

ارزیابی تغییرات پارامترهای لرزه‌ای با جایگزینی شاره در سنگ مخزن کربناته

اصغر نادری*، ایرج مداحی، ناصر کشاورز فرج‌خواه، مصطفی حیدری، میثم سلیمی دلشاد و سجاد اسماعیل‌پور

پژوهشکده علوم زمین پردیس بالادستی پژوهشگاه صنعت نفت

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱)

چکیده

با توجه به اهمیت ردیابی و پیگیری جریان شاره و شناسایی زون‌های جاروب نشده مخزن طی فرایند تولید، به‌منظور ازدیاد برداشت و با توجه به هزینه زیاد حفاری، تهیه و کاوش مغزه‌های چاهی برای بررسی این زون‌ها، لرزه‌نگاری چهاربُعدی در میدان‌های بالغ، راهکار جدیدی برای شناسایی زون‌های هدف جاروب نشده و پیگیری جریان شاره را فراهم کرده است. قبل از اقدام به عملیات لرزه‌نگاری چهاربُعدی، لازم است امکان مشاهده تغییرات احتمالی ایجاد شده در پارامترهای لرزه‌ای در نتیجه تولید هیدروکربور مورد بررسی قرار گیرد تا از صرف هزینه‌های لرزه‌نگاری تکراری جلوگیری شود. به این منظور در این تحقیق تغییرات احتمالی در پارامترهای لرزه‌ای و کشسان (الاستیک) مخزن در یک چاه، از یک مخزن نفتی کربناته با کمک روابط فیزیک سنگ مورد بررسی قرار گرفت. متوسط تغییرات در پارامترهای مخزن با جایگزینی گاز به جای نفت به ترتیب برای سرعت موج طولی، عرضی، مدول کپه‌ای (بالک) و چگالی برای چاه مورد بررسی: ۳۸۰ متر بر ثانیه، ۶۳ متر بر ثانیه، ۲/۶ گیگاپاسکال و ۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که امکان مشاهده تغییرات ایجاد شده در مخزن به علت جابه‌جایی شاره وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پایشگری لرزه‌ای مخزن، لرزه‌نگاری وابسته به زمان، پارامترهای لرزه‌ای، فیزیک سنگ، کاستر توکسوز، سنگ‌های کربناته

Evaluating the variation of seismic parameters due to fluid substitution in a carbonate reservoir

Asghar Naderi*, Iraj Maddahi, Naser Keshavarz Faraj Khah, Mostafa Heydari, Meisam Salimi Delshad, and Sajad Esmailpour

Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)

(Received: 16 February 2013, accepted: 23 October 2014)

Summary

4D (or Time-lapse) seismic study is based on repeating 2D or 3D seismic surveys over the same area with the same acquisition parameters, in different times and measuring the difference in seismic data in terms of both amplitude and reflection time. This technique has been increasingly utilized to monitor the fluid flow during the hydrocarbon production, or during the enhanced oil recovery to assess unswept target zones through miscible or immiscible flooding. An overview of reservoir properties such as porosity, pore pressure, temperature, and water/oil/gas saturation changes as a result of depletion or injection could be investigated through 4D seismic analyses. Time lapse studies are usually subject of investigation on reflection seismic data. However, this technique could be applied to any other seismic techniques such as Vertical Seismic Profiling (VSP). In 4D seismic studies, subtle changes in the reservoir properties could be studied via

*Corresponding author:

Naderia@ripi.ir

*نگارنده رابط:

change in seismic wave properties, if good quality seismic data is available. A feasibility study is a prerequisite in 4D seismic acquisition, due to high cost of repeating a seismic survey (especially in a vast area with 3D coverage, such as oil and gas fields in Iran).

Gassmann rock physics model is widely in use for fluid replacement to predict seismic properties in porous rocks such as sandstones with high porosity and permeability. Carbonate rocks usually have a higher density and elastic modulus than sandstones, and include less porosity and permeability. Also the pore shapes and their connections in carbonates are more complex and different from sandstones (penny shapes rather than spherical). Since the Gassmann model does not count for the pore shape type and geometry, other rock physics models such as Kuster-Toksoz model is required to be utilized to study fluid replacement effect on seismic wave parameters in carbonate rocks. Kuster-Toksoz model is also considering the effect of mineralogy as well as pore shape and geometry.

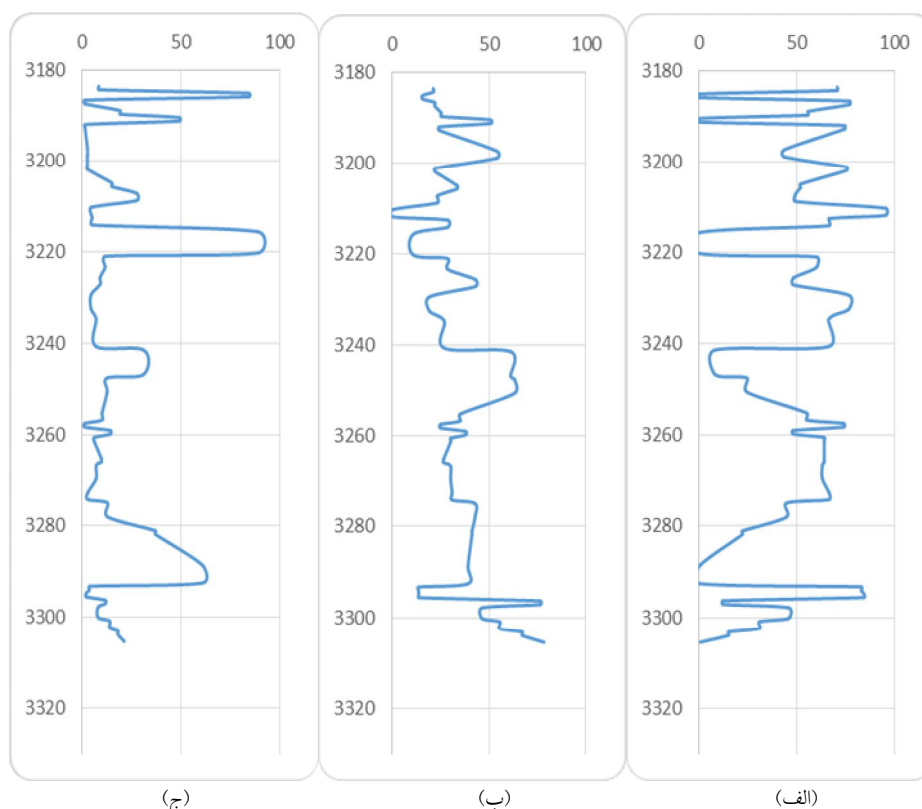
In this research, as a 4D feasibility study, the change in seismic wave parameters due to hydrocarbon production (fluid replacement) in a well of carbonate oil reservoir located in South-West of Iran has been investigated. Based on inverse Kuster-Toksoz rock physics model, percentage of different porosity types (spherical, disk, and needles) in the considered well is modeled. As a result, however, the spherical porosity in the well was dominant (45% of total pores), other porosities included a considerable share (55% of total pores). Considering the pore shape and geometry and the proportional porosity percentages via Kuster-Toksoz rock physics model, the average change in P and S velocity, bulk modulus and density due to hydrocarbon production (replacing oil by gas) was about 380 m/s, 63 m/s, 2.6 Gpa and 78 kg/m³ respectively; while using Gassmann rock physics model which did not include the pore shape and geometry and the proportional porosity percentages, the primary wave velocity and the bulk modulus were 163 m/s, 1.35 Gpa respectively. This suggests that the field could be subject of 4D seismic study for fluid flow detection, if high repeatability of the seismic survey could be achieved and seismic data could be considered as high quality data.

