Journal of Mineral Resources Engineering, 8(4): 43-62, (2023)

Imam Khomeini International University
Vol. 8, No. 4, Winter 2023

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Comparison of Available Water Resources in terms of Formation of Mineral Deposition for Injection into a Petroleum Reservoir

Mostafavi S.A.[1], Riahi S.[2*], Mavaddat M.[3], Bigdeli A.[4]

1- Ph.D Student, Dept. of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor, Institute of Petroleum Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Ph.D, National Iranian Oil Company, Shiraz, Iran
4- Ph.D, Dept. of Earth, Energy and Environment, University of Calgary, Calgary, Canada

Received: 08 Dec. 2022 **Accepted: 26 Aug. 2023**

Abstract: Recently, water injection has been widely studied as one of the most popular enhanced/improved oil recovery methods. Most of the studies focus on low salinity and seawater injection, emphasizing the quality of the injection fluid. In addition, receiving the required quantity of injection water and high-quality injection fluid is crucial. Produced water with oil and urban wastewater can be regarded as appropriate resources for water injection projects to mitigate the environmental concerns and the cost of water treatment. This study examines several water resources suggested for injection into an oil reservoir near the Persian Gulf to find the optimal choice. The studied resources are low-salinity water, seawater (from the Persian Gulf), produced water, and urban wastewater. Injection fluid quality, compatibility with formation brine, scale formation, and usability were the primary factors considered when selecting the optimal water resource. Accordingly, geo-chemical software *OLI Scale Chem* was used for compatibility check and estimation of scale type and amount. As a result, the least amount of scale formed after urban wastewater injection, whereas seawater was the most incompatible water source. It should be emphasized that various non-technical factors, such as the climate of the region, the water transmission route and associated costs, economic conditions of the country, environmental concerns, and the priority of wastewater usage may significantly impact resource selection.

Keywords: Inorganic scales, Water compatibility, Water injection, Enhanced oil recovery, Improved oil recovery.

How to cite this article
Mostafavi, S. A., Riahi, S., Mavaddat, M., and Bigdeli A. (2023). *"Comparison of several water resources for preventing the deposition of inorganic scale during injection into a petroleum reservoir"*. Journal of Mineral Resources Engineering, 8(4): 43-62.
DOI: 10.30479/JMRE.2023.18095.1620

*Corresponding Author Email: *riahi@ut.ac.ir*

COPYRIGHTS
©2023 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCTION

The best EOR/IOR water resource selection to inject into the reservoir has always been challenging in the petroleum industry. This challenge refers to injectivity maintenance, which depends on the availability of injection resources in the desired amount and quality. Seawater and low salinity are conventional injection water resources in different water resources that have been widely investigated in the last decades. However, based on environmental issues and the cost of treatment, urban wastewater and produced water could be other candidates to inject. The variety and availability of these water resources are discussed below:

- Sea water (SW): 72% of the ground is covered by water, of which 97% is saline seawater. An enormous seawater source makes it the first candidate for offshore and coastal field's water injection, even though it is practically problematic because of its high sulphate content.
- Low salinity water (LSW): Water with salinity lower than 4000 mg/l is considered low salinity water. It increases the recovery factor by wettability alteration, microscopic displacement, and residual oil saturation reduction. Recent studies show that lowering salinity is not the only way to enhance oil recovery; increasing some ion contents also helps wettability alteration. LSW is usually made by desalination and treatment of saline water- which costs too much- or dilution of high salinity waters by valuable fresh water. The high cost of low salinity water supply deducts the attractiveness of this method.
- Urban wastewater (UWW): Disposed water from cities, industries, and agriculture is wastewater. The quality of wastewater, which may contain suspended solids (between 350-1200 mg/l), dissolved minerals and components (250-1000 mg/l), micro-organisms, nutrients (e.g., nitrogen and phosphorus), heavy metals, and microscopic pollutions -depending on its source- is varied [1]. High-contaminated wastewaters are very problematic and may cause severe harm to the environment and public health. Due to low mineral and dissolved solid content (less than 4000 mg/l), this vast water source can be classified as low salinity waters with low gathering and treatment costs compared to LSW. Besides, according to global data, wastewater volume is 20 times more than the produced water, and therefore, it is more accessible, especially for reservoirs near the cities.
- Produced water (PW): Many wells produce water as a by-product during oil and gas production. According to the records, the water-oil ratio was almost 3 in 2018. In other words, for 98 million barrels of oil production, 300 million barrels of water were produced. This amount is expected to be increased up to 12 barrels of water per barrel of produced oil by 2025 [2]the characteristic, and the production of produced water are considered to facilitate the understanding of its physics, chemistry, affecting factors, and corresponding impacts. The major produced water management methods, including produced water minimization, produced water reuse/recycling, and produced water disposal, as well as legal frameworks, policies, and regulations related to produced water from onshore and offshore oil and gas fields, are described. Commonly applied produced water treatment technologies in the oil and gas industry, corresponding technical details, and advantages and disadvantages are evaluated. Produced water reinjection (PWRI. It should be noted that the produced water directly relates to the production years of the reservoir. Therefore, a high-produced water-oil ratio is not expected in the green fields and those in their early production stages.
- In addition to the availability of water resources, water quality is crucial, too. Scale generation, flow assurance, formation damage, and water treatment cost are some operational challenges of injection water quality. The scale formation in porous media is the most significant factor that limits an injection project.
- Scaling is the deposition of inorganic salts due to the supersaturation of minerals in water, which may close the fluid channels and reduce the water injectivity. Scale formation depends on thermodynamic conditions, such as pressure, temperature, pH, and changes in water composition. Accordingly, the water may become supersaturated at reservoir conditions in case of incompatible waters, and the scales start to precipitate [3]. Therefore, compatibility tests and simulations are recommended to check the probability of scaling. This study uses a geochemical software as a fast and reliable tool to investigate fluid compatibility by setting their properties and defining the desired conditions [4]. The software checks the stability of equilibrium and fluid saturation conditions of the constituent ions. It offers a vast database of chemical reactions that could take place at reservoir or near-surface conditions.

METHODS

This study investigates water injection into an oil reservoir in the southern region of Iran. According to the geographical position of the field, in the vicinity of the Persian Gulf and the access to the urban wastewater from the nearby city, four different candidates are available as injection fluid: produced water, Persian Gulf water, low salinity water (10 times diluted Persian Gulf water), and urban wastewater. The compositions of injection water candidates and the formation water are summarized in Table 1.

Table 1. Composition of injection water candidates and the formation water

Property/water sample	Unit	Produced water (PW)	Persian Gulf water (PGW)	Urban wastewater (UWW)	Low-salinity water (LSW)	Formation water (FW)
pH	_	5.3	8.04	7.22	7.88	6.1
NH_3-N	mg/L	Na	Na	24.7	Na	Na
HCO_3^-	mg/L HCO_3^-	138	158	Na*	15.8	348
SO_4^{2-}	mg/L SO_4^{2-}	203	3236	235.5	323.6	465
Cl^-	mg/L Cl^-	125000	21974	387	2197.4	131000
NO_3	mg/L	Na	Na	2	Na	Na
P	mg/L	Na	Na	14	Na	Na
SiO_2	mg/L	Na	Na	26	Na	Na
Ca^{2+}	mg/L CaCO3	11400	391	126	39.1	7000
Mg^{2+}	mg/L CaCO3	1900	1516	36	151.6	1800
Na^+	ppm	61000	11985	88.78	1198.5	70000
K^+	ppm	850	464	25.2	46.4	980
Sr^{2+}	ppm	1030	0	NA	0	400
TDS	mg/L	201553	39750	1226	3975	212000

*The bicarbonate amount was not reported in the wastewater, butestimated with the software

The compatibility tests were conducted using the geochemical simulator *Oli ScaleChem* in nine ratios to establish different mixing ratios of reservoir and injection fluids (0.1 to 0.9 with 0.1 steps) at reservoir temperature and pressure (205 F and 3700 psi).

FINDINGS AND ARGUMENT

Based on the availability of injection fluid amounts, candidates were nominated with two assumptions. In the first assumption, the injection fluid is reachable satisfactorily, so the pure injection fluid candidates are simulated.

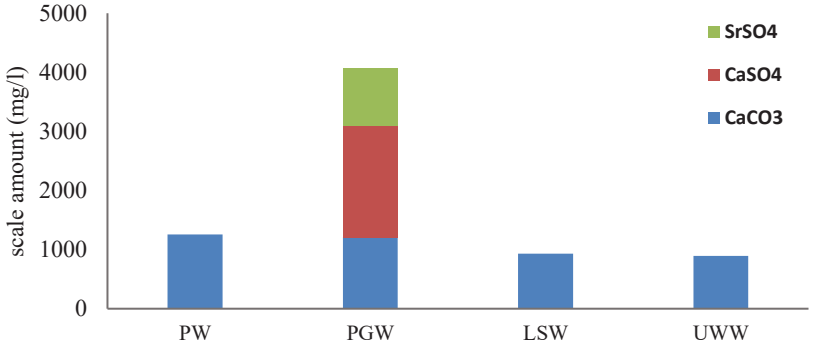


Figure 1. Total scale generation of injection candidates with formation water in different ratios

Figure 1 shows the total scale generation of when the pure injection fluid candidates are mixed with formation water in different ratios. Simulation results demonstrate comparable high compatibility of low salinity water and urban wastewater and incompatibility of Persian Gulf water with formation water. The high scale prediction of PGW mixture with formation water is due to the high concentration of sulfate ion in PGW and its sensitivity to highly concentrated divalent cations, like calcium and strontium, in formation water.

In the second assumption, when the water resource is not reachable at the desired volume, mixing of resources is the replacement strategy. This study investigated an equal ratio of coupled injection candidates (0.5-0.5 ratio) to estimate the scale precipitation. Figure 2 shows the total scale generation of coupled injection candidates with formation water in different proportions.

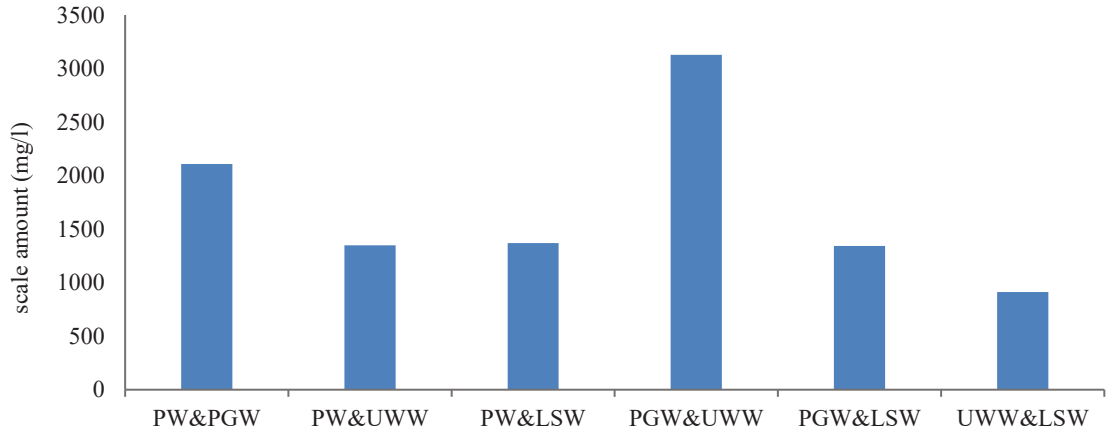


Figure 2. Total scale generation of coupled injection candidates with formation water in different ratios

Results show that mixed injection candidates containing Persian Gulf water (PGW) are the most incompatible injection waters with formation brine.

