌ترتیب آب سازند، آب دریا، آب سازند ۴۰ بار رقیق، آب دریا ۲۰ بار رقیق، نانوسیالات و ترکیب آب دریا ۲۰ بار رقیق و یک ٪ زیرکونیوم اکسی کلراید با ترکیبات **جدول ۲** انتخاب شدند. نتایج نشان داد که نانوذرات قادر به کنترل تورم اسمکتیت با توجه به اندازه بزرگتر شان نسبت به فاصله لایه‌های رسی نبودند اما زیرکونیوم اکسی کلراید به‌عنوان مهارکننده تورم کارایی بالایی دارد.

**تجهیزات و روش آزمایش**

آزمایشات میکرومدل و سیلاب‌زنی با تزریق ترکیب آب‌های طراحی شده با استفاده از نتایج آزمایشات شاخص تورم در مجاورت رس‌های کائولینیت و اسمکتیت طراحی و اجرا گردید.

در صنعت نفت، انجام چنین مطالعات و یا تحقیقات مشابه می‌تواند در کاهش و یا حذف آسیب‌های سازند ناشی از تورم و مهاجرت رس‌ها با توجه به حساسیت رس‌ها به آب با شناسایی ترکیب سیال تزریقی مناسب به‌منظور کاهش ریسک تزریق آب هوشمند کمک کند و برای طراحی سیالات، حفاری، انگیزش چاه‌ها در انتخاب افزاینده‌های مناسب که صدمه سازند را در اثر تورم یا مهاجرت رس‌های موجود در ناحیه تهاجم کنترل می‌کند بسیار مفید می‌باشد. هدف اصلی این کار بررسی اثر هم‌زمان و مجزای تورم و مهاجرت رس‌های موجود در سنگ مخزن بر انحراف از نفوذپذیری اولیه به‌عنوان شاخص صدمه سازند در اثر تزریق آب هوشمند می‌باشد و نتایج مورد انتظار اصلاح و بهینه‌سازی ترکیب سیال تزریقی و ارائه الگوی مناسب در تزریق آب هوشمند جهت کاهش یا حذف صدمات سازندی است.

## مواد، تجهیزات و روش آزمایش

### مواد و تجهیزات

**مواد جامد:** در این تحقیق از داده‌های میدانی یک مخزن در منطقه جنوب ایران استفاده شد. خواص این مخزن در **جدول ۱** مشخصات مخزن در طراحی آزمایشات ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات مخزن در طراحی آزمایشات

| ویژگی                 | شرح    |
|-----------------------|--------|
| نوع مخزن              | کربنات |
| میانگین تخلخل (%)     | ۲۵     |
| نفوذپذیری (mD)        | ۵۰-۳۰۰ |
| شوری آب سازند (ppm)   | ۹۷۱۳۲  |
| میزان کائولینیت (%)   | ۲/۵-۷  |
| میزان اسمکتیت (%)     | ۲/۵-۵  |
| مجموع رس در سازند (%) | ۵-۱۰   |

خصوصیات، نوع و میزان رس‌های موجود در سنگ مخزن با انجام و تفسیر آزمایش‌های توصیفی XRD و SEM تعیین گردید و براساس نتایج به‌دست آمده

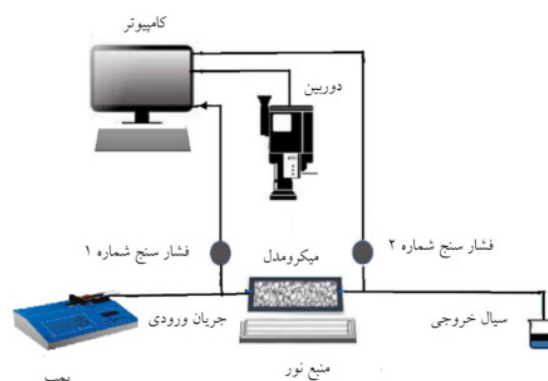
جدول ۲ مشخصات ترکیب آب‌های تزریقی در آزمایشات میکرو مدل و سیلاب‌زنی مغزه

| یون (mg/L)                         | آب دریا (SW) |        | آب سازند (FW) |        | ترکیب زیرکونیوم اکسی کلراید (SI) |  | ترکیب نانو سیال |      |
|------------------------------------|--------------|--------|---------------|--------|----------------------------------|--|-----------------|------|
|                                    | SW           | 20DTSW | FW            | 40DTFW |                                  |  | یون (mg/L)      | NF   |
| Na                                 | ۱۲۳۵۰        | ۶۱۸    | ۲۹۹۳۵         | ۷۳۵    | ۶۱۸                              |  | Mg              | ۴۹۵  |
| K                                  | ۵۷۰          | ۲۹     | ۲۱۰           | ۵      | ۲۹                               |  | Al              | ۴۳۷  |
| Ca                                 | ۴۸۱          | ۲۴     | ۶۲۸۹          | ۱۵۷    | ۲۴                               |  | Si              | ۳۸۵  |
| Mg                                 | ۱۴۳۰         | ۷۲     | ۵۶۵           | ۱۴     | ۷۲                               |  | O               | ۱۱۵۸ |
| SO <sub>4</sub>                    | ۴۶۰۰         | ۲۳۰    | ۱۸۱           | ۵      | ۲۳۰                              |  |                 |      |
| HCO <sub>3</sub>                   | ۲۳۰          | ۱۲     | ۱۴۰           | ۴      | ۱۲                               |  |                 |      |
| Cl                                 | ۲۲۲۴۰        | ۱۱۱۲   | ۶۰۳۵۲         | ۱۵۰۹   | ۱۱۱۲                             |  |                 |      |
| Cl <sub>2</sub> H <sub>2</sub> OZr |              |        |               |        | ۲۱                               |  |                 |      |
| TDS, mg/L                          | ۴۱۹۰۱        | ۲۰۹۵   | ۹۷۱۳۲         | ۲۴۲۸   | ۲۱۱۶                             |  |                 | ۲۴۷۶ |

SW: آب دریا، 20DTSW: آب دریا ۲۰ بار رقیق شده، FW: آب سازند، 40DTFW: آب سازند ۴۰ بار رقیق، SI: سیال کنترل تورم (آب دریا ۲۰ بار رقیق و یک٪ زیرکونیوم اکسی کلراید)، NF: سیال کنترل مهاجرت (نانوذرات  $\text{MgO}$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در آب دریا ۲۰ بار رقیق)

برای آزمایش سیلاب‌زنی، نمونه سنگ مخزن با استفاده از مش شماره ۲۰۰ پودر شد و به‌منظور اطمینان از همگن بودن ذرات، فرآیند الک هم‌زمان و در چند مرحله انجام شد. برای شبیه سازی نمونه سنگ مخزن، مقدار مشخص کانی کائولینیت و اسمکتیت به پودر سنگ اضافه شد. دوغاب با مخلوط کردن پودر سنگ و آب سازند تهیه شد. سپس داخل محفظه ریخته شد که دو طرف آن مشبک کوچکی به اندازه  $15\text{ }\mu\text{m}$  دارد و در نهایت فشاری تا ۳۵۰۰ psi برای تهیه مغزه مصنوعی به آن وارد شد، نمودار روش آماده‌سازی و مشخصات نمونه مغزه مصنوعی در شکل ۳ و جدول ۴ ارائه شده است.

تجهیزات میکرومدل از چهاربخش شامل سرنگ تزریق، شیشه میکرومدل، سیستم تصویربرداری و ترانس‌میتور فشار مطابق شکل ۲ تشکیل شده است و مشخصات میکرومدل در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲ اجزای میکرومدل در آزمایشات میکروسکوپی

جدول ۳ مشخصات میکرومدل

| ویژگی                        | مقدار |
|------------------------------|-------|
| تخلخل (%)                    | ۳۱/۴  |
| میانگین قطر منافذ جریان (ml) | ۰/۸۴  |
| عمق حکاکی (ml)               | ۰/۱۸۵ |
| حجم فضای منافذ (ml)          | ۰/۴   |

## بحث و نتایج

به‌منظور بررسی اثر ترکیب آب هوشمند و تأثیر الگوی تزریق بر تورم و مهاجرت رس‌های موجود در سنگ مخزن، ۸ گروه آزمایش در دو محیط میکرومدل و سیلاب‌زنی طراحی و انجام شد.