Keywords: Seismic reservoir monitoring, time lapse, seismic parameters, rock physics, Kuster-Toksoz, carbonate rocks

۱ مقدمه

میدان‌های موجود شامل شناسایی زون‌های فرعی نفتی و حفاری هدایت شده است. مخازن بیشتر از آنچه تصور می‌شود ناهمگن هستند و این مسئله منجر به عدم قطعیت‌های قابل توجه در توصیف مخزن می‌شود. لذا شبیه‌سازی مخزن براساس این توصیف نمی‌تواند پیش‌بینی درستی از عملکرد مخزن داشته باشد. این درحالی است که نتایج آن ممکن است با داده‌های تولید به‌خوبی منطبق باشد. علی‌رغم توسعه مدل‌های عددی شبیه‌سازی مخزن، همچنان اطلاعاتی در خصوص این که در بین چاه‌ها چه می‌گذرد و چگونه شاره درون مخزن جابه‌جا می‌شود وجود ندارد. در گذشته مهندسان مخزن، برای به‌دست آوردن اطلاعات به‌منظور تعیین جزئیات مربوط به ساختار مخزن و رفتار جریان آن، فقط به حفاری متراکم چاه‌ها و گرفتن مغزه‌ها متوسل می‌شدند که روشی گران با کارایی کم بود. امروزه تکرار برداشت‌های لرزه‌ای یا لرزه‌نگاری

تولید جهانی نفت با آهنگ نزدیک ۲ درصد در سال در حال افزایش است در حالی که حجم اکتشاف سالانه رفته‌رفته در حال کاهش است (جک، ۱۹۹۸؛ جانگ، ۲۰۰۱). با توجه به این روند، و از آنجا که بیشتر میدان‌های نفتی کشور برای سالیان متوالی در حال تولید بوده‌اند، به منظور افزایش میزان تولید و حفظ جایگاه صنعت نفت کشور چاره‌ای جز بهبود ضریب بازیافت نفت و گاز قابل تصور نیست. بررسی‌های آماری شرکت بی‌پی روی ۱۳ میدان نفتی بزرگ نشان می‌دهد که متوسط ضریب بازیافت مخازن کم است. نور (۱۹۸۹) نشان داد که افزایش ۱۰ درصدی ضریب بازیافت در ایالات متحده امریکا، ذخایر قابل بازیافت موجود را تا دو برابر افزایش خواهد داد. بارزترین روش برای افزایش ضریب بازیافت در

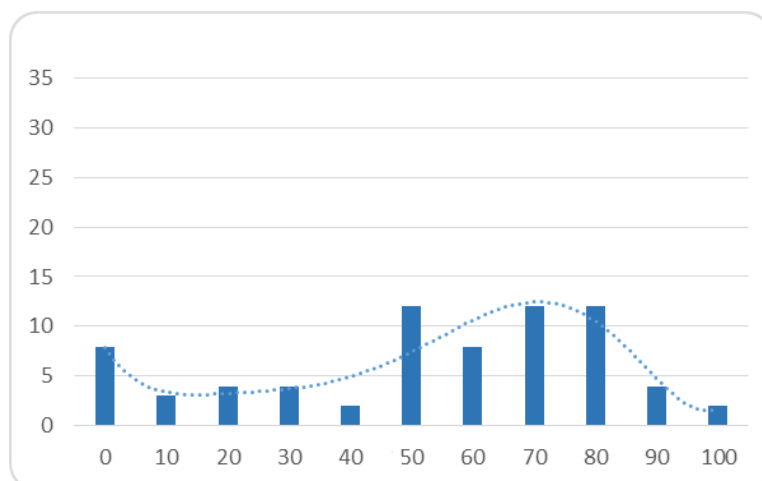


شکل ۱. درصد و نوع فضاهای خالی برآورد شده از راه مدل‌سازی وارون در چاه (محور قائم عمق و افقی درصد است). (الف) کروی، (ب) سوزنی، (ج) ترک.

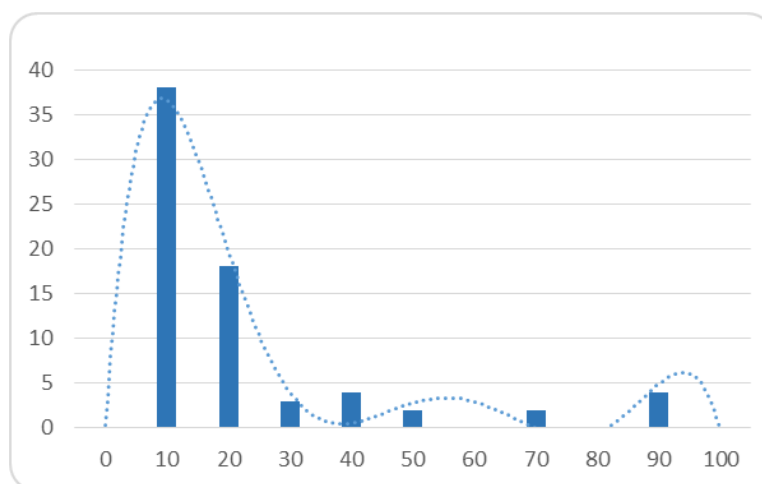
می‌شود. (پورس و همکاران، ۱۹۶۲) و مرحله دوم انتخاب نشانگرهای لرزه‌ای است که به تغییرات سرعت و میرایی ناشی از تغییر شرایط مخزن خیلی حساس هستند. به عنوان نمونه وقتی آب جایگزین نفت درون زون‌های نفتی می‌شود، در سنگ‌های نه چندان سخت سرعت موج طولی افزایش و سرعت موج عرضی اندکی کاهش می‌یابد. بر این اساس کاهش زمان رفت و برگشت موج باعث بالا کشیده شدن بازتاب کننده پایین (یا Base) لایه مخزنی در مقطع لرزه‌ای زمانی P-P می‌شود. در مقطع لرزه‌ای زمانی P-S پایین افتادگی کمتر خواهد بود زیرا کاهش سرعت موج S نسبت به کاهش سرعت موج P کم و خفیف است. علاوه بر تغییرات سرعت ناشی از جابه‌جایی شاره درون مخزن، کاهش دامنه امواج بازتابی را در بالا و پایین زون مخزنی می‌توان مشاهده کرد که ممکن است در دورافت‌های دور بهتر قابل مشاهده باشد. علاوه بر این،

چهاربُعدی در میدان‌های بالغ، راهکار جدیدی را برای ردیابی و پیگیری جریان شاره و یافتن زون‌های هدف جاروب نشده حین فعالیت‌های ازدیاد برداشت، پیش‌نهاده است. نمونه‌های موفق پایشگری لرزه‌ای تزریق بخار آب، آب، دی اکسید کربن و موارد دیگر نشان می‌دهد که داده‌های لرزه‌ای دارای پتانسیل قوی در پایش جریان شاره در مخزن هستند (الشوهیل و همکاران، ۲۰۰۷؛ الشوهیل، ۲۰۱۱؛ جانگ، ۲۰۱۰؛ وراکر، ۲۰۱۲).

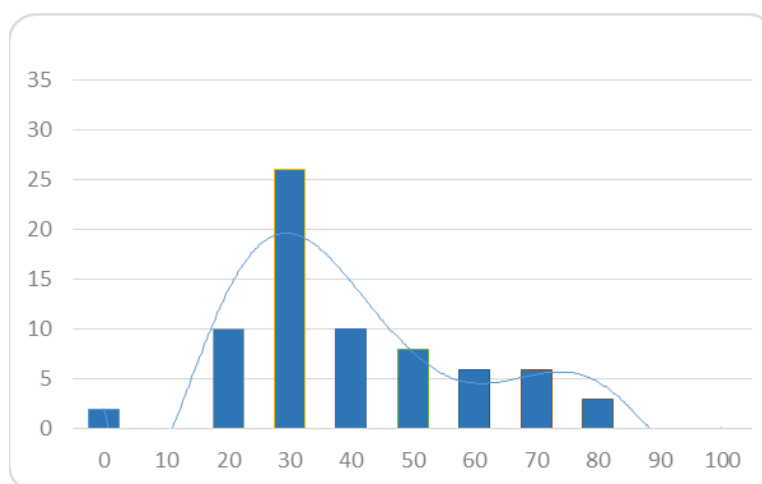
لرزه‌نگاری چهاربُعدی برای پایش تغییرات در وضعیت مخزن (اشباع، فشار، دما و گاهی تخلخل) ناشی از تولید و یا تزریق، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای طراحی شده است. در کاربرد این روش دو مرحله تنگاتنگ وجود دارد. یکی فیزیک سنگ که به وسیله آن شرایط و خواص مخزن به خواص کشسان و ناکشسان سنگ مخزن و در نتیجه به سرعت و میرایی امواج لرزه‌ای نسبت داده



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. بافت‌نگار درصد نوع حفره‌ها. (الف) بافت‌نگار درصد حفره‌های کروی. (ب) بافت‌نگار درصد حفره‌های سوزنی. (ج) بافت‌نگار درصد حفره‌های ترک (محور افقی درصد و محور قائم فراوانی نوع حفره).

