



## Petroleum Research

Petroleum Research, 2023(August-September ), Vol. 33, No. 130, 25-26

DOI:10.22078/PR.2023.4900.3192

# Pore Pressure Estimation of One of the Gas Fields in Southwestern Iran Using Well Log and Seismic Data

Abolfazl Pourhassan Heris and Reza Falahat\*

1 MSc Student, Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

rezafalahat@sut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2023.4900.3192

Received: August/27/2022

Accepted: May/07/2023

## Introduction

Pore pressure is the pressure caused by the fluid inside the porous space of the rock. When the pore pressure is higher than the hydrostatic pressure, high pressures occur in the formation. The amount of pore pressure is influenced by various factors, such as the porosity of the formation, the type of fluid inside the porous network of the formation, the permeability of the formation and the density of the sedimentary layers of the formation. The existence of areas with high and abnormal pore pressure has been reported in many oil fields in the world, including the North Sea, the Gulf of Mexico, West Africa, the Caspian Sea, and the southwestern oil fields of Iran [1, 2]. Pore pressure data has various applications. This information can be used in various fields such as field development and well planning [3]. The first studies in the field of pore pressure prediction were carried out by Hutman and Johnson in 1965. These studies were based on the measured properties of shale in the sonic log and the pore pressure was calculated based on the deviation of the measured values from the normal trend line of the sonic log. In 1966, Hamm used the equivalent depth method to determine pore pressure. This method is based on the assumption that formations with the same velocity have the same effective stress. Pennebaker predicted pore pressure by examining seismic velocities. In 1972, Eaton determined the effective stress from the ratio between the measured well log parameter and the normal value of that parameter. Then, they estimated the pore pressure based on Terzaghi's principle of the difference between overburden pressure and effective stress. Gardner et al

presented a relationship between overburden pressure, hydrostatic pressure and formation pressure. In the previous methods, insufficient consolidation of the target formation was considered as the main cause of high pressure. Bowers's research in 1995, in addition to insufficient consolidation, also considered fluid expansion as the cause of high pressure. I Atashbari et al estimated pore pressure from the relationship between compressibility of rock and fluid.

## Materials and Methods

In this study, information and data from one of the southwestern gas fields of Iran have been used. This field is located in shallow waters (about 70 meters) in the Persian Gulf region. In order to estimate the pore pressure, information was provided from the studied gas field, which includes resistivity log, sonic log, density log, 3D seismic velocity data, 3D seismic density data and MDT Pressure data. First, using the data of the density log, the overburden pressure gradient was calculated. Then, using the data of the pressures measured at the well site (MDT) and the overburden pressure data, the required coefficients to estimate the pore pressure were determined. In the next step, the trend line of normal changes of each of the resistivity and sonic logs was determined. Finally, using resistivity and sonic logs data, pore pressure was calculated using the set of relationships provided by Eaton in 1975 and Bowers in 1995 at different depths. Then, using 3D seismic velocities and using Petrel software, pore pressures were calculated and modeled using Eaton and Bowers relationships [4-6]. In the last step, a comparison was made between the results

obtained from the data and different methods in order to evaluate them with the pressure data measured at the well site and the error rate of each method was determined.

### Results and Discussion

Comparing the results of pore pressure estimated using different pore pressure estimation methods with MDT measured pore pressures at the well site according to Figure 1 shows that Eaton's velocity method with an average error of 9.7% has a good match with the MDT measured data. It gives the most appropriate spatial expansion of pressure at all depths. The error of the rest of the well logging methods is also given in Figure 1 in order to compare different methods. Although Bowers' method has a lower percentage of error than Eaton's method, it shows problems at shallow depths, which indicates the high sensitivity of this method to the measured data of MDT pressure at the well site.

In other words, at shallow depths without pressure measurement, the pore pressure estimated by this method has a significant error. To confirm the model and the estimated values using seismic velocities, the well pressure logs were upscaled, and then were compared with the values obtained through different methods. A relatively average agreement (55%) with Eaton's method and a good agreement (78%) with Bowers method were observed. Comparing the results of the estimated pressure with the seismic velocities shows the strong dependence of the Bowers method on the measured MDT pressures at the well site. In other words, at depths where the pressure has not been measured, it provides an estimate with a significant error, but Eaton's method provides a relatively suitable answer for all depths (Figure 2). Therefore, Eaton's method using velocity is suggested as the most suitable method for estimating pore pressure.

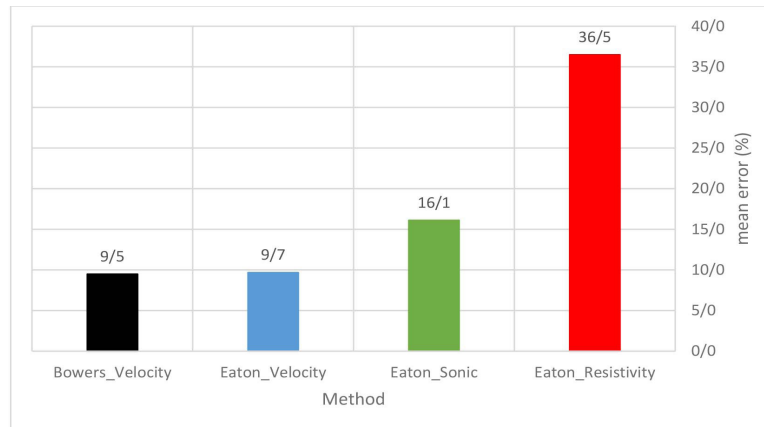


Fig. 1 The average error rate of each well log-based method.

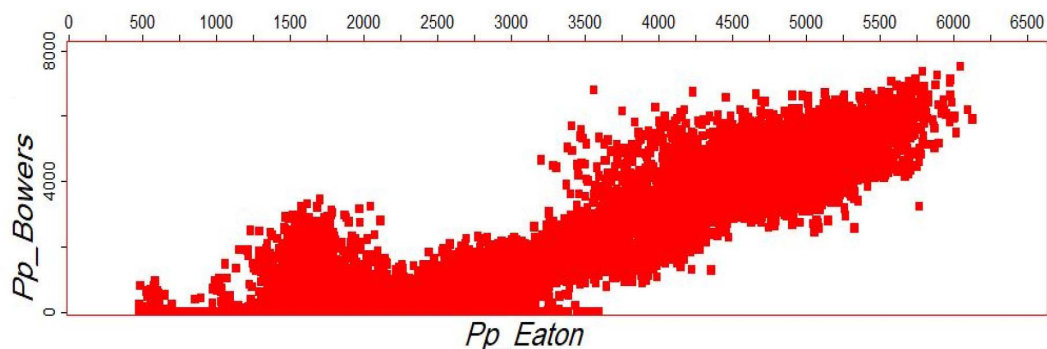


Fig. 2 Comparison of estimated pressures with seismic data.

### Conclusions

In this study, pore pressure was estimated using well logs and seismic data. For this Purpose, we used Bowers and Eaton's methods, which are based on the use of resistivity, sonic and velocity logs data. According to the results, the Bowers velocity and the Eaton velocity method have a lower average error value among the well logging methods compared to the MDT measured

pressures. In the following, it was observed that Eaton's velocity method obtained from seismic data provides a suitable answer for all depths. However, Bowers' method, due to its high sensitivity to the existence of measured pressure data at the well site and the lack of this information at shallow depths, provide suitable answer only on the reservoir areas where the measured pressure data were available. Among the methods

studied in this research, the Eaton velocity method obtained from seismic data provides the best estimate of the pore pressure of this gas field and is recommended for use in other similar fields.

# References

1. Mohammadi, M., Soleymani, B., Mahmoudian, M. (2017). Formation abnormal pressure prediction using 3D seismic velocity data of copal field, Petroleum Research Journal, 103-115.
2. Azadpour, M., Shadmanaman, N. (2016). Investigating the mechanisms of creating high pore pressure in one of the hydrocarbon fields in the South of Iran, Petroleum Research Journal, 147-160.
3. Adim, A., Riyahee, M. A., Bagheri, M. (2018). Pore pressure estimation by Eaton and Bowers methods using seismic and well survey data, Journal of Applied Geophysics Research, 267-275.
4. Eaton, B. A. (1972). The effect of overburden stress on geopressures prediction from well logs, Journal of Petroleum Technology, 3719, 929-934.
5. Eaton, B. A., (1975), The equation for geopressure prediction from well logs, Presented at the Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers.
6. Bowers, G. L., (1995), Pore pressure estimation from velocity data: accounting for over pressure mechanisms besides under compaction, IADC/SPE Drilling Conference Proceedings, 515-530.