شکل ۳ روش آماده سازی مغزه مصنوعی

جدول ۴ خواص نمونه مغزه مصنوعی استفاده شده در این مطالعه

| مشخصات                 | نفوذپذیری (mD) | طول (ft) | قطر (ft) | سطح (ft <sup>2</sup> ) | حجم (cc) | مش  | رس (%) |
|------------------------|----------------|----------|----------|------------------------|----------|-----|--------|
| خواص نمونه مغزه مصنوعی | ۴۰ - ۵۰        | ۰/۴۱۳    | ۰/۰۷۹    | ۰/۰۰۵                  | ۵۶/۹۷    | ۲۰۰ | ۵-۰    |

آزمایشات میکرو مدل در چهار دبی جریان متفاوت (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mL/hr) برای میزان برابر از هر سیال تزریقی (۱/۶ mL) انجام و با نصب دو ترانسمیتر با دقت ۰/۰۰۱ bar اختلاف فشار جریان در مسیر ورودی و خروجی ثبت شد. برای به دست آوردن تروایی، نمودار اختلاف فشار بر حسب دبی رسم و با استفاده از شیب خط (m) تروایی در هر آزمایش در رابطه ۲ محاسبه شد.

$$m = \frac{\mu \times L}{k \times A} = \frac{\Delta p}{q} \rightarrow k = \frac{\mu \times L}{m \times A} \quad (2)$$

#### تعیین اثر میزان تورم و مهاجرت بر آسیب سازند

در این مکانیسم اثر رس های کاتولینیت (مهاجر) و اسمکتیت (تورم) موجود در سنگ مخزن هر کدام به میزان ۵ wt.% به صورت جداگانه در حضور به ترتیب سیالات تزریقی DSW، DFW، FW و در نهایت NF بر شاخص آسیب بررسی شد. نتایج این گروه های آزمایش در **جدول ۵** با بیان تغییرات نفوذپذیری نسبت به شرایط اولیه میکرو مدل بدون رس و محاسبه میزان آسیب سازند (FDEI) ارائه شده است.

شاخص آسیب سازند<sup>۱</sup> به صورت عبارت FDEI برای توصیف بهتر تغییرات نفوذپذیری نسبت به نفوذپذیری اولیه در رابطه ۱ بیان شد:

$$FDEI \% = \frac{K_i - K_n}{K_i} \times 100 \quad (1)$$

$K_n$ : نفوذپذیری با حضور خاک رس در هر مرحله از آزمایش با تزریق سیالات مختلف  
 $K_i$ : نفوذپذیری اولیه میکرو مدل معادل ۳۳۴ mD و نمونه مغزه مصنوعی ۵۰ mD

ایجاد میزان نفوذپذیری بر روی شیشه میکرو مدل و نمونه مغزه غیرقابل کنترل است اما به دلیل مقایسه تغییرات نفوذپذیری با تعریف شاخص آسیب سازند تفاوت میزان نفوذپذیری اولیه در هریک از محیط های میکرو مدل و نمونه مغزه مصنوعی قابل اغماض است و در میکرو مدل علاوه بر محاسبه میزان تغییرات نفوذپذیری پایش تصویری جهت امکان تفسیر تغییرات شاخص آسیب نسبت به اثر تورم و مهاجرت مورد نظر بوده است و نتایج آزمایشات در هر دو محیط میکرو مدل و سیلاب زنی به لحاظ کمی و کیفی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

#### نتایج آزمایشات میکرو مدل

1. Formation Damage Evaluation Index (FDEI)

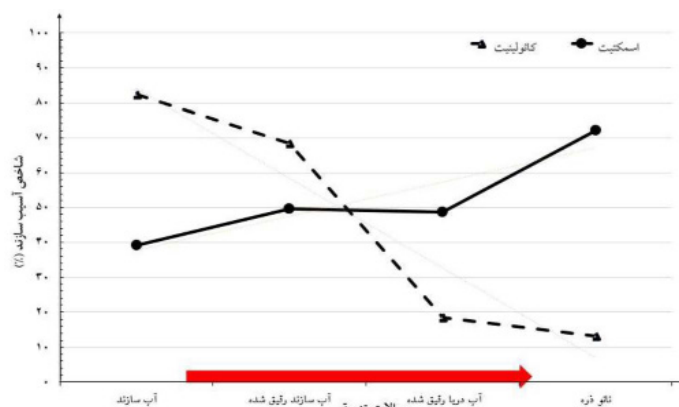
جدول ۵ نتایج آزمایشات میکرومدل برای بررسی اثر مجزای تورم و مهاجرت

| سناریو | مواد            | مرحله | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|--------|-----------------|-------|-------------------|----------------|--------|
| ۱      | کائولینیت<br>۵٪ | ۱     | آب سازند          | ۵۹             | ۸۲     |
|        |                 | ۲     | آب سازند رقیق شده | ۱۰۵            | ۶۸     |
|        |                 | ۳     | آب دریا رقیق شده  | ۲۷۲            | ۱۸     |
|        |                 | ۴     | نانو ذره          | ۲۸۹            | ۱۳     |
| ۲      | اسمکتیت ۵٪      | ۱     | آب سازند          | ۲۰۳            | ۳۹     |
|        |                 | ۲     | آب سازند رقیق شده | ۱۶۸            | ۵۰     |
|        |                 | ۳     | آب دریا رقیق شده  | ۱۷۱            | ۴۹     |
|        |                 | ۴     | نانوذره           | ۹۳             | ۷۲     |

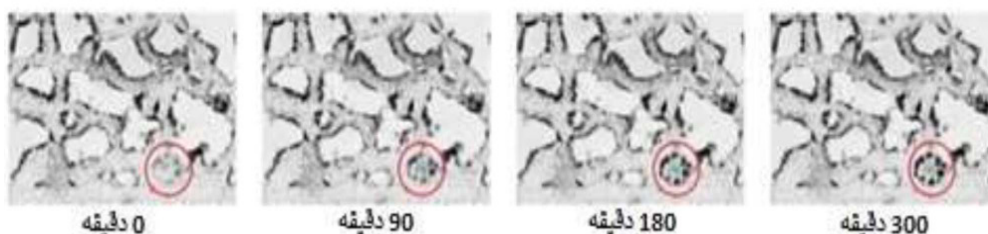
FW: آب سازند، DFW: آب سازند رقیق شده، DSW: آب دریا رقیق شده و NF: نانوذرات  $\text{MgO}$ ،  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در آب دریا رقیق

سطح و مهاجرت به خارج از میکرومدل و خنثی شدن اثر تورم به دلیل کاهش تراکم رس‌ها و باز شدن فضای مسیرهای جریان در منافذ دانست. با تزریق NF به عنوان کنترل کننده مهاجرت، عملکرد خوبی در کنترل تورم ندارد، لذا شاهد کاهش شدید نفوذپذیری حتی بیشتر از حالت FW به DFW هستیم زیرا نانوذرات به اندازه کافی کوچک نیستند که بتوانند به لایه‌های داخلی خاک رس نفوذ کنند. بنابراین استفاده از سیال کنترل مهاجرت در محیط متخلخل دارای رس با قابلیت تورم و مهاجرت مفید نمی‌باشد. شکل ۶ روند این تفسیر را به صورت تصویری نشان می‌دهد. به طور کلی با بررسی روند تغییرات در دوازمایش می‌توان گفت با توجه به شیب تندتر کاهشی آسیب سازند (۶۹٪) با حضور رس مهاجر (کائولینیت) در مقایسه با شیب افزایشی آن (حدود ۳۳٪) با حضور رس متورم (اسمکتیت) تأثیر کاهش غلظت شوری بر مهاجرت بیش از تورم در تغییرات آسیب سازند نسبت به شرایط اولیه مؤثر می‌باشد. می‌توان گفت که در سنگ مخازنی که رس‌های مستعد مهاجرت وجود دارد بهتر است از سیال کنترل مهاجرت به عنوان افزایه استفاده نشود و اجازه داده شود خروج رس‌ها از سنگ مخزن اتفاق بی‌افتد و تنها از افزایه‌های کنترل تورم استفاده شود و در تأسیسات سر چاه در تله سنگ با تغییر اندازه منافذ جریان جداسازی شوند.

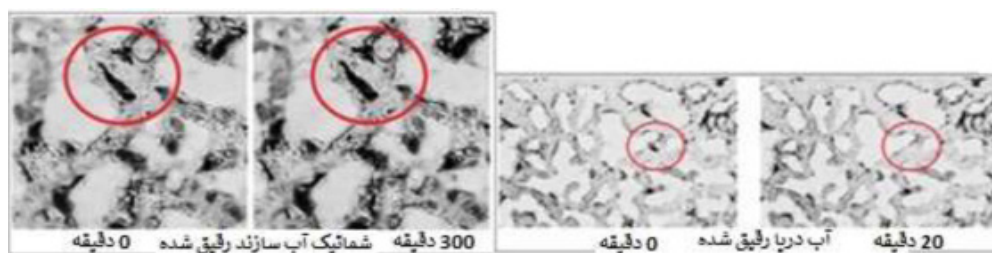
نتایج گروه اول (روند تغییرات نمودار رس کائولینیت)، در حین تزریق سیالات با حضور رس کائولینیت روند صعودی نفوذپذیری و کاهش شاخص آسیب مشاهده شد شکل ۴ که به دلیل مهاجرت خاک رس به خارج از میکرومدل است. با توجه به تغییرات شدید و فزاینده بیش از دو برابر نفوذپذیری از وضعیت اولیه میکرومدل ( $K_{FW}$ ) به ۵۹ به ۱۰۵ mD می‌توان گفت که به دلیل کاهش شدید شوری از آب سازند خالص به آب سازند ۴۰ بار رقیقی بوده است اما شیب شدید کاهش شاخص آسیب با تأخیر پس از شروع تزریق آب دریای رقیق اتفاق افتاد که نشان می‌دهد شروع مهاجرت رس‌ها نیاز به زمان دارد و از همان ابتدای تزریق اتفاق نمی‌افتد. تصویر گرفته شده از میکرومدل در شکل ۵ این روند مهاجرت را با افزایش تیرگی در ناحیه تعیین شده نشان می‌دهد. در نهایت، با تزریق NF، تغییر در شیب کاهشی شاخص آسیب در قسمت انتهایی بیانگر کنترل مهاجرت رس‌ها توسط این ترکیب است. نتایج گروه دوم (روند تغییرات نمودار رس اسمکتیت)، در حین تزریق به ترتیب FW، DFW، DSW و NF با حضور رس اسمکتیت روند افزایش شاخص آسیب به دلیل تورم خاک رس اتفاق افتاد، تنها در زمان تزریق DSW، در روند کاهش، آسیب جزئی حدود ۱٪ مشاهده شد که می‌توان آن را ناشی از جدا شدن رس‌ها از