این تغییرات در داده‌های لرزه‌ای با تکرار زمانی است. نظریه و مدل‌های متعدد عرضه شده در مقاله‌ها و کتاب‌ها درباره خواص کشسان و ناکشسان سنگ، هندسه منافذ (فضاهای خالی) را یک عامل مهم در مدول کشسان و میرایی موج لرزه‌ای می‌دانند. در بین هندسه فضاهای خالی، حفره‌های کروی خیلی پایدار هستند و تأثیر کمی روی میرایی دارند. درحالی‌که ترک‌ها با وجود اینکه معمولاً درصد کمی از فضاهای خالی را شامل می‌شوند، ممکن است مدول کشسان مؤثر را به شدت کاهش دهند و باعث میرایی زیاد و قابل توجه در امواج لرزه‌ای شوند. به همین علت بسیاری از نویسندگان و محققان از جمله اشلیبی (۱۹۷۵)، کاستر و توکسوز (۱۹۷۴)، مک کنزی (۱۹۴۹)، ماوکو نور (۱۹۷۸)، اسپرانت و براس (۱۹۷۴)، تیمور و همکاران (۱۹۷۱)، والش (۱۹۶۵)، بچلی و همکاران (۲۰۰۵)، جانگک (۲۰۱۰ و ۲۰۰۱) به بررسی تأثیر هندسه شکستگی‌ها بر سرعت امواج لرزه‌ای پرداخته‌اند.

در بین این نظریه‌ها، مدل کاستر و توکسوز (مدل KT) که براساس نظریه پراکنندگی عرضه شده است، درحکم یکی از واقعی‌ترین و ساده‌ترین مدل‌های شناخته شده در مجامع ژئوفیزیکی، اغلب در خصوص سنگ‌های کربناته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل فرض شده است که فضاهای خالی به صورت مجموعه‌ای از شبه‌کروی‌هایی با نسبت تناسب‌های گوناگون هستند. شکل‌های کروی نمایانگر فضاهای خالی به نسبت کروی با نسبت تناسب زیاد هستند و شبه‌کروی‌های با نسبت تناسب بسیار کم، شبیه ترک‌ها هستند.

شاره عامل دیگری برای تعیین مدول کشسان است. با توجه به معادله گاسمن، مدول کشسان خشک و تخلخل، مهم‌ترین عامل در تعیین مدول کشسان کل سنگ است. به عبارت دیگر، اثر شارها در سنگ‌های با مدول کشسان خشک کم و تخلخل زیاد، بیشتر قابل مشاهده

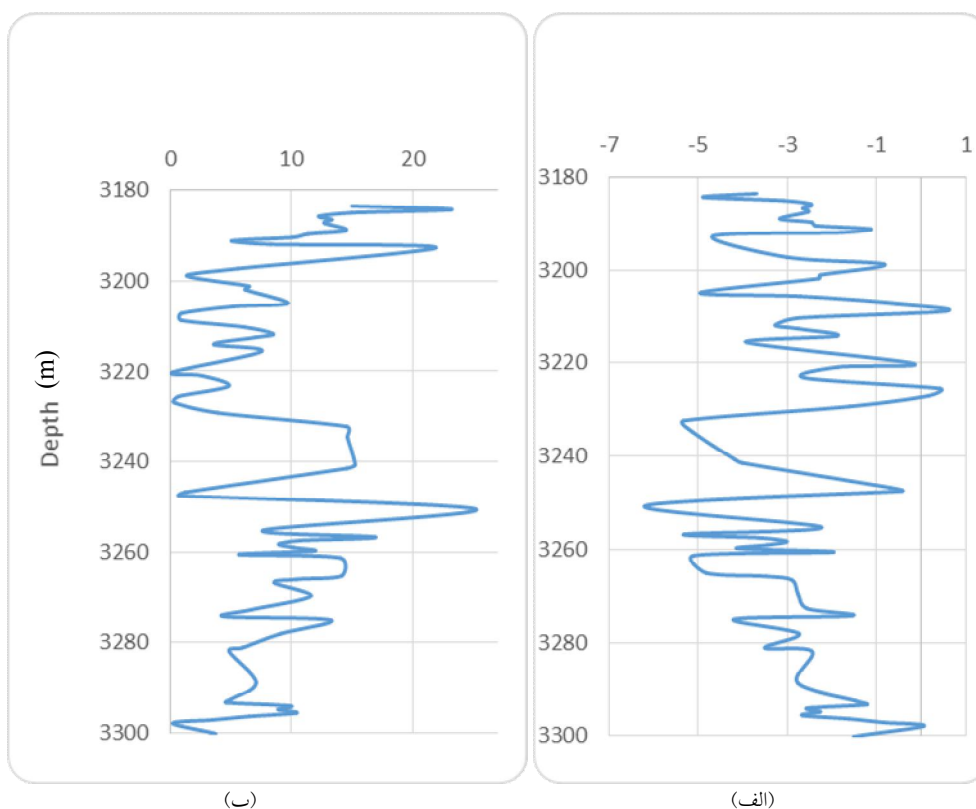
تغییر در فشار مؤثر و گرانروی شاره ممکن است منجر به تغییرات قابل مشاهده در طیف دامنه در بازتابنده پایین زون مخزنی دیده شود.

مهم‌ترین مسئله قبل از اقدام به انجام لرزه‌نگاری چهاربُعدی به منظور مشاهده و تفسیر تغییرات رخ داده در مخزن در نتیجه تولید و گذشت زمان، دانستن این موضوع است که آیا می‌توان این تغییرات را در داده‌های لرزه‌ای مشاهده کرد یا خیر؟ لذا ابتدا باید میزان تغییرات پارامترهای لرزه‌ای با روش‌های کم‌هزینه و سریع محاسبه و امکان مشاهده تغییرات خواص مخزنی (به خصوص تغییر شاره مخزن) در نتیجه تولید در داده‌های لرزه‌ای بررسی شود. به بیان دیگر، امکان‌سنجی بررسی‌های لرزه‌ای چهاربُعدی یا لرزه‌نگاری تکرار با زمان، بر این مطالعات مقدم هستند.

در این مقاله ابتدا نظریه‌های مطرح در زمینه پیش‌گفته مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و سپس در یک چاه از یکی از میدان‌های کربناته نفتی واقع در جنوب غربی ایران، تأثیر جابه‌جایی شاره در تغییر پارامترهای کشسان و سرعت‌های لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و محاسبه شده است. نتیجه‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

۲ عوامل مؤثر بر سرعت امواج در سنگ

عوامل مؤثر بر سرعت امواج لرزه‌ای شامل خواص سنگ (تراکم، تاریخچه تحکیم، سن سنگ، سیمان‌شدگی، بافت، چگالی، محتوای رُس، تخلخل و شکل فضاهای خالی و مانند آن)، خواص شاره (گرانروی)، چگالی، ترکیب شاره، ترشوندگی، نوع، درصد اشباع و نظیر آن) و شرایط محیط (تاریخچه تنش، محیط رسوب گذاری، دما، تاریخچه تولید، فشار مؤثر و مانند آن) است. برخی از این عوامل مانند جابه‌جایی شاره، تغییر فشار و دما، در نتیجه فرایند و دوره زمانی تولید تغییر می‌کند. هدف امکان‌سنجی تحقیقات چهاربُعدی بررسی امکان مشاهده

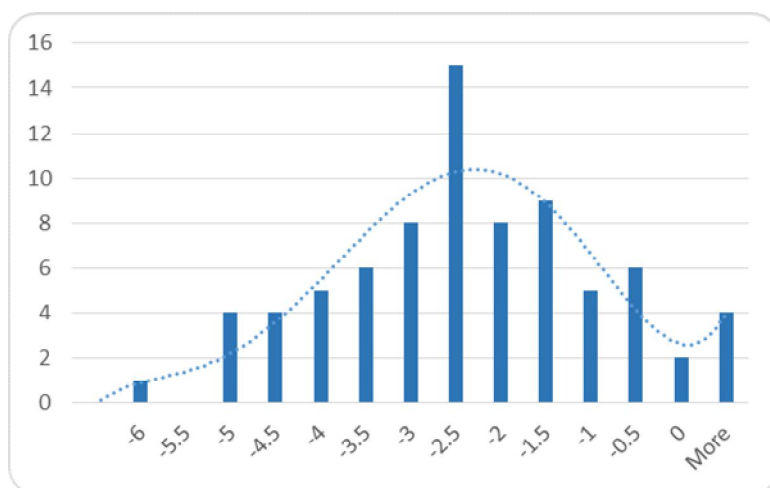


شکل ۳. مقدار و درصد تغییر مدول بالک با جایگزینی شاره به دست آمده از مدل سازی معکوس روش کاستر و توکسوز در چاه. شکل (الف) مقدار برحسب گیگاپاسکال. (ب) درصد تغییر مدول بالک .