# تخمین فشار منفذی یکی از میادین گازی جنوب غربی ایران با استفاده از نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای

ابوالفضل پورحسن هریس و رضا فلاح<sup>\*</sup>

دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

## چکیده

تخمین و پیش‌بینی فشار منفذی امری ضروری برای جلوگیری از مخاطرات ناشی از حفاری در مناطق با فشار منفذی بالا است. با پیش‌بینی فشار منفذی می‌توان در برنامه‌ریزی چاه‌ها، لوله‌گذاری و وزن گل حفاری مناسب منطقه از این اطلاعات استفاده نمود. امروزه همچنین به دلیل هزینه بالای ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم فشار منفذی استفاده از روش‌های غیرمستقیم مقرون به صرفه‌تر هستند. هدف اصلی این تحقیق تخمین و پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش‌ها مختلف و مقایسه کارایی آن‌ها است. در روش چاه‌نگاری، فشار منفذی طبق روابط ارائه شده توسط ایتون با سه روش که از نگاره‌های مقاومت ویژه، سونیک و سرعت استفاده می‌کند تخمین زده شد. در ادامه، با به کارگیری روش باورز، فشار روباره با استفاده از اطلاعات نگاره چگالی محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطه بین سرعت و تنش موثر، تنش موثر محاسبه و در نهایت، فشار منفذی با استفاده از رابطه ترزاقی تخمین زده شد. در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی و با به کارگیری دو روش سرعت ایتون و باورز، فشار منفذی به صورت مکعب سه بعدی تخمین زده شد. سپس با استفاده از اطلاعات فشاری یکی از چاه‌های موجود، مکعب‌های سه بعدی تخمین زده شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد روش سرعت ایتون با خطای ۹/۷٪ انطباق خوبی را با داده‌های فشار اندازه‌گیری شده در محل چاه دارد و مناسب‌ترین گستردگی فضایی فشار را در عمق‌های مخزنی و همچنین در مناطق سطحی تر ارائه می‌کند؛ ولی روش سرعت باورز به دلیل حساسیت زیاد آن به وجود داده‌های فشار اندازه‌گیری شده، نتایج خوبی در مناطق کم عمق نداشته است. همچنین روش‌های مقاومت ویژه و سونیک ایتون همراه با خطای بالایی بوده‌اند؛ بنابراین، روش سرعت ایتون در مناطق مشابه برای تخمین فشار منفذی پیشنهاد می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** تخمین فشار منفذی، فشار بالا، چاه‌نگاری، داده‌های لرزه‌ای، روش ایتون، روش باورز

## مقدمه

متخلخل سنگ اطلاق می‌شود. هنگامی که میزان فشار منفذی از فشار هیدرواستاتیک بسیار بیشتر باشد فشارهای زیاد در سازند به وجود می‌آیند. میزان فشار منفذی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار

فشار منفذی به فشار ناشی از سیال درون فضای

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی  
rezafalahat@sut.ac.ir  
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4900.3192)

پوش سنگ و کارایی تله‌های نفتی و در نهایت مسیر مهاجرت هیدروکربن استفاده می‌شود. مناطق با فشار بالا در اثر عوامل مختلفی ایجاد می‌شوند که می‌توان به عدم تحکیم کافی، گرفتادن سیال سازندی و عدم خروج آن از بافت رسوبات، افزایش حجم سیال مخزن در اثر انبساط حاصل از تبدیل نفت به گاز، نیروی شناوری و جابه‌جایی و مهاجرت سیال اشاره نمود که هر کدام از عوامل ذکر شده به نحوی در ایجاد مناطق فشار بالا اثر گذارند [۴]. به‌طور معمول در هر کدام از چاه‌های نفتی برای تعیین برخی خواص پتروفیزیکی و مخزنی مثل تخلخل، تراوایی، لیتولوژی و غیره، نگاره‌های مختلفی (چگالی، گاما، صوتی، مقاومت و غیره) در داخل چاه برداشت می‌شوند که با استفاده از این اطلاعات می‌توان فشار منفذی را محاسبه و با استفاده از روش‌های زمین آماری در کل منطقه مدل‌سازی نمود.

اولین مطالعات در زمینه پیش‌بینی فشار منفذی توسط هاتمن و جانسون انجام شد که این مطالعات براساس خصوصیات اندازه‌گیری شده شیل در نمودار نگاره صوتی صورت گرفت و فشار منفذی بر اساس انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از خط روند نرمال نگاره صوتی شد. هام از روش عمق معادل در تعیین فشار منفذی استفاده کرد. این روش بر این فرض استوار است که سازندهای با سرعت مشابه، دارای تنش موثر یکسان هستند. پنه باکر با بررسی سرعت‌های لرزه‌ای به پیش‌بینی فشار منفذی پرداخت. ایتون از نسبت بین پارامتر چاه‌نگاری اندازه‌گیری شده و مقدار نرمال آن پارامتر، تنش موثر را تعیین کرد و بر اساس اصل ترزاقی از اختلاف بین فشار روباره و تنش موثر، فشار منفذی را تخمین زد. نقطه ضعف روش ایتون در نیاز به پروفایل تراکم نرمال شیل است. گاردنر و همکاران رابطه‌ای را بین فشار روباره، فشار هیدرواستاتیک و فشار سازندی ارائه نمودند. در روش‌های قبل، عدم تحکیم کافی سازند موردنظر به‌عنوان عامل اصلی

دارد که می‌توان به تخلخل سازند، نوع سیال داخل شبکه متخلخل سازند، تراوایی سازند و تراکم لایه‌های رسوبی سازند اشاره نمود. پیش‌بینی و محاسبه دقیق این فشارها در پروژه‌های صنعت نفت (اکتشاف، تولید و حفاری) از اهمیت به‌سزایی برخوردارند [۱ و ۲]. ضرر و زیان‌های مالی حاصل از حفاری در مناطق با فشار بالا نیاز به شناخت و مطالعه این فشارها را دوچندان کرده است. برای شناخت این مناطق باید برروی خواص فیزیکی و شیمیایی سیال منفذی و تنش‌های موجود برروی توالی‌های رسوبی منطقه تحقیق و مطالعه صورت گیرد. وجود مناطقی با فشار منفذی بالا و غیرطبیعی در بسیاری از میدان‌های نفتی جهان از جمله دریای شمال، خلیج مکزیک، غرب آفریقا، دریای خزر و میدان‌های جنوب غربی نفتی ایران گزارش شده است. داده‌های فشار منفذی کاربرد و استفاده‌های مختلفی دارند. از این اطلاعات می‌توان در زمینه‌های مختلفی مثل توسعه میدان‌ها و برنامه‌ریزی چاه‌ها استفاده نمود. با شناخت مناطق فشار بالا و پیش‌بینی دقیق فشار منفذی می‌توان در بسیاری از موارد از جمله کاهش هزینه‌های حفاری، ایمنی چاه و حفظ شرایط زیست‌محیطی بهره برد. بنابراین شناخت کافی و دقیق از فشار منفذی می‌تواند در طراحی، کنترل، ایمنی و حفظ محیط‌زیست کمک شایانی کند. کاربرد دیگر این اطلاعات کمک به محاسبه و انتخاب وزن گل حفاری مناسب است که از فروریختن و ناپایداری دیواره چاه و همچنین ایجاد شکستگی جلوگیری کند [۳]. اهمیت تعیین وزن گل حفاری بدین دلیل است که برای جلوگیری از فوران یا ریزش چاه باید فشار گل حفاری از گرادیان فشار منفذی سازند زیاد باشد. از طرف دیگر، این فشار نباید بیشتر از گرادیان فشار شکست سازند باشد زیرا موجب ایجاد شکستگی در سازند و هرز روی گل حفاری و موجب آسیب به سازند می‌شود. در حوزه مربوط به مهندسی اکتشاف نفت، از این اطلاعات برای بررسی و کنترل