شکل ۴ تغییرات شاخص آسیب سازند با حضور رس‌های کائولینیت و اسمکتیت در میکرومدل



شکل ۵ نمایش مهاجرت رس‌های کائولینیت با کاهش شوری در زمان تزریق DFW با حجم ۱/۶ mL در سناریوی اول



شکل ۶ نمایش تورم رس‌های اسمکتیت با کاهش شوری در زمان تزریق DFW و مهاجرت در زمان تزریق DSW در سناریوی دوم

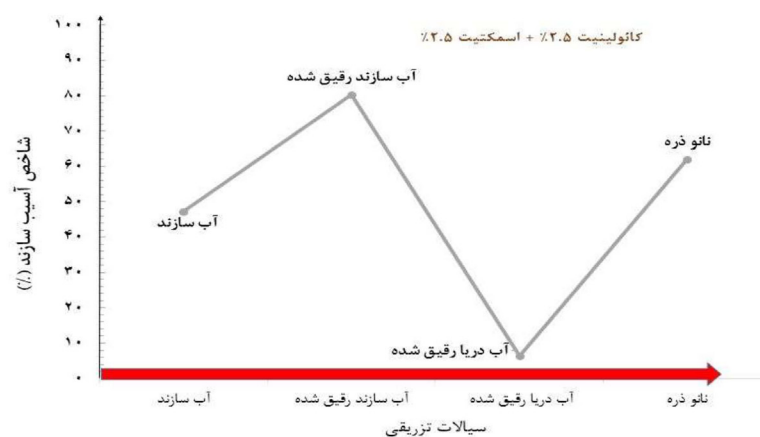
سبب افزایش شاخص آسیب به حدود ۲ برابر به میزان ۸۰/۲۷٪ می‌شود که با پایش تصویری در شکل ۸ تیرگی محل مشخص شده در زمان min ۳۰۰ قابل مشاهده است و بیانگر اثر قابل توجه تورم رس‌های اسمکتیت در این مرحله از تزریق می‌باشد. با توجه به تفاوت کوچک بین ترکیب یونی DFW و DSW، انتظار می‌رفت نفوذپذیری و شاخص آسیب تغییر چندانی نکند اما برخلاف این انتظار شوک کاهش شدید شاخص آسیب به ۶/۳۰٪ و بهبود نفوذپذیری مشاهده شد که دلیل آن می‌تواند ایجاد فضای کافی برای جابه‌جایی و مهاجرت رس‌های کائولینیت به خارج از سیستم و خنثی شدن اثر تورم رس‌های اسمکتیت در مرحله قبل باشد.

### بررسی اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند

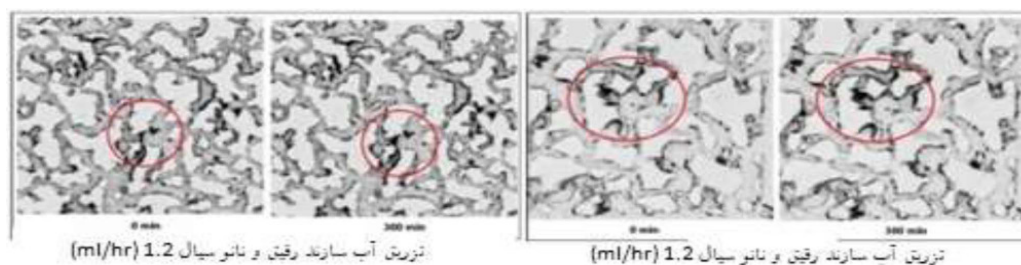
به‌منظور بررسی اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند و مقایسه اثر میزان تراکم رس‌ها، در طراحی آزمایشات گروه ۳ و ۴، میکرومدل با مخلوط‌های ۵ (۲/۵ %wt) کائولینیت و ۲/۵ (اسمکتیت) و ۱۰ (۵ %wt) کائولینیت و ۵ (اسمکتیت) پوشش داده شد که نتایج این گروه آزمایش در جدول ۶ بیان شده است. در سناریوی ۳، روند تغییرات شاخص آسیب همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در مرحله شروع با تزریق FW میزان شاخص آسیب ۴۷٪ می‌باشد و در ادامه با کاهش شوری به میزان ۴۰ مرتبه آب سازند (DFW)

جدول ۶ اثر همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند

| سناریو | مواد                             | مرحله | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|--------|----------------------------------|-------|-------------------|----------------|--------|
| ۳      | کائولینیت ۲/۵٪ +<br>اسمکتیت ۲/۵٪ | ۱     | آب سازند          | ۱۷۶            | ۴۷     |
|        |                                  | ۲     | آب سازند رقیق شده | ۶۶             | ۸۰     |
|        |                                  | ۳     | آب دریا رقیق شده  | ۳۱۳            | ۶      |
|        |                                  | ۴     | نانو ذره          | ۱۲۷            | ۶۲     |
| ۴      | کائولینیت ۵٪ + اسمکتیت<br>۵٪     | ۱     | آب سازند          | ۶۴             | ۸۱     |
|        |                                  | ۲     | آب سازند رقیق شده | ۶۱             | ۸۲     |
|        |                                  | ۳     | آب دریا رقیق شده  | ۵۸             | ۸۳     |
|        |                                  | ۴     | نانو ذره          | ۵۷             | ۸۳     |



شکل ۷ اثر همزمان تورم و مهاجرت بر شاخص آسیب سازند در مخلوط ۵ و ۱۰٪ تراکم رس‌ها



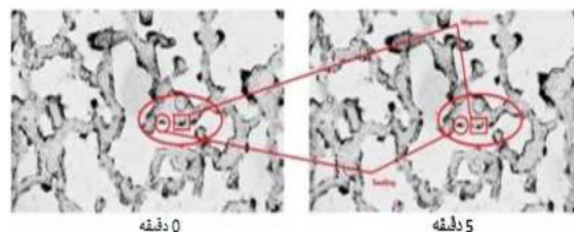
شکل ۸ نمایش تورم رس‌ها با تزریق آب سازند رقیق و نانو سیال با پوشش مخلوط رس ۵٪ میکرومدل (سناریو ۳)

شوند و در اینجا نیز صحت این تفسیر مشاهده شد. در آزمایشات گروه ۴٪، کائولینیت و اسمکتیت هر کدام به ۵ wt.% و در مجموع مخلوط ۱۰٪ افزایش یافت. در مرحله شروع با تزریق آب سازند میزان شاخص آسیب مشابه سناریوی ۱ با اختلاف ۲٪ آزمایشات رس پایه کائولینیت حاصل شد و اثر غالب مهاجرت را به دلیل شاخص آسیب مشابه (سناریو-۱ جدول ۵ و سناریو-۴ جدول ۶) تقویت می‌کند.

در ادامه، با تزریق نانو سیال (NF) به‌عنوان سیال کنترل مهاجرت توقف جابه‌جایی و خروج رس‌های کائولینیت اتفاق افتاد و شاخص آسیب را به ۶۱/۹۵٪ افزایش یافت و می‌توان گفت به دلیل کنترل مهاجرت رس‌های کائولینیت و همزمان تورم رس‌های اسمکتیت در نتیجه انسداد مسیر جریان است (شکل ۸). همان‌طور که در تفسیر بخش قبل نیز بیان شد رس‌های مهاجر غیرتورمی بهتر است از سیستم خارج

نظر گرفته شد. در سناریوی ۳ این سیالات تزریقی در مجاورت به میزان مساوی ۲/۵ wt% از هردو نوع رس تورمی و غیر تورمی (مهاجرپذیر) قرار گرفته‌اند. نمودار میله‌ای خاکستری شکل ۱۰ نتیجه آزمایش گروه ۳-، مشارکت اثر هم‌زمان دو پدیده تورم و مهاجرت نشان داده شده است. میزان شاخص آسیب از ۴۷/۱۶٪ بین شرایط اولیه دو سناریوی ۱ و ۲ آغاز می‌شود که با توجه به وجود نیمی از مخلوط رس تورم پذیر و نیم دیگر کائولینیت بنا به ساختار این رس غیر تورمی با کاهش شوری جدایش آن از سطح و جابه‌جایی به سهولت انجام و همراه سیال جریان می‌یابد. میزان مشارکت مکانیسم مهاجرت با توجه به اختلاف بیشتر آن حدود ۳۵٪ با مرحله آغازین سناریو ۱ نسبت به اختلاف ۸٪ با سناریو ۲ مشهود است که بیانگر اثر غالب مهاجرت رس‌ها است. در مرحله تزریق آب سازند رقیق (DFW) شوری به میزان قابل توجهی یعنی ۴۰ برابر کاهش یافته است اثر تورم در سناریو ۲ یعنی در مجاورت اسمکتیت روند افزایشی دارد اما در سناریو ۱ به دلیل عدم تورم‌پذیری کائولینیت و از طرفی ادامه مهاجرت و خروج این رس‌ها اثر کاهشی شاخص آسیب اتفاق می‌افتد، در سناریو ۳ برآیند مشارکت هم‌زمان دو پدیده در این مرحله تحت تأثیر مهاجرت کائولینیت و تورم رس‌های اسمکتیت یک شوک ناگهانی و گذرا به دلیل انسداد مسیرهای جریانرا سبب می‌شود، و میزان شاخص آسیب به مقدار حداکثری ۸۰/۲۷٪ افزایش می‌یابد.

