



Feasibility Study of Monitoring of Water Injection into an Iranian Oil Fields Using 4D Seismic Data

Saghi Jalini¹ and Reza Falahat^{*2}

Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Iran

rezafalahat@sut.ac.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5267.3338

Received: August/29/2023

Accepted: December/31/2023

Introduction

Enhanced oil recovery methods are typically examined through laboratory-scale investigations, with subsequent analysis via reservoir simulations. This procedure, however, does not guarantee the success of the operation in the field [1]. In Iran, several reservoirs have undergone water and natural gas injections, which in some cases have been connected to the production of high volumes of injected water or formation water. Therefore, monitoring the production and injection process in reservoirs seems necessary. There are several monitoring methods, including four-dimensional (4D) seismic, repeated well logs, and chemical tracers. Due to its full coverage of the reservoir, 4D seismic is considered the main monitoring method. The proper implementation of 4D seismic operations, however, requires preliminary studies regarding the feasibility of this approach. At this stage, different injection and production scenarios are prepared and the seismic response for each scenario is calculated. To accurately estimate these responses, rock and fluid physics models are used. Many existing rock physics models are provided for sandstone reservoirs. Therefore, using them in carbonate reservoirs, which have a more complex structure, mainly causes the results to deviate from laboratory measurements and well logs [2, 3]. Some of the most commonly used rock physics models are the Hertz-Mindlin model [4], Gassmann model [5], Kuşter-Toksöz model [6], Xu-Payne model [7], differential effective medium theory (DEM) [8], and Shiri-Falahat model [3]. Each model is based on certain assumptions limiting its application. Jalini and Falahat [9] provided a hybrid method suitable

for complex carbonate reservoirs. This model, which is an improved version of Shiri-Falahat's model, is a combination of the Kuşter-Toksöz model, DEM equation, MacBeth relations [10], and Gassmann's fluid substitution model. Therefore, the Jalini-Falahat model provides the possibility to investigate the effect of pressure, pore shape, fluid saturation, and mineralogy, simultaneously. In this research, the Jalini-Falahat rock physics model is used to study the elastic properties of an oil reservoir in south Iran. Then, the feasibility of 4D seismic is carried out in zero-dimension (petro-elastic range), well scale (1D) and reservoir scale (3D).

Materials and Methods

In this study, information and data from an oil field in south Iran are used. There are two reservoir formations, Burgan (sandstone) and Yamama (carbonate). To identify the most appropriate model for simulating the reservoir's seismic response, six of the most frequently used models are studied. These models include Hertz-Mindlin, Gassmann, Kuşter-Toksöz, DEM, Shiri-Falahat, and Jalini-Falahat. Gassmann's model, which is one of the most common equations in the industry, only considers the amount of porosity and does not consider the effect of pore type. Meanwhile, the Kuşter-Toksöz method performs better due to their consideration of pore shape. However, this equation does not consider the effect of pressure. The method presented by Shiri and Falahat combines the Kuşter-Toksöz, Gassmann, and MacBeth pressure equations. This model considers the effect of the pore shape and pressure in the reservoir at the same time. The Shiri-

Falahat model is more accurate than the previous models. However, due to the use of the Kuşter-Toksöz model, using this method in rocks with fractures or high porosity values causes errors.

The Jalini-Falahat model, which is an improved version of the Shiri-Falahat method, utilizes the differential Kuşter-Toksöz model [11] instead of the Kuşter-Toksöz model. In this method, the porosity is added to the rock matrix gradually, solving the problem of the previous model in fractured or highly porous rocks. Here, the Jalini-Falahat model is used in both the Burgan and Yamama formations to study the feasibility of 4D seismic operation and its success in monitoring water injection and production. This study is performed in 3 steps. First, the feasibility study is performed in zero-dimension (petro-elastic range) for 3 scenarios of injecting formation water, seawater, and smart water. Then, 1D studies are conducted to simulate the seismic response caused by the rising of oil-water contact in a well using well logs. Finally, the 3D investigation is performed to monitor the changes in seismic response due to the rising of oil-water contact in a synthetic seismic cube of data.

Results and Discussion

The simulation of formation water, seawater, and smart water injection process in zero-dimension shows that the 4D seismic operation on both Burgan and Yamama formations is feasible. The acoustic impedance in Burgan formation changes by more than 5% in each scenario, which will be visible in 4D seismic responses. In Yamama formation, the seismic responses are slightly lower than Burgan. However,

both formations show a change in acoustic impedance between -4.5% and 7% for pressure and saturation impacts. Therefore, the 4D seismic responses can be used for monitoring water injection or production.

In 1D studies, the synthetic seismic responses are provided by the Jalini-Falahat model in a well under different scenarios of rising oil-water contact in each formation. For the seismic response to indicate a change in reservoir properties, the amplitude should change by at least 10%. Investigating the seismic response of the Burgan formation indicates that any rise in oil-water contact over 3 meters will be visible (up to 130% change in amplitude). The same approach in Yamama formation results in a 7-meter threshold which is confirmed to be available by reservoir models. To study the feasibility of 4D seismic in field scale, the calculations are performed on two data cubes from two different years. The investigation on Burgan formation is performed on the data from 1974 and 2000. Due to production, the gas cap is displaced and the oil-water contact rises. Both phenomena and their cumulative effect on amplitude (RMS) are shown in Fig. 1. As shown in the figure, the amplitude is changed up to 50%, which is recordable by 4D seismic data. The same analysis was carried out for Yamama reservoir. The production from Yamama did not begin until 2004. So, the calculations are performed for 2004 and 2020. In addition, due to the limited production from Yamama, there is no change in gas saturation. The 4D seismic signal in Yamama due to rising WOC is above detectable level. Thus, 4D seismic data in the Yamama reservoir is also considered to be feasible and can be used to monitor water injection processes.

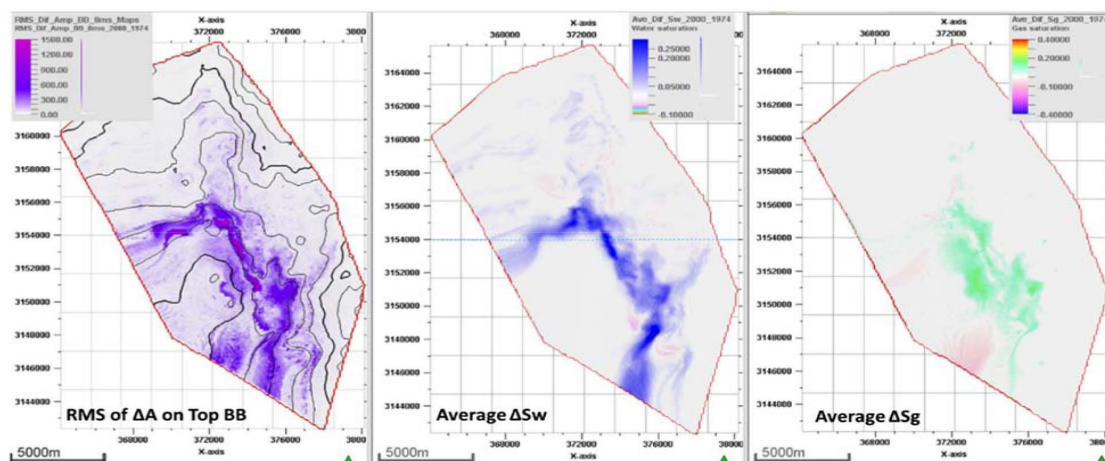


Fig. 1 From left to right: variation of seismic amplitude, water saturation, and gas saturation in Burgan formation between 1974 and 2000.

Conclusions

In this study, the feasibility of 4D seismic operation for monitoring water injection and production is investigated in an oil field in south Iran. The feasibility study is performed in zero, one, and three dimensions on two reservoir formations: Burgan and Yamama. The seismic responses are estimated using

the Jalini-Falahat rock physics model [9]. In zero dimension, three scenarios are studied: 1) formation water injection, 2) seawater injection, and 3) smart water injection. The acoustic impedance calculated under different scenarios in both formations changes from -4.5% to +7% which can be recorded using 4D seismic studies. In the next step, the 1D studies are

performed on a well under using synthetic seismic data for different scenarios of rising oil-water contact. Any displacement of the contact over 3 meters in the Burgan formation and over 7 meters in the Yamama reservoirs can be recorded in 4D seismic operations. In three-dimensional studies, the same procedure is performed on 3D data for two different years. According to the results, the change in acoustic impedance between 1974 and 2000 for the Burgan formation is about 50% and between 2004 and 2020 for the Yamama formation is about 20%. Therefore, it is possible to monitor the changes in the oil-water contact in both the Burgan and Yamama reservoirs in 3D. Considering the results of the feasibility study, 4D seismic is recommended for monitoring injection and production from this field.

References

1. Fayemendy, C. (2015). Time-lapse Seismic: Multidisciplinary Tool for Reservoir Management, EAGE short Course Publications.
2. Falahat, R. and Farrokhnia, F. (2020). Rock physics modelling of the carbonate reservoirs: A log-based algorithm to determine the pore aspect ratio. *Journal of Applied Geophysics*, 103930, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103930.
3. Shiri, S. and Falahat, R. (2020). Rock physics modeling and 4D seismic feasibility study in one of the Iranian carbonate reservoirs. *Journal of Applied Geophysics*, 103855, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103855.
4. Mindlin, R. D. (1949), Compliance of elastic bodies in contact: *Journal of Applied Mechanics*, 16, 259–268, doi.org/10.1115/1.4009973.
5. Gassmann, F. (1951). Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, 16(4), 673-685, doi.org/10.1190/1.1437718.
6. Kuşter, G.T. and Toksöz, M.N. (1974). Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations. *Geophysics*, 39(5), 587-606, doi.org/10.1190/1.1440450.
7. Xu, S. and Payne, M.A. (2009). Modeling elastic properties in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 28(1), 66-74, doi.org/10.1190/1.3064148.
8. Nishizawa, O. (1982). Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks transversely isotropic case. *Journal of Physics of the Earth*, 30(4), 331-347, doi.org/10.4294/jpe1952.30.331.
9. Jalini, S., Falahat, R. (2024), Analyzing Rock Physics Models for 3D and 4D Seismic Feasibility Study in the Carbonate Reservoirs and Developing a Hybrid Algorithm, *Pure and Applied Geophysics*, submitted.
10. MacBeth, C. (2004). A classification for the pressure-sensitivity properties of a sandstone rock frame. *Geophysics*, 69(2), 497-510, doi.org/10.1190/1.1707070.
11. Liu, Z., & Sun, S. Z. (2015). The differential Kuşter–Toksöz rock physics model for predicting S-wave velocity. *Journal of geophysics and engineering*, 12(5), 839-848, doi.org/10.1088/1742-2132/12/5/839.