سورمه، مند، نیریز، کنگان، دالان بالایی، نار و دالان پایینی می‌باشد. مخازن اصلی گاز در این میدان شامل سازندهای کربناته کنگان (تریاس)، سازند دالان بالایی و سازند دالان پایینی (پرمین) است. نگاره‌های موجود در میدان مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

### روش تحقیق

#### روش‌های مبتنی بر چاه‌نگاری

روش ایتون

روش ایتون رایج‌ترین روش تخمین مقدار فشار منفذی است. ایشان عدم تحکیم کافی لایه‌های شیلی را به‌عنوان عامل ایجاد فشار غیرنرمال در نظر گرفت. در روش ایتون از یک ضریب توانی مخصوص منطقه استفاده می‌شود. تحقیقات ایتون منجر به ارائه مجموعه روابطی برای تعیین فشار منفذی با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری شد که این معادلات از اطلاعات نگاره‌های مختلف چاه (مقاومت، زمان سیر صوت و ...) استفاده می‌کند. تمامی روابط ارائه شده توسط ایتون دارای تئوری مشابه هستند [۷]. روش ایتون در حقیقت، نسخه اصلاح شده روش عمق معادل است که توسط هاتمن و جانسون ارائه گردیده است. وجه مشترک هر دو روش استناد به وابسته بودن فشار روباره به فشار منفذی و تنش موثر عمودی می‌باشد (رابطه ترزاقی). ایتون روابط زیر را با استفاده از اطلاعات نگاره‌های زمان سیر موج سونیک، مقاومت و سرعت ارائه داد [۸].

تخمین فشار منفذی با استفاده از اطلاعات نگاره مقاومت ویژه الکتریکی به‌صورت رابطه ۱ است:

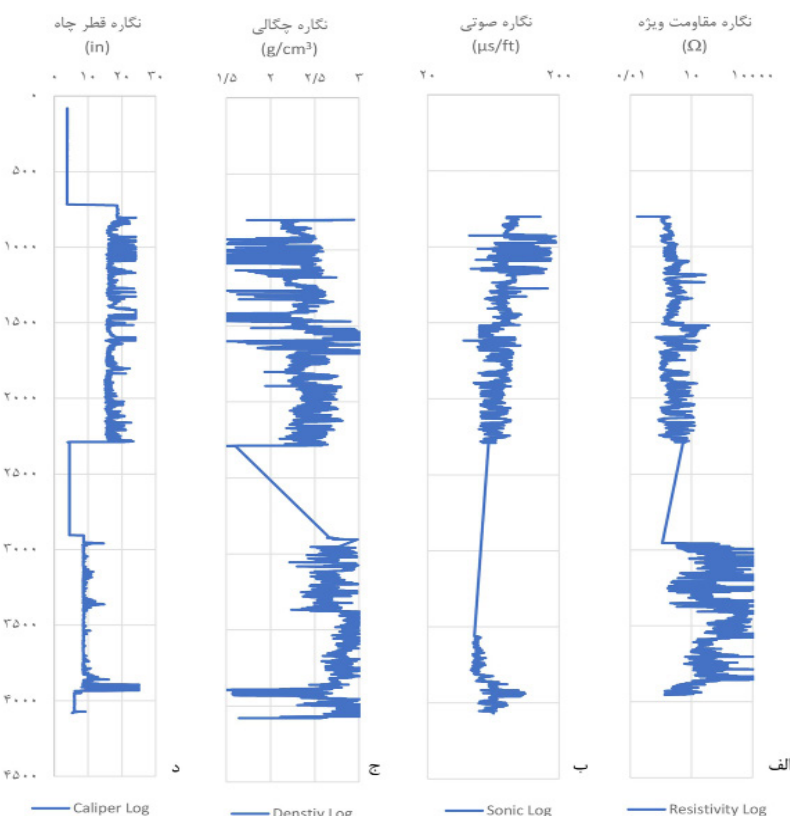
$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{hyd}) \left( \frac{R_i}{R_n} \right)^n \quad (1)$$

که  $P_p$  فشار منفذی تخمین زده شده،  $P_{ob}$  فشار روباره،  $P_{hyd}$  فشار هیدرو استاتیک،  $R_i$  مقاومت الکتریکی مشاهده شده،  $R_n$  مقاومت الکتریکی حالت نرمال و  $n$  ضریب ایتون می‌باشد.

بررسی‌های باورز علاوه‌بر عدم تحکیم کافی، انبساط سیال را نیز به‌عنوان عامل ایجاد فشار بالا در نظر گرفت. در تئوری باورز بر خلاف تئوری ایتون نیازی به پروفایل تراکم نرمال شیل نیست. آتشباری و همکاران از رابطه بین تراکم‌پذیری سنگ و سیال، فشار منفذی را تخمین زدند. در این روش، باتوجه‌به اینکه تغییر فضای منفذی تابع تراکم‌پذیری سنگ و سیال است، وقتی سازند تحت تراکم قرار می‌گیرد، فضای منفذی کاهش می‌یابد. این باعث اعمال فشار برروی سیال منفذی می‌شود. ازاین‌رو از تراکم‌پذیری به‌عنوان یک پارامتر تعیین فشار استفاده شده است. محمدی و همکاران در یک مطالعه به پیش‌بینی فشار منفذی میدان کوپال با استفاده از روش باورز پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه حاکی از وجود دو ناحیه با فشار منفذی بالا در منطقه مورد مطالعه است. ایرج مداحی و همکاران در مطالعه‌ای نتایج تخمین فشار منفذی با استفاده از دو داده مقاومت صوتی و داده سرعت لرزه‌ای را مقایسه کرده و نشان دادند داده‌های مقاومت صوتی نتایج بهتری را نسبت به داده‌های سرعت لرزه‌ای ارائه می‌دهند. در این تحقیق، فشار منفذی در یکی از میدان‌های گازی جنوب ایران تخمین زده شد. برای این کار، از اطلاعات حاصل از چاه‌نگاری، لرزه‌نگاری و فشارهای اندازه‌گیری شده استفاده شد و فشار منفذی توسط روش‌های متعددی تخمین زده شدند. با مقایسه روش‌های مختلف، روش مناسب و بهینه برای تخمین فشار منفذی پیشنهاد گردید.

#### زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این پروژه مربوط به یکی از میدان‌های گازی جنوب غربی ایران می‌باشد. این میدان گازی در جنوب شرقی بندر بوشهر و نزدیک میدان عظیم پارس جنوبی قرار دارد. چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه به‌ترتیب از سطح به عمق شامل سازندهای آسماری، جهرم، ایلام، سروک، کژدمی، داریان، فهلان، هیث،



شکل ۱ نگاره‌های مختلف میدان مورد مطالعه: (که الف) نگاره مقاومت ویژه، (ب) نگاره صوتی، (ج) نگاره چگالی و (د) نگاره قطر چاه را نشان می‌دهد

مطالعه می‌باشد که این ضریب می‌تواند مقادیر مختلفی را برای هر ناحیه دارا باشد [۷]. روش ایتون بیشترین استفاده را در تعیین فشار منفذی دارد. به‌منظور استفاده از رابطه ایتون طبق روابط ارائه شده توسط ایشان باید فشار روباره، فشار هیدرواستاتیک نرمال، خط روند نرمال تغییرات پارامتر موردنظر و ضریب توانی آن منطقه مشخص شود. به‌طور کلی، مراحل کار روش ایتون به‌صورت زیر می‌باشد:

#### الف- تعیین خط روند تغییرات نرمال نگاره‌ها

برای تعیین خط روند نرمال تغییرات هر پارامتر (نگاره مقاومت ویژه، نگاره سونیک و نگاره سرعت امواج فشارشی)، با رسم نمودار تغییرات هر نگاره نسبت به عمق و با تعیین مناطق خیلی که تغییرات مقادیر نگاره در آن بازه روند نرمال دارد، با برازش خطی در این بازه در نرم‌افزار اکسل مقادیر نرمال تعیین گردیدند.