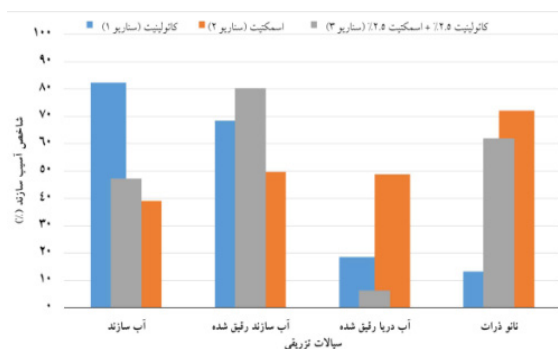
و در تمام مراحل تزریق سیالات این روند با تغییر ناچیز حدود ۲٪ ادامه یافت و لذا می‌توان گفت هر چه درصد وزنی رس‌ها بیشتر باشد، آسیب سازند همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است به دلیل توقف جابه‌جایی ناشی از مراحل قبل و به تله افتادن رس‌ها در گلوگاه‌های جریان و تورم هم‌زمان در این نقاط، شدیدتر است. و همچنین استفاده از ترکیب سیال کنترل مهاجرت (NF) باعث تشدید آسیب می‌گردد. بنابراین مهاجرت مکانیسمی مفید در اثر هم‌زمان مخلوط رس‌های تورمی و غیر تورمی است.



شکل ۹ نمایش تورم و مهاجرت با تزریق آب دریا رقیق با پوشش مخلوط ۱۰٪ میکرومدل (سناریو ۴)

### بررسی میزان مشارکت هر مکانیزم در آسیب سازند

به منظور بررسی میزان مشارکت پدیده‌های تورم و مهاجرت نتایج آزمایشات گروه‌های ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱۰، مقایسه تغییرات شاخص آسیب سازند (FDEI) برای سناریوهای ۱ و ۲ میکرومدل با محتوای رس‌های پایه و سناریو ۳ مخلوط ۵٪ رس‌های کائولینیت و اسمکتیت ارائه شده است. در تمام سناریوهای این بخش تزریق به ترتیب FW، DFW، DSF و NF در



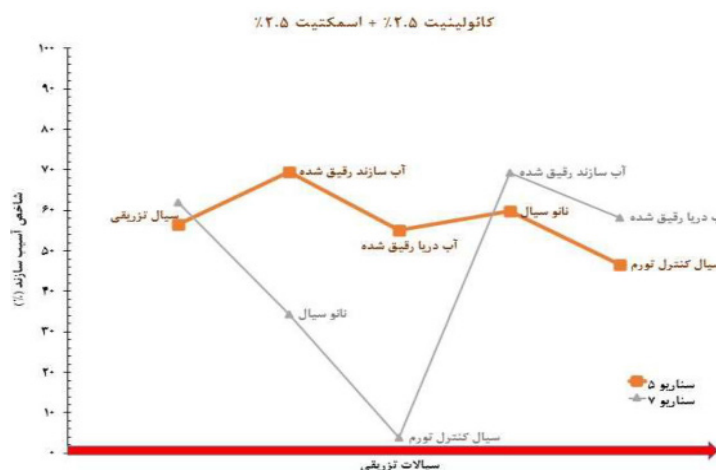
شکل ۱۰ مقایسه اثر تورم و مهاجرت بر تغییرات شاخص آسیب سازند (FDEI) در سناریوهای ۱، ۲ و ۳

نتایج دو گروه آزمایشات ۵ و ۷ با هدف بررسی تأثیر الگوهای مختلف تزریق بر شاخص آسیب در میکرو مدل حاوی مخلوط ۵٪ وزنی کائولینیت و اسمکتیت بررسی شده است. در **شکل ۱۱** روند تغییرات شاخص آسیب با علائم اختصاری سیالات تزریقی بر روی نمودارها طبق تعریف سناریوهای **جدول ۷** مشخص شده است، تغییر الویت تزریق دو سیال کنترل مهاجرت و کنترل تورم مورد مقایسه قرار گرفت. تغییرات شاخص آسیب سازند در سناریو ۵ بعد از تزریق آب سازند ۴۰ بار رقیق (DFW)، تورم کانی‌های رس سبب صعود روند آسیب سازند (FDEI) از ۵۶/۶۱ به ۶۹/۵۸٪ شد و در ادامه در طی تزریق آب دریا ۲۰ بار رقیق (DSW) مهاجرت و خروج رس‌ها باعث بهبود وضعیت و کاهش آسیب سازند به ۵۵٪ گردید که اثر بسیار موفق مهاجرت رس‌ها در این مرحله بخوبی نمایان می‌شود و اثر تورم با کاهش شوری را حدود ۱۴٪ بهبود بخشیده است. در مرحله بعد با تزریق نانو سیال (NF) علی‌رغم انتظار بهبود وضعیت با کنترل مهاجرت، کنترل و متوقف نمودن مهاجرت رس‌ها سبب روند صعودی شاخص آسیب به ۵۹/۷۸٪ گردید که می‌توان گفت در مراحل قبل که با کاهش شوری جابه‌جایی و مهاجرت اتفاق افتاده است در این مرحله با توقف حرکت رس‌ها با جریان سیال سبب رسوب این رس‌ها در منافذ جریان و انسداد شده است.

در ادامه با تزریق آب دریا رقیق (DSW) با شوری نزدیک به DFW تورم اسمکتیت ادامه دارد و از طرفی روند مهاجرت کائولینیت که با تأخیر اتفاق افتاده اثر خود را نشان می‌دهد و شیب تندتر کاهش آسیب را شاهد هستیم و مهاجرت با شیب اثرگذاری بیشتر آسیب سازند را به میزان ۶/۳۰٪ کاهش می‌دهد که اثباتی بر اثر غالب مهاجرت در مشارکت دپدیده مهاجرت و تورم می‌باشد. در مرحله پایانی با تزریق نانو سیال (NF) به‌عنوان کنترل مهاجرت همانند بخش‌های قبل اثر توقف مهاجرت و هم‌زمان تورم سبب انسداد مسیرهای جریان و در نتیجه افزایش برآیند شاخص آسیب در مشارکت پدیده‌های تورم و مهاجرت شده است. می‌توان گفت استفاده از سیال کنترل مهاجرت برای اتفاق دو پدیده به‌صورت هم‌زمان مطلوب نمی‌باشد. لذا به‌طور کلی می‌توان گفت در مشارکت دو پدیده، آسیب ناشی از تورم روند یکسانی را طی می‌کند اما مهاجرت کانی‌های رس غیر تورمی و حتی به‌طور جزئی جابه‌جایی کانی‌های رس تورمی سرنوشت آسیب سازند را تعیین می‌کند و چنانچه تزریق مداوم و زمان کافی برای اثرگذاری مهاجرت با تأخیر داده شود در نهایت کاهش قابل ملاحظه‌ای در شاخص آسیب سازند تجربه خواهیم کرد.

#### اثر الگوهای تزریق بر شاخص آسیب سازند

ارزیابی الگوها در مخلوط ۵٪ رس: در این بخش



شکل ۱۱ مقایسه تأثیر الگوهای متفاوت تزریق در محیط متخلخل حاوی مخلوط ۵٪ وزنی کائولینیت و اسمکتیت