CONCLUSIONS

One of the crucial challenges across water injection projects is injectivity maintenance, specifically the compatibility of the injection water and the formation brine. Urban wastewater and low-salinity water are the most common, and Persian Gulf water and its mixture with other injection candidates are the least compatible waters. Although the produced water scale content was 50 times more than low-salinity water and 200 times more than urban wastewater, its scale generation is only about 30% more than urban wastewater or low-salinity water and formation water mixtures. This makes the produced water an attractive injection candidate based on operational and environmental issues.

REFERENCES

[1] Scheierling, S. M., Bartone, C. R., Mara, D. D., and Drechsel, P. (2011). *"Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture"*. Water International, 36(4): 420-440.

[2] Liang, Y., Ning, Y., Liao, L., and Yuan, B. (2018). *"Special Focus on Produced Water in Oil and Gas Fields: Origin, Management, and Reinjection Practice"*. In book: Formation Damage During Improved Oil Recovery, 515-586.

[3] Kumar, S., Naiya, T. K., and Kumar, T. (2018). *"Developments in oilfield scale handling towards green technology-A review"*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 169: 428-444.

[4] Mostafavi, S. A., Riahi, S., Mavaddat, M., and Bigdeli, A. (2021). *"Best Practices-design for Scale Reduction During Produced Water Reinjection (PWRI)"*. In Conference: 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, 1-5.

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

دوره هشتم، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۲، صفحه ٤۷ تا ٦۲
Vol. 8, No. 4, Winter 2023, pp. 47-62

علمی-پژوهشی

مقایسه منابع آبی موجود ازنظر تشکیل رسوبات معدنی به‌منظور تزریق در یک میدان نفتی

سید علیرضا مصطفوی[۱]، سیاوش ریاحی[۲*]، مرضیه مودت[۳]، علیرضا بیگدلی[۴]

۱- دانشجو دکتری تخصصی، گروه مهندسی نفت، دانشگاه تهران (پردیس بین الملل)، کیش
۲- استاد، انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران
۳- دکتری تخصصی، گروه مهندسی مخازن، شرکت ملی نفت ایران، شیراز
۴- دکتری تخصصی، گروه زمین، انرژی و محیط زیست، دانشگاه کلگری، کلگری، کانادا

دریافت: ۱٤۰۱/۰۹/۱۷ پذیرش: ۱٤۰۲/۰٦/۰٤

چکیده

در بین روش‌های مختلف بهبود تولید و ازدیاد برداشت نفت، تزریق آب از متداول‌ترین روش‌ها است که اخیرا به طور گسترده‌ای مطالعه شده است. در این مطالعات اثر کیفیت سیال تزریقی بر کاهش تراوایی مخزن و تاثیر تزریق آب بر بهبود تولید مورد بررسی قرار گرفته است. حال آنکه علاوه بر کیفیت مناسب، فراهم کردن آب به مقدار لازم نیز اهمیت بالایی دارد. در این مطالعه، منابع مختلف آب موجود برای پیشنهاد منبع بهینه برای تزریق در یک میدان نفتی نزدیک به خلیج‌فارس بررسی شد. این منابع شامل آب کم‌شور، آب دریا، پساب واحد بهره‌برداری و فاضلاب شهری بود که در این بین آب تولیدی همراه با نفت (پساب میدان‌های نفتی) و پساب‌های شهری در راستای رفع چالش‌های محیط زیستی و کاهش هزینه بالای تصفیه نیز می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای تزریق در میدان‌ها باشند. منابع یاد شده از منظر کیفیت سیال، سازگاری با آب سازندی، تشکیل رسوبات معدنی و امکان استفاده از آن‌ها بررسی شد. در این پژوهش برای تعیین سازگاری سیالات و پیش‌بینی جنس رسوبات احتمالی از نرم‌افزار ژئوشیمیایی ***OLIScalChem*** استفاده شده است. در نتیجه این بررسی کمترین مقدار رسوبات ناشی از ترکیب آب سازندی با فاضلاب شهری و بیشترین مقدار مربوط به آب خلیج‌فارس است. توجه به این نکته ضروری است که برای انتخاب سیال تزریقی عوامل غیرفنی متعددی مانند شرایط اقلیمی، مسیر انتقال آب و هزینه‌های مربوطه، توانمندی اقتصادی کشور، مسایل محیط زیستی و اولویت استفاده از منابع آب تاثیر بسزایی دارند.

کلمات کلیدی

رسوبات معدنی، سازگاری آب‌ها، تزریق آب، ازدیاد برداشت نفت، بهبود تولید نفت.

استناد به این مقاله

مصطفوی، س. ع. ر.، ریاحی، س.، مودت، م.، بیگدلی، ع. ر.؛ ۱۴۰۲؛ "**مقایسه منابع آبی موجود ازنظر تشکیل رسوبات معدنی به‌منظور تزریق در یک میدان نفتی**". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۴، ص ۶۲-۴۳.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18095.1620

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: riahi@ut.ac.ir

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

باوجود تلاش دولت‌ها در جایگزینی سوخت‌های هیدروکربنی با سایر منابع انرژی، نفت همچنان به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی شناخته می‌شود. تولید از میادین نفتی در سه مرحله تولید اولیه (تخلیه طبیعی)، تولید ثانویه (بهبود تولید) و تولید ثالثیه (ازدیاد برداشت) انجام می‌شود. بر اساس اطلاعات موجود از میدان‌های مختلف سراسر جهان، در تولید به روش تخلیه طبیعی[1] تنها ۵ تا ۲۵ درصد از نفت درجا قابل تولید است. به همین خاطر، برای کاهش اشباع نفت باقی‌مانده مخزن، به فرآیندهای بهبود تولید و یا ازدیاد برداشت نفت نیاز است. پس از تحلیل انرژی مخزن در دوره تخلیه طبیعی، روش‌های بهبود تولید[2] با هدف تثبیت فشار[3] مخزن استفاده می‌شوند. یکی از متداول‌ترین این روش‌ها، تزریق آب به آبده مخزن است. برای استمرار تولید، روش‌های ازدیاد برداشت نفت[4] انجام می‌شوند. در بین روش‌های مختلف ازدیاد برداشت نیز تزریق آب با افزایش بیش از ۴۰ درصد ضریب بازیافت از موثرترین روش‌هاست[۱]. در مراحل ثانویه و ثالثیه تزریق آب چه به عنوان عامل تثبیت فشار یا به عنوان جاروب‌کننده نفت باقی‌مانده در مخزن، به افزایش تولید نفت کمک می‌کند؛ به طوری که طبق منابع تنها در سال ۲۰۱۹ میلادی ۴۱ میدان در ناحیه فلات قاره نروژ از روش‌های مختلف تزریق آب بهره گرفته‌اند[۲]. این نشان‌دهنده اهمیت تزریق آب در دانش روز و پروژه‌های عملیاتی مهندسی نفت است. حال آنکه با توجه به حجم بالای آب مورد نیاز برای تزریق، مهندسین مخزن در این پروژه‌ها همواره با چالش انتخاب منبع مناسب برای تامین آب مورد نیاز مواجه‌اند. همچنین انتخاب برخی منابع آب به دلیل دوری از میادین نفتی، شرایط اقلیمی منطقه و توپوگرافی مسیر انتقال آب از لحاظ اقتصادی و عملیاتی توجیه‌پذیر نیست.

۱-۱- منابع آب

از جمله منابع آبی مختلف برای تزریق به مخزن؛ آب‌های کم‌شور، پساب‌های جمع‌آوری شده سایر صنایع مانند فاضلاب شهری، آب دریا و اقیانوس‌ها و پساب‌های تولیدی میدان‌ها هستند. تعیین منابع آب قابل استفاده برای تزریق، تابع عوامل متعددی از جمله شرایط آب و هوایی منطقه، حجم منابع در دسترس، موقعیت جغرافیایی، شرایط اقتصادی کشور و قوانین و مقررات محیط زیستی است. مسایل محیط زیستی (پیش‌تصفیه لازم و میزان نفت همراه)، سازگاری آب تزریقی با آب سازندی، تزریق‌پذیری سازند هدف، اقتصادی و دسترسی به منابع و احتمال موفقیت عملیات تزریق مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در انتخاب منبع آب مطلوب برای تزریق‌اند.

۱-۱-۱- آب‌های کم‌شور

اصطلاح آب کم‌شور در صنعت نفت به آب‌های با شوری کمتر از ۴۰۰۰ (ppm) اطلاق می‌گردد[۴،۳]. اثر تزریق آب کم‌شور[5] در بهبود تولید نفت اولین بار در سال ۱۹۶۷ میلادی بر روی ماسه‌سنگ‌های رس‌دار توسط برنارد مشاهده شد[۵]. در دو دهه اخیر تزریق آب کم‌شور با هدف بهبود تولید و ازدیاد برداشت به طور گسترده‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در مخازن ماسه‌سنگی با توجه به ماهیت ترشوندگی سنگ، تزریق آب با هدف بهبود بازده جاروبی[6] انجام می‌شود در حالی که در سنگ‌های کربناته فرآیند موجود به مراتب پیچیده‌تر است. تزریق آب باعث فعال شدن مکانیسم‌های سنگ- سیال و سیال- سیال شده و تعادل فازهای آب- نفت- سنگ را تغییر می‌دهد. تشکیل تعادل فازی جدید بین این سه فاز موجب تولید نفت و کاهش اشباع نفت باقی‌مانده در مخزن می‌شود[۶]. در این سنگ‌ها با توجه به خاصیت نفت دوست سطح سنگ، سیال تزریقی علاوه بر بازده جاروبی باید خواص ترشوندگی سنگ را نیز بهبود بخشد[۹-۷]. مطالعات متعددی در سنگ‌های کربناته نشان‌دهنده اثر مثبت تزریق آب (در بازه وسیعی از شوری زیر ۱۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ قدم) بر افزایش ضریب بازیافت است[۱۸-۱۰]. مطالعات دقیق‌تر نشان می‌دهد کاهش شوری به تنهایی عامل ازدیاد برداشت نیست، بلکه اصلاح مقادیر یون‌های موجود در سیال تزریقی است که موجب بهبود تولید می‌شود[۲۰،۱۹]. به عنوان مثال تحقیقات گسترده‌ای روی اثر وجود یون‌های چندظرفیتی سولفات، کلسیم و منیزیم در بهبود عملکرد تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربناته و ازدیاد برداشت انجام شده است [۲۱-۱۹]. منابع آب کم‌شور معمولا فاقد نفت همراه‌اند و به فرآیندهای پیش‌تصفیه قبل از تزریق نیاز ندارند. از طرفی به دلیل پایین بودن مقادیر نمک محلول در این دسته از آب‌ها، مشکلات مربوط به سازگاری سیال تزریقی در آن‌ها محدود است. مهم‌ترین عوامل محدودکننده در پروژه‌های تزریق آب کم‌شور مسایل محیط زیستی و کمبود این منابع آبی هستند. هزینه‌های بالای شیرین‌سازی نیز از جذابیت این روش می‌کاهد.