امکان سنجی پایش تزریق آب با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

ساقی جلینی و رضا فلاحت*

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

چکیده

در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش تقاضا و کاهش ذخایر نفتی، روش‌های افزایش برداشت از مخازن نفت و گاز مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها تزریق آب به مخزن است. به دلیل پیچیدگی‌های ساختمانی و رسوب‌شناسی اکثر مخازن ایران، موفقیت روش‌های افزایش برداشت به‌ویژه تزریق آب با عدم قطعیت بالایی همراه است. بنابراین پایش (مانیتورینگ) و کنترل فرآیند تزریق با استفاده از عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی به منظور کاهش ریسک عملیات و افزایش نرخ بهره‌برداری، ضروری می‌باشد. در این مطالعه امکان سنجی عملیات لرزه‌نگاری با هدف پایش فرآیند تزریق آب در دو لایه مخزنی بورگان (ماسه‌سنگی) و یاماما (کربناته) در یکی از میادین نفتی جنوب ایران در مقیاس‌های صفر، یک و سه بعدی انجام گردید. به این منظور، ابتدا بررسی‌های کاملی بر روی مدل‌های فیزیک سنگ موجود انجام شد و مدل مناسب فیزیک سنگ که اکثر پارامترهای موثر را پوشش دهد انتخاب گردید. در ادامه، تغییرات لرزه‌ای ناشی از سه حالت تزریق آب سازندی، تزریق آب دریا و تزریق آب هوشمند در هر لایه بررسی شده است. نتایج به دست آمده در مقیاس صفر بعدی نشان داد که مقاومت صوتی به مقدار $4/5$ الی $7/$ برای حالت‌های مختلف در هر دو مخزن ماسه‌سنگی و کربناته تغییر می‌کند. برای انجام مطالعات در مقیاس یک بعدی، داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی با استفاده از نگاره‌های چاه و برای حالت‌های مختلف بالا آمدن سطح تماس آب-نفت تولید شد. نتایج مدل‌سازی یک بعدی نشانگر آن است که جابه‌جایی سطح تماس بیشتر از 3 m در مخزن بورگان و بیشتر از 7 m در مخزن یاماما قابل ثبت توسط داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی خواهد بود. برای انجام مطالعات در مقیاس سه بعدی، داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی سه بعدی با استفاده از مدل‌های استاتیک و دینامیک مخازن بورگان و یاماما تولید شدند. مطالعات امکان سنجی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری در مقیاس سه بعدی نیز نشانگر امکان پذیر بودن داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی برای پایش تغییرات سطح تماس هر دو مخزن بورگان و یاماما در مقیاس مخزنی می‌باشد. بنابراین، عملیات برداشت داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی در میدان انتخاب شده برای پایش و بهینه‌سازی برنامه تولید و پیشنهاد مکان مناسب برای حفر چاه‌های جدید پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: تزریق آب، لرزه‌نگاری چهار بعدی، فیزیک سنگ، امکان سنجی لرزه‌نگاری، نگاره چاه، پایش مخازن

*مسئول مکاتبات

rezafalahat2001@gmail.com

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2023.5267.3338)

مقدمه

در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و گسترش صنایع موجب افزایش تقاضا در زمینه انرژی و به‌ویژه نفت و گاز شده است. از این رو بهبود و افزایش برداشت از مخازن در اولویت شرکت‌های تولیدکننده نفت قرار گرفته است [۱]. در ایران نیز علی‌رغم کاهش تدریجی تولید از مخازن و با توجه به حجم عظیم منابع نفت و گاز باقیمانده، استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت مورد توجه قرار گرفته است. معمولاً عملیات ازدیاد برداشت در مقیاس آزمایشگاهی بررسی و سپس تأثیرپذیری آن با استفاده از مدل و شبیه‌ساز مخزن مطالعه می‌گردد. علی‌رغم حصول نتایج امیدوارکننده در این زمینه، اجرای این عملیات در مقیاس میدان تضمین نمی‌شود [۲]. در ایران نیز تزریق آب و گاز طبیعی در تعدادی از مخازن انجام شده است که در برخی موارد با تولید بالای آب تزریق شده و یا آب سازندی همراه بوده است. از این رو پایش^۱ فرآیند تولید و تزریق در مخازن ضروری به نظر می‌رسد.

بدون عملیات پایش، تعیین سرنوشت مواد تزریق شده در مخزن با عدم قطعیت بالایی همراه خواهد بود. وجود مسیرهای پیش‌بینی نشده از قبیل گسل‌های کوچک، نواحی تراوای بین چاه‌ها، ارتباط سازند مخزنی با سازندهای بالایی و پایینی و ... از جمله مواردی هستند که می‌توانند سبب شکست پروژه شوند [۳]. از سوی دیگر، فرآیند پایش امکان بررسی و رفع مشکلاتی نظیر برش آب زودرس^۲ در حین تزریق آب و یا باقیماندن بخش قابل توجهی از نفت در داخل مخزن به دلیل پدیده انگشتی شدن^۳ را فراهم می‌کند [۴]. لذا افزایش موفقیت و کاهش ریسک و هزینه عملیات ازدیاد برداشت در گرو موفقیت فرآیند پایش است.

به منظور انجام عملیات پایش از روش‌های متعددی نظیر لرزه‌نگاری چهاربعدی، نگاره‌های تولید^۴ و پتروفیزیکی تکراری، تزریق نشانگرهای شیمیایی^۵ و

... استفاده می‌شود [۵]. در این میان، لرزه‌نگاری چهاربعدی به دلیل پوشش کامل ناحیه مخزنی در سه بعد، به عنوان روش اصلی پایش در نظر گرفته می‌شود. این روش با بررسی جهت حرکت آب و گاز و همچنین تغییرات فشار در مخزن، امکان شناسایی نفت و گاز باقیمانده^۶ و نیز طراحی بهینه چاه‌های تولیدی و تزریقی را فراهم می‌کند. نمونه‌ای از به کارگیری موفق این شیوه، در دریای شمال اروپا به چشم می‌خورد که سبب افزایش ۲۵٪ نرخ بهره‌برداری در یک دوره ۱۵ ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۰) شده است [۲].

اجرای مناسب عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی با هدف پایش فرآیند تزریق یا تولید آب نیازمند مطالعات اولیه در خصوص امکان‌سنجی این شیوه است. در این مرحله، حالت‌های^۷ مختلف تزریق و تولید آماده شده و سپس پاسخ لرزه‌ای هر کدام از این حالت‌ها محاسبه می‌گردد. به منظور تخمین دقیق این پاسخ‌ها از مدل‌های فیزیک سنگ و سیال^۸ استفاده می‌شود. این مدل‌ها ضمن برقراری ارتباطی ریاضی بین پاسخ لرزه‌ای و خواص سنگ و سیال مخزن، امکان مطالعه تغییرات این خواص با زمان را فراهم می‌کنند.

بسیاری از مدل‌های فیزیک سنگی موجود، مربوط به مخازن ماسه‌سنگی هستند. مخازن کربناته به دلیل وجود انواع تخلخل و نیز چگالی و سرعت صوت بالای توده سنگ، دارای پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به مخازن ماسه‌ای می‌باشند [۶]. لذا استفاده از مدل‌های فیزیک سنگی رایج برای مخازن کربناته عمدتاً سبب انحراف نتایج نسبت به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نگاره‌های چاه می‌گردد [۷-۹]. از این رو دقت محاسبات در هر

1. Monitoring
2. Water Breakthrough
3. Fingering
4. Production Logs
5. Tracers
6. Bypassed Oil and Gas
7. Scenarios
8. Rock and Fluid Models

مخزن به استفاده از مدل مناسب آن مخزن وابسته است.

برخی از رایج‌ترین مدل‌های فیزیک سنگی موجود در صنعت برای سنگ‌های عبارتند از مدل هرتز-میندلین [۱۰]، مدل گسمن [۱۱]، مدل کاستر-توکسوز [۱۲]، مدل شو-پین [۱۳]. هر یک از این مدل‌ها بر اساس فرضیات اولیه خاصی ارائه شده و دارای محدودیت‌هایی هستند. مدل هرتز-میندلین به عنوان یکی از رایج‌ترین مدل‌های تماسی و به منظور محاسبه خواص کشسان مخازن ماسه‌سنگی کم عمق مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. این مدل که برای سنگ‌های ماسه‌ای غیرمستحکم با دانه‌های کروی ارائه شده است، اثر تغییر فشار در مخزن را لحاظ می‌کند اما شکل حفرات را در نظر نمی‌گیرد. لذا با توجه به عمق بالای مخازن ایران و نیز تنوع شکل فضاهای خالی در سنگ‌های کربناته، استفاده از آن در مخازن کشور مناسب نمی‌باشد.

مدل گسمن که از رایج‌ترین معادلات در صنعت می‌باشد، تنها مقدار تخلخل را در نظر می‌گیرد و اثر شکل حفرات را لحاظ نمی‌کند. این در حالی است که وجود تخلخل‌های قالبی^۱ و حفره‌ای^۲ عمدتاً سبب افزایش و وجود شکستگی‌ها سبب کاهش سرعت می‌گردد. در این میان، روش کاستر-توکسوز و مشتقات آن [۱۳ و ۱۵] به دلیل در نظر گرفتن شکل حفرات عملکرد بهتری دارند. این مدل‌ها با استفاده از متغیری به نام ضریب هندسی حفره^۳ شکل حفرات را به صورت متغیری ریاضی مطرح می‌کنند. این ضریب به صورت نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی فرضی دربرگیرنده حفره تعریف می‌شود. با وجود این، معادلات فوق نیز اثر تغییر فشار در مخزن را در نظر نمی‌گیرند. همچنین با توجه به اینکه رابطه کاستر-توکسوز برای تخلخل‌های پایین نوشته شده است، استفاده از این روابط در سنگ‌های دارای شکستگی (نظیر

برخی از مخازن کربناته ایران) سبب بروز خطا می‌شود.

شیری و فلاحت با ترکیب روابط کاستر-توکسوز، گسمن و نیز رابطه فشاری مک بث [۱۶] مدل فیزیک سنگی جدیدی را ارائه کردند که تأثیر شکل فضاهای خالی و تغییرات فشار در مخزن را به طور همزمان در نظر می‌گرفت [۸]. مدل شیری-فلاحت نسبت به مدل‌های قبلی دقیق‌تر بوده و در مخازن کربناته بهتر عمل می‌کند. با این وجود، به دلیل استفاده از رابطه کاستر-توکسوز، به کارگیری این روش در سنگ‌های دارای شکاف یا مقادیر بالای تخلخل باعث بروز خطا می‌شود.

شکل بهبودیافته مدل شیری-فلاحت توسط جلینی و فلاحت ارائه شده است [۱۷]. در این روش به جای مدل کاستر-توکسوز از ترکیب روش کاستر-توکسوز و نظریه محیط موثر جزئی^۴ [۱۸] استفاده شده است. در این روش ترکیبی که به اختصار کاستر-توکسوز جزئی^۴ [۱۹] نامیده می‌شود، با اضافه کردن تدریجی سهم فضاهای خالی، میتوان خواص کشسان را برای هر مقدار عددی از تخلخل محاسبه نمود. بنابراین مدل جلینی-فلاحت امکان بررسی اثر تغییر فشار، شکل حفرات، اشباع سیالات و نوع کانی را به طور همزمان فراهم می‌کند [۱۷]. لذا این مدل برای مطالعه امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری در مخازن ماسه‌سنگی و کربناته ایران مناسب خواهد بود.

در این مقاله ابتدا توانایی مدل فیزیک سنگی جلینی-فلاحت در مطالعه خواص یکی از مخازن نفتی ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی تحت سه حالت تزریق یا تولید آب سازندی، آب دریا و آب هوشمند در محدوده صفر بعدی (پتروالاستیک) مورد بررسی قرار گرفته و عدم قطعیت هر روش با

1. Moldic

2. Vuggy

3. Pore Aspect Ratio

4. Differential Effective Medium Theory

5. Differential Kuşter-Toksoz

استفاده از این مدل تعیین می‌شود. سپس به منظور بررسی دقیق‌تر امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس چاه و میدان انجام می‌شود و میزان احتمال موفقیت پروژه تعیین می‌گردد.

روش مطالعه

در مطالعات امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی، از مدل‌های فیزیک سنگی به منظور کمی کردن تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مخزن بر روی خواص کشسانی و لرزه‌ای آن استفاده می‌شود. هر یک از این مدل‌ها براساس شرایط و فرضیات اولیه خاصی ارائه می‌شوند. لذا پیش از انجام محاسبات، شناسایی محدودیت‌های هر مدل و میزان حساسیت آن نسبت به خواص مختلف مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به هدف نهایی مطالعه، مدلی مناسب تلقی می‌شود که خواص مخازن ایران از جمله تنوع شکل فضاهای خالی در سنگ‌های کربناته، امکان وجود شکاف، عمق زیاد، پیچیدگی کانی‌شناسی، تغییرات فشار و اشباع را لحاظ کند. به این منظور مدل جلینی-فلاحی در نظر گرفته شده است.

مدل مورد نظر در دسته مدل‌های ترکیبی قرار می‌گیرد [۲۰]. در این مدل، ابتدا خواص سیالات مخزن (آب، گاز و نفت) شامل چگالی و ضریب حجمی با استفاده از روابط بتزل و ونگ [۲۱] به طور جداگانه محاسبه می‌شود. سپس این نتایج با یکدیگر ترکیب شده و خواص کشسان ترکیب سیالات را مشخص می‌کنند. برای این منظور از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$K_{fl} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{K_i}} \quad (1)$$

در این رابطه K_{fl} ضریب حجمی سیال مخزن، S_i اشباع سیال نام و K_i ضریب حجمی سیال نام است. در قدم بعدی خواص کشسان سنگ خشک با استفاده از روش کاستر-توکسوز جزئی (DKT) [۱۹] محاسبه می‌شود. این شیوه که ترکیبی از دو مدل کاستر-توکسوز [۱۲] و محیط موثر جزئی (DEM)

[۱۸] است، نقاط قوت هر دو روش را به طور همزمان فراهم می‌کند. روش کاستر-توکسوز روشی سریع است. اما این روش برای فضاهای خالی پراکنده ارائه شده است. لذا استفاده از این روش در سنگ‌های با تخلخل بالا یا دارای شکاف سبب بروز خطا می‌شود. در مدل DEM به دلیل اضافه کردن تدریجی تخلخل این مشکل وجود ندارد. اما این روش نسبت به سایر روش‌ها کندتر می‌باشد. لذا ترکیب این دو مدل سبب دستیابی به پاسخی سریع و دقیق می‌گردد.