جدول ۷ مقایسه الگوهای تزریق در مدل با کائولینیت ۲/۵٪ + اسمکتیت ۲/۵٪

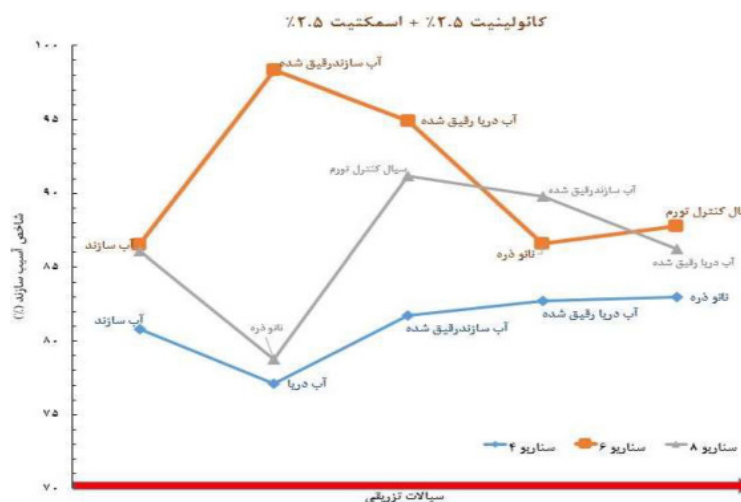
| مواد                          | سناریو | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| کائولینیت ۲/۵٪ + اسمکتیت ۲/۵٪ | ۵      | ۱           | آب سازند          | ۱۴۵            | ۵۷     |
|                               |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۱۰۲            | ۷۰     |
|                               |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۱۵۰            | ۵۵     |
|                               |        | ۴           | نانوذره           | ۱۳۴            | ۶۰     |
|                               |        | ۵           | سیال کنترل تورم   | ۱۷۸            | ۴۷     |
|                               | ۷      | ۱           | آب سازند          | ۱۲۷            | ۶۲     |
|                               |        | ۲           | نانوذره           | ۲۱۹            | ۳۴     |
|                               |        | ۳           | سیال کنترل تورم   | ۳۲۱            | ۴      |
|                               |        | ۴           | آب سازند رقیق شده | ۱۰۳            | ۶۹     |
|                               |        | ۵           | آب دریا رقیق شده  | ۱۴۰            | ۵۸     |

آزمایشات گروه‌های ۶،۴ و ۸ به بررسی مقایسه تأثیر الگوهای مختلف تزریق بر شاخص آسیب در میکرو مدل حاوی مخلوط ۱۰٪ وزنی کائولینیت و اسمکتیت که نسبت به الگوهای قبلی درصد وزنی رس‌ها دو برابر شد، و همچنین سناریو ۴ با افزودن آب دریا کاهش شوری تدریجی به‌عنوان یک الگوی جدید با دو سناریو دیگر که جابه‌جایی الویت‌های تزریق انجام شد مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در **جدول ۸** بیان شده است. همان‌طور که با مقایسه **شکل‌های ۱۱ و ۱۲** مشاهده می‌شود، نسبت به سناریوهای ۵ و ۷ به‌دلیل افزایش تراکم رس‌ها و دو برابر شدن میزان درصد وزنی رس‌ها روند تغییرات شاخص آسیب سازند در سطح بالاتری بیش از ۷۵٪ در تمام مراحل آزمایش و الگوها قرار دارند و می‌توان گفت میزان آسیب سازند در محیط با محتوای رس بیشتر به‌دلیل تراکم رس‌ها، تورم و مهاجرت ذرات رس سبب انسداد گلوگاه‌های مسیر جریان به‌صورت گسترده می‌شود. در این گروه آزمایشات الگوی کاهش تدریجی شوری در سطح میانگین پایین‌تری قرار دارد (**شکل ۱۲**). نتیجه کلی از مقایسه الگوهای تزریق، با توجه به اینکه مقدار نفوذپذیری و انتخاب میزان و نوع رس‌ها از یک سنگ مخزن کربناته تبعیت شده است.

و در مرحله آخر با تزریق ترکیب سیال کنترل تورم (SI)، تورم رس‌ها به‌خوبی کنترل شده و روند نزولی شاخص آسیب به ۴۶/۶۱٪، موفقیت استفاده از این ترکیب را نشان می‌دهد. در سناریوی ۷، با تغییر الویت تزریق ترکیب کنترل مهاجرت و تورم به مرحله ابتدایی آزمایش شاخص آسیب بشدت روند نزولی در همان مراحل اولیه نشان داده و تا پایان تزریق SI شاخص آسیب به‌میزان کمترین حد خود ۳/۸۸٪ نسبت به تمام سناریوهای مورد بررسی بوده است و از همان ابتدا روند نزولی در این گروه آزمایش را به‌دلیل استفاده از سیال کنترل مهاجرت و تورم در زمان مناسب و به‌دلیل استفاده ترکیب مناسب اکسی زیرکونیوم به‌عنوان افزایه کنترل تورم در زمان کاهش شوری آب سازند و دریا شاهد بودیم. به‌عبارتی می‌توان گفت تزریق سیال‌های کنترل در زمان مناسب بسیار حائز اهمیت می‌باشد تزریق نانوسیال جهت کنترل مهاجرت در زمان مناسب اثر بهیود و همان‌طور که در سناریو ۵ مشاهده شد استفاده از آن در زمان یا الویت نامناسب سبب رسوب رس‌ها در مسیرهای جریان خواهد شد. و می‌توان گفت ترکیب سیال کنترل تورم و الگوی الویت تزریق موفق در این تحقیق معرفی شد. ارزیابی الگوها در مخلوط ۱۰٪ رس: در این بخش با طراحی

جدول ۸ مقایسه الگوهای مختلف تزریق برای میکرومدل با کائولینیت ۵٪ + اسمکتیت ۵٪

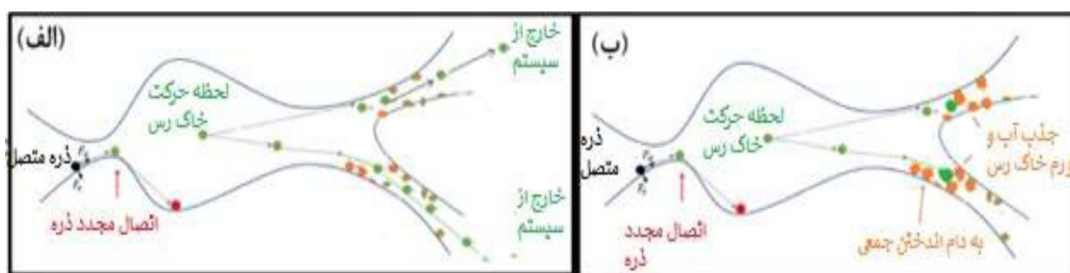
| نوع مواد                  | سناریو | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|---------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| کائولینیت ۵٪ + اسمکتیت ۵٪ | ۴      | ۱           | آب سازند          | ۶۴             | ۸۱     |
|                           |        | ۲           | آب دریا           | ۷۶             | ۷۷     |
|                           |        | ۳           | آب سازند رقیق شده | ۶۱             | ۸۲     |
|                           |        | ۴           | آب دریا رقیق شده  | ۵۸             | ۸۳     |
|                           |        | ۵           | نانو ذره          | ۵۷             | ۸۳     |
|                           | ۶      | ۱           | آب سازند          | ۴۵             | ۸۷     |
|                           |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۶              | ۹۸     |
|                           |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۱۷             | ۹۵     |
|                           |        | ۴           | نانو ذره          | ۴۵             | ۸۷     |
|                           |        | ۵           | سیال کنترل تورم   | ۴۱             | ۸۸     |
|                           | ۸      | ۱           | آب سازند          | ۴۷             | ۸۶     |
|                           |        | ۲           | نانو ذره          | ۷۱             | ۷۹     |
|                           |        | ۳           | سیال کنترل تورم   | ۳۰             | ۹۱     |
|                           |        | ۴           | آب سازند رقیق شده | ۳۴             | ۹۰     |
|                           |        | ۵           | آب دریا رقیق شده  | ۴۶             | ۸۶     |



شکل ۱۲ مقایسه الگوهای تزریق در محیط متخلخل حاوی مخلوط ۱۰ wt.% کائولینیت و اسمکتیت

نتیجه راندهمان فرآیند کنترل آسیب سازند بهبود می یابد ولی چنانچه مهاجرت بعد از تورم و با تأخیر باشد سبب به تله افتادن رس‌های در حال حرکت در گلوگاه‌ها و انسداد مسیر جریان و در نتیجه اختلال در نفوذپذیری مؤثر خواهد شد (شکل ۱۳ ب).

و در سنگ‌های کربناته نفوذپذیری نسبت به مخازن ماسه‌سنگی بسیار کمتر است. اگر با کاهش شوری و سرعت جریان، مهاجرت رس‌های غیرتورمی تشدید شود و هم‌زمان تورم رس‌های تورمی کنترل گردد فضای کافی برای جابه‌جایی و خروج رس‌ها از سیستم وجود خواهد داشت (شکل ۱۳ الف) و در



شکل ۱۳ الف) مهاجرت قبل از تورم و خروج رس ها ب) مهاجرت بعد از تورم رس ها و تله افتادن رس های در حال حرکت

در شکل ۱۴ مقایسه سناریوهای تزریق سیالات با الگوها و ترکیبات متفاوت برای دو مخلوط وزنی ۵ و ۱۰٪ پوشش رس در میکرومدل رسم گردید که سناریو شماره ۷- یعنی ترتیب تزریق سیالات FW-NF-SI-DFW-DSW یا به عبارتی الویت تزریق ابتدای سیالات کنترل مهاجرت و تورم در شرایط مخلوط وزنی ۵٪ پوشش رس میکرو مدل در کاهش آسیب سازند ناشی از اثر تزریق آب با شوری کم بر روی رس های موجود در سنگ مخزن مؤثر می باشد. و برای مخلوط وزنی رس ۱۰٪ سناریو شماره ۴- کاهش تدریجی شوری با تزریق ترتیب سیالات FW-SW-DFW-DSW-NF در کاهش آسیب سازند ناشی از اثر تزریق آب با شوری کم مؤثرتر می باشد. البته می توان ترکیب هر دو الگو را برای کنترل آسیب سازند با توجه به میزان رس بین ۵ تا ۱۰٪ در سنگ های کربناته مخازن به کار برد.