۱-۱-۲- آب شور (دریاها و اقیانوس‌ها)

حدود ۷۲ درصد سطح کره زمین از آب پوشیده شده است که ۹۷ درصد آن آب شور است. این آمار نشان‌دهنده دسترسی نسبتا مناسب به آب دریاها و اقیانوس‌ها برای استفاده ازدیاد برداشتی و تزریق در میدان‌ها است؛ اما نگرانی اصلی در تزریق آب دریاها پیرامون جامدات همراه و ترکیبات آن، به طور مشخص سولفات و بی‌کربنات است[۲۲]. وجود جامدات معلق در نمونه آب تزریقی موجب افزایش هزینه‌های تزریق و در مواردی غیراقتصادی شدن آن می‌شود. از طرفی ترکیب آب دریا که معمولا مقادیر زیادی سولفات در آن وجود دارد، با نمونه آب سازندی که با توجه به محیط رسوبی معمولا مقادیر بالایی از کاتیون‌های دو ظرفیتی مثل کلسیم، استرانسیم، باریم و منیزیم دارد، موجب تشکیل رسوب کلسیم سولفات می‌شود[۲۵-۲۳]. رسوبات معدنی با رسوب در محیط متخلخل کاهش تراوایی، افزایش افت فشار ته چاهی، تشکیل شکاف ناخواسته در مخزن، فرسودگی پمپ‌های تزریق و نظایر آنها هزینه‌های عملیات را به طور غیرمستقیم افزایش می‌دهند. اهمیت تشکیل رسوبات معدنی تا حدی بالاست که مشکلات ناشی از آن‌ها هنگام تزریق در مواردی انتخاب سیال تزریقی را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد[۲۷،۲۶]، بنابراین فرآیند پیش‌تصفیه با واحدهای نمک‌زدایی (مثل اسمزی معکوس و فلش چندمرحله‌ای) در پروژه‌های تزریق آب دریا اهمیت بالایی دارد و هزینه‌های عملیاتی فرآیند تزریق آب شور را افزایش می‌دهد.

۱-۱-۳- پساب‌های شهری

سومین منبع آب تزریقی پساب‌های شهری هستند. استفاده مجدد از پساب‌های شهری در دهه اخیر به دلیل مسایل سلامت فردی و محیط زیستی مورد توجه سازمان بهداشت جهانی قرار گرفته است[۲۸]. آسانو و همکاران آب استفاده شده و خروجی از خانه‌ها، مشاغل، صنایع، شهرها و کشاورزی را به عنوان پساب معرفی کردند[۲۹]. پساب را می‌توان ترکیب پیچیده‌ای متشکل از مقدار قابل توجهی جامدات (بین ۳۵۰-۱۲۰۰ میلی‌گرم در هر لیتر)، مواد محلول و همراه (مواد شیمیایی نیازمند اکسیژن بین ۲۵۰-۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، میکرواورگانیزم‌ها (تا ۱۰۹ عدد در هر میلی‌لیتر)، مواد مغذی، فلزات سنگین و آلاینده‌های میکروسکوپی در نظر گرفت[۳۰].

نیاز به آب و متقابلا رفتار متناسب با پساب با توجه به شرایط اقتصادی، توسعه شهری و فناوری‌های مرتبط و شرایط اقلیمی متغیر است[۳۱]. از طرفی استفاده از پساب‌های شهری به صورت روزافزون در حال افزایش است. بر اساس اطلاعات موجود میزان استفاده از پساب‌ها در کشورهای اروپایی، چین و ایالات‌متحده سالانه ۱۰ الی ۲۹ درصد و در استرالیا ۴۱ درصد افزایش می‌یابد[۶]. سالانه در سراسر جهان ۳۳۰ کیلومتر مکعب پساب تولید می‌شود که طبق گزارش‌ها به طور کلی حدود ۶۰ درصد پساب‌های تولید شده جمع‌آوری و تصفیه می‌شوند[۳۳]. این در حالی است که طبق اطلاعات موجود تصفیه پساب‌ها در برخی کشورها مانند انگلستان، فرانسه و ایتالیا بالای ۹۹ درصد است. در برخی دیگر مثل یمن و لبنان نزدیک به صفر است[۳۳]. اطلاعات موجود از کشورهای شورای همکاری خلیج‌فارس در سال ۲۰۲۰ میلادی نشان‌دهنده تولید سالانه ۴ کیلومتر مکعب پساب است که از این مقدار ۷۳ درصد تصفیه می‌شود[۳۴].

بر اساس گزارش‌های موجود سالانه ۳٫۵۴۸ کیلومتر مکعب پساب در ایران تولید می‌شود که از این مقدار ۰٫۸۲۱ کیلومتر مکعب تصفیه و تنها مقدار ۰٫۳۲۸ کیلومتر مکعب یعنی کمتر از ۱۰ درصد آن مجددا استفاده می‌شود[۳۳]. با توجه به درصد پایین تصفیه پساب در ایران (حدود ۲۳ درصد) بیش از ۷۵ درصد پساب‌های تولیدی رهاسازی می‌شود و مقدار نامعلومی از آن به صورت مستقیم و غیرمستقیم در حال استفاده است. استفاده از پساب‌ها به صورت غیررسمی به عنوان آب مورد نیاز کشاورزی، بررسی پتانسیل تصفیه پساب و استفاده مجدد از آن را دشوار می‌سازد.

با وجود اینکه پساب‌های شهری، نفت همراه قابل‌توجهی ندارند؛ اما به دلیل وجود مقادیر قابل ملاحظه جامدات همراه این پساب‌ها، فرآیند پیش‌تصفیه قبل از تزریق به مخزن با هدف کاهش مشکلات تزریق‌پذیری الزامی است. از طرفی با توجه به اینکه استفاده از پساب شهری برای تزریق به مخزن تاکنون مطالعه نشده است، سازگاری سیال تزریقی با سیال سازندی و عملکرد آن در راستای بهبود تولید و ازدیاد برداشت نیازمند بررسی‌های دقیق و تکمیلی است.

۱-۱-۴- پساب‌های صنعت نفت

در اثر تولید از مخازن و حرکت سطح تماس آب-نفت/گاز در میدان‌ها در گذر زمان، حجم آب تولیدی به تدریج افزایش می‌یابد. در مقیاس جهانی، بر اساس اطلاعات موجود مقدار

میانگین آب تولیدی به ازای هر بشکه نفت در سال ۲۰۱۷ میلادی حدود ۳ بشکه گزارش شده است[۲۵]. به عبارت دیگر، در ازای تولید ۹۸ میلیون بشکه نفت در روز در سال مذکور ۳۰۰ میلیون بشکه آب نیز تولید شده است. این مقدار معادل ۵ درصد پساب شهری تولید شده در جهان است. پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۵ میلادی مقدار پساب تولیدی میدان‌ها تا ۱۲ بشکه آب به ازای تولید هر بشکه نفت نیز افزایش خواهد یافت[۳۵]. پساب‌های تولیدی به دلیل ترکیبات و نفت همراه سمی هستند. به طوری که مصرف این آب‌ها توسط جانداران باعث مسمومیت‌های شدید و حتی آلوده شدن خاک به وسیله آن‌ها موجب عدم امکان پرورش گیاهان برای چندین سال می‌شود. سمی بودن پساب‌ها از یک‌سو و افزایش نسبت آب به نفت و آب به گاز تولیدی از سوی دیگر، موجب بروز مشکلات متعدد اقتصادی و عملیاتی و مهم‌تر از همه بحران‌های محیط زیستی می‌شود[۳۷،۳۶].

برای رفع چالش پساب تولیدی، روش‌هایی مانند رهاسازی در طبیعت، نگهداری در حوضچه‌های تبخیر، نمک‌زدایی/ تمیزسازی[۷] و تزریق مجدد استفاده می‌شوند. انتخاب روش مناسب تصفیه به عواملی همچون محدودیت‌های جغرافیایی، هزینه‌های اقتصادی و قوانین محیط زیستی منطقه بستگی دارد. با توجه به پیچیدگی و هزینه‌های بسیار بالای روش‌های پاک‌سازی پساب، به طور کلی در میدان‌های فراساحلی[۸]، در اکثر موارد، پس از اعمال برخی تغییرات که به کاهش مقدار نفت و گاز همراه آب به مقادیری کمتر از ۳۰-۴۰ میلی‌گرم بر لیتر منجر می‌شوند[۳۸]، پساب‌های تولیدی به دریا ریخته می‌شوند. طبق گزارش‌های موجود مقدار پساب رها شده این صنعت در کشور نروژ در سال ۱۹۹۳ معادل ۲۶ میلیون مترمکعب در سال بوده که تا سال ۲۰۰۰ میلادی به رقمی معادل ۱۲۰ میلیون مترمکعب رسیده است[۳۹]. در میدان‌های خشکی[۹] پساب تولیدی برای دفع، تثبیت فشار و یا ازدیاد برداشت به آبده و یا لایه نفتی در مخزن بازگردانده می‌شوند[۴۰] که این روش به عنوان اقتصادی‌ترین و محیط زیستی‌ترین روش نیز شناخته شده است.[۴۱] با توجه به مخاطرات آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی با پساب‌های تزریقی، تزریق به لایه‌های عمیق‌تر و متخلخل انجام می‌شود. کاهش مقدار پساب در سطح زمین، کاهش مصرف آب شیرین در صنعت، رعایت معیارها و قوانین مدیریت پسماند، کاهش هزینه‌ها و صرفه اقتصادی در مقایسه با مصرف آب‌های سطحی مزایایی تزریق مجدد پساب هستند. بهترین راهکار برای دفع پساب‌های نفتی حفر چاه و یا استفاده از چاه‌های متروکه و تزریق پساب در سازندهای مخزنی و یا آبده است. انتخاب استراتژی تزریق (تزریق در مخزن یا آبده) نیازمند انجام بررسی‌های دقیق‌تر است که سازگاری سیالات (سیال تزریقی و سیال آبده) بخش جدانشدنی این بررسی‌ها است. جدول ۱ به طور خلاصه به بررسی اجمالی پارامترهای مهم هر یک از منابع آبی برای تزریق می‌پردازد[۷-۳].

۱-۲- تزریق‌پذیری و نقش رسوبات معدنی

مهم‌ترین چالش تزریق آب با هدف تولید ثانویه و ازدیاد برداشت پایداری تزریق است. تزریق پایدار می‌تواند از دو دیدگاه تامین حجم و کیفیت سیال بررسی شود. به عبارتی تزریق پایدار وابسته به تامین آب باکیفیت مناسب در حجم لازم است. عامل حجم سیال تزریقی خود وابسته به عوامل متعددی از جمله استراتژی تزریق، ابعاد مخزن، کیفیت مخزن، شرایط عملیاتی تزریق مانند تعداد چاه‌ها، قطر حفره، لایه تکمیل و نظایر آنها است. از طرفی سیال تزریقی باید کیفیت مطلوب داشته باشد. به طور کلی وجود هرگونه ناخالصی در آب موجب کاهش کیفیت آن می‌شود. این ناخالصی‌ها معمولا از جنس مواد معدنی محلول مانند کلسیم، منیزیم، سولفات و نظایر آنها [۴۴]، جامدات معلق، فلزات سنگین که معمولا در پساب‌های صنعتی و تجاری هستند، مواد آلی مصرف‌کننده اکسیژن، مواد مغذی[۱۰] [۴۵]، مواد آلی نسوز[۱۱] و پاتوژن‌ها[۱۲] هستند. ناخالصی‌های موجود در منابع مختلف آبی نیز با توجه به فرآیندی که آب در مسیر تبدیل شدن به پساب طی کرده متفاوت هستند. در این بین مهم‌ترین اجزای پساب در راستای تزریق به مخزن جامدات معلق، فلزات سنگین و مواد معدنی محلول هستند[۴۶]. دلیل اهمیت این اجزا پتانسیل بالقوه آن‌ها در تشکیل رسوبات، کاهش تخلخل و تراوایی مخزن و در نتیجه کاهش تزریق‌پذیری در مخزن است. در این بین، جامدات معلق را می‌توان با توجه به مقدار، اندازه، چگونگی توزیع ذرات و چگونگی توزیع اندازه حفرات سنگ به راحتی با روش‌های مختلف جداسازی در مرحله پیش‌تصفیه آب به طور کامل حذف کرد، اما حتی با فرض پیش‌تصفیه سیال تزریقی، تشکیل رسوبات معدنی به واسطه وجود مواد معدنی و فلزات سنگین محلول در سیالات به عنوان پرچالش‌ترین عامل کاهش تزریق‌پذیری شناخته می‌شود.