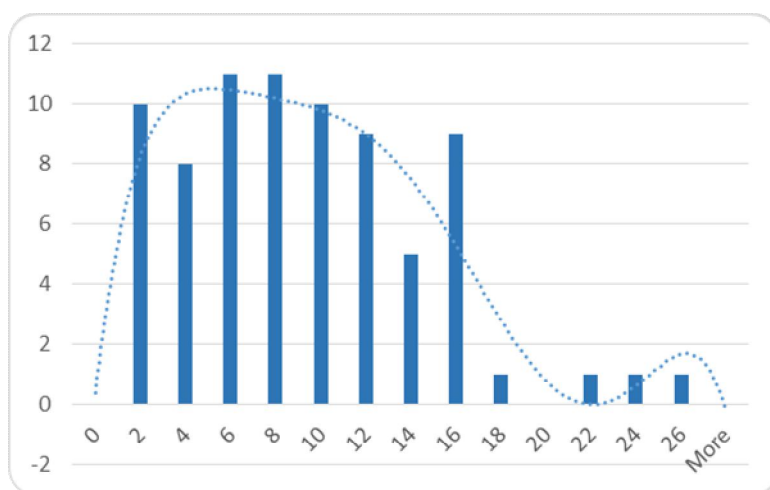
۳ نظریه های محیط مؤثر

محیط کَشسان محیطی است که بعد از برداشتن نیروی اعمال شده بر آن، ابعاد اصلی دوباره به حالت اولیه برگردند، یعنی تغییر شکل دائمی در جسم ناشی از تنش ایجاد نشود. از آنجا که طول موج لرزه ای خیلی بزرگ تر از اندازه دانه ها است، سنگ ها اغلب به صورت محیط مؤثر در نظر گرفته می شوند. به عبارت دیگر، علی رغم نامتجانس بودن میکروسکوپی، از نظر فیزیکی، رفتار سنگ در مقیاس ماکروسکوپی شبیه محیط پیوسته و همگن است. پارامترهای کَشسان محیط مؤثر را می توان به صورت خواص کَشسان متوسط یک عنصر نماینده حجمی محاسبه و تعریف کرد. به طور طبیعی، مدول کَشسان یک محیط مؤثر بیشتر بستگی به مدول کَشسان ترکیبات حجم و توزیع هندسی آنها دارد. روش اول برای

است. این دو پارامتر (مدول کَشسان خشک و تخلخل) به طور معکوس با یکدیگر تغییر می کنند. حالت مدول کَشسان خشک و تخلخل کم را نمی توان به صورت معمولی حس کرد زیرا مدول کَشسان سنگی با تخلخل کم به مدول کَشسان کانی های سنگ نزدیک می شود و این عدد برای اکثر کانی ها بیش از محدوده شناخته شده برای سنگ ها است. به علاوه تأثیر شاره روی مدول کَشسان به بسامد نیز بستگی دارد. در بسامدهای بیشتر از یک کیلوهرتز (مفهوم نسبی وابسته به هندسه منفذها، نفوذپذیری و گرانیروی شاره) شاره از حالت نرمال فاصله می گیرد و دارای چسبندگی به نظر می رسد که در این حالت، معادله گاسمن نامعتبر خواهد بود. مفهوم بستگی به بسامد ممکن است این مشکل را حل کند. این مفهوم در روابط عرضه شده بیوت اعمال شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. بافت‌نگار مقدار تغییرات مدول کپه‌ای. (الف) درصد تغییرات مدول کپه‌ای. (ب) سنگ مخزن با تغییر شاره در چاه (واحد مدول کپه‌ای گیگاپاسکال و محور قائم فراوانی).

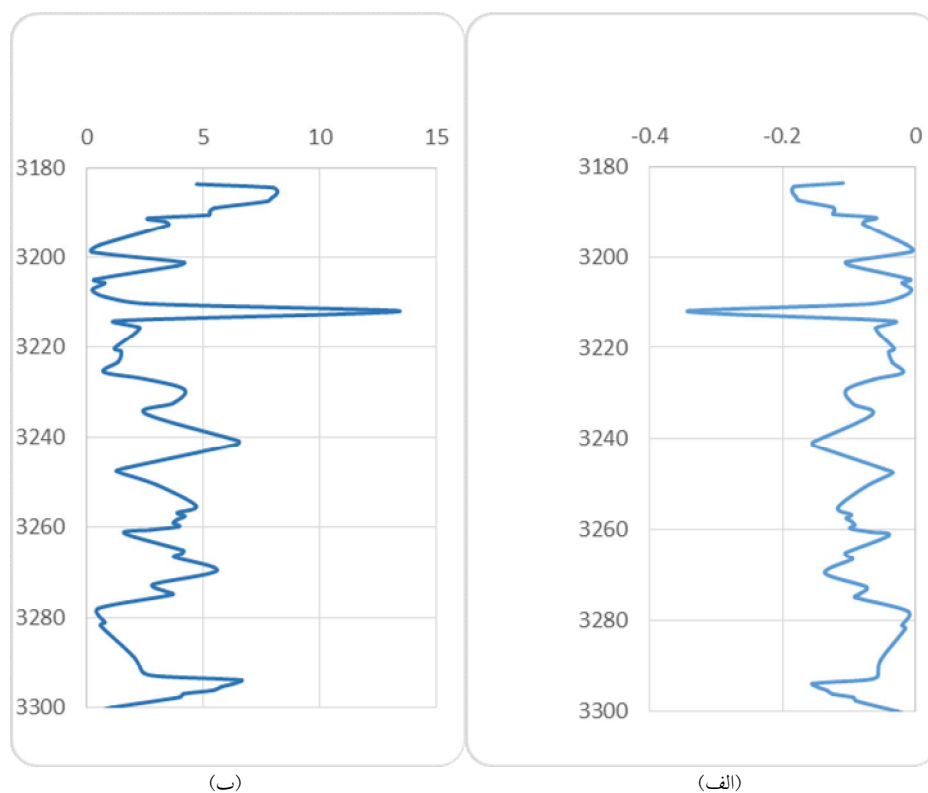
اگر سنگ از n جزء تشکیل شده و درصد هر کدام از آنها C_1, C_2, \dots, C_n و مدول کپه‌ای هر کدام به ترتیب M_1, M_2, \dots, M_n باشد و کرنش در همه اجزاء ثابت فرض شود، مدول کشسان مؤثر میانگین به صورت حسابی خواهد بود. این مدل که اولین بار ویت (۱۹۲۸) آن را پیشنهاد کرد و به مدل ویت معروف شده به صورت زیر است:

$$M = C_1 M_1 + C_2 M_2 + \dots + C_n M_n, \quad (2)$$

تعیین مدول کشسان مؤثر محاسبه مستقیم است (گوگون و پالسیوسکاس، ۱۹۹۴). مدول کشسان را می‌توان با تقسیم حجم متوسط تنش به حجم متوسط کرنش به صورت زیر محاسبه کرد.

$$M = S/\epsilon, \quad (1)$$

که M مدول کشسان محیط مؤثر، S و ϵ به ترتیب متوسط تنش‌ها و کرنش‌های عنصر نماینده حجم (سنگ) هستند.



شکل ۵. مقدار تغییرات چگالی (واحد چگالی، گرم بر سانتی متر مکعب و محور قائم عمق بر حسب متر). (الف) درصد تغییرات چگالی. (ب) سنگ مخزن با تغییر شماره در چاه.

این مدل‌ها سادگی کاربرد آنها است. اگر اندازه و مقدار مدول کشسان اجزای تشکیل دهنده سنگ به صورت قابل توجهی متفاوت باشد، مرزهای حاصل از مدل ممکن است خیلی مفید باشد.

در این تحقیق مدول کشسان و چگالی جامد سنگ با کمک این روابط و درصد کانی‌های حاصل از نمودارهای چاهی محاسبه شده است.

مدول‌های شماره‌های مخزن (آب شور، نفت و گاز) با کمک روابط (باتزل و ونگ، ۱۹۹۲) و در شرایط مخزن محاسبه شده‌اند.