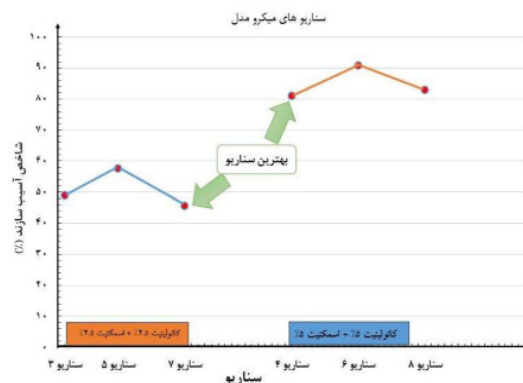
**نتایج آزمایشات سیلاب**

**تعیین اثر تورم و مهاجرت بر آسیب سازند**

کائولینیت از یک صفحه هشت وجهی و یک صفحه چهار وجهی تشکیل شده است که ظرفیت تبادل کاتیونی ناچیز (CEC)<sup>۱</sup> دارد. CEC پایین به معنای بار سطحی منفی کم و در نتیجه پتانسیل تورم کم است. بنابراین کائولینیت در محیط متخلخل، مشکل تورم ایجاد نمی کند. اما در شرایط مخزن در حالت تعادل ایستایی است و هر گونه تغییر در وضعیت مخزن به ویژه در شوری می تواند باعث حرکت و انسداد منافذ یا اثرگذاری نفوذپذیری شود. از طرفی اسمکتیت بیشتر مسئول تورم و

کاهش فضاهای منافذ است. در این گروه آزمایش سعی شده است اثر کائولینیت (مهاجر) و اسمکتیت (تورم) بر آسیب سازند به صورت جداگانه بررسی شود. بدین ترتیب، دو نمونه سنگ حاوی ۵٪ وزنی کائولینیت و ۵٪ وزنی اسمکتیت تهیه شد. نتایج این گروه آزمایش در جدول ۹ دو سری آزمایش مغزه با حضور کائولینیت و اسمکتیت به صورت مجزا بیان شده است. همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود برای هر دو رس تورمی و غیر تورمی روند صعودی میزان آسیب اتفاق افتاده است اما در سناریو ۲ با حضور اسمکتیت به عنوان رس تورمی تغییرات آسیب از ۱۷/۱۲ تا ۴۵/۸۶٪ در موقعیت بالاتری نسبت به اثر کائولینیت، رس غیر تورمی در سناریو ۱ با تغییرات بین ۱۳/۹۲ تا ۳۴/۱۸ قرار گرفته است. که می توان گفت جذب آب به علت کاهش شوری و تورم رس اثر بیشتری بر آسیب نسبت به رس غیر تورمی و اثر مهاجرت دارد، هر چند با روند موازی و سطح پایین تر آسیب برای رس کائولینیت شاید بتوان بدین گونه تفسیر کرد این نوع رس دارای سطح تبادل یونی کمتر نسبت به اسمکتیت و در نتیجه تورم جزئی است. و علت روند افزایش موازی میزان آسیب در سطح پایین تر نسبت به رس تورمی اسمکتیت بوده است و مهاجرت اگر اتفاق می افتاد در مرحله آخر تزریق با استفاده از سیال کنترل مهاجرت (NF) باید شاهد روند معکوس مسیر مهاجرت برای شاخص آسیب می بودیم.

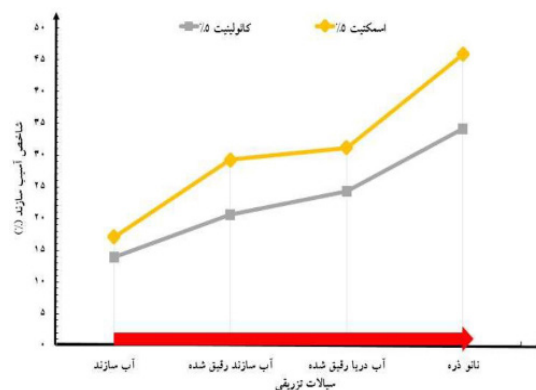
1. Cation Exchange Capacity



شکل ۱۴ تأثیر سناریوهای تزریق سیالات برای مخلوط وزنی ۵ و ۱۰٪ پوشش رس میکرومدل

جدول ۹ تأثیر نوع رس بر میزان آسیب سازند در اثر تورم و مهاجرت رس

| سناریو | مواد         | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|--------|--------------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| ۱      | کائولینیت ۵٪ | ۱           | آب سازند          | ۴۳             | ۱۳/۹۲  |
|        |              | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۹/۷           | ۲۰/۶   |
|        |              | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۷/۸۵          | ۲۴/۳   |
|        |              | ۴           | نانو ذره          | ۳۲/۹           | ۳۴/۱۸  |
| ۲      | اسمکتیت ۵٪   | ۱           | آب سازند          | ۴۱/۴۴          | ۱۷/۱۲  |
|        |              | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۵/۳۸          | ۲۹/۲۴  |
|        |              | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۴/۴۱          | ۳۱/۱۸  |
|        |              | ۴           | نانو ذره          | ۲۷             | ۴۵/۸۶  |



شکل ۱۵ تأثیر کانی رس بر شاخص آسیب سازند (FDEI) در مقابل سیالات تزریقی

در این بخش، اثر همزمان تورم و مهاجرت در محیط نمونه سنگ حاوی رس مورد بررسی قرار گرفت، در سناریوی ۳، به میزان ۲/۵ %wt کائولینیت و ۲/۵ %wt اسمکتیت در نمونه سنگ وجود داشت، در حالی که در نمونه سنگ سناریوی ۴، جهت مقایسه تأثیر افزایش تراکم رس‌ها کائولینیت به ۵٪ وزنی و اسمکتیت به ۵٪ افزایش داده شد.

علی‌احمال ترکیب سیال نانو ذرات به‌عنوان سیال کنترل مهاجرت برای هر دو نوع رس در کنترل آسیب مؤثر نبوده است. و می‌توان گفت آسیب ناشی از تورم بیشتر از مهاجرت رس‌ها در سنگ‌های مخزن مؤثر می‌باشد.

بررسی اثر همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند

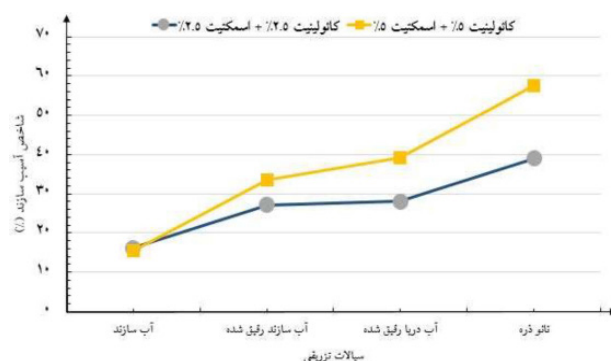
تغییرات شاخص آسیب برای طرح‌های مختلف تزریق محلول با استفاده از سیلاب تزریق نمونه‌های مصنوعی مغزه با محتوای خاک رس مختلف در **شکل ۱۷** ارائه شده است. کمترین مقدار FDEI برای محیطی بود که حاوی کانی‌های کائولینیت است. در چنین شرایطی صرفاً "مهاجرت رس درصد آسیب سازند را کنترل می‌کند. در محیطی که فقط اسمکتیت وجود داشت، مکانیسم آسیب سازند غالب تورم بود و FDEI به دلیل حداکثر تبادل ظرفیت یونی در این نوع رس در سطح بالاتری نسبت به رس غیر تورمی و مخلوط ۵٪ قرار دارد. و روند تغییرات مخلوط رس‌ها به نمودار تورمی اسمکتیت نزدیک‌تر بوده که بیانگر اثر غالب تورم به‌طور میانگین بیش از ۸۰٪ می‌باشد، و در مخلوط ۱۰٪ رس‌ها به‌علت تراکم بیشتر، تأثیر هم‌زمان مهاجرت و تورم رس‌ها سبب انسداد مسیرهای جریان و قرار گرفتن در بالاترین سطح آسیب شده است.

البته انتخاب‌های تجمعی با حداقل و حداکثر میزان رس‌ها با نمونه واقعی مطابقت دارد. طبق نتایج بیان شده در **جدول ۱۰**، در هر دو گروه آزمایشات ۳ و ۴، شاخص آسیب در طی تزریق آب سازند (FW) و ایجاد شرایط اولیه مخزن تقریباً "حدود ۱۶٪ بود. و در ادامه تزریق با کاهش شوری همان‌طور که در **شکل ۱۶** مشاهده می‌شود در سناریو ۴ به دلیل افزایش و تراکم میزان رس‌ها به ۱۰٪ wt خروج و مهاجرت رس‌ها با اختلال مواجه می‌شود و از طرفی فرصت کافی نفوذ یون‌ها بین لایه‌های رس متورم بیشتر شده و لذا سطح بالاتر آسیب سازند تا انتهای تزریق برای تمامی سیالات مربوط به این سناریو می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت برای درصد وزنی بیشتر رس‌ها به دلیل تأثیر غالب تورم و عدم فرصت خروج و یا مهاجرت رس‌های غیر تورمی آسیب سازند شدیدتر است.