به منظور اعمال اثر فشار، نتایج به دست آمده از DKT در معادله مک بث [۱۶] قرار می‌گیرند و سپس اثر حضور سیال توسط معادله گسمن [۱۱] به مجموعه اضافه می‌شود. همچنین استفاده از مدل گسمن سبب تطابق محدوده فرکانسی بین مطالعات آزمایشگاهی و نگاره‌های چاه با نتایج لرزه‌نگاری می‌شود. خواص کشسان به دست آمده از این مدل از طریق روابط ۲ و ۳ به سرعت موج صوتی تبدیل شده و با نگاره‌های صوتی چاه یا سرعت لرزه‌ای مقایسه می‌شوند.

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (3)$$

در این روابط V_s و V_p به ترتیب سرعت موج تراکمی و برشی هستند. همچنین K_{sat} و μ_{sat} ضرایب حجمی و برشی سنگ اشباع و ρ_{sat} چگالی سنگ اشباع می‌باشند. همچنین روابط ۴ و ۵ جهت محاسبه مقاومت صوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛

$$I_p = V_p \rho_{sat} \quad (4)$$

$$I_s = V_s \rho_{sat} \quad (5)$$

در این روابط I_s و I_p به ترتیب معرف مقاومت صوتی موج تراکمی و برشی هستند.

با استفاده از مدل جلینی-فلاحی و روابط ۲ تا ۵، میزان تأثیر تغییر خواص مخزن بر پاسخ لرزه‌ای

قابل بررسی خواهد بود. به این ترتیب می‌توان با تغییر مقدار عددی خواص مخزن نظیر چگالی، اشباع، فشار و ... اثربخشی عملیات لرزه‌نگاری تحت حالت‌های مختلف تزریق و تولید را مطالعه نمود. در ادامه، با استفاده از روش ذکر شده، اقدام به انجام مطالعات امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی برای پایش تزریق آب در هر دو مخزن ماسه‌سنگی و کربناته یکی از میداین نفتی جنوب ایران شد. این مطالعات در مقیاس صفر بعدی، یک بعدی و سه بعدی انجام گردید.

معرفی میدان

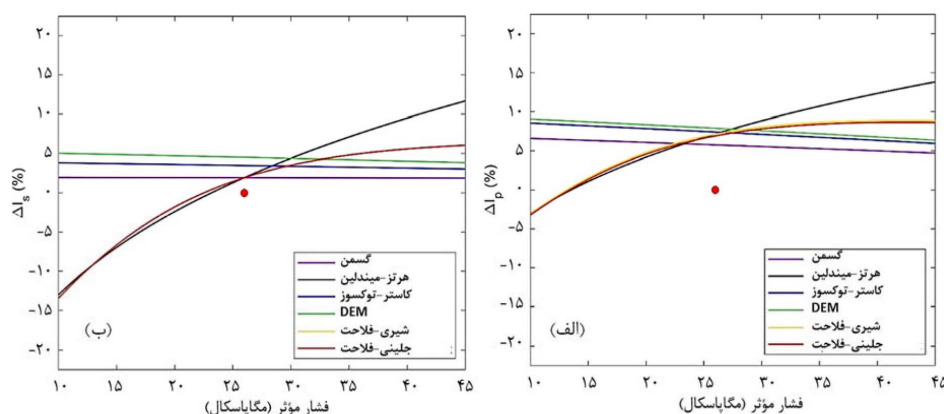
به منظور امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی و مشاهده اثر فرآیند تزریق آب بر پاسخ‌های لرزه‌ای، میدانی در جنوب ایران در نظر گرفته شده است. این میدان دارای دو سازند مخزنی اصلی بورگان و یاماما می‌باشد. سازند بورگان از جنس ماسه‌سنگ (کوارتز و رس) و سازند یاماما کربناته (آهک و دولومیت) است و سیالات مخزن شامل آب و نفت به همراه کلاهدک گازی می‌باشند. سازند بورگان دارای فضاهای خالی بین‌دانه‌ای و یاماما حاوی تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، قالبی و حفره‌ای است. اطلاعات موجود از منطقه شامل نگاره‌های مختلف تخلخل، چگالی، اشباع، سرعت صوت و سنگ‌شناختی^۱ و نیز داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به بعدیسه بعدی اولیه می‌باشد. همچنین با توجه به ماهیت میدان و تاریخچه تولید آن، فشار سازند بورگان به زیر فشار حباب رسیده و گاز آزاد شده است و احتمالاً سبب تشکیل کلاهدک گازی ثانویه گشته است.

بررسی و تحلیل مدل‌های فیزیک سنگی با هدف انتخاب مدل مناسب

جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای دو سازند مخزنی نسبت به تغییر خواص سنگ و سیال آنها از مدل جلینی-فلاحی^[۱۷] استفاده شده است. حساسیت‌سنجی این مدل نسبت به سایر مدل‌های رایج در صنعت

نفت نشان می‌دهد که این مدل در نمایش اثر تغییرات خواص مخزنی بر پارامترهای لرزه‌ای بهتر عمل می‌کند. **شکل ۱** میزان تأثیر تغییر فشار و اشباع مخزن بورگان بر ۶ مدل رایج شامل هرتز-میندلین، گسمن، کاستر-توکسوز، DEM، شیر-فلاحی و جلینی-فلاحی را نشان می‌دهد. در این تصویر تغییر مقاومت صوتی موج تراکمی و برشی در اثر کاهش اشباع نفت به میزان ۷۰٪ در فشارهای مختلف MPa ۱۰ تا ۴۵ نشان داده شده است. نقطه قرمز نشان دهنده شرایط اولیه مخزن با اشباع نفت ۸۸٪ و فشار موثر ۲۶ MPa است. جاننشینی نفت با آب سبب افزایش چگالی و ضریب حجمی سنگ شده و در نهایت موجب افزایش سرعت و مقاومت صوتی موج تراکمی می‌گردد (**شکل ۱، الف**). چون موج برشی به نوع سیال وابسته نیست، تغییرات سرعت و مقاومت صوتی آن کمتر خواهد بود (**شکل ۱، ب**). باتوجه به این که تمام مدل‌ها برای افزودن اثر سیال به سنگ خشک با مدل گسمن ترکیب می‌شوند، همه مدل‌ها نسبت به تغییر اشباع حساس هستند. با این وجود، مدل‌های DEM و گسمن به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیرپذیری را از اشباع نشان می‌دهند.

در حین تولید، فشار مخزن افت کرده و سبب افزایش فشار موثر (اختلاف فشار طبقات فوقانی و فشار مخزن) میشود. عکس این روند در فرآیند تزریق آب اتفاق می‌افتد. همانطور که در **شکل ۱** مشخص است، معادلات گسمن، DEM و کاستر-توکسوز به تغییر فشار حساس نیستند. شیب کم تغییرات در این مدل‌ها ناشی از اثر فشار حین محاسبه ضریب حجمی سیال توسط معادلات بتزل و ونگ^[۲۱ و ۲۲] می‌باشد. باید توجه داشت که مدل هرتز-میندلین با وجود حساسیت به فشار، به دلیل فرضیات اولیه حاکم، فقط در مخازن کم عمق ماسه‌ای قابل استفاده است. لذا مدل‌های شیر-فلاحی و جلینی-فلاحی بهترین نتایج را در زمینه فشار ارائه می‌دهند.



شکل ۱ (الف) تغییرات مقاومت صوتی موج تراکمی و (ب) تغییرات موج برشی در اثر جانشینی ۷۰٪ از نفت مخزن با آب به ازای مقادیر مختلف فشار موثر.

تغییرات مهم مخزنی را در نظر می‌گیرد. لذا از این مدل برای مطالعه امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری در میدان مورد نظر استفاده شد. برای این منظور، حالت تولید و تزریق آب متناسب با تاریخچه تولید میدان، نحوه برداشت و روند احتمالی تزریق در آینده در نظر گرفته شده است. این حالت‌ها عبارتند از: (۱) تزریق آب سازندی، (۲) تزریق آب دریا و (۳) تزریق آب هوشمند.

در فرآیند تزریق آب دریا و آب هوشمند از ترکیب سیال ارائه شده در مراجع برای تعریف خواص سیال تزریقی استفاده شده است [۲۳]. جدول ۱ ترکیب این سیالات را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای آب هوشمند از ترکیبی مشابه آب دریا با غلظت سولفاتی ۸ برابر معمول استفاده شده است.

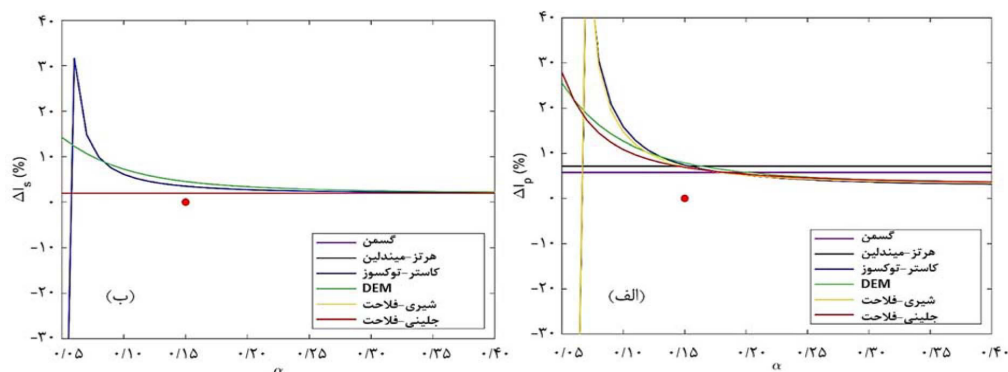
امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس صفر بعدی

هر یک از حالت‌های تزریق انتخاب شده، با استفاده از مدل جلینی-فلاحت و به طور جداگانه در مخازن بورگان و یاماما شبیه‌سازی و میزان تغییرات مقاومت صوتی (ΔI_p و ΔI_s) آنها تعیین شده است. به این ترتیب میزان حساسیت عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی نسبت به تغییر خواص مختلف مخزن در هر حالت مشخص گردیده است که در ادامه بحث می‌گردد.

در ادامه، تأثیر مقدار و تغییرات تخلخل بررسی شد و مشخص گردید که به جز مدل هرتز-میندلین، سایر مدل‌ها از حساسیت خوبی نسبت به تخلخل برخوردارند. مدل هرتز-میندلین در تخلخل‌های پایین رفتار نادرستی را نشان می‌دهد و برای محاسبه تغییرات موج تراکمی مناسب نیست. حساسیت مدل‌ها نسبت به شکل حفرات در شکل ۲ آورده شده است. در این تصویر، اثر تغییر اشباع نفت به میزان ۷۰٪ در حضور فضاهای خالی با ضرایب هندسی ۰/۰۵ (شکاف) تا ۰/۴ (حفرات قالبی) بر مقاومت صوتی بررسی شده است. با کروی‌تر شدن حفرات و افزایش ضریب هندسی، ساختار سنگ محکم‌تر شده و حساسیت آن به تغییر نوع و حجم سیال کاهش می‌یابد. دو مدل گسمن و هرتز-میندلین شکل حفرات را در نظر نمی‌گیرند. لذا این مدل‌ها برای شبیه‌سازی مخازن کربناته با فضاهای خالی متنوع مناسب نیستند. به علاوه مدل کاستر-توکسوز علی‌رغم در نظر گرفتن شکل حفرات، در ضرایب هندسی کمتر از ۰/۱ (شکاف) پاسخ اشتباهی می‌دهد. روش شیر-فلاحت نیز که بر اساس مدل کاستر-توکسوز بنا شده است، همین نقص را نشان می‌دهد. دو مدل DEM و جلینی-فلاحت در این زمینه بهترین نتایج را فراهم می‌کنند.

امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی

بنابر آنچه بیان شد، مدل جلینی-فلاحت اثر تمام



شکل ۲ (الف) تغییرات مقاومت صوتی موج تراکمی و (ب) تغییرات موج برشی در اثر جانشینی ۷۰٪ از نفت مخزن با آب در حضور فضاهای خالی با اشکال متنوع.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی یون‌های تشکیل دهنده آب دریا و آب هوشمند انتخابی جهت تزریق به مخازن بورگان و یامما

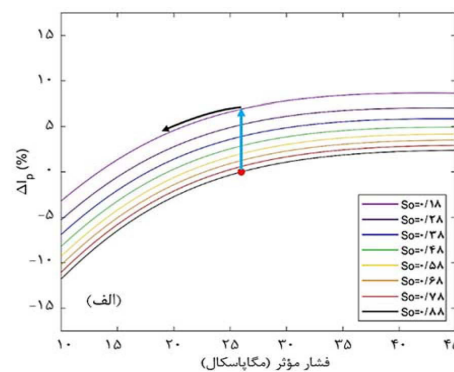
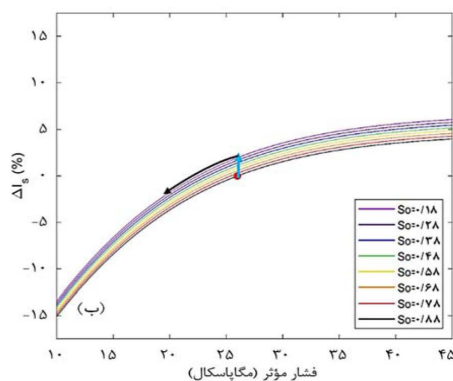
Eq. TDS	TDS	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	یون‌های موجود (ppb)
۴۳/۱۰	۴۳/۲۸	۱۳/۶۴	۰/۳۹	۱/۷۳	۰/۰۱	۲/۸۵	۰/۰۱	۲۴/۶۵	آب دریا
۳۵/۷۳	۴۹/۵۱	۱۲/۹۷	۰/۴۹	۲/۰۶	۰/۰۱	۲۷/۰۹	۰/۰۱	۶/۸۸	آب هوشمند

* Eq. TDS معادل NaCl برای مجموع یون‌های محلول موجود

سازند بورگان

همچنین میزان تغییرات مقاومت صوتی در صورت کاهش اشباع نفت با خطوط رنگی و به ازای مقادیر مختلف فشار مؤثر مخزن از ۱۰ MPa تا ۴۵ MPa قابل مشاهده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، کاهش ۷۰٪ حجم نفت در اثر تزریق و جانشینی آن توسط آب (فلش آبی‌رنگ) سبب افزایش مقاومت صوتی سنگ اشباع می‌گردد. این افزایش در مورد ΔI_p حدود ۶/۹۱٪ (شکل ۳، الف) و در مورد ΔI_s که حساسیت کمتری به نوع سیال دارد، حدود ۱/۹۶٪ می‌باشد (شکل ۳، ب).

به منظور انجام محاسبات امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری با هدف پایش فرآیند تزریق در مخزن ماسه‌سنگی بورگان، اشباع اولیه نفت مخزن برابر با ۸۸٪ و فشار مؤثر آن حدود ۲۶ MPa در نظر گرفته شده است. در اولین حالت، تزریق آبی مشابه آب سازند به مخزن بررسی گشته و میزان حساسیت مقاومت صوتی نسبت به تغییر فشار و اشباع سیالات تعیین شده است (شکل ۳). در شکل ۳، نقطه قرمز رنگ نمایانگر شرایط اولیه مخزن است.



شکل ۳ نمایش تغییرات (الف) مقاومت صوتی تراکمی (ΔI_p) و (ب) مقاومت صوتی برشی (ΔI_s) در اطراف چاه تولیدی و تزریقی در مقابل تغییر فشار مؤثر برای جانشینی ۷۰٪ از نفت توسط آب طی فرآیند تزریق آب سازندی به مخزن.

مخزن بورگان در اثر تزریق آب، در مجموع، مقدار ΔI_p حدود $2/521\%$ افزایش و مقدار حدود ΔI_s $3/088\%$ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۲** (وسط جدول) جمع‌بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع 35% و 70% نشان می‌دهد. در حالت دوم، میزان حساسیت پاسخ لرزه‌ای مخزن نسبت به تغییر فشار و اشباع سیالات در صورت تزریق آب دریا به داخل مخزن بررسی می‌شود. ترکیب آب دریا مورد استفاده در این مرحله نیز در **جدول ۱** آورده شده است. جانشینی نفت با آب در اثر تزریق آب دریا سبب افزایش مقاومت صوتی سنگ (فلش آبی رنگ) نسبت به شرایط اولیه مخزن (نقطه قرمز رنگ) می‌گردد. این افزایش در مورد ΔI_p حدود $5/536\%$ و در مورد ΔI_s حدود $1/46\%$ می‌باشد. همچنین در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه 1000 psi (فلش سیاه رنگ)، مقدار مقاومت صوتی سنگ در اطراف محل تزریق کاهش می‌یابد که این کاهش برای مقاومت صوتی تراکمی و برشی به ترتیب برابر با $3/015\%$ و $4/548\%$ است. در اطراف چاه‌های تزریقی، در صورت کاهش 70% از نفت مخزن بورگان در اثر تزریق آب، در مجموع، مقدار حدود $2/521\%$ افزایش و مقدار ΔI_s حدود $3/088\%$ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۲** (وسط جدول) جمع‌بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع 35% و 70% نشان می‌دهد. حالت سوم، میزان حساسیت پاسخ لرزه‌ای در تزریق آب هوشمند به مخزن را بررسی می‌کند. همانطور که در **جدول ۱** مشخص است، میزان غلظت یون سولفات در آب تزریقی ۸ برابر معمول در نظر گرفته شده است. افزایش مقاومت صوتی در اثر کاهش

همچنین در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه 1000 psi (فلش سیاه رنگ)، مقدار مقاومت صوتی سنگ در اطراف محل تزریق کاهش می‌یابد که این کاهش در رابطه با مقاومت صوتی تراکمی و برشی به ترتیب برابر با $2/94\%$ و $4/56\%$ است. باید توجه داشت که تأثیر اثر فشار در اطراف چاه‌های تولیدی به چشم نمی‌خورد. زیرا چاه‌های تولیدی عموماً در فواصلی دورتر از چاه‌های تزریقی قرار دارند و معمولاً اثر فشار تزریق تا این فاصله نفوذ نمی‌کند. درحالی که در اطراف چاه‌های تزریقی، در صورت کاهش 70% از نفت مخزن بورگان در اثر تزریق آب، در مجموع، مقدار ΔI_p حدود $3/97\%$ افزایش و مقدار ΔI_s حدود $2/6\%$ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). این مقادیر در اطراف چاه تولیدی به ترتیب برابر با $6/91\%$ و $1/96\%$ می‌باشد. با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۲** (سمت راست) جمع‌بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع 35% و 70% نشان می‌دهد. در حالت دوم، میزان حساسیت پاسخ لرزه‌ای مخزن نسبت به تغییر فشار و اشباع سیالات در صورت تزریق آب دریا به داخل مخزن بررسی می‌شود. ترکیب آب دریا مورد استفاده در این مرحله نیز در **جدول ۱** آورده شده است. جانشینی نفت با آب در اثر تزریق آب دریا سبب افزایش مقاومت صوتی سنگ (فلش آبی رنگ) نسبت به شرایط اولیه مخزن (نقطه قرمز رنگ) می‌گردد. این افزایش در مورد ΔI_p حدود $5/536\%$ و در مورد ΔI_s حدود $1/46\%$ می‌باشد. همچنین در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه 1000 psi (فلش سیاه رنگ)، مقدار مقاومت صوتی سنگ در اطراف محل تزریق کاهش می‌یابد که این کاهش برای مقاومت صوتی تراکمی و برشی به ترتیب برابر با $3/015\%$ و $4/548\%$ است. در اطراف چاه‌های تزریقی، در صورت کاهش 70% از نفت

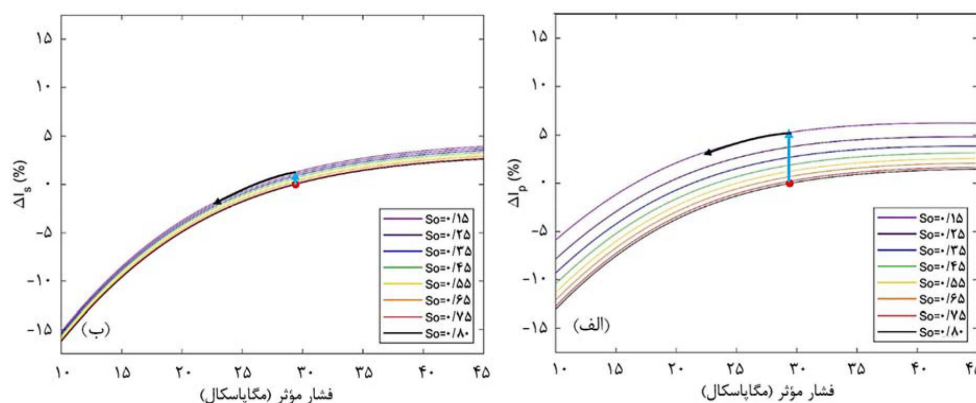
جدول ۲ میزان تغییرات I_p و I_s در مخزن بورگان به ازای تغییرات اشباع ۳۵٪ و ۷۰٪ و افزایش فشار ۱۰۰۰ psi در اثر تزریق سه نوع آب به داخل مخزن در اطراف چاه تزریقی و تولیدی.

خاصیت	تغییرات	تزریق آب سازندی				تزریق آب دریا				تزریق آب هوشمند			
		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی	
		$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$
Δp	psi	۰	۰	-۲/۹۴۰	-۴/۵۶۰	۰	۰	-۴/۵۴۸	-۳/۱۰۵	۰	۰	-۴/۵۴۷	-۳/۱۰۲۱
Δs		۰/۹۹۰	۱/۹۶۰	۲/۹۵۰	۰/۹۹۰	۲/۱۰۲۱	۵/۵۳۶	۰/۷۲۶	۲/۱۰۲۱	۰/۷۲۶	۱/۴۳۸	۰/۷۲۶	۱/۴۳۸
تغییر کلی به ازای تغییر اشباع ۳۵٪	۰/۹۹۰	۲/۹۵۰	۱/۹۶۰	۳/۹۷۰	۰/۱۰	۳/۸۱۲	۲/۰۲۱	-۰/۹۹۴	۰/۷۲۶	۲/۰۰۲	۵/۴۷۴	۱/۴۳۸	۵/۴۷۴
تغییر کلی به ازای تغییر اشباع ۷۰٪	۱/۹۶۰	۶/۹۱۰	۳/۹۷۰	۳/۹۷۰	۱/۴۶۰	-۳/۱۰۸۸	۵/۵۳۶	۲/۵۲۱	۱/۴۳۸	-۳/۱۰۹	۵/۴۷۴	۲/۴۵۳	۲/۴۵۳

۷۰٪ حجم نفت در این حالت (فلش آبی رنگ) برای ΔI_p حدود ۵/۴۷۴٪ و برای ΔI_s حدود ۱/۴۳۸٪ می باشد. علاوه بر این در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه ۱۰۰۰ psi در حین تزریق آب هوشمند، مقدار مقاومت صوتی سنگ در اطراف محل تزریق کاهش می یابد که این کاهش برای مقاومت تراکمی و برشی به ترتیب برابر با ۳/۰۲۱٪ و ۴/۵۴۷٪ است. همچنین در صورت تولید ۷۰٪ از نفت در اثر تزریق آب هوشمند، مقدار ΔI_p در اطراف چاه تزریقی حدود ۲/۴۵۳٪ افزایش و مقدار ΔI_s حدود ۳/۱۰۹٪ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می توان تغییرات اشباع شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۲** (سمت چپ) جمع بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع ۳۵٪ و ۷۰٪ نشان می دهد. همان طور که در **جدول ۲** مشخص است، اختلاف کمی بین انواع تزریق آب وجود دارد ولی در مجموع، هر سه حالت مورد نظر باعث تغییرات بیشتر از ۲٪ در مقاومت صوتی شده اند. بنابراین، پایش تزریق آب به مخزن بورگان توسط لرزه نگاری چهار بعدی قابل بررسی و مشاهده خواهد بود.