۳-۱ معادله گاسمن

اگر شماره در طول فرایند تغییر شکل سنگ در حال تعادل نگهداری شود، می‌توانیم مدول حجمی سنگ اشباع از

اگر تنش روی همه اجزاء ثابت باشد، مدول کشسان مؤثر برای همه اجزاء به صورت متوسط هماهنگ (هارمونیک) خواهند بود. ریوس (۱۹۲۹) آن را پیشنهاد داده و به مدل ریوس معروف شده است (معادله ۳).

$$1/M = C_1 / M_1 + C_2 / M_2 + \dots + C_n / M_n \quad (3)$$

مدول کشسان متوسط محاسبه شده از راه وویت، کران بالا و مدول کشسان محاسبه شده به روش مدل ریوس کران پایین مقادیر متوسط مدول‌های کشسان را به دست می‌دهد. (هیل، ۱۹۵۲) به منظور به دست آوردن تقریب بهتر، متوسط گیری از آنها را به صورت زیر مطرح کرد:

$$M = (M_V + M_R) / 2 \quad (4)$$

واضح است که رابطه $M_V > M > M_R$ بین این مدول‌ها برقرار است. رابطه (۴) مدل VHR نامیده می‌شود. مزیت

در سنگ‌های کربناته است، به طوری که در این نوع سنگ‌ها سرعت موج فشاری از ۱۷۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه و سرعت موج بُرشی از ۶۰۰ تا ۳۵۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کند. (ابری و همکاران، ۲۰۰۳)

عامل اصلی کنترل‌کننده سرعت در سنگ‌ها، تخلخل است. بیشتر معادلات نظریه‌های موجود، تغییرات در خواص کشسان ناشی از نوع فضاهای خالی را در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه، بررسی‌های کمی حاصل از وارون لرزه‌ای، AVO و محاسبه حجم حفره‌ها که براساس این معادلات پایه‌گذاری شده‌اند، در معرض عدم قطعیت‌های زیادی هستند.

سنگ‌های کربناته از یک طرف دارای سامانه حفره‌های پیچیده شامل: درون‌ذره‌ای، بین‌ذره‌ای، حفره‌ای، قالبی و موارد دیگر هستند و از طرفی دیگر نتایج تحقیقات جدید نشان می‌دهد که سرعت‌های لرزه‌ای و نیز رابطه بین سرعت‌ها و تخلخل به شدت تحت تأثیر نوع فضاهای خالی در سنگ قرار دارد؛ به همین علت، اعتبار معادله گاسمن در سنگ‌های کربناته نامشخص و توسعه یک مدل فیزیکی سنگ برای این نوع سنگ‌ها بسیار مشکل است (گرگور و همکاران، ۲۰۰۳). مدل‌های فیزیکی سنگ تجربی، به سبب سادگی کاربردشان، به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها به طور نوعی رابطه‌ای خطی بین تخلخل و سرعت‌های لرزه‌ای فرض می‌کنند و اغلب رابطه‌ای خوب بین یکی از خواص فیزیکی مانند نفوذپذیری و سرعت امواج به دست می‌آورند. در این حالت نفوذپذیری یک عامل مهم در کنترل سرعت در نظر گرفته می‌شود، در حالی که سرعت به شدت با تخلخل کنترل می‌شود. می‌توان گفت که روابط تجربی اغلب تعداد بسیار محدودی از عوامل (معمولاً کمتر از سه عامل) تأثیرگذار بر سرعت عبور امواج لرزه‌ای از سنگ را در نظر می‌گیرند.

مدل‌های برپایه اینکلوزن (inclusion)، مانند مدل کاستر - توکسوز (۱۹۷۴)، می‌توانند چندین عامل موثر

شاره را از مدول حجمی مربوط به حالت خشک به شرح زیر به دست آوریم:

$$K = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_a}\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1-\phi}{K_s} + \frac{K_d}{K_s^2}}, \quad (5)$$

که K ، K_d ، K_f و K_s به ترتیب مدول‌های کپه‌ای (بالک) سنگ اشباع از شاره، سنگ خشک، شاره و سنگ جامد و ϕ تخلخل هستند. معادله (۵) به معادله گاسمن معروف است. مدل گاسمن فرض می‌کند که فشار شاره در حال تعادل است. این مسئله وقتی اتفاق می‌افتد که بسامد لرزه‌ای به اندازه کافی کم است و جریان محلی و کلی شاره می‌تواند توزیع فشار را در طول همه فازهای شاره به حالت تعادل درآورد. این مدل، مدل بسامد کم یا بسامد صفر نامیده می‌شود. در شرایط تعادل فشار شاره، K_f را می‌توان با کمک رابطه متوسط هماهنگ محاسبه کرد (مدل ریوس یا وویت).

۲-۳ رابطه کاستر-توکسوز

رسوبات کربناته در معرض دگرگونی‌های سریع و جامعی قرار دارند که کانی‌شناسی و خواص حفره‌ای را در این سنگ‌ها تغییر می‌دهد. فرایندهای سیمانی‌شدن و انحلال به طور پیوسته در جهت نابودی و یا ایجاد تخلخل در سنگ هستند. در موارد حداکثری، این تغییرات می‌تواند کانی‌شناسی سنگ را به طور کامل از آراگونایت/کلسیت به دولومیت تبدیل و یا توزیع حفره‌ها را در سنگ برعکس کند. یعنی دانه‌های اصلی حل شوند و تخلخل ایجاد کنند و فضاهای حفره‌ای اصلی سیمانی‌شده و دانه‌ها را تشکیل دهند. (ابری و همکاران، ۲۰۰۳)

همه این تغییرات، خواص کشسان سنگ و در نتیجه سرعت امواج صوتی را در آن تغییر می‌دهند. نتیجه این فرایندها، افزایش وسعت دامنه تغییرات سرعت‌های صوتی

مانند تخلخل، کانی‌شناسی، نوع حفره و شاره حفره را دربرگیرند. به‌طور نوعی این مدل‌ها از نوع درجه یک هستند زیرا اثر متقابل بین حفره‌ها را نادیده می‌گیرند و برای حالتی که شاره رقیق باشد، معتبرند. از آنجا که شکل فضاهای خالی تأثیر زیادی روی مدول‌های کشسان و در نتیجه روی سرعت امواج می‌گذارد و معادله گاسمن نیز این پارامترها را به‌طور مستقل در نظر نمی‌گیرد، در این تحقیق مدل کاستر و توکسوز برای مدل کردن تغییرات سرعت موج طولی لرزه‌ای ناشی از تغییرات شاره مخزن مورد استفاده قرار گرفت.

مدلی که کاستر و توکسوز (۱۹۷۴) برای محاسبه مدول‌های کشسان براساس شکل فضاهای خالی سنگ عرضه کردند، به‌صورت زیر است:

$$(K_{KT}^* - K_m) \frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_m)}{(K_{KT}^* + \frac{4}{3}\mu_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P^{mi}$$

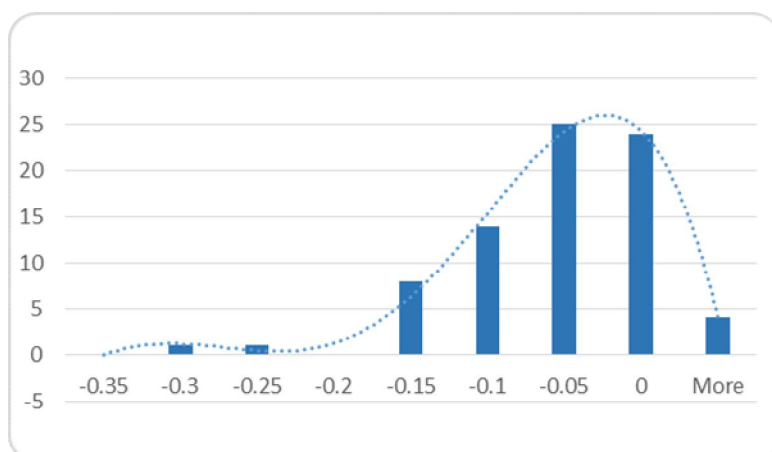
$$(\mu_{KT}^* - \mu_m) \frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_{KT}^* + \zeta_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi},$$

۳-۳ تغییر سرعت موج عرضی با جابه‌جایی شاره
سرعت موج عرضی طبق رابطه (۷) با مدول‌های کشسان و چگالی سنگ مخزن ارتباط دارد. مدول بُرشی (μ) سنگ مخزن با جابه‌جایی شاره، بدون تغییر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، مدول بُرشی شاره صفر است و جابه‌جایی آن تأثیری روی مدول بُرشی سنگ مخزن ندارد. ولی چگالی سنگ مخزن با جابه‌جایی شاره براساس رابطه (۸) تغییر می‌کند. در نتیجه سرعت امواج عرضی تحت تأثیر جابه‌جایی شاره قرار دارد. این تأثیر با مشتق‌گیری از رابطه (۷) نسبت به چگالی به‌صورت رابطه (۹) خواهد بود.