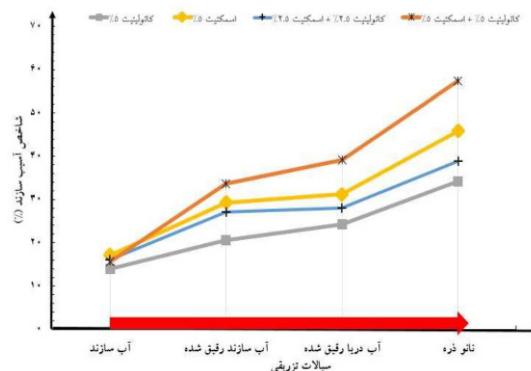
بررسی میزان مشارکت هر مکانیزم در آسیب سازند

جدول ۱۰ اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند

| سناریو | مواد                             | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|--------|----------------------------------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| ۳      | کائولینیت ۲/۵٪ +<br>اسمکتیت ۲/۵٪ | ۱           | آب سازند          | ۴۱/۹۵          | ۱۶/۱   |
|        |                                  | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۶/۴۳          | ۲۷/۱۴  |
|        |                                  | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۵/۹۹          | ۲۸/۰۲  |
|        |                                  | ۴           | نانو ذره          | ۳۰/۵۳          | ۳۸/۹۴  |
| ۴      | کائولینیت ۵٪ +<br>اسمکتیت ۵٪     | ۱           | آب سازند          | ۴۲/۲۳          | ۱۵/۵۴  |
|        |                                  | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۳/۲۱          | ۳۳/۵۸  |
|        |                                  | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۰/۴۳          | ۳۹/۱۴  |
|        |                                  | ۴           | نانو ذره          | ۲۱/۳۱          | ۵۷/۳۸  |



شکل ۱۶ اثر هم‌زمان تورم و مهاجرت رس‌ها بر آسیب سازند



شکل ۱۷ تأثیر مکانیسم‌های مختلف بر آسیب سازند

#### اثر الگوهای تزریق بر آسیب سازند

در این بخش آزمایشات گروه‌های ۷،۵،۳ و ۹ برای بررسی تأثیر الگوهای مختلف تزریق بر آسیب سازند ناشی از اثر هم‌زمان پدیده‌های تورم و مهاجرت برای مخلوط ۵٪ رس‌های اسمکتیت و کائولینیت طراحی شد و نتایج در **جدول ۱۱** ارائه شده است و در **شکل ۱۸** روند تغییرات شاخص آسیب سازند با ذکر علامت اختصاری سیالات تزریقی برای الگوهای متفاوت مشاهده می‌گردد. در دو سناریو ۳ و ۵ روند آسیب سازند تا زمان تزریق NF یکسان و با اختلاف سطح ۲٪ می‌باشد. در مرحله پایانی سناریو ۵، تزریق ترکیب کنترل تورم (SI) سبب تثبیت روند تغییرات آسیب شد که بیانگر اثرگذاری این ترکیب می‌باشد. با طراحی و اجرای سناریوهای ۷ و ۹ کاهش سطح آسیب سازند در طول روند تزریق سیالات به دلیل جابه‌جایی الویت تزریق ترکیب سیال SI به عنوان کنترل تورم به مراحل اولیه و قبل از DFW و DSW اتفاق افتاد که در سناریوی ۹ با حذف سیال کنترل مهاجرت (NF) و الویت تزریق سیال کنترل تورم (SI) این الگو در پایین ترین سطح شاخص آسیب نسبت به الگوهای دیگر قرار گرفته است. در این بخش گروه آزمایشات ۸،۶،۴ و ۱۰ الگوهای تزریق برای مخلوط ۱۰٪ رس‌های اسمکتیت و کائولینیت یعنی افزایش تراکم دو برابری میزان رس‌ها در نمونه سنگ طراحی شد در **جدول ۱۲** روند تغییرات آسیب ناشی از اثر تزریق ترکیب سیالات با علامت اختصاری معین در **شکل ۱۹** ارائه

شده است. همان‌طور که از مقایسه **شکل ۱۸** و **۱۹** مشاهده می‌شود روند تغییرات شاخص آسیب مشابه سناریوهای ۳، ۵، ۷ و ۹ می‌باشد. اما در این بخش به دلیل افزایش تراکم رس‌ها در محیط، به‌طور میانگین میزان آسیب در سطح بالاتری قرار دارد و در این آزمایشات نیز اثر کنترلی مهاجرت مناسب نبوده و روند افزایشی آسیب ناشی از رسوب و به تله افتادن رس‌ها در مسیر جریان به دلیل کنترل جابه‌جایی آن‌ها و در نتیجه انسداد گلوگاه‌ها می‌باشد. که در آزمایشات میکرو مدل نیز نتایج مشابه حاصل شد.

در **شکل ۲۰** مقایسه الگوهای متفاوت تزریق برای دو حجم وزنی مخلوط ۵ و ۱۰٪ در نمونه مغزه مصنوعی با روش‌ها و ترکیبات متفاوت سیالات رسم گردید که نشان می‌دهد سناریوهای ۹ و ۱۰ یعنی ترتیب تزریق سیالات FW-SI-DFW-DSW یا به عبارتی الویت ابتدای تزریق سیال کنترلی تورم در هر دو میزان مخلوط ۵ و ۱۰٪ رس‌ها در کاهش آسیب سازند ناشی از اثر مکانیسم هم‌زمان تورم و مهاجرت در سنگ مخزن ۱۰ تا ۲۰٪ سبب کاهش شاخص آسیب سازند می‌گردد. و از ترکیب نتایج آزمایشات هر دو محیط میکرو مدل و سیلاب مغزه مصنوعی می‌توان گفت حذف سیال کنترل مهاجرت یا به عبارت دیگر مهاجرت منجر به خروج رس‌ها شده و در کنترل آسیب مناسب بوده است.

جدول ۱۱ سناریوهای مختلف تزریق برای نمونه سنگ با کائولینیت ۲/۵٪ + اسمکتیت ۲/۵٪

| مواد                          | سناریو | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|-------------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| کائولینیت ۲/۵٪ + اسمکتیت ۲/۵٪ | ۳      | ۱           | آب سازند          | ۴۲             | ۱۶     |
|                               |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۶             | ۲۷     |
|                               |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۶             | ۲۸     |
|                               |        | ۴           | نانو ذره          | ۳۱             | ۳۹     |
|                               | ۵      | ۱           | آب سازند          | ۴۲             | ۱۶     |
|                               |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۶             | ۲۹     |
|                               |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۶             | ۳۰     |
|                               |        | ۴           | نانو ذره          | ۲۹             | ۴۲     |
|                               |        | ۵           | سیال کنترل تورم   | ۲۹             | ۴۲     |
|                               | ۷      | ۱           | آب سازند          | ۴۱             | ۱۷     |
|                               |        | ۲           | نانو ذره          | ۳۸             | ۲۵     |
|                               |        | ۳           | سیال کنترل تورم   | ۳۷             | ۲۶     |
|                               |        | ۴           | آب سازند رقیق شده | ۳۷             | ۲۷     |
|                               |        | ۵           | آب دریا رقیق شده  | ۳۶             | ۲۸     |
|                               | ۹      | ۱           | آب سازند          | ۴۳             | ۱۴     |
|                               |        | ۲           | سیال کنترل تورم   | ۴۲             | ۱۶     |
|                               |        | ۳           | آب سازند رقیق شده | ۴۱             | ۱۷     |
|                               |        | ۴           | آب دریا رقیق شده  | ۴۱             | ۱۹     |



شکل ۱۸ مقایسه الگوهای تزریق در محیط متخلخل حاوی ۵٪ کائولینیت و اسمکتیت

جدول ۱۲ سناریوهای مختلف تزریق برای نمونه مغزه با کائولینیت ۵٪ + اسمکتیت ۵٪

| مواد                      | سناریو | مرحله تزریق | سیال تزریقی       | نفوذپذیری (mD) | % آسیب |
|---------------------------|--------|-------------|-------------------|----------------|--------|
| کائولینیت ۵٪ + اسمکتیت ۵٪ | ۴      | ۱           | آب سازند          | ۴۲             | ۱۶     |
|                           |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۳             | ۳۴     |
|                           |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۰             | ۳۹     |
|                           |        | ۴           | نانو ذره          | ۲۱             | ۵۷     |
|                           | ۶      | ۱           | آب سازند          | ۴۳             | ۱۴     |
|                           |        | ۲           | آب سازند رقیق شده | ۳۵             | ۳۰     |
|                           |        | ۳           | آب دریا رقیق شده  | ۳۳             | ۳۴     |
|                           |        | ۴           | نانو ذره          | ۲۲             | ۵۶     |
|                           |        | ۵           | سیال کنترل تورم   | ۲۲             | ۵۷     |
|                           | ۸      | ۱           | آب سازند          | ۴۲             | ۱۶     |
|                           |        | ۲           | نانو ذره          | ۳۵             | ۳۰     |
|                           |        | ۳           | سیال کنترل تورم   | ۳۴             | ۳۲     |
|                           |        | ۴           | آب سازند رقیق شده | ۳۳             | ۳۴     |
|                           |        | ۵           | آب دریا رقیق شده  | ۳۲             | ۳۵     |
|                           | ۱۰     | ۱           | آب سازند          | ۴۱             | ۱۸     |
|                           |        | ۲           | سیال کنترل تورم   | ۴۰             | ۱۹     |
|                           |        | ۳           | آب سازند رقیق شده | ۴۰             | ۲۰     |
|                           |        | ۴           | آب دریا رقیق شده  | ۳۹             | ۲۲     |





شکل ۲۰ تأثیر سناریوهای مختلف تزریق آب با شوری کم در میزان آسیب سازند در سیلاب زنی

## نتیجه گیری

میکرومدل سبب ۵ تا ۱۰٪ کاهش شاخص آسیب گردید.