جدول ۱: بررسی کلی منابع آبی

پارامتر/منبع	آب کم شور	پساب شهری	آب دریا	پساب میدان‌ها
پیش‌تصفیه	نیاز ندارد.	نیازمند فرآیندهای تصفیه برای جداسازی جامدات معلق	در صورت استفاده از واحدهای نمک‌زدایی مانند اسمزی معکوس (RO) و فلش چندمرحله‌ای (MSF) تصفیه دیگری نیاز ندارد.	نیازمند تصفیه گسترده برای جداسازی نفت آزاد و جامدات معلق است (سیلیکا، اکسیدهای آهن، سولفید آهن و رسوبات سولفاته و کربناته).
نفت همراه	ندارد.	ندارد (ناچیز با توجه به مصارف بالادست).	ندارد.	می‌بایست به کمتر از ۴۲ میلی‌گرم بر لیتر برسد (بر اساس محاسبات سرانگشتی به صورت دقیق برای مورد بررسی نیازمند انجام آزمایش‌ها است).
سازگاری	مشکلات محدود/ بررسی‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی لازم است (با توجه به معدود نمک‌های موجود).	بررسی‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی لازم است (با توجه به ترکیب پساب).	مشکلات اصلی مربوط به مقادیر یون سولفات است.	نیازمند انجام بررسی‌های دقیق و کامل شبیه‌سازی/آزمایشگاهی است.
محیط‌زیست	تحت تاثیر شرایط اقلیمی و امکان تامین آب شیرین است (با توجه به کمبود منابع آب شیرین پیشنهاد نمی‌شود).	تحت تاثیر شرایط اقلیمی (استفاده‌های کشاورزی، دام‌پروری، آبیاری شهری و نظایر آنها اولویت‌دارند) است.	استفاده از پساب خروجی واحدهای نمک‌زدایی مانند اسمزی معکوس (RO) و فلش چندمرحله‌ای (MSF) مشکلات محیط زیستی متعددی را حل می‌کند.	در میدان‌ها خشکی تزریق به لایه‌های عمیق زمین‌شناسی (با استفاده از چاه‌های تزریق پساب یا چاه‌های متروکه نفتی) پس از انجام فرآیند تصفیه
هزینه	هزینه بسیار بالا (به صورت مستقیم و غیرمستقیم)	هزینه بالا (به صورت غیرمستقیم)	هزینه‌ها تحت تاثیر پارامترهای مختلف واحد سولفات زدایی (مانند ابعاد واحد، بازده واحد و نظایر آنها) است.	هزینه آماده‌سازی سیال تزریقی به صورت سرانگشتی بین ۶ تا ۱۸ برابر واحد سولفات‌زدایی آب دریا است.
تزریق پذیری	بالا (مشکلات کم تخریب سازند)	مناسب (مشکلات کم تخریب سازند)	قابل‌قبول (ریسک تشکیل رسوبات سولفاته و تخریب سازند)	حتی با جداسازی مقادیر زیادی از نفت همراه، تخریب سازند بسیار بیشتر از تزریق آب دریا و سایر گزینه‌ها است.
دسترسی به منابع (مقدار موردنیاز)	کم (کلا ۳ درصد از منابع آب زمین آب شیرین است. شرایط برای نواحی خشک و نیمه‌خشک بحرانی‌تر است)	وابسته به مقدار جمع‌آوری، تصفیه و مصارف (اعم از مستقیم و غیرمستقیم) است.	به موقعیت جغرافیایی مخزن مورد بررسی بستگی دارد (بسیار زیاد در صورت نزدیک بودن به آب‌های آزاد).	وابسته به حجم آب تولیدی میدان و میدان‌ها مجاور است (پیش‌بینی: به طور میانگین تا سال ۲۰۲۵ به ازای هر بشکه نفت ۱۲ بشکه آب تولید خواهد شد.).
احتمال موفقیت (بهبود تولید ازدیاد برداشت)	بالا بر اساس آزمایش‌ها و مشاهدات عملیاتی بین چند درصد تا چند ده درصد ازدیاد برداشت به همراه داشته است (وابسته به پارامترهای متعدد مثل جنس سازند، ترکیب سیال تزریقی، پایداری تزریق‌پذیری، فعال شدن مکانیزم‌ها و نظایر آنها).	نیاز به بررسی دارد (با توجه به نزدیک بودن ترکیب سیال به آب کم‌شور احتمال موفقیت بالا است.).	وابسته به ترکیبات آب دریا و سیال درجا مخزن می‌تواند متغیر باشد (نیازمند انجام آزمایش‌ها تکمیلی).	وابسته به ترکیبات پساب تزریقی و آب سازندی متغیر است (نیازمند انجام آزمایش‌ها کامل).

رسوبات معدنی جامداتی‌اند که در اثر فوق اشباع شدن سیال نسبت به ماده محلول تشکیل و ته‌نشین می‌شوند. فوق اشباع شدن در اثر تغییرات شرایط ترمودینامیکی مانند دما، فشار و یا pH و یا ترکیب شدن آب‌های ناسازگار رخ می‌دهد[۴۷]. جامدات معدنی در تمامی مراحل تولید/تزریق اهم از محیط متخلخل، رشته تکمیلی چاه، ادوات سر چاهی و خطوط لوله و تاسیسات سطح‌الارضی و فراورشی امکان تشکیل و رسوب‌گذاری دارند. تشکیل این رسوبات موجب کاهش راندمان ادوات، افزایش هزینه‌ها، کاهش و حتی توقف تولید می‌شود. در این بین متداول‌ترین رسوبات معدنی در صنعت نفت کلسیم کربنات ($CaCO_3$)، استرانسیم سولفات ($SrSO_4$)، باریم سولفات ($BrSO_4$) و هالیت ($NaCl$) هستند [۴۹،۴۸]. به طور کلی رسوبات کربناته در اثر افزایش دما افزایش و با افزایش فشار کاهش می‌یابند. همچنین افزایش pH موجب افزایش احتمال تشکیل این نوع رسوبات می‌شود. رفع رسوبات کربناته با کاهش pH سیستم از طریق تزریق اسید امکان‌پذیر است. در مورد رسوبات سولفاته نیز تشکیل آن‌ها بیشتر در اثر ترکیب آب‌های ناسازگار رخ می‌دهد. به عنوان مثال در اثر ترکیب آب دریا که مقادیر بالایی سولفات دارد، با آب سازندی که در آن یون‌های استرانسیم و باریم بالایی باشد ترکیب و رسوبات سولفاته تشکیل شوند. این رسوبات با اسیدکاری برطرف نمی‌شوند و باید از تشکیل آن‌ها از طریق حذف یون‌های مشکل‌ساز و یا استفاده از بازدارنده‌ها پیشگیری کرد. در این بین هالیت به اندازه رسوبات کربناته و سولفاته مشکل‌ساز نیست و این رسوب در آب کم‌شور به راحتی انحلال‌پذیر است[۵۱-۴۹].

۲- مواد و روش‌ها

میدان مورد بررسی در چند کیلومتری یکی از شهرهای ساحلی جنوب کشور قرار دارد. جنس سنگ مخزن کربناته و ترکیبی از دولومیت و سنگ آهک است. این میدان پس از چندین سال تولید در دوره کاهش تولید قرار گرفته و با توجه به بالا آمدن سطح تماس نفت- آب و رسیدن به محل تکمیل چاه‌ها، مقدار اشباع آب تولیدی آن نیز افزایش یافته است، بنابراین برای تثبیت فشار مخزن و ازدیاد برداشت از نفت، پروژه تزریق آب برای این میدان تعریف شده است. از جمله منابع آبی قابل تامین میدان می‌توان به آب خلیج‌فارس، پساب تولیدی در واحد بهره‌برداری (ترکیبی از پساب خود میدان و میدان‌ها مجاور آن) و فاضلاب شهری جمع‌آوری شده، اشاره کرد. علاوه بر منابع یاد شده تزریق آب کم‌شور نیز به دلیل مزایای آن در فرآیند ازدیاد برداشت بررسی شد. مطالعات پیرامون آب کم‌شور با فرض اینکه امکان نمک‌زدایی از آب دریا و کاهش شوری آن به یک‌دهم شوری اصلی فراهم باشد انجام شده است. ترکیب اجزای سیالات مورد بررسی برای تزریق و نمونه آب خود میدان در جدول ۲ ارایه شده است.

با توجه به هزینه‌های بالای پروژه‌های ازدیاد برداشت، پیش از هرگونه اقدام عملیاتی چگونگی عملکرد فرآیند و حتی امکان‌پذیری انجام آن باید به صورت دقیق و کامل بررسی شود. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، از مهم‌ترین چالش‌ها در پروژه‌های تزریق آب می‌توان به کاهش تزریق‌پذیری سازند اشاره کرد. کاهش تزریق‌پذیری در اثر وجود ناخالصی‌ها در سیال تزریقی مانند نفت، جامدات همراه و تشکیل رسوبات معدنی رخ می‌دهد.

بررسی‌های انجام شده بر روی ترکیبات نمونه آب خلیج‌فارس و پساب شهری نشان داد که در هیچ یک از این دو نمونه آب، نفت وجود ندارد. تنها نمونه آب پساب جمع‌آوری شده از میدان‌ها مقداری نفت همراه خود دارد که با توجه به مقدار کم آن قابل چشم‌پوشی است. با توجه به جداسازی جامدات پیش از تزریق و با فرض بازدهی کامل فرآیند فیلتراسیون، در این پژوهش از بررسی اثر جامدات همراه چشم‌پوشی شده و منحصرا به بررسی تشکیل رسوبات معدنی ناشی از مواد معدنی محلول در نمونه‌های آب پرداخته می‌شود. بدین منظور دو راهکار کلی وجود دارد:

- انجام آزمایش‌های سازگاری: در این آزمایش‌ها نمونه سیالات در نسبت‌های مشخص با یکدیگر ترکیب شده، سیال پس از مدت معین فیلتر شده و جامدات تشکیل شده جداسازی و سپس مقدار جامدات جدا شده اندازه‌گیری و با آزمایش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس نوع آن‌ها تعیین می‌شوند.
- شبیه‌سازی نمونه‌های آب: در این روش، از نرم‌افزارهای تجاری ژئوشیمیایی استفاده می‌شود. این نرم‌افزارها در شرایط ترمودینامیکی تعیین شده با بررسی شاخص اشباع[۱۳] مقدار جامدات تشکیل شونده را در حالت تعادلی مشخص می‌کنند.