تخمین فشار منفذی با استفاده از اطلاعات نگاره زمان سیر سونیک و با به‌کارگیری رابطه ۲ صورت می‌گیرد:

$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{hyd}) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_i} \right)^n \quad (2)$$

که  $P_p$  فشار منفذی تخمین زده شده،  $P_{ob}$  فشار روباره،  $P_{hyd}$  فشار هیدرو استاتیک،  $\Delta t_i$  زمان عبور مشاهده شده،  $\Delta t_n$  زمان عبور حالت نرمال و  $n$  ضریب ایتون می‌باشد. تخمین فشار منفذی با استفاده از اطلاعات نگاره سرعت به‌صورت رابطه ۳ است:

$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{hyd}) \left( \frac{V_i}{V_n} \right)^n \quad (3)$$

که  $P_p$  فشار منفذی تخمین زده شده،  $P_{ob}$  فشار روباره،  $P_{hyd}$  فشار هیدرو استاتیک،  $V_i$  سرعت مشاهده شده،  $V_n$  سرعت حالت نرمال و  $n$  ضریب ایتون می‌باشد [۹ و ۱۰]. ثابت نمایی به‌کار رفته در روابط بالا وابسته به سنگ‌شناسی ناحیه مورد

رابطه ایتون در دسترس می‌باشد و با جاگذاری در رابطه ایتون، فشار منفذی با استفاده از داده‌های مختلف (نگاره مقاومت ویژه، سونیک و سرعت امواج فشارشی) محاسبه گردید که نتایج در شکل ۲ قابل مشاهده است.

روش باورز

روش باورز، رابطه بین فشار موثر و سرعت را بیان می‌کند که به این روش، روش فشار موثر نیز گفته می‌شود. در روش باورز بر خلاف روش ایتون نیازی به پروفایل تراکم نرمال شیل نیست. همچنین در این روش، باورز علاوه بر تراکم نرمال شیل، تراکم غیرنرمال شیل و اثر باربرداری را لحاظ نمود و رابطه ۴ را بیان نمود [۱۱]:

$$V = V_o + AP_{efc}^B \quad (4)$$

که سرعت در رسوبات نامتراکم اشباع از سیال، و ضرایب کنترل کننده تغییرات سرعت با افزایش فشار موثر هستند. برای استفاده از روش باورز در مناطقی که باربرداری صورت گرفته است.

## ب- فشار هیدرواستاتیک نرمال

فشار هیدرواستاتیک وابسته به ترکیب شیمیایی سیال سازندی و نوع سیال سازندی است. در این مطالعه از نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط آزاد پور و همکاران استفاده و گرادیان فشار هیدرواستاتیک ۰/۴۶۴ psi/ft در نظر گرفته شد.

## ج- فشار روباره

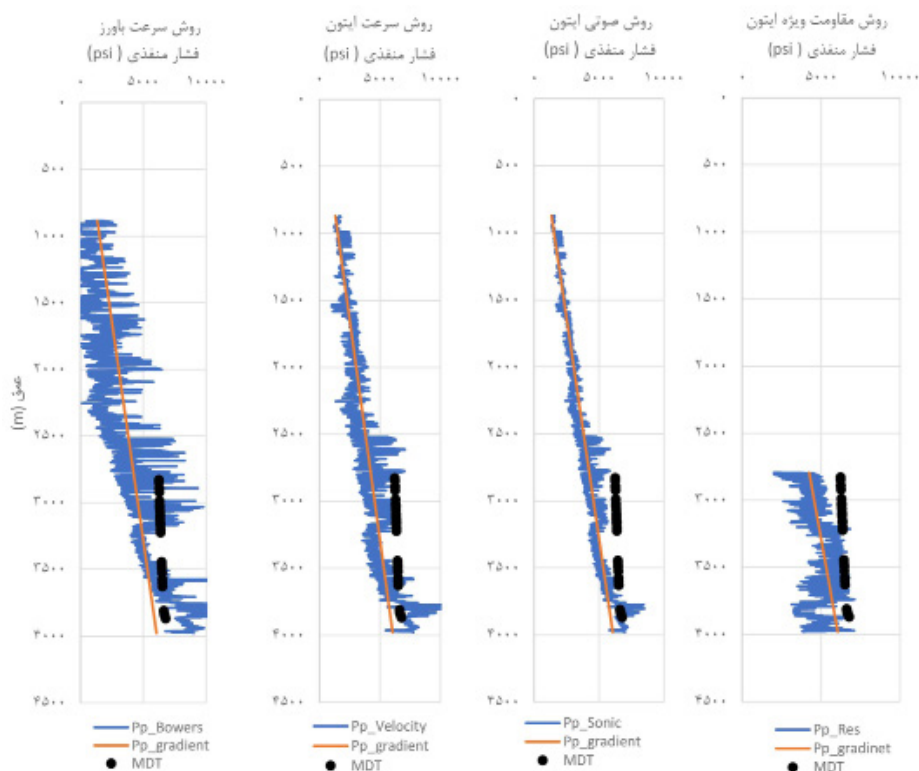
برای محاسبه فشار روباره از نگاره چگالی بالک استفاده شد و با فرمول نویسی در نرم افزار اکسل، گرادیان فشار روباره ۱/۰۷ psi/ft تعیین گردید.

## د- ضریب نمایی ایتون

مقدار این ضریب نمایی را می‌توان از دو روش سعی و خطا و همچنین با بازنویسی رابطه ایتون برحسب این ضریب نمایی و استفاده از اطلاعات فشاری موجود، تخمین زد. در این مطالعه مقدار ضریب نمایی ۰/۷- تخمین زده شد.

## ه- تخمین فشار منفذی

با محاسبه ضریب نمایی ایتون، تمامی پارامترهای



شکل ۲ فشار منفذی تخمین زده شده توسط الف) رابطه مقاومت ویژه ایتون، ب) صوتی ایتون، ج) سرعت ایتون و د) سرعت باورز

از سوی دیگر باتوجه به این که داده‌های لرزه‌ای محدوده وسیعی از مخزن و عمق‌های مختلف را پوشش می‌دهند، استفاده از این روش، از جمله روش‌های با صرفه و قابل اطمینان جهت تخمین فشار منفذی می‌باشد. با داشتن اطلاعات لرزه‌ای در فضای بین چاه‌های یک میدان می‌توان تخمین دقیق‌تری از فشار منفذی منطقه را به دست آورد [۵]. اساس روش‌های لرزه‌ای عمدتاً بر پایه تأثیر فشار مخزن بر سرعت لرزه‌ای (خصوصاً سرعت امواج P) استوار هستند. امروزه با پیشرفت روزافزون روش‌های لرزه‌نگاری سه بعدی و چهاربعدی، تخمین و پیش‌بینی دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر از فشار منفذی امکان‌پذیر می‌باشد. دامنه بازتاب‌های لرزه‌ای تابع مقاومت صوتی می‌باشد که تغییرات فشار منفذی اثر قابل توجهی را روی این پارامتر نشان می‌دهد. همچنین نباید از تأثیر سیال سازند روی سرعت صوت چشم‌پوشی کرد. فشارهای غیرعادی را می‌توان از طریق تغییرات در سرعت‌های لرزه‌ای با عمق شناسایی کرد [۶]. روابط ارائه شده برای روش‌های لرزه‌ای اغلب تجربی و بر اساس مطالعات موردی و داده‌های حقیقی به دست آمده‌اند. در روش لرزه‌ای از اصل بنیادی ترزاقی استفاده می‌شود. طبق این اصل، مقدار فشار منفذی برابر اختلاف بین مقدار فشار روباره و تنش موثر است؛ بنابراین با استفاده از مکعب سرعت لرزه‌ای حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، مقادیر فشار روباره و تنش موثر را محاسبه کرده و نهایتاً از اختلاف بین این دو مقدار، می‌توان فشار منفذی را محاسبه نمود. برای محاسبه مکعب تنش موثر می‌توان از روش باورز که روش تنش موثر نیز نامیده می‌شود استفاده نمود. به منظور تهیه مکعب فشار روباره از مکعب مقاومت صوتی (حاصل ضرب سرعت در چگالی) استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از تبدیل مکعب سرعت لرزه‌ای به مکعب چگالی با استفاده از رابطه گاردنر استفاده کرد. شمایل کلی رابطه گاردنر به صورت رابطه ۷ است:

باید رابطه باورز تصحیح و اثر بار برداری را لحاظ نمود. در این صورت باید حداکثر فشاری که در آن بار برداری رخ داده است مشخص شود. همچنین مسیر بار برداری توسط یک تابع‌نمایی از اطلاعات چاه‌های دیگر به دست می‌آید که رابطه تصحیح شده باورز به صورت رابطه ۵ می‌باشد:

$$V = V_o + A \left( \frac{P_{efc}}{P_{efc \max}^{1-u}} \right)^B \quad (5)$$

که  $u$  ثابت بار برداری و  $P_{efc \max}$  حداکثر فشار موثر برای شروع بار برداری است که مقدار آن از رابطه ۶ قابل محاسبه است:

$$P_{efc \max} = \left( \frac{V_{\max} - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (6)$$

که  $V_{\max}$  حداکثر سرعت مشاهده شده است. برای استفاده از این روش، نیاز به سرعت امواج در تنش موثر صفر  $V_0$  و نیز ضرایب  $A$  و  $B$  می‌باشد. مراحل کار روش باورز به صورت زیر است:

#### الف- تعیین تنش موثر

برای این کار با استفاده از اطلاعات فشاری موجود، همچنین فشار روباره محاسبه شده از نگاره چگالی، با توجه به اصل ترزاقی، تنش موثر محاسبه گردید.

#### ب- محاسبه ضرایب $V_0$ ، $A$ و $B$

برای محاسبه ضرایب، ابتدا با رسم نمودار تنش موثر و نگاره سرعت امواج فشارشی در نرم‌افزار متلب و با اعمال برازش درجه دوم بر روی این داده‌ها، ضرایب  $V_0$ ،  $A$  و  $B$  به ترتیب ۳۷۹۴، ۰/۰۰۰۰۰۰۰۲۹۳۸ و ۲/۸۵ محاسبه گردیدند.

#### ج- تخمین فشار منفذی

با محاسبه تمامی ضرایب مورد نیاز، با جاگذاری در رابطه باورز، تنش موثر محاسبه شد و در نهایت با استفاده از اصل ترزاقی و با فرمول‌نویسی در نرم‌افزار اکسل، فشار منفذی محاسبه گردید که فشار منفذی تخمین زده شده توسط این روش در شکل ۲ قابل مشاهده است.

#### روش‌های مبتنی بر داده‌های لرزه‌ای

مزیت استفاده از داده‌های لرزه‌ای نسبت به روش‌های دیگر، تخمین فشار منفذی قبل از حفر چاه است.

نگاره چگالی حدود ۴۶٪ و بین داده‌های حاصل از روش گاردنر و نگاره چگالی حدود ۴۴٪ به‌دست آمد. سرانجام با انجام واسنجی بین نگاره چگالی و مکعب چگالی حاصل از مقاومت صوتی، مکعب چگالی تصحیح و مکعب فشار روباره در نرم‌افزار پترل محاسبه گردید (شکل ۳).

#### ج- واسنجی سرعت‌های لرزه‌ای

برای استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای حاصل از امپدانس صوتی، واسنجی بین این داده و نگاره سرعت امواج فشارشی، جهت تصحیح داده‌های مکعب سرعت امواج لرزه‌ای صورت گرفت.

#### د- مکعب فشار منفذی

در نهایت با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده در بخش چاه‌نگاری (خط روند نرمال تغییرات و ضریب نمایی ایتون)، با فرمول‌نویسی در نرم‌افزار پترل (طبق رابطه ۳)، فشار منفذی حاصل از روش ایتون با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای محاسبه گردید که شکل ۴ نمایانگر نتیجه آن می‌باشد. در مرحله بعدی، روش باورز برروی داده‌های لرزه‌ای پیاده گردید و مراحل اجرایی زیر انجام شد:

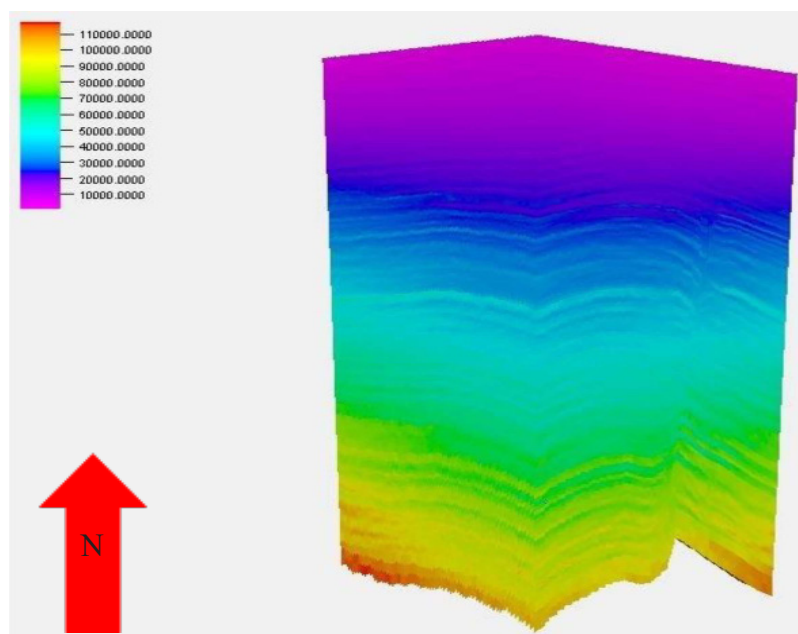
که  $\rho_b$  چگالی حجمی بالک و  $V$  سرعت عبور امواج تراکمی،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابتی هستند که در مناطق مختلف متفاوت می‌باشند و به کمک نمودارهای چاه محاسبه می‌شوند [۱۲ و ۱۳]. مراحل کار روش ایتون با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به‌طور کلی شامل مراحل زیر می‌باشد:

#### الف- مکعب فشار هیدرواستاتیک

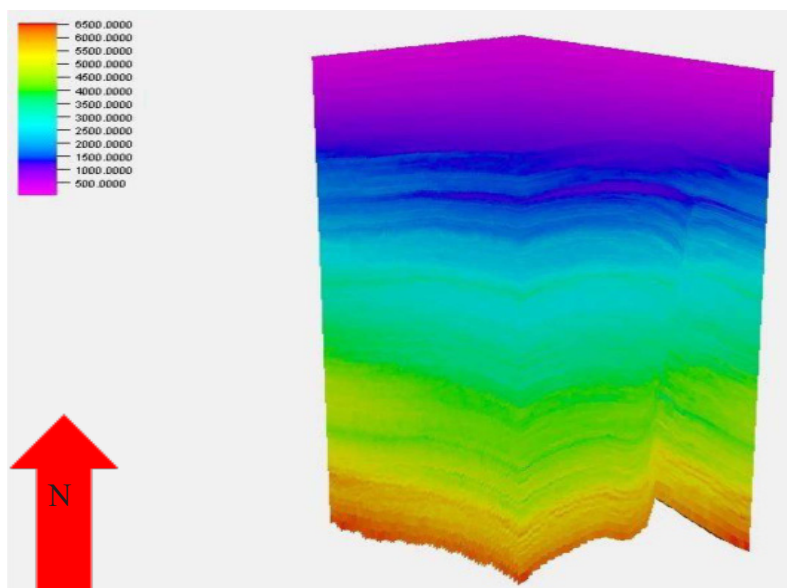
برای محاسبه مکعب فشار هیدرواستاتیک نرمال منطقه در نرم‌افزار پترل، با ضرب گرادیان فشار هیدرواستاتیک (۰/۴۶۴ psi/ft) در مکعب عمق، مکعب فشار هیدرواستاتیک محاسبه گردید.