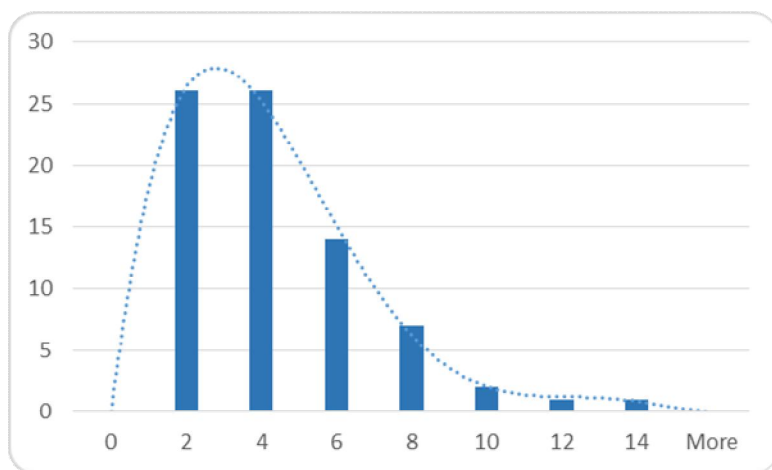
جدول ۱: ضرایب P, Q برای برخی شکل‌های خاص. زیرنویس‌های i, m به ترتیب به شاره درون سنگ و مواد زمینه آن اشاره دارد.

Inclusion Shape	P^{mi}	Q^{mi}
Spheres	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \frac{4}{3}\mu_m}$	$\frac{\mu_m + \zeta_m}{\mu_i + \zeta_m}$
Needles	$\frac{K_m + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}$	$\frac{1}{5} \left(\frac{4\mu_m}{\mu_m + \mu_i} + 2 \frac{\mu_m + \gamma_m}{\mu_i + \gamma_m} + \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i} \right)$
Disks	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i}$	$\frac{\mu_m + \zeta_i}{\mu_i + \zeta_i}$
Penny Cracks	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m}$	$\frac{1}{5} \left(1 + \frac{8\mu_m}{4\mu_i + \pi\alpha(\mu_m + 2\beta_m)} + 2 \frac{K_i + \frac{2}{3}(\mu_i + \mu_m)}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m} \right)$

$$\beta = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + 4\mu)} \quad \gamma = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + \mu)} \quad \zeta = \frac{\mu(9K + 8\mu)}{6(K + 2\mu)}$$



(الف)



(ب)

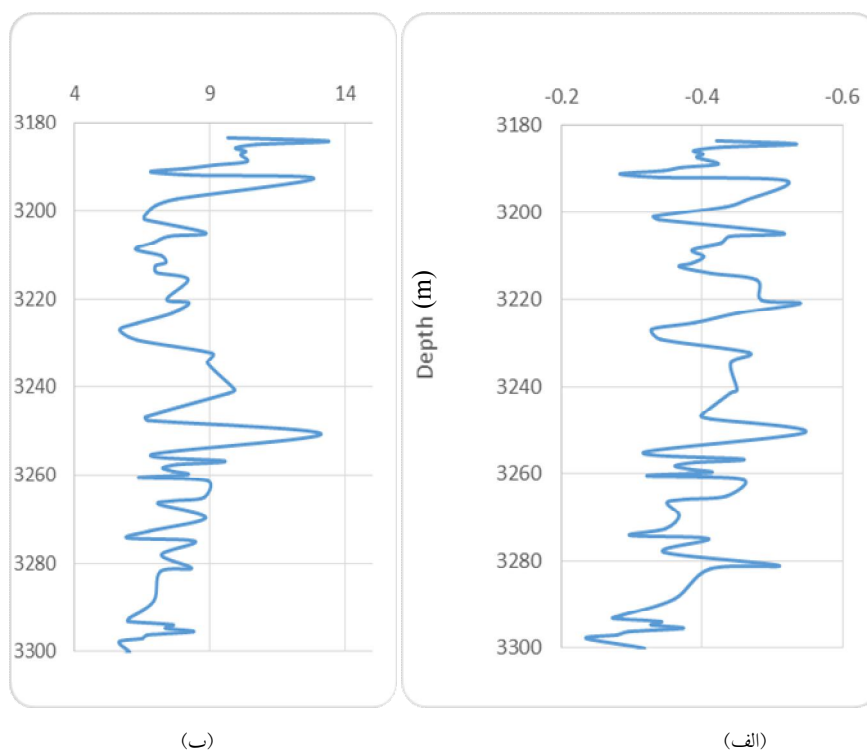
شکل ۶. بافت‌نگار مقدار تغییرات چگالی (واحد چگالی، گرم بر سانتی‌متر مکعب و محور قائم فراوانی). (الف) و درصد تغییرات چگالی. (ب) سنگ مخزن با تغییر شاره در چاه.

که V_s ، μ ، ρ ، φ ، ρ_f و ρ_{ma} به ترتیب سرعت موج عرضی، مدول بُرشی، چگالی، تخلخل سنگ مخزن، چگالی شاره مخزن و چگالی ماتریکس سنگ مخزن هستند. در این تحقیق از رابطه (۹) برای محاسبه تغییرات سرعت موج عرضی در سنگ مخزن با جابه‌جایی شاره در هر چاه میدان مورد بررسی استفاده شد که نتایج آن در بخش‌های بعدی خواهد آمد.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (7)$$

$$\rho_{sat} = \rho_f \varphi + (1 - \varphi) \rho_{ma}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = -\frac{\Delta \rho}{2\rho}, \quad (9)$$



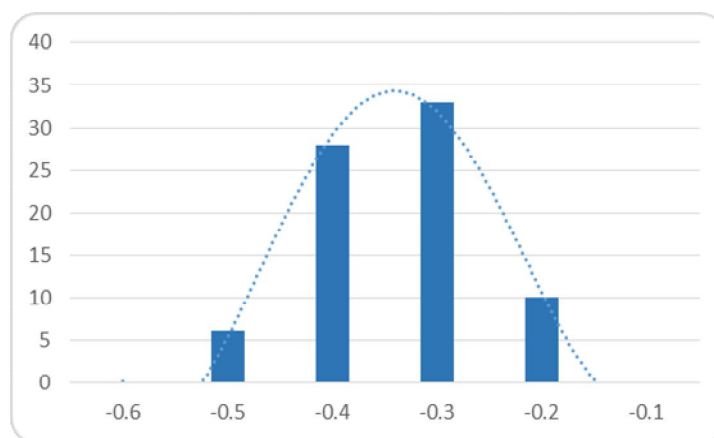
شکل ۷. مقدار تغییرات سرعت موج طولی (واحد سرعت موج طولی کیلومتر بر ثانیه و محور قائم عمق بر حسب متر). (الف) درصد تغییرات سرعت موج طولی. (ب) سنگ مخزن با تغییر شماره در چاه.