تاکنون در مطالعات بسیاری نتایج حاصل از شبیه‌سازها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که مطابقت بسیار بالایی را نشان می‌دهند[۵۴-۵۲]، بنابراین برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان و با توجه به پیش‌بینی قابل‌قبول نرم‌افزارها، در این

جدول ۲: ترکیب اجزا و خواص آب سازندی و نمونه آب‌های تزریقی

ویژگی/نمونه آب	واحد	پساب واحد بهره برداری	آب خلیج فارس	پساب شهری	آب کم شور	آب سازندی
دما	C	۲۳٫۷	۲۴٫۵	۲۴٫۷	۲۴٫۵	۲۳٫۹
pH	-	۵٫۳	۸٫۰۴	۷٫۲۲	۷٫۸۸	۶٫۱
هدایت الکتریکی	ms/cm	۳۱۱	گزارش نشده	۱٫۹۱۵	۰٫۰۰۷	۳۲۸
آمونیاک (NH_3-N)	mg/L	گزارش نشده	گزارش نشده	۲۴٫۷	گزارش نشده	گزارش نشده
بی کربنات (HCO_3^-)	mg/L	۱۳۸	۱۸۵	گزارش نشده*	۱۵٫۸	۳۴۸
سولفات (SO_4^{2-})	mg/L	۲۰۳	۳۲۳۶	۲۳۵٫۵	۳۲۳٫۶	۴۶۵
کلر (Cl^-)	mg/L	۱۲۵۰۰۰	۲۱۹۷۴	۳۸۷	۲۱۹۷٫۴	۱۳۱۰۰۰
نیترات	mg/L	گزارش نشده	گزارش نشده	۲	گزارش نشده	گزارش نشده
فسفر	mg/L	گزارش نشده	گزارش نشده	۱۴	گزارش نشده	گزارش نشده
SiO_2	mg/L	گزارش نشده	گزارش نشده	۲۶	گزارش نشده	گزارش نشده
کلسیم (Ca^{2+})	mg/L	۱۱۴۰۰	۳۹۱	۱۲۶	۳۹٫۱	۶۹۹۸
منیزیم (Mg^{2+})	mg/L	۱۹۰۰	۱۵۱۶	۳۶	۱۵۱٫۶	۱۸۰۰
سدیم (Na^+)	ppm	۶۱۰۰۰	۱۱۹۸۵	۸۸٫۷۸	۱۱۹۸٫۵	۷۰۰۰۰
پتاسیم (K^+)	ppm	۸۵۰	۴۶۴	۲۵٫۲	۴۶٫۴	۹۸۰
استرانسیم (Sr^{2+})	ppm	۱۰۳۰	۰	گزارش نشده	۰	۴۰۲
کل جامدات محلول	mg/L	۲۰۱۵۵۳	۳۹۷۵۰	۱۲۲۶	۳۹۶۵	۲۱۳۰۰۰

* باتوجه به موجود نبودن مقدار یون بی‌کربنات در محاسبات آزمایشگاهی، مقادیر بی‌کربنات برای پساب شهری (در تعادل فازی) و با استفاده از نرم‌افزار تعیین گردیده است.

پژوهش از شبیه‌ساز صنعتی در بررسی سازگاری سیالات استفاده شده است.

در این پژوهش، برای بررسی سازگاری سیالات مورد بررسی تزریق با نمونه آب سازندی از نرم‌افزار *OLIScaleChem* نسخه ۴٫۰ به کار گرفته شد. نرم‌افزار ژئوشیمیایی *OLIScaleChem* برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ در یک پروژه مشترک بین شرکت *OLI* و شل توسعه پیدا کرد. این نرم‌افزار از یک مدل پایه آبی ویژه برای تعیین چگونگی توزیع مواد بهره می‌گیرد که امکان استفاده از قابلیت‌های آن را برای مدل‌سازی بازه گسترده‌ای از ذرات محلول در آب در شرایط دما و فشاری مختلف میسر می‌سازد. با توجه به توانمندی نرم‌افزار *OLIScaleChem* در انجام محاسبات در شرایط دما و فشار بالای مخزن این نرم‌افزار در مطالعه حاضر استفاده شد.

در این مطالعه در مرحله اول، سازگاری هر یک از آب‌های مورد استفاده به عنوان گزینه‌های تزریق، یعنی نمونه‌های آب خلیج‌فارس، پساب واحد بهره‌برداری، آب کم‌شور و پساب شهری با آب سازندی در شرایط ترمودینامیکی مخزن بررسی شد. در مرحله دوم، با توجه به احتمال عدم تامین این منابع به مقدار لازم، سازگاری ترکیبی از نمونه‌های آب با آب سازندی بررسی شد. در این حالت پیش از شبیه‌سازی آزمایش‌های سازگاری ترکیب آب‌های تزریقی با آب سازندی، سازگاری نمونه‌های آب با یکدیگر نیز بررسی و سپس به دلیل تعدد حالت‌های موجود، ترکیب آب‌های تزریقی به صورت دوبه‌دو و در نسبت‌های مساوی (نسبت ۰٫۵- ۰٫۵) با یکدیگر شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی این بخش از مطالعه، ابتدا سیالات تزریقی در شرایط سطح ترکیب شده و مقدار رسوب جامدات پیش‌بینی شدند، سپس با فرض جداسازی کامل رسوبات تشکیل شده، اجزای سیالات ترکیبی تزریق تعیین و سازگاری آن‌ها با آب سازندی در شرایط مخزن شبیه‌سازی شد.

با توجه به تغییر نسبت ترکیب آب سازندی با سیال تزریقی درگذر زمان و تغییر دایمی ترکیب سیال موجود در محیط متخلخل، بررسی سازگاری سیالات صرفا در یک نسبت ترکیب مشخص منطقی نیست. معیاری که در این پژوهش برای سنجش سازگاری مورد استفاده قرار گرفت، مجموع رسوبات اندازه‌گیری شده در نسبت‌های مختلف است. سازگاری تمامی سیالات در ۹ نسبت مختلف در بازه‌های مساوی (نسبت‌های ۰٫۱ الی ۰٫۹) انجام شد. روند انجام شبیه‌سازی آزمایش‌ها سازگاری در شکل ۱ ارایه شده است.

شکل ۱: مراحل انجام شبیه‌سازی آزمایش‌های سازگاری

۳- تحلیل نتایج

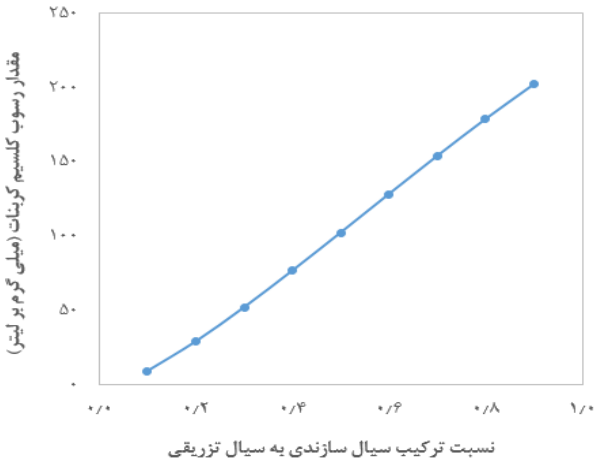
سازگاری سیالات مطرح شده با آب سازندی یکبار با نمونه‌های خالص گزینه‌های تزریق و یک‌بار برای ترکیبات آن‌ها بررسی و نتایج تحلیل شد.

۳-۱- نتایج محاسبات سازگاری سیالات مختلف با آب سازندی

یکی از پارامترهای تعیین‌کننده در پروژه‌های تزریق آب، امکان تامین سیال تزریقی در حجم مورد نیاز در بلندمدت است. در این بخش سازگاری سیالات تزریقی و آب سازندی با فرض در دسترس بودن گزینه‌های تزریق در حجم لازم برای تزریق انجام شد.

۳-۱-۱- آب سازندی و آب کم‌شور

ترکیب سیال کم‌شور با فرض نمک‌زدایی آب خلیج‌فارس با بازدهی ۹۰ درصد و یا رقیق‌سازی ۱۰ مرتبه‌ای آب خلیج‌فارس، تعیین شد. نتایج شبیه‌سازی تشکیل رسوبات کربناته را نشان می‌دهد. بر اساس این شبیه‌سازی مقدار این رسوبات با افزایش



شکل ۲: مقدار رسوبات در نسبت‌های مختلف ترکیب آب سازندی و نمونه آب کم‌شور

مشارکت آب سازندی در مخلوط دو سیال، افزایش می‌یابد. در شکل ۲ اثر درصد مشارکت سیالات در تشکیل رسوب کلسیم کربنات ارایه شده است.

مجموع کل رسوبات تشکیل شده برای نسبت‌های مختلف مورد بررسی بین آب سازندی و آب کم‌شور ۹۳۱ میلی‌گرم بر لیتر است که کل این مقدار مربوط به رسوبات کلسیم کربنات است.

۳-۱-۲- آب سازندی و آب خلیج‌فارس

توجه به مجاورت میدان با خلیج‌فارس، امکان استفاده از آب دریا برای تزریق به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آب تزریقی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ چگونگی تغییر مقادیر رسوبات مختلف در اثر ترکیب دو سیال در نسبت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

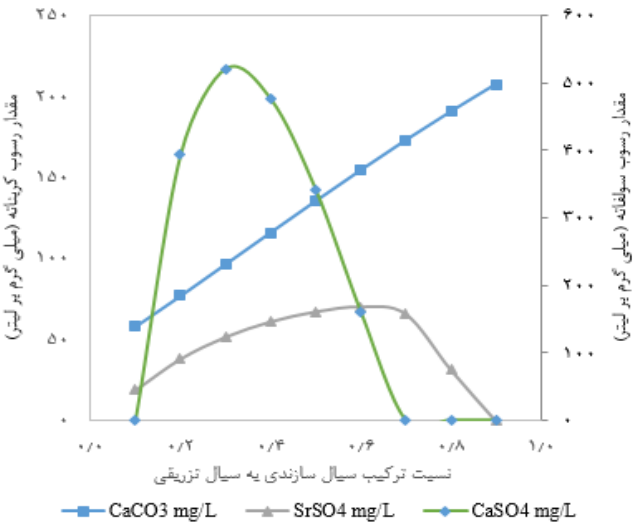
نتایج شبیه‌سازی نشان از تشکیل رسوبات کربناته (کلسیم کربنات) و سولفاته (استرانسیم و کلسیم سولفات) هنگام ترکیب دو سیال دارد. رسوب کلسیم کربنات به دلیل کربناته بودن سنگ مخزن و اشباع نمونه آب سازندی از این مواد تشکیل می‌شود. به همین دلیل با افزایش نسبت آب سازندی در مقابل سیال تزریقی، مقدار رسوب کلسیم کربنات نیز افزایش می‌یابد. رسوبات سولفاته باتوجه به ناسازگاری سیال تزریقی که مقادیر بالای سولفات دارد با آب سازندی که اشباع از کلسیم است رخ می‌دهند. در مورد میدان مورد مطالعه آب سازندی مقادیر زیادی استرانسیم دارد و در تشکیل رسوبات سولفاته مشارکت می‌کند. با افزایش نسبت آب دریا به آب سازندی مقدار یون سولفات نیز افزایش می‌یابد. در وجود کلسیم و استرانسیم شاخص اشباع برای استرانسیم سولفات و کلسیم سولفات بالا می‌رود و این رسوبات تشکیل می‌شوند. حال اگر مقدار آب سازندی در ترکیب دو سیال از یک مقدار مشخصی کمتر شود، از میزان فوق اشباع بودن ترکیب سیالات نسبت به استرانسیم و کلسیم کاسته می‌شود و در نتیجه مقدار رسوبات سولفات کلسیم / استرانسیم کاهش می‌یابد.

کل رسوبات تشکیل شده در نسبت‌های مختلف ترکیب سیالات بیش از ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. این در حالی است که بیش از ۲۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آن رسوبات سولفاته هستند که در صورت تشکیل در محیط متخلخل برطرف کردن آن‌ها آسان نیست.