#### ب- مکعب فشار روباره

جهت محاسبه مکعب فشار روباره، ابتدا نگاره چگالی چاه با استفاده از ابزار بزرگ‌نمایی نگاره چاه نرم‌افزار پترل، با استفاده از روش میانگین‌گیری حسابی بزرگ‌نمایی گردید. سپس برازشی بین داده‌های چگالی حاصل از مقاومت صوتی و روش گاردنر با نگاره چگالی موجود در محل چاه صورت گرفت تا روشی که بیشترین ضریب همبستگی را دارا می‌باشد، تعیین گردد که ضریب همبستگی بین داده‌های چگالی حاصل از مقاومت صوتی با



شکل ۳ مکعب فشار روباره حاصل از داده مکعب چگالی منطقه برحسب psi



شکل ۴ مکعب فشار منفذی حاصل از داده مکعب سرعت لرزه‌ای منطقه به‌روش ایتون برحسب psi

استفاده از اطلاعات فشاری موجود، مقدار ضریب نمایی تخمین زده شد. با محاسبه پارامترهای دیگر رابطه ایتون شامل فشار روباره، فشار هیدرواستاتیک و خط روند نرمال تغییرات نگاره‌های مقاومت ویژه، نگاره سونیک و نگاره سرعت امواج فشارشی و با جاگذاری در رابطه ایتون فشار منفذی توسط داده‌های نگاره‌های مختلف (نگاره مقاومت ویژه، نگاره سونیک و نگاره سرعت امواج فشارشی)، محاسبه گردید. همچنین با داشتن مقادیر فشار روباره و فشارهای اندازه‌گیری شده MDT با محاسبه در نرم‌افزار اکسل، از اختلاف فشارهای MDT و فشار روباره طبق اصل ترزاقی، تنش موثر محاسبه گردید. سپس با رسم نمودار بین داده‌های تنش موثر محاسبه شده و داده‌های نگاره سرعت امواج فشارشی و با اعمال برآزش درجه دوم برروی این داده‌ها، ضرایب رابطه باورز محاسبه گردید. در مرحله بعد با استفاده از ضرایب محاسبه شده و نگاره سرعت امواج فشارشی، تنش موثر از رابطه باورز محاسبه گردید که در نهایت با استفاده از رابطه ترزاقی فشار منفذی از اختلاف فشار روباره و تنش موثر محاسبه شد. در بخش داده‌های لرزه‌ای نیز در هر دو روش ایتون و باورز، از ضرایب محاسبه شده در بخش چاه‌نگاری استفاده شد.

#### الف- مکعب تنش موثر

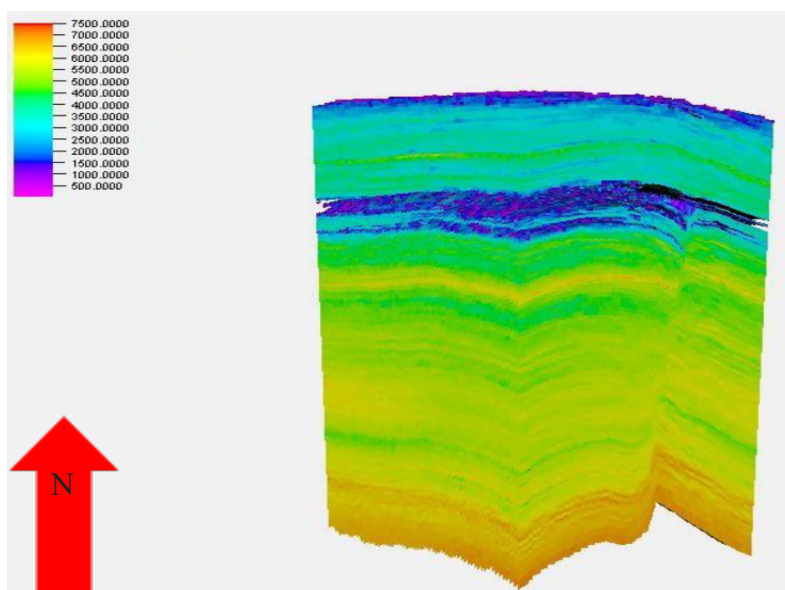
برای ساخت مکعب تنش موثر، از اطلاعات به‌دست آمده در بخش چاه‌نگاری ( $V_0$ ،  $A$  و  $B$ ) و همچنین مکعب سرعت لرزه‌ای واسنجی شده استفاده شد و مکعب تنش موثر طبق شکل ۵ محاسبه گردید.

#### ب- مکعب فشار منفذی

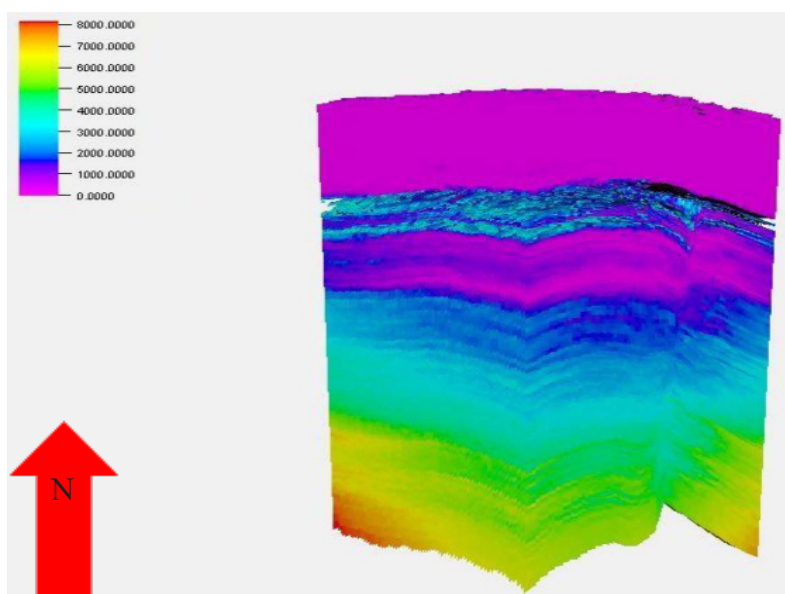
با فرمول‌نویسی در نرم‌افزار پترل و با استفاده از اصل ترزاقی، از اختلاف مکعب‌های فشار روباره و تنش موثر، مکعب فشار منفذی با استفاده از روش باورز و داده‌های سرعت لرزه‌ای طبق شکل ۶ محاسبه گردید.

#### بحث

در این تحقیق از نرم‌افزارهای اکسل، پترل و متلب برای انجام کارهای محاسباتی و مدل‌سازی فشار منفذی میدان مورد مطالعه استفاده شده است. همچنین در این مقاله از فشارهای اندازه‌گیری شده Modular dynamic test (MDT) استفاده شده است. داده‌های MDT میدان مورد مطالعه برای محاسبه ضریب نمایی ایتون و ضرایب رابطه باورز در بخش چاه‌نگاری مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت که با بازنویسی رابطه ایتون بر حسب ضریب نمایی و



شکل ۵ مکعب فشار موثر حاصل از داده مکعب سرعت لرزه‌ای منطقه به‌روش باورز برحسب psi



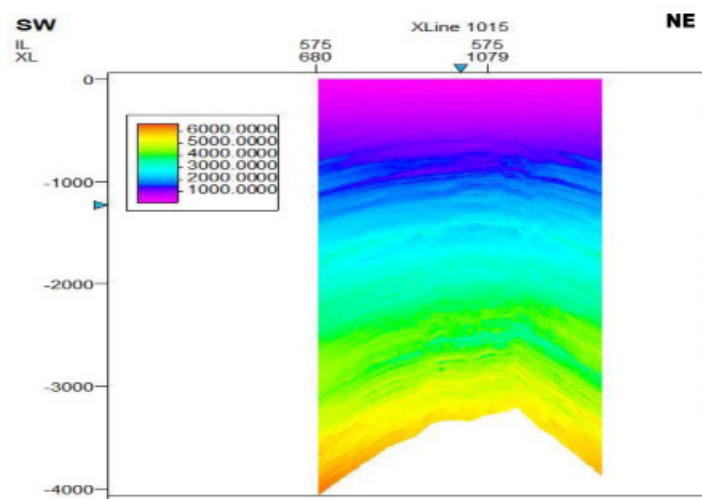
شکل ۶ مکعب فشار منفذی حاصل از داده مکعب سرعت لرزه‌ای منطقه به‌روش باورز برحسب psi

استفاده از مکعب سرعت لرزه‌ای واسنجی شده با نگاره سرعت امواج فشارشی چاه و ضرایب محاسبه شده در بخش چاه‌نگاری (خط روند نرمال تغییرات و ضریب نمایی ایتون)، مکعب فشار منفذی از این روش محاسبه شد. در روش باورز نیز با استفاده از مکعب سرعت لرزه‌ای واسنجی شده و همچنین ضرایب محاسبه شده در بخش چاه‌نگاری ( $A$ ،  $V_0$  و  $B$ )، مکعب تنش موثر محاسبه گردید.