سازند یاماما

در بررسی سازند یاماما تحت سه حالت تزریق آب و با استفاده از مدل جلینی-فلاحت، میزان حساسیت متغیرهای لرزه ای این سازند نسبت به تغییر فشار و اشباع سیالات در حین تزریق محاسبه شد. در این مطالعه اشباع اولیه نفت ۸۰٪ و فشار حدود ۲۹ MPa در نظر گرفته شده است. **شکل ۴** نتایج شبیه سازی حالت تزریق آبی مشابه آب سازندی را نشان می دهد. در این تصویر، نقطه قرمز رنگ نمایانگر شرایط اولیه مخزن است. همان طور که مشخص است، کاهش ۶۵٪ حجم نفت در اثر تزریق سبب افزایش مقاومت صوتی سنگ اشباع می گردد (فلش آبی رنگ). این افزایش در مورد ΔI_p حدود ۵/۲۹٪ و در مورد ΔI_s که حساسیت کمتری به نوع سیال دارد، حدود ۱/۲۷٪ می باشد.



شکل ۴ نمایش تغییرات (الف) مقاومت صوتی تراکمی (ΔI_p) و (ب) مقاومت صوتی برشی (ΔI_s) در اطراف چاه تولیدی و تزریقی در مقابل تغییر فشار موثر برای جانشینی ۶۵٪ از نفت توسط آب طی فرآیند تزریق آب سازندی به مخزن.

تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۳** (وسط جدول) جمع‌بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع ۳۵٪ و ۶۵٪ نشان می‌دهد. حالت سوم میزان حساسیت پاسخ‌های لرزه‌ای را در صورت تزریق آب هوشمند بررسی می‌کند. همان‌طور که در **جدول ۱** دیده می‌شود، میزان غلظت یون سولفات در آب تزریقی ۸ برابر معمول در نظر گرفته شده است. در این حالت افزایش ΔI_p در اثر کاهش حجم نفت حدود ۴/۵۰۷٪ و ΔI_s حدود ۱/۰۶۷٪ می‌باشد. از سوی دیگر کاهش مقاومت صوتی تراکمی و برشی در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه ۱۰۰۰ psi به ترتیب برابر با ۲/۰۸٪ و ۳/۲۴۲٪ است (فلش سیاه رنگ). همچنین در اثر تزریق آب هوشمند، مقدار در اطراف چاه تزریقی حدود ۲/۴۲۷٪ افزایش و مقدار حدود ۲/۱۷۵٪ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود. **جدول ۳** جمع‌بندی نتایج فوق را به صورت عددی و برای دو کاهش اشباع ۳۵٪ و ۶۵٪ نشان می‌دهد.

کاهش فشار مخزن به اندازه ۱۰۰۰ psi سبب کاهش مقاومت صوتی در محل تزریق می‌شود (فلش سیاه رنگ). این کاهش برای مقاومت تراکمی و برشی به ترتیب برابر با ۱/۹۹٪ و ۳/۲۵٪ است. همچنین در صورت تولید ۶۵٪ از نفت مخزن یا ماما در اثر تزریق آب سازندی، مقدار ΔI_p در اطراف چاه تزریقی حدود ۳/۳٪ افزایش و مقدار ΔI_s حدود ۱/۹۸٪ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب تغییرات ΔI_p و ΔI_s می‌توان تغییرات اشباع‌شدگی و تغییرات فشار را از هم تمییز داد و بنابراین اقدام به پایش نمود.

در مرحله بعد، حالت تزریق آب دریا با ترکیب ارائه شده در **جدول ۱** بررسی شده است. افزایش ΔI_p در اثر کاهش حجم نفت حدود ۴/۵۴۹٪ و در مورد ΔI_s که حساسیت کمتری به نوع سیال دارد، حدود ۱/۰۸٪ می‌باشد (فلش آبی رنگ). علاوه بر این در اثر افزایش فشار مخزن به اندازه ۱۰۰۰ psi در اثر تزریق (فلش سیاه رنگ)، مقدار مقاومت صوتی تراکمی و برشی به ترتیب به ۲/۰۷۶٪ و ۳/۲۴۳٪ کاهش خواهد یافت. همچنین در صورت تولید ۶۵٪ از نفت، مقدار ΔI_p در اطراف چاه تزریقی حدود ۲/۴۷۳٪ افزایش و مقدار ΔI_s حدود ۲/۱۶۳٪ کاهش خواهد یافت (برآیند اثر تغییر اشباع شدگی و تغییر فشار). با ترکیب

همان‌طور که از مقایسه نتایج شبیه‌سازی سازند یاماما با نتایج سازند بورگان مشخص است (جدول‌های ۲ و ۳)، حساسیت پاسخ‌های ثبت شده به تغییرات این لایه در اثر فرآیند تزریق نسبت به بورگان مقداری کمتر است. با این وجود امکان استفاده از لرزه‌نگاری چهار بعدی برای بررسی و پایش اثر تزریق آب‌های مختلف در این مخزن نیز وجود دارد. البته تأثیر اشباع و فشار باید به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد.

امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس یک بعدی

به منظور امکان‌سنجی در محدوده یک بعدی (نگاره‌ها)، از داده‌های چاهی در منطقه مورد بررسی استفاده شده است. در این مرحله ابتدا از مدل جلینی-فلاحی برای شبیه‌سازی سرعت در شرایط اولیه چاه^۱ استفاده گردید. سپس نگاره‌های مقاومت صوتی و ضریب بازتاب^۲ محاسبه شد. در این مرحله، با استفاده از موجک استخراج شده از چاه، رد لرزه مصنوعی در محل چاه ساخته می‌شود. در مرحله بعد، عملیات فوق برای حالت‌های مختلف تولید و بالا آمدن سطح تماس آب و نفت تا ارتفاع‌های مشخص تکرار می‌گردد. مقایسه تغییرات دامنه در این حالت‌ها نسبت به شرایط اولیه، می‌تواند تغییرات ویژگی‌های مخزن طی بهره‌برداری از چاه را نشان دهد. البته میزان تغییرات دامنه باید از حد مشخصی (حد برش^۵) بیشتر باشد تا بر روی مقاطع لرزه‌ای دیده شود. با توجه به موارد مشابه در مقالات و پروژه‌های صنعتی دیگر، برای بررسی تغییراتی نظیر عمق سطح تماس، فشار، اشباع و ... باید دامنه رد لرزه ساخته شده در هر حالت، نسبت به شرایط اولیه بیش از ۱۰٪ تغییر کند. همچنین، لازم به توجه است که دامنه به دست آمده از این مراحل، باید نسبت به زمان (عمق) جابه‌جا (تصحیح) شود تا اثر تغییرات دامنه هر لایه بر

1. Base
2. Reflectivity Coefficient
3. Trace
4. Amplitude
5. Cut off

جدول ۳ میزان تغییرات ΔI_p و ΔI_s در مخزن یاماما به ازای تغییرات اشباع ۳۵٪ و ۶۵٪ و افزایش فشار ۱۰۰۰ psi در اثر تزریق آب به داخل مخزن در اطراف چاه تزریقی و تولیدی.

خاصیت	تغییرات	تزریق آب سازندی				تزریق آب دریا				تزریق آب هوشمند			
		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی		اطراف چاه تولیدی		اطراف چاه تزریقی	
		$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$	$\Delta I_p(\%)$	$\Delta I_s(\%)$
Δp	+۱۰۰۰ psi	۰	۰	-۳/۲۵۰	-۱/۹۹۰	۰	۰	-۳/۲۴۳	-۲/۰۷۶	۰	۰	-۳/۲۴۲	-۲/۰۸۰
Δs	۳۵٪	۰/۶۸۰	۱/۹۰۰	۰/۶۸۰	۱/۹۰۰	۰/۶۲۵	۱/۷۶۱	۰/۶۲۵	۱/۷۶۱	۰/۶۱۸	۱/۷۴۹	۰/۶۱۸	۱/۷۴۹
	۶۵٪	۱/۳۷۰	۵/۳۹۰	۱/۳۷۰	۵/۳۹۰	۱/۰۸۰	۴/۵۴۹	۱/۰۸۰	۴/۵۴۹	۱/۰۶۷	۴/۵۰۷	۱/۰۶۷	۴/۵۰۷
تغییر کلی به ازای تغییر اشباع ۳۵٪	۰/۶۸۰	۱/۹۰۰	-۲/۵۷۰	-۰/۰۹۰	۰/۶۲۵	۱/۷۶۱	-۲/۶۱۸	-۰/۳۱۵	۰/۶۱۸	۱/۷۴۹	-۲/۶۲۴	-۰/۳۳۱	
تغییر کلی به ازای تغییر اشباع ۶۵٪	۱/۳۷۰	۵/۳۹۰	-۱/۹۸۰	۳/۳۰۰	۱/۰۸۰	۴/۵۴۹	-۲/۱۶۳	۲/۴۷۳	۱/۰۶۷	۴/۵۰۷	-۲/۱۷۵	۲/۴۲۷	

در مخزن بورگان در شکل ۵ آورده شده است. در این تصویر، نگاره‌ها به ترتیب از چپ به راست شامل تخلخل موثر و کل، اشباع آب، سرعت موج تراکمی و برشی محاسبه شده از روش جلینی-فلاحی، چگالی، تغییرات اشباع در اثر بالا آمدن آب در لایه‌ها طی حالت‌های مختلف (جدول ۴)، مقاومت صوتی هر حالت، تغییر مقاومت نسبت به مقدار اولیه، دامنه واقعی ردلرزه بدون جابه‌جایی زمانی و مقدار جابه‌جایی زمانی موجود بین حالت‌های مختلف، تغییرات دامنه نسبت به دامنه اولیه و درصد تغییرات دامنه هستند. همچنین هر حالت در این تصویر با رنگ متفاوتی نشان داده شده است.

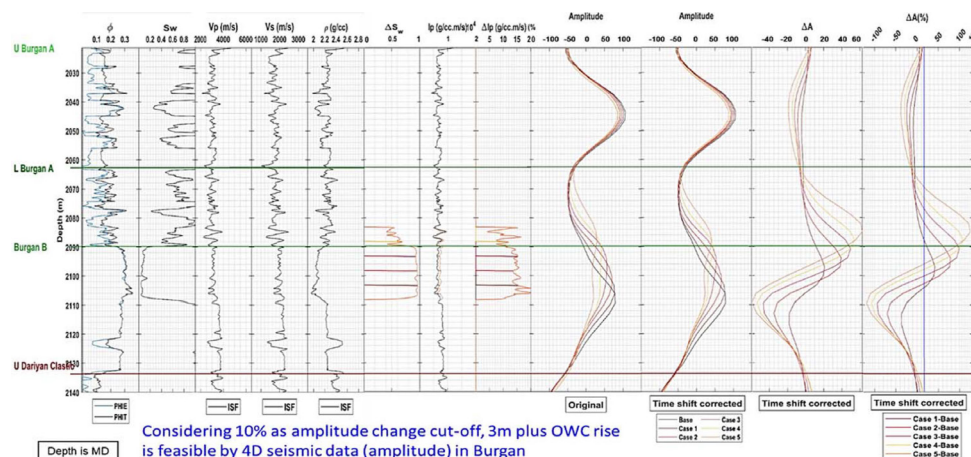
لایه‌های زیرین آن برطرف گردد و اختلاف مشاهده شده فقط بیانگر تغییر ویژگی‌های لایه مورد مطالعه باشد. جدول ۴ حالت‌هایی که در این بخش از مطالعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در هر حالت، تولید از طریق بالا آمدن سطح تماس آب و نفت (OWC)^۱ نسبت به عمق اولیه این سطح شبیه‌سازی شده است. این حرکت و بالا آمدن به طور تدریجی و در ۱۳ حالت مجزا بررسی می‌شود. با توجه به کمتر بودن ضخامت مخزن بورگان نسبت به سازند یاماما، بالا آمدن OWC در بورگان طی ۵ مرحله و در یاماما طی ۸ مرحله صورت گرفته است.

سازند بورگان

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در چاه مورد نظر

جدول ۴ حالت‌های مختلف بالا آمدن سطح تماس آب و نفت نسبت به عمق اولیه آن در دو سازند مخزنی بورگان و یاماما.