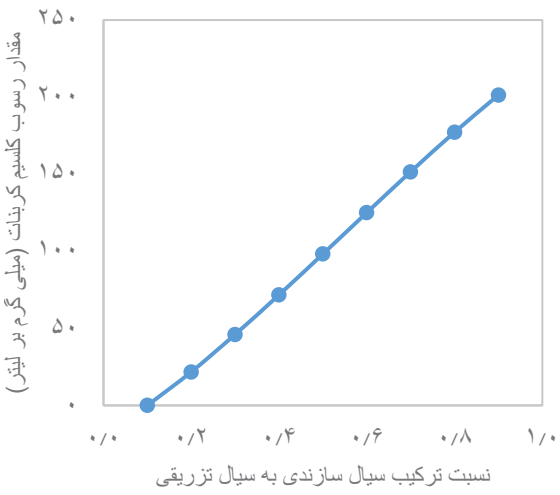
۳-۱-۳- آب سازندی و پساب شهری

با توجه به مجاورت میدان هدف تزریق به شهر، امکان جمع‌آوری فاضلاب شهری و انجام فرآیند جداسازی جامدات این نمونه پساب به عنوان سیال تزریقی مدلسازی شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، رسوبات کلسیم کربنات تشکیل خواهند شد و با افزایش درصد آب سازندی نیز مقدار این رسوبات افزایش می‌یابد. روند تشکیل رسوب کربناته با تغییر درصد سیالات مانند شکل ۴ است.

مجموع رسوبات تشکیل شده در نسبت‌های مختلف مورد بررسی از پساب شهری و سیال سازندی ۸۹۳ میلی‌گرم بر لیتر است. ترکیبات فاضلاب شهری به دلیل وجود آمونیاک،



شکل ۳: مقادیر رسوبات در نسبت‌های مختلف ترکیب آب سازندی و آب خلیج‌فارس



شکل ۴: مقدار رسوبات در نسبت‌های مختلف ترکیب آب سازندی و نمونه فاضلاب شهری

نیتروژن و فسفر از سایر نمونه‌های آب متفاوت است، بنابراین برای بررسی دقیق‌تر اثر اجزای یاد شده انجام آزمایش‌ها سازگاری مورد نیاز است.

۳-۱-۴- آب سازندی و پساب واحد بهره‌برداری

نمونه آب واحد بهره‌برداری از مرکز جمع‌آوری اخذ شده است. در این محل پساب سه میدان که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، جمع‌آوری و ترکیب می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تزریق پساب میدان‌ها به مخزن موجب تشکیل رسوبات کربناته (مشخصا کلسیم کربنات) می‌شود. تشکیل رسوب کلسیم کربنات با افزایش درصد آب سازندی در ترکیب افزایش می‌یابد. روند تغییرات مقدار رسوبات با افزایش مقدار آب سازنده در شکل ۵ قابل مشاهده است. مجموع رسوبات تشکیل شده در نسبت‌های مختلف مورد بررسی ۱۲۵۶ میلی‌گرم بر لیتر است.

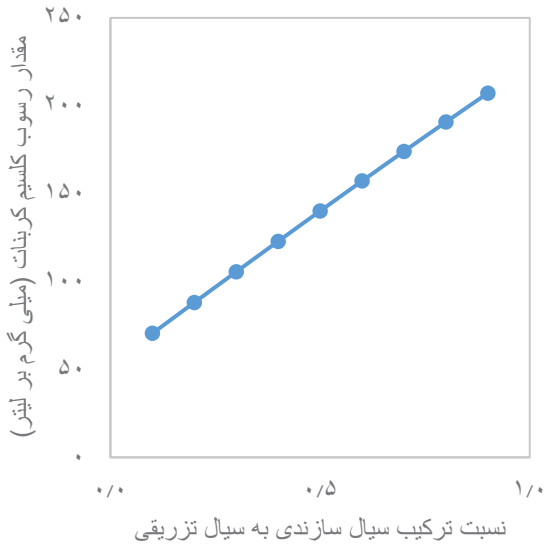
همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار رسوبات مربوط به ترکیب پساب شهری با آب سازندی است و بیشترین آن مربوط به ترکیبات آب دریا و آب سازندی است. در جدول ۳ مقدار رسوبات برای هرکدام از نمونه آب‌ها در نسبت‌های مختلف ترکیب ارایه شده است.

مقدار کم رسوبات معدنی در پساب شهری و آب کم‌شور با توجه به مقدار کم جامدات محلول[۱۴] قابل پیش‌بینی بود. نکته مهم در این قسمت، تشکیل رسوبات محدود هنگام ترکیب پساب جمع‌آوری شده در واحد بهره‌برداری با آب سازندی است.

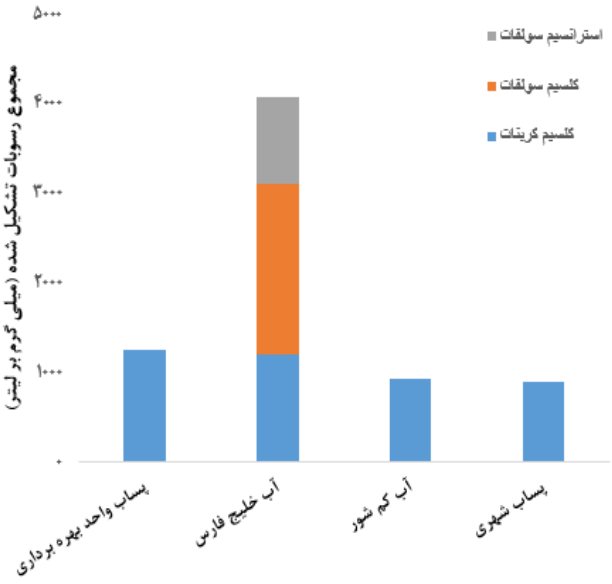
برای بررسی بهتر سازگاری سیالات، نتایج شبیه‌ساز برای مجموع رسوبات تشکیل‌شونده بر اثر ادغام هرکدام از گزینه‌های تزریقی با آب سازندی در نسبت‌های مختلف در شکل ۶ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین گزینه‌های موجود آب خلیج‌فارس ناسازگارترین آب تزریقی است. از حاصل ادغام این آب با آب سازندی به دلیل مقادیر بالای سولفات در آب خلیج فارس و حساسیت این یون به کاتیون‌های دو ظرفیتی (مثل کلسیم و استرانسیم) رسوبات سولفاته قابل

جدول ۳: کل رسوبات تشکیل شده از ادغام سیالات تزریقی در ۹ نسبت مختلف (۰/۱ الی ۰/۹)

	آب خلیج‌فارس	پساب تولیدی	فاضلاب شهری	آب کم شور
آب خلیج‌فارس	–	۴۹۸۵	۱۷/۳۶	۲۸/۷۵
پساب تولیدی	۴۹۸۵	–	۰	۰
فاضلاب شهری	۱۷/۳۶	۰	–	۰
آب کم شور	۲۸/۷۵	۰	۰	–



شکل ۵: مقدار رسوبات در نسبت‌های مختلف ترکیب آب سازندی و نمونه پساب واحد بهره‌برداری



شکل ۶: مجموع کل رسوبات تشکیل شده گزینه‌های تزریق با آب سازندی در نسبت‌های مختلف ترکیب

توجهی تشکیل می‌شوند. از طرفی کلسیم کربنات رسوب غالب در اثر ادغام تمامی گزینه‌های تزریق با آب سازندی است، بنابراین رسوبات حاصل از ادغام سایر گزینه‌ها (پساب شهری، آب کم‌شور و پساب واحد بهره‌برداری) با آب سارند تقریبا در یک بازه ثابت است.

مقدار رسوبات تشکیل شده از ترکیب پساب واحد بهره‌برداری با آب درجای مخزن در شرایط مخزن (دمای ۲۰۵ درجه فارنهایت و فشار ۳۷۰۰ پام) ۱۲۵۶ میلی‌گرم بر لیتر است. این مقدار حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه سیالات کم‌شور (پساب شهری و آب رقیق شده خلیج‌فارس) است. این در حالی است که مقدار کل جامدات محلول در پساب واحد بهره‌برداری بیش از ۲۰۰ برابر پساب شهری و بیش از ۵۰ برابر نمونه آب کم‌شور استفاده شده است. در نتیجه مقدار کل جامدات محلول به تنهایی تعیین‌کننده نیست و مقدار یون‌های مشخص تشکیل رسوبات را محقق می‌کنند.

۳-۲- نتایج محاسبات سازگاری آب‌های ترکیبی با آب سازندی

در صورتی که سیال تزریقی مورد نیاز در حجم لازم تامین نشود، نیاز است سیال منتخب تزریقی با سایر منابع موجود ادغام شود. از این‌رو بررسی سازگاری ترکیب گزینه‌های تزریق با یکدیگر (با هدف تعیین سازگاری گزینه‌های تزریق با یکدیگر) و آب سازندی نیز اهمیت بالایی دارد.

۳-۲-۱- تزریق آب‌های ترکیبی

برای تامین حجم سیال تزریقی در مقدار لازم، ترکیب آب از منابع مختلف و تزریق آن به مخزن محتمل است. در برخی مواقع نیز ترکیب سیالات با هدف تهیه سیال باکیفیت‌تر تزریقی و افزایش بازدهی تزریق انجام می‌شود [۵۵]. برای بررسی مقادیر رسوبات حاصل از ترکیب نمونه آب‌های مختلف، مجموع تمام رسوبات ناشی از ترکیب دوتایی آب‌ها در نسبت‌های مختلف بررسی شد. ترکیب سیالات در سطح زمین تهیه و سپس به مخزن تزریق می‌شود، بنابراین شرایط محیطی برای ترکیب سیالات دما و فشار محیط در نظر گرفته شده است. جدول ۳ مقادیر رسوبات تشکیل شده در اثر ترکیب سیالات منابع آبی مختلف در نسبت‌های مختلف است.

بر اساس نتایج شبیه‌ساز از ترکیب آب کم‌شور و فاضلاب شهری و پساب میدان‌ها با یکدیگر در تمامی نسبت‌ها رسوبی تشکیل نمی‌شود. بیشترین مقدار رسوبات نتیجه ترکیب آب خلیج‌فارس و پساب تولیدی است؛ اما برای تعیین سیال ترکیبی مطلوب برای تزریق به مخزن باید نتیجه ادغام با آب سازندی بررسی شود.

۳-۲-۲- سازگاری سیالات ترکیبی با آب سازندی

همان‌طور که در نتایج مرحله قبل مشخص است، ساخت سیالات ترکیبی در سطح ممکن است با تشکیل جامدات معدنی همراه باشد. این جامدات مشکلات متعددی را در مسیر تزریق از سطح تا مخزن (به ویژه در پمپ‌ها و محیط متخلخل) به وجود می‌آورد، بنابراین پیش از تزریق به مخزن، جداسازی جامدات تشکیل شده ضروری است. به همین دلیل پیش از شبیه‌سازی ترکیب سیالات تزریقی با آب سازند، جامدات ترکیب سیالات را جدا می‌کنیم. از طرفی با توجه به تعدد نمونه سیالات (در صورت بررسی سیال تزریقی در نسبت‌های مختلف با آب سازندی) تنها نمونه سیالات ترکیبی ساخته شده با نسبت برابر (۵۰-۵۰) از هر جفت سیال با آب سازند در نسبت‌های مختلف ترکیب می‌شود. در جدول ۴ مجموع رسوبات تشکیل شده در نسبت‌های مختلف ادغام آب سازندی با سیالات ترکیبی ارایه شده است.