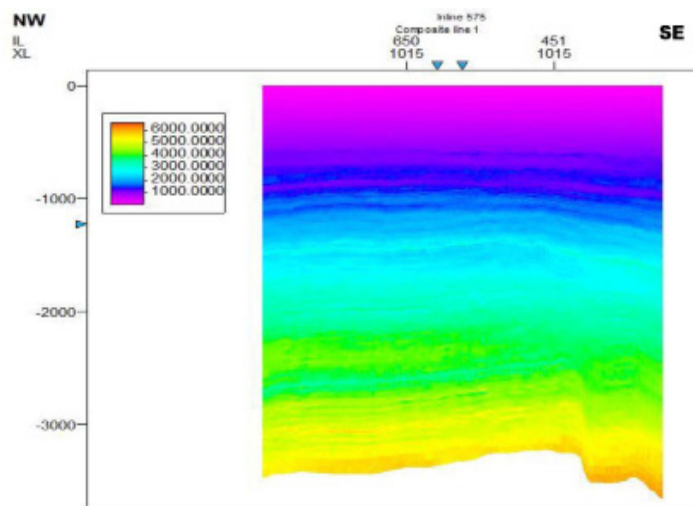
داده‌های لرزه‌ای استفاده شده در این تحقیق، داده‌های پس از برانبارش می‌باشند. در روش ایتون از گرادیان فشار هیدرواستاتیک برای ساخت مکعب فشار هیدرواستاتیک استفاده شد. همچنین با انجام بزرگ‌نمایی نگاره چاه و با انجام واسنجی بین داده‌های چاه و مکعب چگالی حاصل مقاومت صوتی، داده‌های مکعب چگالی تصحیح شده و مکعب فشار روباره محاسبه گردید. در نهایت با

دارد و مناسب‌ترین گستردگی فضایی فشار را در تمامی اعماق به‌دست می‌دهد. خطای بقیه روش‌های چاه‌نگاری نیز در **شکل ۱۱** با هدف مقایسه روش‌های مختلف آورده شده است. روش باورز با وجود درصد خطای کمتر نسبت به روش ایتون، مشکلاتی را در اعماق کم نمایش می‌دهد که نشانگر حساسیت زیاد این روش به داده‌های اندازه‌گیری شده فشار MDT در محل چاه دارد. به عبارت دیگر، در عمق‌های کم و بدون اندازه‌گیری فشار، فشار منفذی تخمین زده شده توسط این روش، حاوی خطای قابل توجهی داشته است.

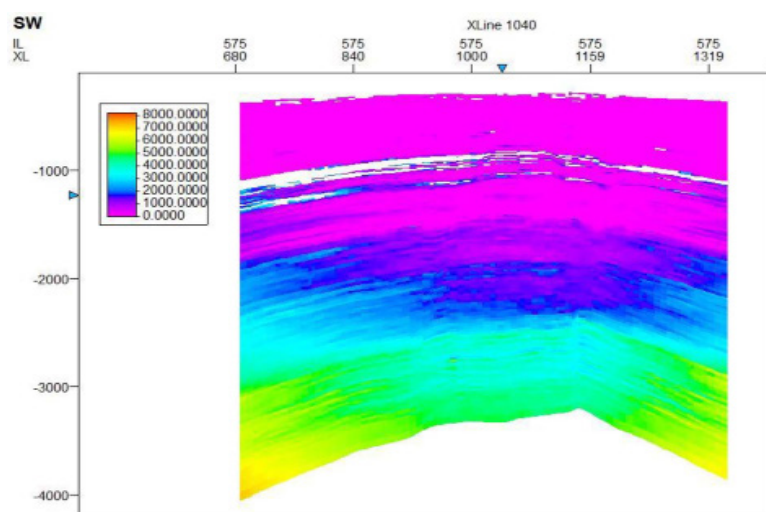
در نهایت با استفاده از اصل ترازقی فشار منفذی از اختلاف فشار روباره و فشار موثر محاسبه گردید. **شکل ۷ الی شکل ۱۰** فشار منفذی تخمین زده شده از روش ایتون و باورز را با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای به ترتیب در مقاطع طولی و عرضی نمایش می‌دهند. مقایسه نتایج فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش‌های مختلف تخمین فشار منفذی با فشارهای منفذی اندازه‌گیری شده MDT در محل چاه طبق **شکل ۱۱** نشان می‌دهد که روش سرعت امواج فشارشی ایتون با خطای میانگین ۹/۷٪ انطباق مناسبی را با داده‌های اندازه‌گیری شده MDT در محل چاه



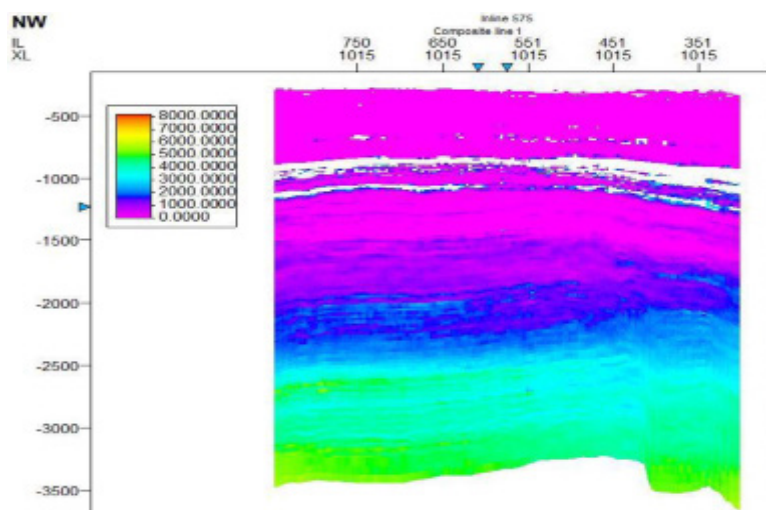
شکل ۷ مقطع طولی فشار منفذی حاصل از روش ایتون با استفاده از داده‌های سرعت‌های لرزه‌ای (فشار برحسب psi)



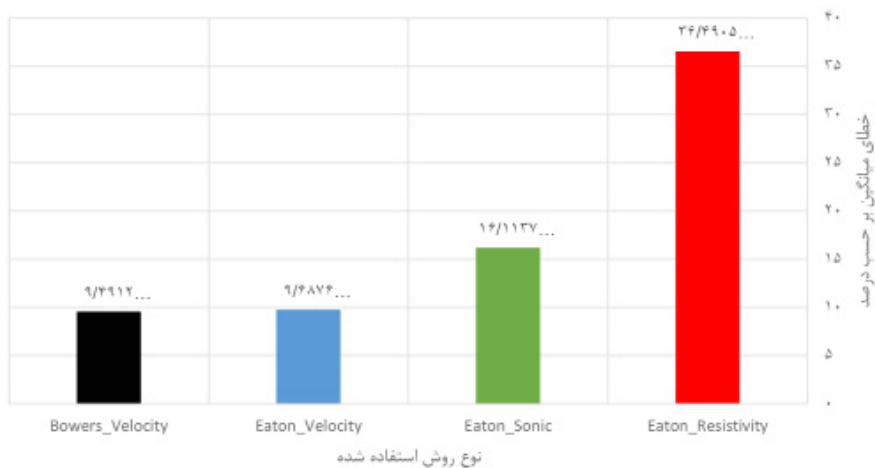
شکل ۸ مقطع عرضی فشار منفذی حاصل از روش ایتون با استفاده از داده‌های سرعت‌های لرزه‌ای (فشار برحسب psi)