(۵) در زمان تزریق آب هوشمند، با وجود پدیده همزمان مهاجرت و تورم، رس‌های متورم تأثیر بیشتری در آسیب سازند دارند.

(۶) محلول سیال تزریقی SI با وجود زیرکونیوم اکسی کلرید (ZOXC)، کارایی قابل قبولی در کنترل تورم بنتونیت با توجه به آزمایش تورم نشان داد. کاتیون  $Zr_4^+$  بار سطحی منفی را خنثی کرده و ذرات رس را تثبیت می‌کند و در آزمایشات دینامیک محیط های میکرومدل و سیلاب مغزه مصنوعی نیز در کاهش و کنترل آسیب نتایج خوبی حاصل شد. لذا این ترکیب جهت کنترل تورم در تزریق آب های هوشمند پیشنهاد می‌شود.

(۷) چنانچه مهاجرت بعد از تورم و با تأخیر باشد سبب به تله افتادن رس‌های در حال حرکت در گلوگاه‌ها و انسداد مسیر جریان و اختلال در نفوذپذیری مؤثر خواهد شد.

(۱) مهاجرت و خروج ذرات رس کائولینیت در میکرومدل باعث کاهش آسیب سازند می‌شود و برعکس رس اسمکتیت باعث افزایش آسیب سازند می‌شود. (۲) تزریق سیال‌های کنترل در زمان مناسب بسیار حائز اهمیت می‌باشد تزریق نانوسیال جهت کنترل مهاجرت در زمان مناسب اثر بهبود و استفاده از آن در زمان یا الویت نامناسب سبب رسوب رس‌ها در مسیرهای جریان و انسداد خواهد شد.

(۳) حذف سیال کنترل مهاجرت با الویت تزریق سیال کنترل تورم در ترکیب سیال تزریقی برای هر دو تراکم ۵ و ۱۰٪ مخلوط رس‌ها با اثر مکانیسم همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها در نمونه سنگ مخزن سبب ۱۰ تا ۲۰٪ کاهش آسیب شاخص سازند گردید.

(۴) کاهش تدریجی شوری آب سازند و اولویت تزریق سیال کنترلی تورم در ترکیب سیال تزریقی با اثر مکانیسم همزمان تورم و مهاجرت رس‌ها در

## مراجع

- [1]. Al-Mohammad, A. M., Al-Khaldi, M. H., & Al-Yami, I. S. (2012). Seawater injection into clastic formations: formation damage investigation using simulation and coreflood studies, In SPE International Production and Operations Conference & Exhibition, OnePetro, doi.org/10.2118/157113-MS.
- [2]. Mikhailov, N., & Chirkov, M. (2010). Formation damage kinetics and its effect on oil reservoir productivity, In SPE North Africa Technical Conference and Exhibition, SPE-128403, doi.org/10.2118/128403-MS.
- [3]. Bedrikovetsky, P. G., Nguyen, T. K., Hage, A., Ciccarelli, J. R., ab Wahab, M., Chang, G., & Furtado, C. A. (2011). Taking advantage of injectivity decline for improved recovery during waterflood with horizontal wells, Journal of Petroleum Science and Engineering, 78(2), 288-303, doi.org/10.1016/j.petrol.2011.05.020.

- [4]. Mojarad, R. S., & Settari, A. (2005, October). Multidimensional velocity-based model of formation permeability damage: validation, damage characterization, and field application, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition?, SPE-97169, doi.org/10.2118/97169-MS.
- [5]. Scott, H. E., Patey, I. T. M., & Byrne, M. T. (2007, May). Return permeability measurements—Proceed with caution, In SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, SPE-107812, doi.org/10.2118/107812-MS.
- [6]. Berry, S. L., Boles, J. L., Brannon, H. D., & Beall, B. B. (2008). Performance evaluation of ionic liquids as a clay stabilizer and shale inhibitor, In SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, SPE-112540, doi.org/10.2118/112540-MS.
- [7]. Mohan, K. K., Fogler, H. S., Vaidya, R. N., & Reed, M. G. (1993). Water sensitivity of sandstones containing swelling and non-swelling clays. In *Colloids in the aquatic environment*, 237-254, Elsevier, doi.org/10.1016/0927-.
- [8]. El-Monier IA, Nasr-El-Din HA, Harper TL, Rosen R. A. new environmentally friendly clay stabilizer. SPE Production & Operations, 30;28(02):145-53. https://doi.org/10.2118/136061-PA.
- [9]. Civan F. (2007). Reservoir formation damage-fundamental, modeling, Assessment, and Mitigation, 2nd ED., Gulf Professional Pub., Elsevier, Burlington, MA, ISBN-13:970-0-7506-7738-7, 1114.
- [10]. 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.org/10.1016/j.petrol.2018.12.082.
- [11]. 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.org/10.1016/j.petrol.2017.02.020.
- [12]. Nzerem, V., & Civan, F. (2013). Correlation of permeability for the travis peak formation, In SPE Annual Technical Conference and Exhibition?, doi.org/10.2118/166288-MS.
- [13]. Ebrahimzade, SH. (2017), A review of studies on the injection of low-salt water into carbonate reservoirs and existing challenges, (Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- [14]. Civan, F. (1994). Predictability of formation damage: an assessment study and generalized model, Final Report, US DOE Contract No. DE-AC22-90BC14658.
- [15]. Civan, F. (1997). Model for interpretation and correlation of contact angle measurements, Journal of Colloid and Interface Science, 192(2), 500-502, doi.org/10.1006/jcis.1997.4991.
- [16]. Aksu, I., Bazilevskaya, E., & Karpyn, Z. T. (2015). Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability, GeoResJ, 7, 1-13, doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.003.
- [17]. Bhui, U. K., & Desai, A. (2015). Swelling Study of Smectites (Montmorillonites): Implications during Low-Saline Water Flooding (LSWF) in Petroleum Reservoirs, In 11th Biennial International Conference & Exposition, SPG India.
- [18]. Clarke, T. (2014). Application of a novel clay stabilizer to mitigate formation damage due to clay swelling (Doctoral dissertation).
- [19]. Sameni, A., Pourafshary, P., Ghanbarzadeh, M., & Ayatollahi, S. (2015). Effect of nanoparticles on clay swelling and migration, Egyptian journal of petroleum, 24(4), 429-437, doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.10.006.
- [20]. Xuan, Y., Jiang, G., Li, Y., Yang, L., & Zhang, X. (2015). Biodegradable oligo (poly-L-lysine) as a high-performance hydration inhibitor for shale. RSC advances, 5(103), 84947-84958, doi.org/10.1039/c5ra16003k.
- [21]. Li, X., Jiang, G., Shen, X., & Li, G. (2020). Poly-L-arginine as a high-performance and biodegradable shale inhibitor in water-based drilling fluids for stabilizing wellbore. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(4), 1899-1907, doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06220.
- [22]. Quainoo, A. K., Negash, B. M., Bavoh, C. B., & Idris, A. (2021). Natural amino acids as potential swelling and dispersion inhibitors for montmorillonite-rich shale formations, Journal of Petroleum Science and Engineering, 196, 107664, doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107664.
- [23]. Razzaghi-Koolaei, F., Zargar, G., Soltani Soulgani, B., & Mehrabianfar, P. (2022). Application of a non-ionic bio-surfactant instead of chemical additives for prevention of the permeability impairment of a swelling sandstone oil reservoir, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 12(6), 1523-1539.
- [24]. Shahmohammadi, B., Chahardowli, M., & Simjoo, M. (2022). Insights into the pore-scale mechanism of low salinity water injection using a clay-coated micromodel, Journal of Petroleum Science and Engineering, 210, 110065, doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110065.
- [25]. Snosy, M. F., Abu El Ela, M., El-Banbi, A., & Sayyauh, H. (2022). Comprehensive investigation of low salinity waterflooding in carbonate reservoirs, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1-24, doi.org/10.1007/s13202-021-01330-y
- [26]. Mehdizad, A., Sedaei, 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, doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109959.

[27]. Mehdizad, A., Pourafshary, P., & Sedace, 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.org/10.1016/j.petrol.2022.110561.

[28]. Ghobadi, H., Riahi, S., & Nakhace, A. (2022). An Investigation and Determination of Different Salinity, Ion Type and pHs Effect on Fine Migration in Sandstone Reservoirs. Journal of Petroleum Research, 31(1400-6), 22-33, doi: 10.22078/pr.2021.4524.3039.