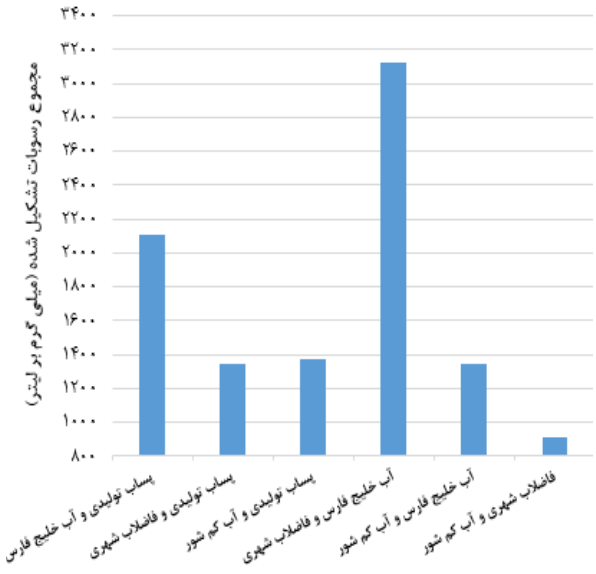
همان‌طور که در جدول مشخص است رسوب غالب در تمامی آزمایش‌ها کلسیم کربنات است که با توجه به کربناته بودن مخزن و اشباع آب سازندی از آن طبیعی به نظر می‌رسد. بیشترین رسوبات از ادغام آب سازندی و ترکیب آب خلیج‌فارس

جدول ۴: مجموع رسوبات حاصل از ادغام آب سازندی با سیالات تزریقی ترکیب شده در نسبت مساوی

سیال ادغام‌شده با آب سازندی	مقدار رسوب (میلی‌گرم بر لیتر)			مجموع
	کلسیم کربنات	کلسیم سولفات	استرانسیم سولفات	
پساب تولیدی و آب خلیج‌فارس	۱۵۰۹	۶۰۰	–	۲۱۰۹
پساب تولیدی و فاضلاب شهری	۱۳۴۸	–	–	۱۳۴۸
پساب تولیدی و آب کم شور	۱۳۷۰	–	–	۱۳۷۰
آب خلیج‌فارس و فاضلاب شهری	۱۱۴۴	۱۰۹۵	۸۸۹	۳۱۲۸
آب خلیج‌فارس و آب کم شور	۱۰۶۲	–	۲۸۱	۱۳۴۴
فاضلاب شهری و آب کم شور	۹۱۲	–	–	۹۱۲

و فاضلاب شهری به وجود می‌آید (بیش از ۳۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین رسوبات نیز حاصل فاضلاب شهری و آب کم‌شور با سیال سازندی به مقدار حدودی ۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. مقدار رسوبات کل ناشی از ترکیب آب سازندی با سه نمونه آب پساب تولیدی و فاضلاب شهری، پساب تولیدی و آب کم‌شور و آب خلیج‌فارس و آب کم‌شور رسوباتی با مقادیر مشابه (۱۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) می‌دهد. در این بین تزریق پساب تولیدی با آب کم‌شور و فاضلاب شهری با توجه به نوع رسوب (فقط کلسیم کربنات که رفع آن آسان‌تر است) و مسایل محیط زیستی، جذاب‌تر به نظر می‌رسد.

برای بررسی بهتر سازگاری ترکیب سیالات، نتایج شبیه‌ساز برای مجموع رسوبات تشکیل‌شونده بر اثر ادغام سیالات ترکیبی با نسبت برابر (نسبت ۵۰-۵۰) با آب سازندی در نسبت‌های مختلف در شکل ۷ نیز ارایه شده است. در این مرحله نیز آب‌های ترکیبی آب خلیج فارس ناسازگارترین گزینه‌ها هستند. دلیل این رخداد وجود مقادیر قابل توجه سولفات در آب دریاها و حساسیت آن به کاتیون‌های دو ظرفیتی در تشکیل رسوبات سولفاته است.



شکل ۷: مجموع کل رسوبات ادغام سیالات تزریق با آب سازندی در نسبت‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

با گذر عمر مخازن و کاهش انرژی مخزن در تولید طبیعی، برای استمرار تولید انجام روش‌های بهبود تولید و ازدیاد برداشت الزامی است. در این راستا یکی از متداول‌ترین روش‌ها تزریق آب است. تزریق آب به مخازن هیدروکربوری با چالش‌هایی همراه است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تامین منابع آب تزریقی در مقدار و کیفیت مناسب است. در این پژوهش منابع مختلف آب تزریقی به مخزن از منظر کیفیت آب و امکان تزریق بررسی شد.

با در نظر گرفتن مسایل محیط زیستی، کنترل پساب‌های تولیدی میدان‌ها نفتی الزامی است. اقتصادی‌ترین و متداول‌ترین روش برای میدان‌ها خشکی دفع و تزریق مجدد آن است. علاوه بر این حجم پساب‌های تولیدی به صورت روزافزون در حال افزایش است. این امر امکان تامین آن برای تزریق به مخزن در مقادیر لازم را فراهم کرده است. در نتیجه تزریق پساب با هدف بهبود تولید و ازدیاد برداشت یک روش جذاب برای افزایش ضریب بازیافت برای میدان‌ها ایران است.

منابع مختلف آبی بررسی شده شامل فاضلاب شهری، آب کم‌شور (با نمک‌زدایی آب خلیج‌فارس)، آب خلیج‌فارس و پساب موجود در واحد بهره‌برداری و ترکیبات آن‌ها هستند. برای بررسی دقیق‌تر اثر متقابل سیالات، جامدات و ذرات نفت همراه آب‌ها (در صورت وجود) حذف شد. در این بین کمترین مشکلات تزریق (مشخصا تشکیل رسوبات) ناشی از فاضلاب شهری و آب کم‌شور با حدود ۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسوب بود. بیشترین رسوبات نیز هنگام تزریق آب خلیج‌فارس (بیش از ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) تشکیل می‌شود. این در حالی است که رسوبات تشکیل شده در اثر ترکیب فاضلاب شهری و آب سازندی از جنس کلسیم کربنات است و رسوبات ناشی از آب خلیج‌فارس ترکیبی از کلسیم کربنات و رسوبات سولفاته (مشخصا کلسیم سولفات و استرانسیم سولفات) خواهد بود و مقابله با رسوبات سولفاته دشوارتر از رسوبات کربناته است.

مقدار رسوبات تشکیل شده از ترکیب پساب واحد بهره‌برداری با آب سازندی در شرایط مخزن ۱۲۵۶ میلی‌گرم بر لیتر (حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه پساب شهری و آب رقیق شده خلیج‌فارس) است. توجه به این نکته ضروری است که مقدار کل جامدات محلول در پساب واحد بهره‌برداری بیش از ۲۰۰ برابر پساب شهری و بیش از ۵۰ برابر نمونه آب کم‌شور استفاده شده است. در نتیجه مقدار کل جامدات محلول به

تنهایی تعیین‌کننده نیست و مقدار یون‌های مشخص تشکیل رسوبات را محقق می‌کند. از نگاه محیط زیستی دفع پساب‌های نفتی در مقابل کاربردهای دیگر آب کم‌شور و پساب‌های شهری در ایران (مانند کشاورزی) نیز اولویت بالاتری دارد. این عوامل در کنار هم تزریق پساب‌های نفتی را بیش از پیش جذاب می‌کند. حال آنکه در مناطقی که مشکلات تامین آب کشاورزی وجود ندارد، تزریق پساب شهری هم از نظر سازگاری و هم از دیدگاه محیط زیستی گزینه مطلوبی است.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده پیرامون سازگاری سیالات تزریقی و ترکیب سیالات تزریقی با آب سازندی نیز به شیوه بیان شده در متن پژوهش عمل شود. به علاوه با توجه به ماهیت شبیه‌سازی این پژوهش پیشنهاد می‌شود بررسی سازگاری سیالات در قالب یک پروژه آزمایشگاهی بررسی و نتایج آن با شبیه‌ساز مقایسه شود.

۵- مراجع

[1] Tetteh, J. T., Rankey, E., and Barati, R. (2017). *"Low salinity waterflooding effect: Crude oil/brine interactions as a recovery mechanism in carbonate rocks"*. OTC Brasil, Rio de Janeiro, Brazil, October. DOI: 10.4043/28023-ms.

[2] Norwegian Petroleum Directorate (2020). *"Water injection"*. Norwegian Petroleum Directorate, https://www.npd.no/en/facts/production/improved-oil-recovery-ior/water/#:~:text=In 2019%2C 41 fields on.

[3] Webb, K. J., Black, C. J. J., and Members, S. P. E. (2003). *"Low Salinity Oil Recovery – Log-Inject-Log"*. In: SPE 13th Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, April. DOI: 10.2118/89379-MS.

[4] Katende, A., and Sagala, F. (2019). *"A critical review of low salinity water flooding : Mechanism , laboratory and field application"*. Journal of Molecular Liquids, 278: 627-649. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.01.037.

[5] Bernard, G. G. (1967). *"Effect of Floodwater Salinity on Recovery Of Oil from Cores Containing Clays"*. In: SPE California Regional Meeting, Los Angeles, California, October. DOI: 10.2118/1725-ms.

[6] Tetteh, J. T., Brady, P. V., and Barati Ghahfarokhi, R. (2020). *"Review of low salinity waterflooding in carbonate rocks: mechanisms, investigation techniques, and future directions"*. Advances in Colloid and Interface Science, 284: 102253. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102253.

[7] Peng, S., Shevchenko, P., and Ko, L. T. (2023). *"Shale Wettability: Untangling the Elusive Property with an Integrated Imbibition and Imaging Technique and a New Hypothetical Theory"*. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 26(01): 40-50. DOI: 10.2118/212276-PA.

[8] Ligthelm, D., Gronsveld, J., Hofman, J., Brussee, N., Marcelis, F., and Van Der Linde, H. (2009). *"Novel waterflooding strategy by manipulation of injection brine composition (SPE-119835)"*. In: EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, June. DOI: https://doi.org/10.2118/119835-MS.

[9] Sohal, M. A., Thyne, G., and Søgaard, E. G. (2016). *"Review of Recovery Mechanisms of Ionically Modified Waterflood in Carbonate Reservoirs"*. Energy and Fuels, 30(3): 1904-1914. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02749.

[10] Yousef, A. A., Al-Saleh, S., Al-Kaabi, A., and Al-Jawfi, M. (2011). *"Laboratory investigation of the impact of injection-water salinity and ionic content on oil recovery from carbonate reservoirs"*. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 14(5): 578-593. DOI: 10.2118/137634-PA.

[11] Romanuka, J., Hofman, J. P., Ligthelm, D. J., Suijkerbuijk, B. M. J. M., Marcelis, A. H. M., and Oedai, S., Brussee, N. J., van der Linde, A. , Aksulu, H. , and Austad, T. (2012). *"Low salinity EOR in carbonates"*. In: SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April. DOI: 10.2118/153869-ms.

[12] Al-Harrasi, A. S., Al-Maamari, R. S., and Masalmeh, S. (2012). *"Laboratory investigation of low salinity waterflooding for carbonate reservoirs"*. In: Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, November. DOI: 10.2118/161468-ms.

[13] Chandrasekhar, S., and Mohanty, K. K. (2013). *"Wettability alteration with brine composition in high temperature carbonate reservoirs"*. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, September. DOI: 10.2118/166280-ms.

[14] Alameri, W., Teklu, T. W., Graves, R. M., Kazemi, H., and AlSumaiti, A. M. (2014). *"Wettability alteration during low-salinity water-flooding in carbonate reservoir cores"*. In: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, October. DOI: 10.2118/171529-ms.

[15] Nasralla, R. A., Sergienko, E., Van Der Linde, H. A., Brussee, N. J., Mahani, H., Suijkerbuijk, B. M. J. M., Al-Qarshubi, I. S., and Masalmeh, S. K. (2014). *"Demonstrating the potential of low-salinity waterflood to improve oil recovery in carbonate reservoirs by qualitative coreflood"*. In: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, November. DOI: 10.2118/172010-ms.