میزان بالا آمدگی میزان بالا آمدگی WOC (m)	حالت	یاماما	بورگان
		میزان بالا آمدگی WOC (m)	حالت
۵	۱	۵	۱
۱۰	۲	۱۰	۲
۲۰	۳	۱۵	۳
۳۰	۴	۲۰	۴
۴۰	۵	۲۵	۵
۵۰	۶		
۷۰	۷		
آبگرفتگی کامل	۸		



شکل ۵ نگاره‌های دامنه و تغییرات آن برای حالت‌های مختلف بالا آمدگی سطح تماس آب و نفت در چاهی در مخزن بورگان

تغییر مقاومت نسبت به مقدار اولیه، دامنه واقعی ردلرزه بدون جابه‌جایی زمانی، مقدار جابه‌جایی زمانی موجود بین حالت‌ها، تغییرات دامنه نسبت به دامنه اولیه و درصد تغییرات دامنه می‌باشند. همچنین در این تصویر هر رنگ نمایانگر یکی از حالت‌های تعریف شده در **جدول ۴** است.

مقدار اختلاف‌های حاصل شده در این مخزن، در مقایسه با مخزن بورگان، مقدار کمتری می‌باشد. با این وجود، درصد اختلاف هر یک از حالت‌ها نتایج قابل‌ثبتی را به نمایش می‌گذارد (پانل اول از سمت راست). مقدار بیشینه تغییرات دامنه، به تناسب تغییرات سطح تماس، جابجا شده و تغییر یافته است. میزان تغییرات دامنه حاصل شده تا ۵۰٪ نیز می‌رسد. لذا با فرض cut off ۱۰٪ (خط آبی)، هر نوع بالآمدگی با ارتفاع بیشتر از ۷٪ در سازند یاماما قابل مطالعه چهار بعدی است و در عملیات لرزه‌نگاری مجدد مشاهده خواهد شد.

امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس سه بعدی

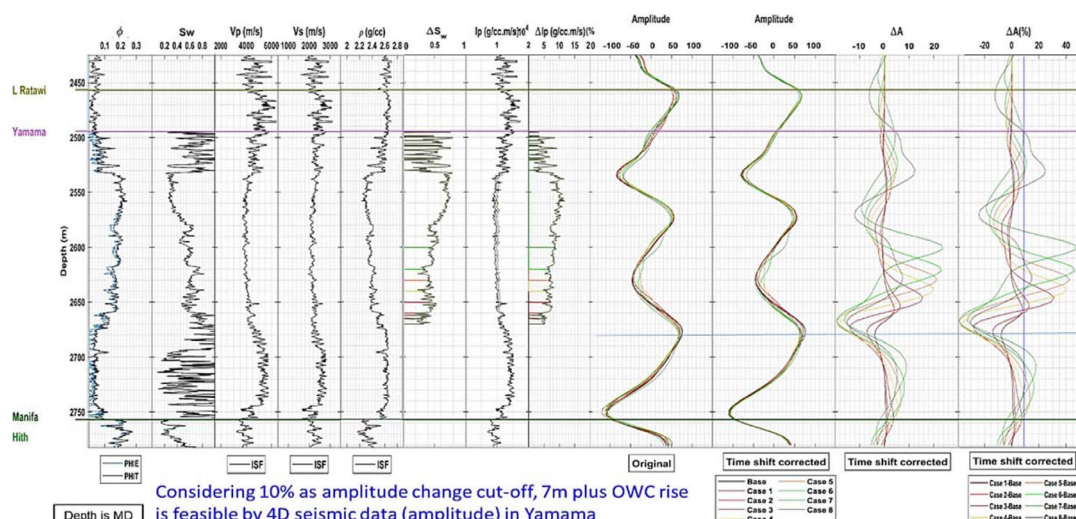
برای انجام مطالعات امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس سه بعدی، از مدل‌های استاتیک و دینامیک هر دو مخزن بورگان و یاماما استفاده گردید. در مرحله اول، با استفاده از مدل جلینی-فلاحت مقدار سرعت لرزه‌ای و مقاومت صوتی در شرایط اولیه مخزن برای تمامی سلول‌های مدل محاسبه گشت.

همان‌طور که در شکل مشخص است، با بالا آمدن آب در مخزن بورگان، دامنه در هر سطح تماس جدید دچار تغییراتی شده است. میزان تغییرات دامنه تا ۱۳۰٪ می‌باشد (پانل اول از سمت راست). همان‌طور که در پانل سوم از سمت راست دیده می‌شود، بیشینه (Peak) دامنه در سطح تماس نفت-آب تشکیل شده است. با افزایش سطح تماس نفت-آب، زمان (عمق) این بیشینه دامنه نیز به تناسب جابجا می‌گردد (بالا می‌آید). بیشینه و کمینه تغییرات دامنه (پانل اول از سمت راست) در محل تقریبی سرسازند بورگان B و سطح تماس تشکیل شده است. مقدار عددی تغییرات دامنه، به تناسب بالا آمدگی سطح تماس می‌باشد.

با فرض حد قابل ثبت ۱۰٪ (خط آبی) داده‌های لرزه‌ای چهار بعدی، هر نوع بالآمدگی با ارتفاع بیش از ۳ m در سازند بورگان قابل پایش توسط داده‌های لرزه‌ای چهار بعدی است.

سازند یاماما

شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی بالا آمدن آب در یکی از چاه‌ها در مخزن یاماما را نشان می‌دهد. در این تصویر نمودارها از چپ به راست به ترتیب شامل تخلخل کل و موثر، اشباع آب، سرعت تراکمی و برشی محاسبه شده با مدل جلینی-فلاحت، چگالی، نگاره تغییر اشباع آب، مقاومت صوتی هر حالت،



شکل ۶ نگاره‌های دامنه و تغییرات آن برای حالت‌های مختلف بالا آمدگی سطح تماس آب و نفت در چاهی در مخزن یاماما.

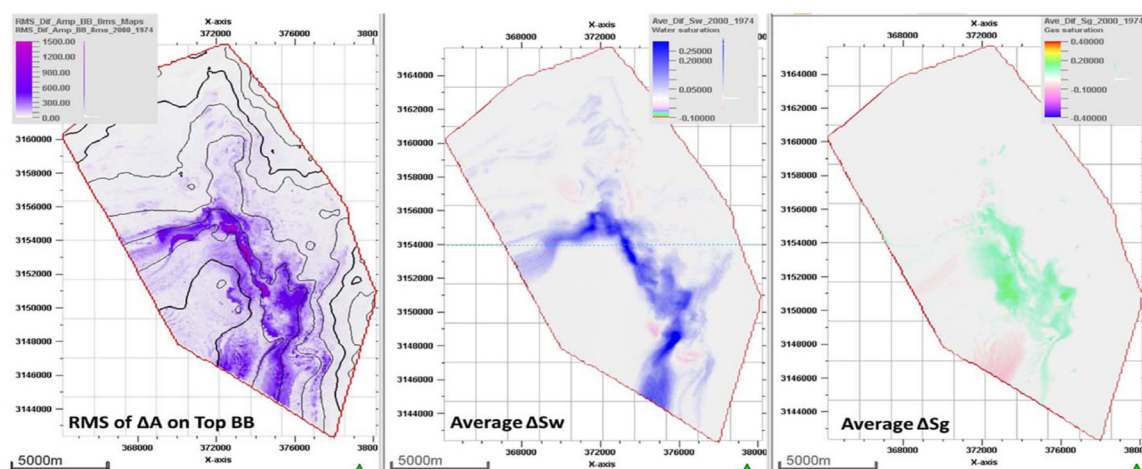
در فاصله سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۰ میلادی آورده شده است. کلاhek گازی این مخزن در اثر تولید جابه‌جا شده است و همچنین سطح تماس آب بالا آمده است که در نقشه تغییرات اشباع‌شدگی قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌طور که در تصویر مشخص است، در فاصله سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۰، سطح تماس آب و نفت بالا آمده و میزان اشباع آب در ناحیه افزایش می‌یابد (نقشه وسط). در اثر افزایش آب در ناحیه، مقاومت صوتی زیاد می‌شود و دامنه موج لرزه‌ای تغییر می‌کند. از سوی دیگر با افت فشار در اثر تولید و آزاد شدن گاز و تشکیل کلاhek گازی، مقاومت صوتی سنگ کاهش یافته و سبب تغییر دامنه در جهت معکوس می‌شود. استفاده از RMS، میزان این تغییرات را بدون در نظر گرفتن علامت و در اثر هر دو عامل آشکار می‌کند. بررسی این مقادیر به صورت تجمعی نشان می‌دهد که تولید از مخزن از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۰، سبب بالا آمدن آب، آزاد شدن گاز و در نتیجه تغییر دامنه تا حدود ۵۰٪ شده است که توسط داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی قابل ثبت می‌باشد.

به این منظور از زبان برنامه‌نویسی متلب برای انجام محاسبات بر روی داده‌های سه بعدی مربوط به حجم کانی‌ها، چگالی، اشباع و ... به دست آمده از مدل‌های استاتیک و دینامیک مخزن استفاده شده است. در قدم بعدی با استفاده از موجک استخراج شده از چاه‌ها، داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی به بعدی مصنوعی در کل ناحیه مورد نظر ساخته شد. سپس برای تغییرات اشباع‌شدگی (بالا آمدن سطح تماس آب و نفت) و تغییرات فشار حاصل از تولید این میدان، میزان تغییرات دامنه طی سال‌های مختلف محاسبه گردید. در ادامه نتایج این بررسی برای دو مخزن بورگان و یاماما در یکی از سال‌ها به طور جداگانه برای هر مخزن آورده شده است.

بررسی تغییرات ناشی از بالا آمدن سطح تماس آب و نفت در مخزن بورگان

به منظور بررسی تغییرات ناشی از بالا آمدن سطح تماس آب و نفت در مخزن بورگان، محاسبات مورد نظر در دو سال ۱۹۷۴ و ۲۰۰۰ میلادی نمایش داده شده است (شکل ۷). در این شکل، نقشه میزان تغییر اشباع گاز (سمت راست) و آب (وسط) و همچنین ریشه میانگین مربعی (RMS)^۱ تغییرات دامنه (سمت چپ) در اثر تولید از مخزن بورگان



شکل ۷ تغییر دامنه موج لرزه‌ای (سمت چپ)، تغییر اشباع آب (وسط) و تغییر اشباع گاز (سمت راست) در مخزن بورگان در اثر تولید بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۰ میلادی.

1. Root Mean Square

داده‌های واقعی به دلیل حضور نوفه^۱ احتمالاً این سطح از پاسخ قابل مشاهده نخواهد بود.

مقدار عددی تغییر دامنه لرزه نگاری چهار بعدی در سال ۲۰۲۰ به صورت تقریبی (کمتر از) ۲۰٪ دامنه لرزه‌نگاری سه بعدی در سال ۲۰۰۴ است. بنابراین برداشت داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی در این ناحیه باید با دقت بالا صورت گیرد. البته باید توجه داشت که بخش نمایش داده شده از سازند یاماما، قسمت با تخلخل و ضخامت کمتری است که تحت تولید قرار گرفته است. طبیعتاً، با انجام تولید از بخش‌های اصلی این مخزن، تغییرات دامنه لرزه‌نگاری چهار بعدی بیشتری حاصل خواهد شد که قابل ثبت نیز خواهد بود.

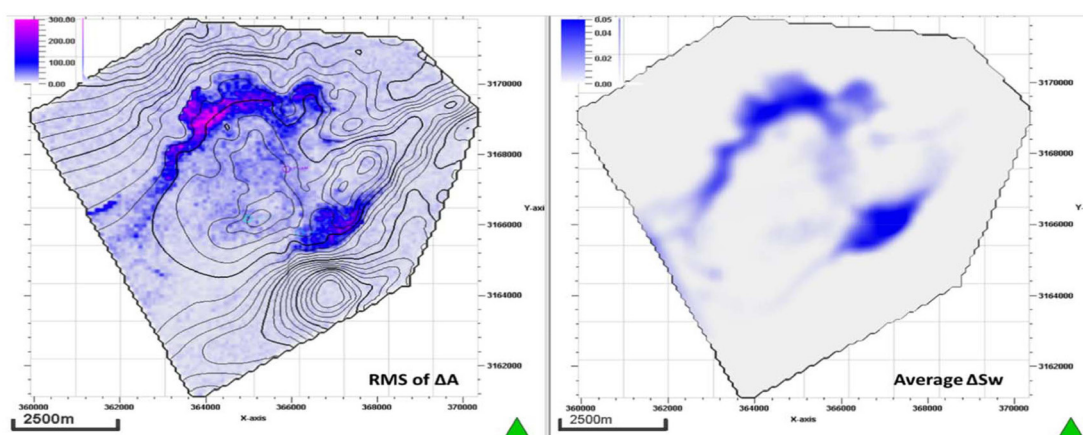
بحث و نتایج

صحت و دقت مطالعات امکان‌سنجی عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی به عوامل مختلفی وابسته است. در متن فوق به انتخاب مدل فیزیکی سنگی مناسب جهت شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای مخزن به عنوان یکی از مهم‌ترین این عوامل اشاره شد.