کاستر و توکسوز با انواع گوناگون شکل فضاهای خالی (کروی، سوزنی و ترک) و درصدهای متفاوت از هر کدام، مدول کپهای محاسبه شد (نادری و همکاران، ۱۳۹۱) در مقاله عرضه شده (نادری و همکاران، ۱۳۹۱) نتایج برآورد زده شکل و درصد حفره‌ها با بررسی مقطع نازک مقایسه و در آن صحت و دقت برآوردهای صورت گرفته، مورد تأیید قرار گرفته است. با توجه به اینکه روابط کاستر و توکسوز برای حالت‌های امواج بسامد زیاد طراحی شده است و داده‌های لرزه‌ای بسامد کمی دارند، لذا در مرحله آخر مدل‌سازی، با کمک معادله گاسمن که برای حالت بسامد کم مناسب است، مدول کپهای در حالت اشباع از شماره تزریقی (جابه‌جایی شماره) محاسبه شد. قبل از محاسبه شکل و درصد حفره‌ها به کمک معادله گاسمن (بدون دخالت دادن شکل حفره‌ها) تغییرات

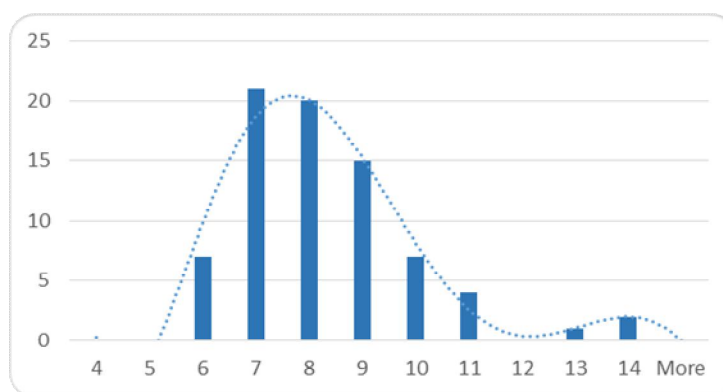
۳-۴ برآورد درصد و نوع حفره‌ها و تغییر سرعت‌های لرزه‌ای و چگالی سنگ مخزن با تغییر شماره در یک سازند کربناته

برای برآورد تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای ناشی از تغییر شماره سازندی در رسوبات کربناته میدان موردنظر، به اطلاعات لازم در زمینه نوع و درصد شکل حفره‌ها نیاز است. از آنجاکه اطلاعات فوق در خصوص این میدان وجود نداشت، سعی شد ابتدا از راه مدل‌سازی وارون، نوع و درصد حفره‌ها به دست آید.

برای تعیین نوع و درصد فضاهای خالی در سازندهای مورد بررسی، با استفاده از نمودارهای چاهی و با کمک روابط حاکم بین سرعت امواج لرزه‌ای، چگالی و مدول‌های کشسان، مدول‌های کشسان حالت اولیه و در شرایط مخزن محاسبه گردید. سپس با کمک روابط



(الف)



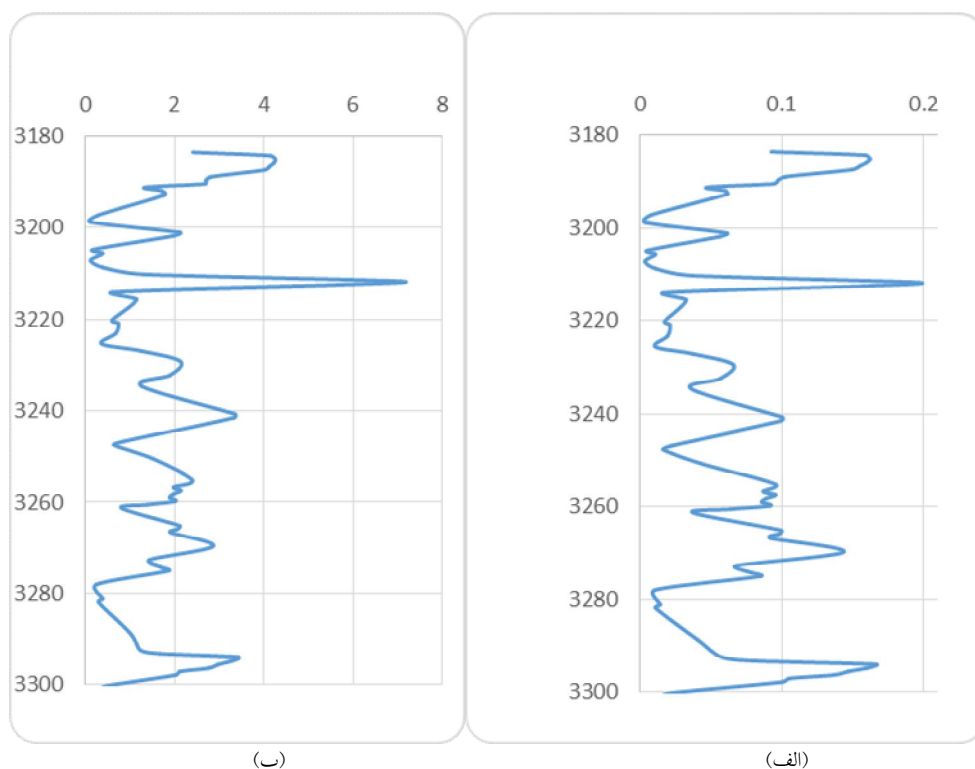
(ب)

شکل ۸ بافت‌نگار مقدار تغییرات سرعت موج طولی (واحد سرعت کیلومتر بر ثانیه و محور قائم فراوانی). (الف) درصد تغییرات سرعت موج طولی سنگ مخزن (ب) با تغییر شاره در چاه.

آزمایشگاهی استفاده شده است. از نمودارهای چاهی از جمله سرعت موج طولی، تخلخل، کانی‌شناسی و چگالی استفاده و سرعت امواج عرضی نیز با کمک روابط تجربی محاسبه شده است. داده‌های مربوط به شاره نمونه‌برداری شده در یک چاه میدان مورد بررسی از جمله چگالی، تراکم‌پذیری و مانند آن، از نتایج تحقیقات PVT آن به‌دست آمده است. مدول‌های کپه‌ای و بُرشی و چگالی ماتریکس سنگ طبق استانداردهای کتاب «مرجع فیزیک سنگ» (ماوکو و همکاران، ۱۹۹۸) براساس رابطه VHR در اعماق گوناگون با کمک نمودارهای پتروفیزیکی حاوی، درصد و نوع کانی‌شناسی در چاه، محاسبه شد. نمودار سرعت موج طولی در شرایط اولیه (قبل از تزریق

مدول کپه‌ای سنگ اشباع از شاره تزریقی و به دنبال آن سایر پارامترهای لرزه‌ای (سرعت موج طولی و بُرشی و چگالی) محاسبه شد و نتایج آن با نتایج حاصل از محاسبات با در نظر گرفتن شکل و درصد حفره‌ها مورد مقایسه شد.

۳-۵ داده‌های اولیه و متوسط تغییرات پارامترهای لرزه‌ای برای بررسی تغییرات پارامترهای لرزه‌ای ناشی از جایگزینی شاره سازندی به سرعت موج طولی، عرضی، کانی‌شناسی و چگالی سنگ مخزن نیاز بود که در این تحقیق مقادیر این پارامترها (غیر از سرعت موج عرضی) از نمودارهای چاهی واسنجی شده با داده‌های



شکل ۹. مقدار تغییرات سرعت موج عرضی (واحد سرعت موج عرضی کیلومتر بر ثانیه و محور قائم عمق برحسب متر) (الف) و درصد تغییرات سرعت موج عرضی (ب) سنگ مخزن با تغییر شماره در چاه.

و ۳۳ درصد کروی، سوزنی و ترک تشکیل می‌دهند. متوسط مقدار و درصد تغییرات مدول بالک، چگالی، سرعت موج طولی و سرعت موج عرضی سنگ مخزن و بافت نگار تغییرات این پارامترها در نتیجه جایگزینی گاز به جای نفت در جدول ۲ آورده شده است. متوسط تغییرات سرعت موج طولی، عرضی، مدول بالک و چگالی با در نظر گرفتن نقش شکل حفره‌ها و درصد آنها به ترتیب ۳۸۸ متر بر ثانیه، ۶۳ متر بر ثانیه، ۲.۶ گیگا پاسکال و ۰.۰۷۹ گرم بر سانتی‌متر مربع محاسبه شد. از شکل ۳ تا شکل ۱۰ تغییرات این پارامترها در نقاط گوناگون و بافت‌نگار آنها نشان داده شده است.

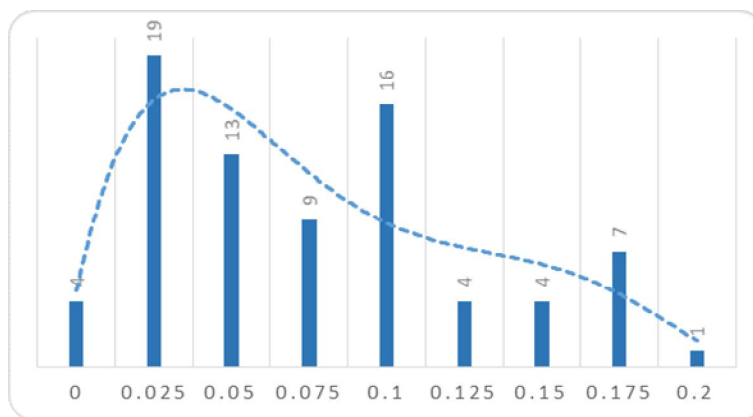
شماره) از نمودار زمان رفت و برگشت موج (dt) محاسبه شد.