[16] Austad, T., Shariatpanahi, S. F., Strand, S., Aksulu, H., and Puntervold, T. (2015). *"Low Salinity EOR Effects in Limestone Reservoir Cores Containing Anhydrite: A Discussion of the Chemical Mechanism"*. Energy and Fuels, 29(11): 6903-6911. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01099.

[17] Wang, X., Liu, W., Shi, L., Zou, Z., Ye, Z., Wang, H., and Han, L. (2021). *"A comprehensive insight on the impact of individual ions on Engineered Waterflood: With already strongly water-wet sandstone"*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 207: 109153. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109153.

[18] Reginato, L. F., Pedroni, L. G., Martins Compan, A. L., Skinner, R., and Sampaio, M. A. (2021). *"Optimization of ionic concentrations in engineered water injection in carbonate reservoir through ANN and FGA"*. Oil and Gas Science and Technology, 76(13): 1-14. DOI: 10.2516/ogst/2020094.

[19] Mahani, H., Keya, A. L., Berg, S., Bartels, W. B., Nasralla, R., and Rossen, W. R. (2015). *"Insights into the mechanism of wettability alteration by low-salinity flooding (LSF) in carbonates"*. Energy and Fuels, 29(3): 1352-1367. DOI: 10.1021/ef5023847.

[20] Derkani, M. H., Fletcher, A. J., Abdallah, W., Sauerer, B., Anderson, J., and Zhang, Z. J. (2018). *"Low salinity waterflooding in carbonate reservoirs: Review of interfacial mechanisms"*. Colloids and Interfaces, 2(2): 20. DOI: 10.3390/colloids2020020.

[21] Rahimi, A., Honarvar, B., and Safari, M. (2020). *"The role of salinity and aging time on carbonate reservoir in low salinity seawater and smart seawater flooding"*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 187: 106739. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106739.

[22] Talebi, S., Riahi, S., and Rostami, B. (2022). *"The Effect of Blending Polymeric and Phosphonate Scale Inhibitors on Fluid/Fluid and Rock/Fluid Interactions: A Comprehensive Experimental and Theoretical Study"*. SPE Journal, 27(2022): 3611-3629. DOI: 10.2118/210583-PA.

[23] Mahmoud, M., Elkatatny, S., and Abdelgawad, K. Z. (2017). *"Using high- and low-salinity seawater injection to maintain the oil reservoir pressure without damage"*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 7(2): 589-596. DOI: 10.1007/s13202-016-0279-x.

[24] Ghosh, B., Sun, L., and Thomas, N. C. (2020). *"Compatibility evaluation of modified seawater for EOR in carbonate reservoirs through the introduction of polyphosphate compound"*. Petroleum Science, 17(2): 393-408. DOI: 10.1007/s12182-019-00380-6.

[25] Song, J., Wang, Q., Shaik, I., Puerto, M., Bikkina, P., Aichele, C., Biswal, S. L., and Hirasaki, G. J. (2020). *"Effect of salinity, Mg2+ and SO42− on "smart water"-induced carbonate wettability alteration in a model oil system"*. Journal of Colloid and Interface Science, 563: 145-155. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.12.040.

[26] Hadia, N. J., Chaudhari, L. S., Mitra, S. K., Vinjamur, M., and Singh, R. (2008). *"Effect of scaling parameters on waterflood performance with horizontal and vertical wells"*. Energy and Fuels, 22(1): 402-409. DOI: 10.1021/ef070097b.

[27] Kokal, S., and Al-Kaabi, A. (2010). *"Enhanced oil recovery: challenges and opportunities"*. Global Energy Solutions, 2010: 64-69.

[28] Narain-ford, D. M., Bartholomeus, R. P., Dekker, S. C., and Van Wezel, A. P. (2020). *"Natural Purification Through Soils : Risks and Opportunities of Sewage Ef fl uent Reuse in Sub-surface Irrigation"*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 250: 85-117. DOI: https://doi.org/10.1007/398_2020_49.

[29] Scheierling, S. M., Bartone, C. R., Mara, D. D., and Drechsel, P. (2011). *"Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture"*. Water International, 36(4): 420-440. DOI: 10.1080/02508060.2011.594527.

[30] Parsons, S. A., and Smith, J. A. (2008). *"Phosphorus removal and recovery from municipal wastewaters"*. Elements, 4(2): 109-112. DOI: 10.2113/GSELEMENTS.4.2.109.

[31] Pahl-wostl, C. (2007). *"Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change"*. Water Resour Manage, 21: 49-62. DOI: 10.1007/s11269-006-9040-4.

[32] Kesari, K. K., Soni, R., Mohammad, Q., and Jamal, S. (2021). *"Wastewater Treatment and Reuse : a Review of its Applications and Health Implications"*. Water Air Soil Pollut, 2021: 208-232. DOI: 10.1007/s11270-021-05154-8.

[33] Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., and Zahoor, A. (2013). *"Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use"*. Agricultural Water Management, 130: 1-13. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.08.007.

[34] Qureshi, A. S. (2020). *"Challenges and Prospects of Using Treated Wastewater to Manage Water Scarcity Crises in the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries"*. Water, 2020: 1-16. DOI: 10.3390/w12071971.

[35] Liang, Y., Ning, Y., Liao, L., and Yuan, B. (2018). *"Special Focus on Produced Water in Oil and Gas Fields: Origin, Management, and Reinjection Practice. Elsevier Inc"*. Formation Damage during Improved Oil

Recovery, 515-586. DOI: 10.1016/B978-0-12-813782-6.00014-2.

[36] Jiménez, S., Micó, M. M., Arnaldos, M., Medina, F., and Contreras, S. (2018). *"State of the art of produced water treatment"*. Chemosphere, 192: 186-208. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.139.

[37] Adeniyi, A. T., and Ejim, C. P. (2021). *"Analyzing the Influence of Salinity on Produced Water Re-Injection"*. In: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition: D031S013R003. DOI: 10.2118/207157-MS.

[38] Dores, R., Hussain, A., Katebah, M., and Adham, S. (2012). *"Using advanced water treatment technologies to treat produced water from the petroleum industry"*. In: SPE International Production and Operations Conference & Exhibition, Doha, Qatar, May, 914-924. DOI: 10.2118/157108-ms.

[39] Ayirala, S. C., Saleh, S. H., and Yousef, A. A. (2017). *"Microscopic scale interactions of water ions at crude oil/water interface and their impact on oil mobilization in advanced water flooding"*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 163: 640-649. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.09.054.

[40] Bedrikovetsky, P., Mackay, E., Monteiro, R. P., Patricio, F., and Rosário, F. F. (2006). *"Injectivity impairment due to sulfate scaling during PWRI: Analytical model"*. In: SPE International Oilfield Scale Symposium, Aberdeen, UK, 31 May-1 June, 184-198. DOI: 10.2523/100512-ms.

[41] Moosavi, S. R., Rayhani, M., Malayeri, M. R., and Riazi, M. (2019). *"Impact of monovalent and divalent cationic and anionic ions on wettability alteration of dolomite rocks"*. Journal of Molecular Liquids, 281: 9-19. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.02.078.

[42] Bader, M. S. H. (2007). *"Seawater versus produced water in oil-fields water injection operations"*. Desalination, 208(1-3): 159-168. DOI: 10.1016/j.desal.2006.05.024.

[43] Alquwaizany, A., Hussain, G., and Al-Zarah, A. I. (2021). *"Changes in Physico-Chemical Composition of Wastewater by Growing Phragmites ausrtalis and Typha in an Arid Environment in Saudi Arabia"*. Environmental Science and Pollution Research, 1-11. DOI: 10.21203/rs.3.rs-365947/v1.

[44] Ellis, T. G. (1983). *"Chemistry of wastewater treatment"*. Environmental and Ecological Chemistry, Vol. II, Chemistry of Wastewater II.

[45] Warwick, C., Guerreiro, A., and Soares, A. (2013). *"Sensing and analysis of soluble phosphates in environmental samples: A review"*. Biosensors and Bioelectronics, 41(1): 1-11. DOI: 10.1016/j.bios.2012.07.012.

[46] Zimin, S. V., Sabanchin, I. V., Krasnov, I. A., Butorin, O. O., Stukan, M. R., Ivanov, E. N., Rebrikova, A. T., Denisenko, A. S., Piskarev, V. I., and Laptev, V. D. (2020). *"Inorganic salt deposition under in situ conditions in Eastern Siberian reservoirs (Russian)"*. Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry, 2020(09): 44-49. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-9-44-49.

[47] Ghalib, H. B., and Almallah, I. A. R. (2017). *"Scaling simulation resulting from mixing predicted model between Mishrif formation water and different waters injection in Basrah oil field, southern Iraq"*. Modeling Earth Systems and Environment, 3(4): 1557-1569. DOI: 10.1007/s40808-017-0384-y.

[48] Hajj, H. El., Pal, O., and Zoghbi, B. (2015). *"SPE-178002-MS Compositional Analysis and Treatment of Oilfield Scales"*. In: SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, April. DOI: 10.2118/178002-MS.

[49] Salikhov, R. M., Chertovskih, E. O., Gilmutdinov, B. R., Lebedeva, I. P., Kostyuk, I. I., Paraschenko, M. K., Uryadnov, A. A., and Kolesnikova, A. R. (2020). *"Special aspects of chemical reagents use under high mineralization of produced waters (Russian)"*. Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry, 2020(09): 59-62. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-9-59-62.

[50] Hu, M., Steefel, C. I., and Rutqvist, J. (2021). *"Microscale Mechanical-Chemical Modeling of Granular Salt : Insights for Creep"*. Journal of Geophysical Research : Solid Earth, 126(12): 1-20. DOI: 10.1029/2021JB023112.

[51] Kleinitz, W., and Dietzsch, G., and Ko, M. (2003). *"Halite scale formation in gas-producing wells"*. Chemical Engineering Research and Design, 81(3): 352-358. DOI: 10.1205/02638760360596900.

[52] Kamalipour, M., Mousavi Dehghani, S. A., Naseri, A., and Abbasi, S. (2018). *"Distinguishing anhydrate and gypsum scale in mixing incompatible surface and ground waters during water injection process"*. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 37(1): 231-240. DOI: 10.30492/IJCCE.2018.26024.

[53] Mostafavi, S. A., Riahi, S., Mavaddat, M., and Bigdeli, A. (2021). *"Best Practices-design for Scale Reduction During Produced Water Reinjection (PWRI)"*. 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, 2021: 1-5. DOI: 10.3997/2214-4609.202113312.

[54] Shabani, A., Kalantariasl, A., Parvazdavani, M., and Abbasi, S. (2019). *"Geochemical and hydrodynamic modeling of permeability impairment due to composite scale formation in porous media"*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 176: 1071-1081. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.088.

[55] Al-Samhan, M., Alanezi, K., Al-Fadhli, J., Al-Attar, F., Mukadam, S., and George, J. (2020). *"Evaluating scale deposition and scale tendency of effluent water mix with seawater for compatible injection water"*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10(5): 2105-2111. DOI: 10.1007/s13202-020-00849-w.

---

[1] Natural depletion

[2] IOR

[3] Pressure Maintenance

[4] EOR

[5] Low Salinity Water injection (LSWI)

[6] Sweep Efficiency

[7] Polishing

[8] offshore

[9] Onshore

[10] nutrients

[11] Refractory organics

[12] pathogens

[13] Saturation Index

[14] Total dissolved solids (TDS)