بررسی امکان‌سنجی لرزه نگاری چهاربعدی در مخزن یاماما

جهت نمایش نتایج حاصل از بررسی امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مخزن یاماما، دو سال ۲۰۰۴ (آغاز تولید از این مخزن) و ۲۰۲۰ میلادی انتخاب شده‌اند (شکل ۸). در این شکل میزان تغییر اشباع آب و همچنین ریشه میانگین مربعی (RMS) تغییرات دامنه در اثر تولید از بخشی از مخزن یاماما در فاصله سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ میلادی آورده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به تولید محدود از این مخزن، در حین تولید تغییری در اشباع گاز این سازند رخ نداده است.

مطابق شکل، در فاصله سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰، سطح تماس آب و نفت بالا آمده و میزان اشباع آب در ناحیه افزایش می‌یابد. در نتیجه این مورد، مقاومت صوتی زیاد می‌شود و دامنه موج لرزه‌ای تغییر می‌کند. ارتباط مستقیم و یک‌به‌یکی بین تغییرات دامنه لرزه‌ای و تغییرات اشباع شدگی قابل مشاهده است. از سوی دیگر، تغییر فشار مخزن سبب ایجاد پاسخ لرزه‌نگاری اندکی شده که با رنگ آبی روشن به نمایش در آمده است. البته در



شکل ۸ تغییر دامنه موج لرزه‌ای و اشباع آب و اشباع گاز در مخزن یاماما در اثر تولید بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ میلادی.

نظر گرفته شود، افزایش سطح تماس بیشتر از m ۶ توسط لرزه‌نگاری چهار بعدی در مخزن بورگان امکان‌پذیر تلقی می‌شود. بررسی مدل‌های استاتیک و دینامیک این مخزن نشان می‌دهد که تغییرات انجام یافته در سطح تماس، بیشتر از m ۶ بوده است. بنابراین پایش تزریق آب در مقیاس چاه برای سازند بورگان ممکن خواهد بود. لازم به ذکر است که در این شرایط نیز خطاهای اندازه‌گیری مربوط به نگاره‌های تخلخل، مقاومت و اشباع حاصل از آن، اشعه گاما و میزان رس حاصل و ... در تعیین عدم قطعیت نهایی پاسخ‌ها نقش دارند. لذا انتخاب چاهی با کمترین میزان خطا و یا استفاده از مجموعه‌ای از چاه‌ها جهت گسترش جامعه مورد بررسی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه نیز جهت افزایش دقت از داده‌های مربوط به ۵ چاه استفاده شده است که نتایج یک چاه در این مقاله بررسی گشته است.

علاوه بر آنچه ذکر شد، بررسی سه بعدی این سازند در مقیاس مخزن نشان می‌دهد که تولید نفت، آزاد شدن گاز و بالا آمدن آب سبب تغییر دامنه تا حدود ۵۰٪ شده است که در عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی قابل ثبت و بررسی می‌باشد. بنابراین انجام عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی برای ثبت تغییرات پارامترهای دینامیکی و بالا آمدگی آب در مخزن بورگان پیشنهاد می‌گردد. البته نحوه برداشت داده‌های لرزه‌نگاری اولیه، میزان نوفه موجود، تعداد چاه‌های مورد استفاده جهت تخمین خواص در نواحی مختلف مخزن، دقت الگوریتم‌های محاسباتی و نیز پیچیدگی‌های داخلی مخزن از مواردی هستند که باید مورد بررسی قرار گیرند. در مورد سازند بورگان، داده‌های موجود از کیفیت خوبی برخوردار بوده و نتایج نهایی نیز قابل اعتماد می‌باشند.

سازند یاماما

به طور کلی حساسیت پاسخ‌های لرزه‌ای محاسبه

همان‌طور که در بخش دوم توضیح داده شده است شد، هر یک از مدل‌های رایج در صنعت نفت براساس شرایط و مفروضات اولیه خاصی طراحی شده‌اند. لذا استفاده از آنها با محدودیت‌هایی همراه است. از این رو انتخاب مدلی جامع که اثر خواص مختلف سنگ و سیال بر پاسخ لرزه‌ای را به درستی لحاظ کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور از مدل جلینی-فلاحی استفاده شده است که با در نظر گرفتن خواص سنگ و سیال نظیر تخلخل، شکل حفرات، اشباع سیالات و فشار، عدم قطعیت پاسخ لرزه‌ای محاسبه شده را کاهش می‌دهد. با این وجود میزان عدم قطعیت پاسخ‌ها به عوامل دیگری نیز بستگی دارد. دقت اندازه‌گیری داده‌های مورد نظر در آزمایشگاه یا با استفاده از نگاره‌ها، دقت و صحت عملیات برداشت لرزه‌ای اولیه و ثانویه، محدودیت میزان داده‌های موجود نسبت به میزان پیچیدگی مخزن و ... از جمله این موارد هستند. در ادامه این بخش نتایج حاصل از مطالعه فوق با ذکر عدم قطعیت‌های موجود در حین مطالعه جمع‌بندی شده است؛

بررسی نتایج

سازند بورگان

طبق بررسی‌های انجام شده، در صورت تزریق آب به مخزن ماسه‌سنگی بورگان، مقدار مقاومت صوتی در محدوده پترو الاستیک بیش از ۲٪ تغییر می‌کند. میزان این تغییرات در صورت تزریق آب سازندی بیشتر از تزریق آب دریا یا آب هوشمند است. همچنین اثر تزریق آب بر مقاومت صوتی سازند در اطراف چاه تولیدی بیشتر از چاه تزریقی است. با این وجود، در تمام حالات ذکر شده امکان مشاهده اثر تزریق آب بر پاسخ لرزه‌ای مخزن وجود دارد.

در مقیاس چاه نیز هر نوع بالا آمدگی سطح آب در سازند به اندازه حداقل ۳ m، سبب ایجاد تغییرات قابل ثبت در پاسخ لرزه‌ای مخزن می‌گردد. اگر میزان عدم قطعیت در عملیات برابر با ۱۰۰٪ در

عدم قطعیت در پاسخ‌های نهایی نقش دارند که در ادامه به صورت موردی و دقیق‌تر به آنها پرداخته خواهد شد؛

- در حین مدل‌سازی، برخی پارامترهای مورد نیاز جهت بررسی مدل‌های فیزیک سنگی نظیر تعداد نقاط تماس بین دانه‌ها در مدل هرتز-میندلین و یا ثوابت مربوط به مدل مک بث، به صورت تئوری و از منابع استخراج شده است. لذا در صورت انجام آزمایش‌های فیزیک سنگی، امکان تخمین دقیق‌تر پارامترهای هر مدل وجود دارد.

- خواص سیال به کار رفته در مدل‌سازی نظیر ضریب بالک و چگالی سیالات از مدل بتزل و ونگ استخراج شده است. این در حالی است که با انجام آزمایش‌های مربوط به خواص سیال می‌توان به نتایج دقیق‌تری در این زمینه دست یافت.

- در مطالعه فوق مدل جلینی-فلاحی با در نظر گرفتن اثر تمامی پارامترهای مهم نظیر تخلخل، شکل حفرات، اشباع و فشار به عنوان مدل جامع معرفی شده است. در صورت انتخاب سایر مدل‌ها، نتایج به دست آمده به دلیل در نظر نگرفتن تمام پارامترها یا ساده‌سازی‌های موجود دقت کافی را نخواهد داشت. با در نظر گرفتن شکل‌های ۱ و ۲

می‌توان این مورد را بهتر بررسی کرد. **جدول ۵** میزان تغییرات مقاومت صوتی تراکمی و برشی در اثر تغییر فشار مخزن به اندازه ۱۰۰۰ psi - (تولید) و ۱۰۰۰ psi + (تزریق) را در حین جانشینی ۷۰٪ از نفت با آب نشان می‌دهد. همان‌طور که در **جدول ۵** مشخص است، مدل‌های گسمن، کاستر-توکسوز و DEM به تغییر فشار حساس نبوده و تنها تحت تأثیر تغییر خواص سیال در اثر تغییر فشار می‌باشند (در اثر افزایش و کاهش فشار به مقدار ۱۰۰۰ psi، مقدار تغییر مقاومت صوتی محاسبه شده با این مدل‌ها بسیار پایین می‌باشد). اما مدل‌های هرتز-میندلین، شیر-فلاحی و جلینی-فلاحی نسبت به تغییر فشار حساس هستند.

شده در مقیاس‌های مختلف صفر تا سه بعدی برای سازند یاماما نسبت به سازند بورگان کمتر است. در صورت تزریق آب به مخزن کربناته یاماما نیز همانند سازند بورگان، مقدار مقاومت صوتی در محدوده پتروالاستیک بیش از ۲٪ تغییر می‌کند. با این وجود، مقادیر ثبت شده در این مخزن نسبت به بورگان کمتر هستند. لذا اگرچه امکان استفاده از لرزه‌نگاری چهار بعدی به منظور پایش اثر تزریق آب در این مخزن نیز وجود دارد، بهتر است تأثیر اشباع و فشار بر مقاومت صوتی به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد. در مقیاس چاه نیز میزان تغییرات دامنه حاصل شده تا ۵۰٪ می‌رسد که از مخزن بورگان کمتر است. با این وجود هر نوع بالاآمدگی با ارتفاع بیشتر از ۷ m در سازند یاماما در مطالعات لرزه‌نگاری چهار بعدی قابل ثبت و بررسی خواهد بود. برای بررسی بهتر این نتایج نیز از تغییرات سطح تماس در ۵ چاه استفاده شده است تا عدم قطعیت حاصل از روش‌های چاه‌پیمایی و محاسبات مرتبط با آنها به حداقل ممکن برسد.

در مقیاس مخزن مقدار عددی تغییر دامنه لرزه نگاری چهار بعدی کمتر از ۲۰٪ است. بنابراین برداشت داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی در این ناحیه باید با دقت بالا و با حداقل نوفه موجود صورت گیرد. زیرا حضور نوفه می‌تواند سبب کاهش کیفیت دامنه شده و عدم قطعیت روش را افزایش دهد. البته همان‌طور که ذکر شد، بخش نمایش داده شده از این سازند، قسمت با تخلخل و ضخامت کمتر است. بررسی تغییرات در نواحی اصلی مخزن نتایج بهتری را به دنبال خواهد داشت. در مجموع با توجه به این مورد و نیز با در نظر گرفتن نتایج امکان‌سنجی صفر و یک بعدی، برداشت داده‌های لرزه‌نگاری چهار بعدی در مخزن یاماما جهت پایش تولید نفت، تغییر سطح تماس و تزریق آب ممکن می‌باشد.

بررسی موردی عدم قطعیت‌های موجود

علاوه بر آنچه ذکر شد، موارد دیگری نیز در ایجاد

جدول ۵ میزان تغییرات ΔI_p و ΔI_s در شکل ۱ به ازای جانشینی ۷۰٪ از نفت با آب و تغییر فشار ۱۰۰۰ psi در اثر تولید و تزریق.

$\Delta I_p(\%)$							
خاصیت	تغییرات	گسمن	هرتز-میندیلین	کاستر-توکسوز	DEM	شیری-فلاحت	جلینی-فلاحت
ΔP	-۱۰۰۰ psi	-۰/۳۸	۳/۰۰	-۰/۵۳	-۰/۵۴	۱/۳۱	۱/۳۰
	+۱۰۰۰ psi	۰/۳۷	-۳/۲۴	۰/۵۱	۰/۵۳	-۲/۹۱	-۲/۸۹
ΔS	٪۷۰	۵/۷۶	۷/۱۷	۷/۴۱	۷/۸۸	۷/۱۵	۶/۹۱
$\Delta I_s(\%)$							
ΔP	-۱۰۰۰ psi	-۰/۰۲	۴/۱۱	-۰/۱۶	-۰/۲۳	۲/۳۹	۲/۳۹
	+۱۰۰۰ psi	۰/۰۲	-۶/۹۵	۰/۲۰	۰/۲۹	-۶/۴۴	-۶/۴۴
ΔS	٪۷۰	۱/۹۶	۱/۹۷	۳/۵۱	۴/۵۴	۱/۹۶	۱/۹۶

می‌شود، مدل‌های هرتز-میندیلین و گسمن نسبت به شکل حفرات حساس نیستند (با تغییر ضریب هندسی حفرات، تغییری در مقاومت صوتی محاسبه شده با این مدل‌ها مشاهده نمی‌شود). از سوی دیگر دو مدل کاستر-توکسوز و شیری-فلاحت نیز برای ضرایب هندسی پایین به درستی تعریف نشده‌اند و بنابراین جامعیت لازم برای بررسی مخازن شکاف‌دار را ندارند. لذا دو مدل DEM و جلینی-فلاحت تنها مدل‌هایی هستند که می‌توانند در نمایش اثر ضریب هندسی حفرات مفید باشند. لذا مدل جلینی-فلاحت نسبت به تمام پارامترها حساس بوده و در محدوده منطقی نمایش تغییرات آنها قرار دارد.