متوسط تغییرات مدول بالک، چگالی، سرعت امواج طولی و عرضی ناشی از تغییر شماره مخزنی از نفت به آب (تزریق آب برای تولید نفت) به ترتیب ۲/۶۵- گیگا پاسکال، ۰/۰۷۵۷ گرم بر سی سی، ۳۸۸- متر بر ثانیه و ۶۳ متر بر ثانیه محاسبه شد که در جدول ۲: به صورت خلاصه متوسط تغییرات آورده شده است.

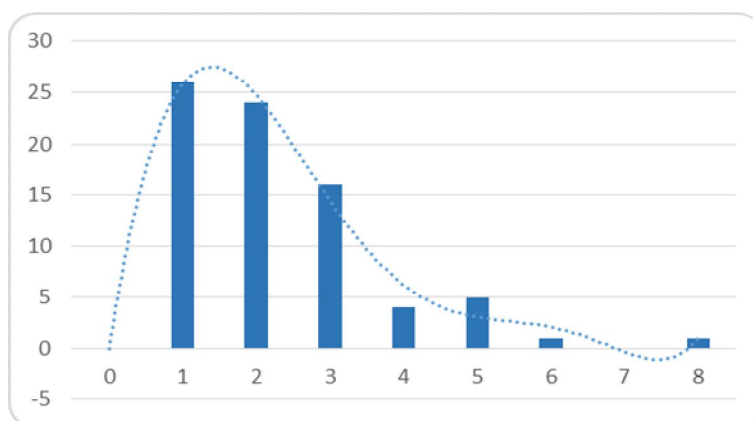
شکل ۱ درصد و نوع حفره‌ها برآورد شده در چاه با کمک مدل‌سازی معکوس و شکل ۲ بافت‌نگار، درصد نوع حفره‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل‌ها نشان می‌دهد که متوسط شکل حفره‌ها را به ترتیب ۱۷، ۵۰،

جدول ۲. متوسط تغییرات پارامترهای لرزه‌ای، مدول کپه‌ای و چگالی در چاه.

روش	پارامتر	تغییر سرعت موج طولی	تغییر سرعت موج طولی %	تغییر مدول بالک	تغییر مدول کپه‌ای %	تغییر چگالی	تغییر چگالی %	سرعت موج عرضی	سرعت موج عرضی %
کاستر و توکسوز	Median	-0.38893	7.405692	-2.65819	7.550065	-0.07573	3.289976	0.058117	1.646064
	Average	-0.38812	7.826038	-2.60071	8.28822	-0.07892	3.428196	0.063668	1.759956
گاسمن	متوسط	-0.163	3.2	-1.35	4.3	-	-	-	-



(الف)



(ب)

شکل ۱۰. بافت‌نگار مقدار تغییرات سرعت موج عرضی (واحد سرعت کیلومتر بر ثانیه و محور قائم فراوانی). الف) و درصد تغییرات سرعت موج عرضی سنگ مخزن. ب) با تغییر شاره در چاه.

- Eshelby, J. D., 1957, The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems: *Proceedings of the Physical Society of London*, Ser. A, 241, 376-396
- Eberli, G. P., Baechle, G. T., Aneslmetti, F. S., Lncze, M. L., 2003, Factor controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks: *The Leading Edge*, 22(7), 654-660.
- Gueguen, Y., and Palciauskas, V., 1994, *Introduction to the Physics of Rocks*, NY: Princeton Univ. Press.
- Hill, R., 1952, The elastic behaviour of a crystalline aggregate: *Proceedings of the Physical Society of London ser. A.*, 65, 349-354.
- Jack, I., 1998, Time-lapse seismic in reservoir management, SEG course notes.
- Kuster, G., T., and Toksoz, M., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part 1. Theoretical formulations, *Geophysics*, 39, 587-606.
- MacKenzie, J. K., 1949, The elastic constants of a solid containing spherical holes: *Proceedings of the Physical Society of London*, 63(B), 2-11.
- Mavko, G. M., and Nur, A., 1978, The effect of nonelliptical cracks on the compressibility of rocks: *Journal of Geophysical Research*, 83, B9, 4459-4468.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 1998, *The Rock Physics Handbook*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Nur, A. 1989, Four-dimensional seismology and (true) direct detection of hydrocarbons: The petrophysical basis: *The Leading Edge*, 8(2), 30-36.
- Pros, Z., Vanek, J., and Klima, K., 1962, The velocity of elastic waves in diabase and graywacke under pressures up to 4 kilobars: *Studia Geoph. et Geod.*, 6, 347-367
- Reuss, A., 1929, Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitatbedingung für einkristalle: *Zeitschrift für Angewandte Mathematic aus Mechanic*, 9, 49-58.
- Sprunt, Eve S., and Brace, W. F., 1974, Direct observation of microcavities in crystalline rocks: *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstracts.*, 11, 139-150
- Timur, A., Hempkins, W. B., and Weinbrandt, R. M., 1971, Scanning electron microscopic study of pore systems in rocks: *Journal of Geophysical Research*, 76(20), 4932-4948.
- Voigt, W., 1928, *Lehrbuch der KIRSTALLPHYSIK:*

۴ نتیجه گیری

متوسط تغییرات سرعت در چاه‌ها با جابه‌جایی شاره با کمک روابط کاستر-توکسوز در چاه بیشتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه است. این مسئله با نتایج تحقیقات و آزمایش‌های عرضه شده در مقالات و کتاب‌های معتبر، هم‌خوانی دارد. تزریق کربن دی اکسید یا گاز درون مخازن کربناته ممکن است باعث تغییرات بیشتری در سرعت نسبت به پیش‌بینی معادله گاسمن شود. این موضوع پایشگری لرزه‌ای را در بیشتر مخازن، امکان‌پذیر می‌کند. تغییرات مشاهده شده در پارامترهای لرزه‌ای مخزن مورد بررسی، با کمک مدل کاستر-توکسوز نسبت به جابه‌جایی شاره، با در نظر گرفتن کیفیت داده‌ها و ضخامت مخزن تولیدی، نشان می‌دهد که امکان مشاهده تغییرات ایجاد شده در درون مخزن در داده‌های لرزه‌ای فراهم است و لذا مدل‌سازی تغییرات مخزن با استفاده از بررسی‌های چهاربُعدی لرزه‌ای برای میدان مورد نظر توصیه می‌شود.

۵ منابع

- نادری، ا.، حیدری، م.، مداحی، ا.، کشاورز فرج‌خواه، ن.، ۱۳۹۱، مدل‌سازی معکوس با استفاده از روابط کاستر و توکسوز جهت برآورد درصد حفره‌ها و نوع آنها در سنگ‌های کربناته: *مجله زمین‌شناسی نفت ایران*، ۳(۳).
- Alshuhail, A., Lawton, D., 2007, Time-lapse surface seismic monitoring of injected CO₂ at the Penn West CO₂-EOR site, Violet Grove, Alberta: *Crewes Research report*, 19.
- Alshuhail, A., 2011, CO₂ Sequestration Site Characterization and Time-lapse Monitoring Using Reflection Seismic Methods: PhD thesis, Calgary, Alberta.
- Baechlie, G. T., Massafiero, J. L., Sun, Y. F., 2005, Changes of shear moduli in carbonate rocks: Implications for Gassmann applicability: *The Leading Edge*, 507-510
- Batzle, M., and Zhijing, W., 1992, Seismic properties of pore fluids, *Geophysics*, 57(11), 1396-1408.

- Zhang, J., J., 2001, Time-lapse Seismic Surveys: Rock Physics Basis: MSc. thesis, Calgary, Alberta.
- Zhang, J., J., 2010, Improving Reservoir Simulation with Time-lapse Seismic Surveys: PhD Thesis, Calgary.
- Teubner, Leipzig.
- Vracar, V., 2012, Fluid Flow Modeling and its Seismic Differencing in Time-lapse: PhD Thesis, Calgary, Alberta PHD Thesis, Calgary, Alberta.
- Walsh, J. B., 1965, The effect of cracks on the compressibility of rock: Journal of Geophysical Research, **70**, 381-389.