شکل ۹ مقطع طولی فشار منفذی حاصل از روش باورز با استفاده از داده‌های سرعت‌های لرزه‌ای (فشار بر حسب psi)



شکل ۱۰ مقطع عرضی فشار منفذی حاصل از روش باورز با استفاده از داده‌های سرعت‌های لرزه‌ای (فشار بر حسب psi)



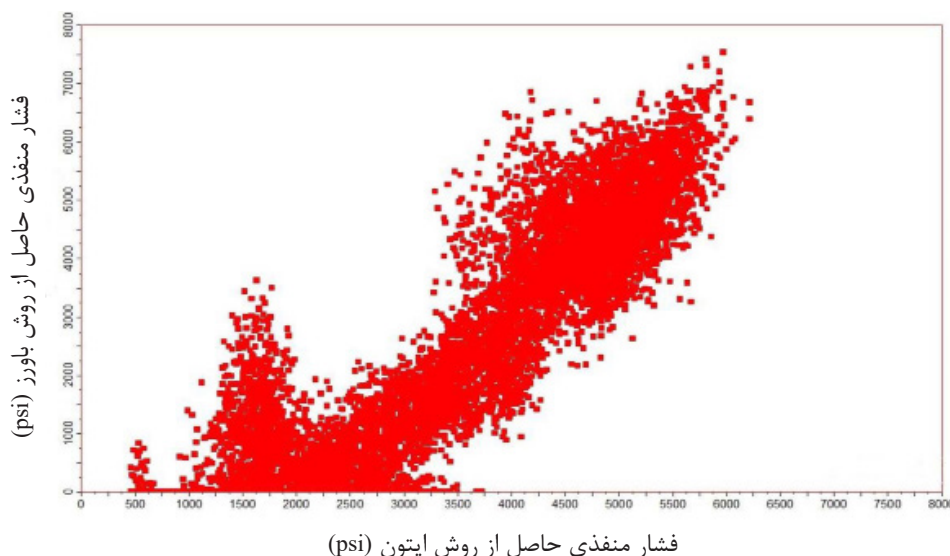
شکل ۱۱ میزان خطای میانگین هر کدام از روش‌های چاه‌نگاری

سرعت، به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای تخمین فشار منفذی پیشنهاد می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، فشار منفذی با استفاده از نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای تخمین زده شد. برای این کار، دو روش باورز و ایتون که مبتنی بر استفاده از مقاومت ویژه، سونیک و سرعت هستند استفاده گردید. طبق نتایج حاصل، روش سرعت باورز و سرعت ایتون دارای مقدار خطای میانگین کمتری در بین روش‌های چاه‌نگاری نسبت به فشارهای اندازه‌گیری شده MDT دارا می‌باشند. در ادامه مشاهده گردید که روش سرعت ایتون حاصل از داده‌های لرزه‌نگاری برای تمامی عمق‌ها جواب مناسبی را ارائه می‌دهد اما روش باورز به‌دلیل حساسیت زیاد به‌وجود داده‌های فشار اندازه‌گیری در محل چاه و کم‌بودن این اطلاعات در عمق‌های کم، فقط برای نواحی مخزنی که اطلاعات اندازه‌گیری شده وجود دارد، جواب مناسبی را ارائه داده است. از بین روش‌های مطالعه شده در این تحقیق، روش سرعت ایتون حاصل از داده‌های لرزه‌نگاری بهترین تخمین را از فشار منفذی این میدان گازی ارائه می‌دهد و برای استفاده در میداین مشابه دیگر پیشنهاد می‌گردد.

برای اطمینان از مدل و مقادیر تخمین زده شده با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای، با بزرگ‌نمایی کردن نگاره فشار یکی از چاه‌ها و مقایسه مقادیر این نگاره با مقادیر به‌دست‌آمده از طریق روش‌های مختلف، از تطابق نسبتاً متوسط حدود ۵۵٪ با روش ایتون و یک تطابق خوب حدود ۷۸٪ با روش باورز را نشان می‌دهد. باتوجه به **شکل ۷** و **شکل ۸** که به‌ترتیب مقطع طولی و عرضی از فشار منفذی تخمین زده شده از روش ایتون با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای را نمایش می‌دهند، نشان از تخمین فشار منفذی نسبتاً خوب برای تمامی اعماق دارد در صورتی که طبق **شکل ۹** و **شکل ۱۰** که به‌ترتیب مقطع طولی و عرضی فشار منفذی تخمین زده شده از روش باورز با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای را نشان می‌دهد، حاکی از مشکلات قابل توجهی در اعماق کمتر است. مقایسه نتایج حاصل از فشار تخمین زده شده با سرعت‌های لرزه‌ای نشان از وابستگی شدید روش باورز به فشارهای اندازه‌گیری شده MDT در محل چاه دارد. به‌عبارت‌دیگر در عمق‌هایی که فشار اندازه‌گیری نشده است تخمین با خطای قابل‌توجه ارائه می‌دهد ولی روش ایتون برای تمامی اعماق جوابی نسبتاً مناسب به‌همراه دارد (**شکل ۱۲**)؛ بنابراین، روش ایتون با به‌کارگیری



**شکل ۱۲** مقایسه فشارهای تخمین زده شده با داده لرزه‌ای حاصل از روش ایتون و باورز (ضریب همبستگی ۹۰٪ می‌باشد)

## مراجع

- [۱]. محمدی، م.، سلیمانی، ب. و محمودیان، م.، (۱۳۹۶). پیش‌بینی فشار غیرعادی سازند با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای سه‌بعدی، میدان کوپال، مجله پژوهش نفت، ۲۷ (۹۷)، ۱۱۵-۱۰۳.
- [۲]. آزادپور، م. و شادمنان، ن. (۱۳۹۵). بررسی مکانیزم‌های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران، مجله پژوهش نفت، ۸۸، ۱۶۰-۱۴۷.
- [۳]. آدیلم، ع.، ریاحی، م. ع. و باقری، م. (۱۳۹۷). تخمین فشار منفذی به روش‌های ایتون و باورز با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و چاه‌پیمایی: نشریه پژوهش‌های کاربردی ژئوفیزیک، ۴ (۲)، ۲۶۷-۲۷۵.
- [۴]. لیثی، ا. و فلاحت، ر.، (۱۴۰۰). بررسی و مقایسه روش‌های مرسوم تخمین تخلخل با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری در یکی از میادین نفتی خلیج فارس، مجله پژوهش نفت، ۱۱۹، ۹۷-۸۸.
- [۵]. نصرت، ا.، (۱۳۸۶). پیش‌بینی فشار منفذی توسط نشانگرهای لرزه‌ای سه‌بعدی: پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالوژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۶]. سلیمانی، ح. ر. (۱۳۹۱). پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از وارون‌سازی و تحلیل سرعت لرزه‌ای: مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۴)، ۷۰-۵۷.
- [7]. Kumar B. (2011). Pore pressure prediction from well logs and seismic data, SPG, 5-11.
- [8]. Stunes, S. (2012). Methods of pore pressure detection from real-time drilling data: petroleum engineering and applied geophysics, Norwegian University of Science and Technology, hdl.handle.net/11250/239811.
- [9]. Eaton, B. A. (1972). The effect of overburden stress on geopressures prediction from well logs: Journal of Petroleum Technology, 3719, 929-934, doi.org/10.2118/3719-PA.
- [10]. Eaton, B. A. (1975). The equation for geopressure prediction from well logs: Paper SPE 5544 Presented at The Fall Meeting of The Society of Petroleum Engineers, Dallas TX, doi.org/10.2118/5544-MS.
- [11]. Bowers, G. L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: accounting for over pressure mechanisms besides under compaction, SPE Drill & Compl 10 (02): 89-95, doi.org/10.2118/27488-PA.
- [12]. Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., & Gregory, A. (1974). Formation velocity and density: the diagnostic basics for stratigraphic traps: Geophysics, 39(6). 770-780, doi.org/10.1190/1.1440465.
- [13]. Dalvand, M., & Falahat, R. (2021). A new rock physics model to estimate shear velocity log, Journal of Petroleum Science and Engineering, 196, 107697, doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107697.