البته لازم به یادآوری است که مدل هرتز-میندیلین برای مخازن ماسه‌ای کم عمق طراحی شده است. لذا تنها دو مدل شیری-فلاحت و جلینی-فلاحت می‌توانند اثر فشار را نمایش دهند. بنابراین حد بالا و پایین تغییرات فشار را دو مدل هرتز-میندیلین و گسمن مشخص می‌کنند. همچنین تمام مدل‌ها به دلیل ترکیب شدن با رابطه گسمن نسبت به تغییر اشباع حساس می‌باشند. در این میان مدل‌های DEM و گسمن به ترتیب حد بالا و پایین تغییرات را نشان می‌دهند و مدل جلینی-فلاحت نیز در این محدوده قرار دارد.

علاوه بر این، جدول ۶ اثر شکل حفرات بر تغییر مقاومت صوتی نمایش داده شده در شکل ۲ را به صورت کمی نشان می‌دهد. همانطور که دیده

جدول ۶ میزان تغییرات ΔI_p و ΔI_s در شکل ۲ به ازای جانشینی ۷۰٪ از نفت با آب و ضریب هندسی حفرات ۰/۱۱، ۰/۱۵ و ۰/۲۵.

$\Delta I_p(\%)$							
خاصیت	مقدار	گسمن	هرتز-میندیلین	کاستر-توکسوز	DEM	شیری-فلاحت	جلینی-فلاحت
α	۰/۱۱	۵/۷۶	۷/۱۷	۱۲/۷۹	۱۱/۳۲	۱۱/۹۳	۹/۶۶
	۰/۱۵	۵/۷۶	۷/۱۷	۷/۴۱	۷/۸۸	۷/۱۵	۶/۹۱
	۰/۲۵	۵/۷۶	۷/۱۷	۴/۱۷	۴/۷۳	۴/۳۰	۴/۵۹
$\Delta I_s(\%)$							
α	۰/۱۱	۱/۹۶	۱/۹۷	۵/۲۳	۶/۵۱	۱/۹۶	۱/۹۶
	۰/۱۵	۱/۹۶	۱/۹۷	۳/۵۱	۴/۵۴	۱/۹۶	۱/۹۶
	۰/۲۵	۱/۹۶	۱/۹۷	۲/۴۱	۲/۸۳	۱/۹۶	۱/۹۶

مرحله مطالعه امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی در مقیاس‌های صفر بعدی (محدوده پتروالاستیک)، یک بعدی (محدوده چاه) و سه بعدی (محدوده میدان) بررسی شد. در شرایط صفر بعدی سه حالت تزریق آب سازندی، آب دریا و آب هوشمند مطالعه شد. طبق نتایج به دست آمده، حساسیت پاسخ لرزه‌ای دریافتی از مخزن بورگان به فرآیند تزریق از سازند یاماما بیشتر است. با این وجود میزان تغییرات مقاومت صوتی برای هر دو سازند بین ۴/۵ الی ۷٪ است که در محدوده مناسب جهت پایش فرآیند تزریق قرار دارد.

در مرحله بعد، داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی یک بعدی با استفاده از نگاره‌های چاه و طی حالت‌های مختلف بالا آمدن سطح تماس آب-نفت به دست آمد. بررسی نتایج در مقیاس یک بعدی نشان داد که جابه‌جایی سطح تماس بیشتر از ۳ m در سازند بورگان و بیشتر از ۷ m در سازند یاماما در عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی قابل ثبت خواهد بود. لذا با توجه به تولید بالا از این ناحیه، برداشت داده لرزه‌ای چهار بعدی در یک بعد پیشنهاد می‌گردد. در مقیاس سه بعدی نیز داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی سه بعدی در مخازن بورگان و یاماما با استفاده از مدل‌های استاتیک و دینامیک در زمان‌های مختلف تولید شدند. طبق نتایج به دست آمده از این مرحله، تغییرات دامنه بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۰ میلادی برای سازند بورگان حدود ۵۰٪ و بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۰ برای سازند یاماما حدود ۲۰٪ است. لذا در مقیاس سه بعدی نیز امکان پایش و بررسی تغییرات سطح تماس آب و نفت در هر دو مخزن بورگان و یاماما وجود دارد. با توجه به مثبت بودن نتیجه امکان‌سنجی لرزه‌نگاری چهار بعدی برای پایش تزریق و تولید از این میدان، پیشنهاد می‌گردد که برای پایش نفت باقیمانده در مخزن، گاز آزاد شده از نفت، بررسی مسیرهای حرکت آب به چاه‌های تولیدی و انتخاب مکان مناسب جهت حفاری چاه‌های جدید

• روش‌های برداشت نگاره‌های صوتی تراکمی و برشی، نگاره چگالی و نیز میزان خطای موجود در حین برداشت هریک از آنها می‌تواند منجر به تولید نتایج بهتر یا بدتر گردد. لذا بررسی گزارشات چاه‌پیمایی و اطلاع از شرایط و ابزار به کار رفته پایش از نتیجه‌گیری نهایی ضروری است.

• ارزیابی پتروفیزیکی و تخمین نگاره‌های تخلخل و اشباع‌شدگی مورد استفاده در محاسبات یک بعدی، به طور مستقیم در میزان خطای نهایی تأثیرگذار است. بنابراین جهت کاهش خطای نهایی لازم است این مراحل با دقت بالا انجام و نتایج آن‌ها در چاه‌های متعدد بررسی و مقایسه شود.

• روش‌های متفاوتی جهت برداشت داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی از قبیل Streamer، Ocean Bottom Cable (OBC)، Ocean Bottom Node (OBN)، Life of Field (LoF) و ... وجود دارد. محدوده دقت اندازه‌گیری هر یک از این روش‌ها متفاوت بوده و انتخاب روش برداشت مناسب در تعیین عدم قطعیت نهایی نقش دارد. در این بین با توجه به تغییر ۳ الی ۷٪ مقاومت صوتی مخزن مورد نظر، روش‌هایی نظیر Streamer احتمالاً مناسب ثبت تغییرات اندک نخواهند بود و روش OBN جهت برداشت دوباره داده لرزه‌نگاری توصیه می‌شود. همچنین روش مورد استفاده در برداشت اولیه و دقت آن و نیز میزان نوفه موجود در هر دو عملیات برداشت از اهمیت بالایی برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه احتمال موفقیت عملیات لرزه‌نگاری چهار بعدی در پایش فرآیند تزریق آب بررسی گردید. به این منظور از مدل فیزیکی سنگی جلینی-فلاحی استفاده شد. این مدل در نمایش اثر تغییر خواص مخزن نظیر تخلخل، شکل حفرات، فشار و اشباع سیالات نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد. مدل مذکور در دو سازند بورگان و یاماما مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن در سه

از لرزه‌نگاری چهار بعدی استفاده شود.

دکتر علی چهارازی در طول اجرای تمامی مراحل این پروژه که باعث غنی‌تر شدن اجرای آن شده است تشکر ویژه می‌نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از پیشنهادات سازنده آقای

مراجع

- [1]. Fink, J. (2015). Enhanced oil recovery, petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 643, Paperback ISBN: 9780128037348, 9 7 8 - 0 - 1 2 - 8 0 3 7 3 4 - 8, eBook ISBN: 9780128037355.
- [2]. Fayemendy, C. (2015). Time-lapse Seismic: Multidisciplinary Tool for Reservoir Management, EAGE short Course Publications, doi:10.22107/JPG.2018.87905.1024.
- [3]. Røste, T., Moen, A.S., Kolstø, E., Brekken, M., Thrana, C., Husby, O. and Lescoffit, G. (2009). The Heidrun Field: monitoring fluid flow in the complex Åre Formation, first break, 27(4), doi.org/10.3997/1365-2397.2009007.
- [4]. Alvarez, E., MacBeth, C. and Brain, J. (2017). Quantifying remaining oil saturation using time-lapse seismic amplitude changes at fluid contacts. *Petroleum Geoscience*, 23(2), 238-250, doi.org/10.1144/petgeo2016-03.
- [5]. Djuraev, U., Jufar, S.R. and Vasant, P. (2017). A review on conceptual and practical oil and gas reservoir monitoring methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152, 586-601, doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.038.
- [6]. Choquette P.W. and Perry C.T. (1989). The Classification and nature of Carbonate Porosity. *Developments in Sedimentology*; Academic Press, Elsevier, Volume 46, 21-41, doi.org/10.1016/S0070-4571(08)71056-2.
- [7]. Falahat, R. and Farrokhnia, F. (2020). Rock physics modelling of the carbonate reservoirs: A log-based algorithm to determine the pore aspect ratio. *Journal of Applied Geophysics*, 103930, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103930.
- [8]. Shiri, S. and Falahat, R. (2020). Rock physics modeling and 4D seismic feasibility study in one of the Iranian carbonate reservoirs. *Journal of Applied Geophysics*, 103855, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103855.
- [9]. Jalini, S. and Falahat, R. (2021). A novel algorithm to estimate mineral elastic properties and pore aspect ratio in the carbonate reservoirs, *Journal of Applied Geophysics*, 184, 104-253, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104253.
- [10]. Mindlin, R. D. (1949), Compliance of elastic bodies in contact: *Journal of Applied Mechanics*, 16, 259-268, doi.org/10.1115/1.4009973.
- [11]. Gassmann, F. (1951). Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, 16(4), 673-685, doi.org/10.1190/1.1437718.
- [12]. Kuşter, G.T. and Toksöz, M.N. (1974). Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations. *Geophysics*, 39(5), 587-606, doi.org/10.1190/1.1440450.
- [13]. Xu, S. and Payne, M.A. (2009). Modeling elastic properties in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 28(1), 66-74, doi.org/10.1190/1.3064148.
- [14]. Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. (2019). *The rock physics handbook*. Cambridge university press.
- [15]. Xu, S. and White, R.E. (1995). A new velocity model for clay-sand mixtures I. *Geophysical Prospecting*, 43(1): 91-118, doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00126.x.
- [16]. MacBeth, C. (2004). A classification for the pressure-sensitivity properties of a sandstone rock frame. *Geophysics*, 69(2), 497-510, doi.org/10.1190/1.1707070.
- [17]. Jalini, S., Falahat, R. (2024), Analyzing rock physics models for 3D and 4D seismic feasibility study in the carbonate reservoirs and developing a hybrid algorithm, *Pure and Applied Geophysics*, submitted.
- [18]. Nishizawa, O. (1982). Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks transversely isotropic case. *Journal of Physics of the Earth*, 30(4): 331-347, doi.org/10.4294/jpe1952.30.331.
- [19]. Liu, Z., & Sun, S. Z. (2015). The differential Kuşter-Toksöz rock physics model for predicting S-wave velocity, *Journal of Geophysics and Engineering*, 12(5): 839-848, doi.org/10.1088/1742-2132/12/5/839.
- [20]. Avseth, P., Mukerji, T. & Mavko, G. (2005). *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk* (First edition). Cambridge University Press.
- [21]. Batzle, M., & Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57(11), 1396-1408, doi.org/10.1190/1.1443207.
- [22]. Nasmia, B., & Falahat, R., (2024). Introducing a simplified rock physics model to estimate shear velocity to consider the geometry of pore spaces and minerals. *Acta Geophysica*, https://doi.org/10.1007/s11600-023-

01258-3.

[23]. Awolayo, A., Sarma, H., & AlSumaiti, A. (2016). An experimental investigation into the impact of sulfate ions in smart water to improve oil recovery in carbonate reservoirs. *Transport in Porous Media*, 111, 649-668,