

## برآورد فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی در یک میدان نفتی

پریسا حجت‌نیا<sup>۱</sup> و محمدعلی ریاحی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (لرزه‌شناسی)، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۴/۷، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

### چکیده

فشار منفذی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخازن هیدروکربوری است. بی‌اطلاعی از چگونگی توزیع این فشار در نقاط گوناگون میدان در حین حفاری ممکن است سبب بروز خطرات جدی جانی و مالی بسیار شدیدی شود. استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی تنها راهی است که می‌تواند فشار منفذی را قبل از حفاری پیش‌بینی کند. در این تحقیق ابتدا سرعتی که از پردازش داده‌های لرزه‌ای به‌دست آمده است، به کمک نمودارهای صوتی موجود در چاه‌های منطقه تصحیح و سپس با استفاده از رابطه موجود بین سرعت و فشار موثر، فشار موثر در منطقه محاسبه شد. با محاسبه فشار روباره و استفاده از رابطه بنیادی ترزاقی، فشار منفذی در منطقه به‌دست آمد. به‌منظور پراکنده کردن اطلاعات موجود در چاه‌ها (سرعت یا فشار) در کل منطقه، از روش‌های برآورد زمین‌آماري (یک یا چندمتغیره) استفاده شد. برای استفاده از روش برآورد چندمتغیره (کوکرینجینگ) لازم است تا متغیر دیگری علاوه بر سرعت یا فشار در نقاط گوناگون میدان در دسترس باشد. در این تحقیق، مقاومت صوتی درحکم متغیر دوم انتخاب شد. این تحقیق روشن ساخت که در مناطقی که پدیده فشار زیاد و مشکل فشار وجود ندارد، با دقت خوبی می‌توان فشار منفذی را با استفاده از رابطه باورز معمولی و رابطه بنیادی ترزاقی به‌دست آورد. از این مکعب به‌دست آمده می‌توان در بررسی‌هایی مانند طراحی مسیر چاه، طراحی وزن گل، تعیین محل نصب لوله جداری استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: فشار منفذی، سرعت امواج لرزه‌ای، وارون سازی لرزه‌ای، مقاومت صوتی، تخمین چند متغیره

### Pore pressure prediction from seismic reflection data in an oil field

Hojjatnia, P.<sup>1</sup> and Riahi, M. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. in Geophysics, (Seismology), Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 28 Jun 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

### Abstract

Pore pressure is an important parameter, in exploration and production of hydrocarbon resources. Lack of accurate knowledge about pore pressure, before drilling phase, leads to serious dangers in drilling process. Accurate knowledge about distribution of pore pressure in a field, leads to reduce risks in drilling, improve well planning and mud weight calculations.

During burial, normally pressured formations are able to maintain hydraulic communication with the surface. Pore pressure or formation pressure is defined as the pressure acting on the fluids in the pore space of a formation. So, this pore fluid pressure equals the hydrostatic pressure of a column of formation water extending to the surface and is also commonly termed as normal pressure.

Hydrostatic pressure is controlled by the density of the fluid saturating the formation. As the pore water becomes saline, or other dissolved solids are added, the hydrostatic

pressure gradient will increase.

Also, sonic velocity, density and resistivity of a normal pressured formation will generally increase with depth of burial and the way such rock properties vary with burial under normal pore pressure conditions is termed its normal compaction trend. Pore pressure gradient is defined as the ratio of the formation

pressure to the depth and is usually displayed in units of psi/ft or equivalent mud weight units in pounds per gallon (ppg). Overburden pressure at any depth is the pressure that results from the combined weight of the rock matrix and the fluids in the pore space overlying the formation of interest. Overburden pressure increases with depth and is also called the vertical stress. Effective pressure is defined as the pressure acting on the solid rock framework. Terzaghi defined it as the difference between the overburden pressure and the pore pressure. Effective pressure thus controls the compaction that takes place in porous granular media including sedimentary rocks and this has been confirmed by laboratory studies.

The only method for predrill predicting pore pressure is based on the use of 3D seismic data. In this study, seismic velocity obtained from processing methods, will be calibrated with regard to sonic velocities measured at wells. Then using the relation between effective pressure and velocity the effective pressure is calculated. In order to distribute the velocity and pressure quantities in the whole field, we use geostatistical estimation methods (kriging or co-kriging). For using co-kriging we need to have more than one variable. We use acoustic impedance as the second variable. For this purpose firstly the 3D seismic volume was inverted to obtain an acoustic impedance. Usage of multi-variable estimation will consider lithologic and geologic variations of the layers and we have a better estimation in comparison with one-variable estimate. The 3D pore pressure cube was constructed using these calibrated velocities. The validation of the results illustrates a successful pore pressure prediction in this carbonate field.

We also include some of definitions here for convenience.

**Key words:** Pore pressure, Seismic velocity, Seismic inversion, Acoustic Impedance, Multi-variable estimation

## ۱ مقدمه

منفذی در یک منطقه به دلایل زیادی حائز اهمیت است. در مناطق دارای فشار زیاد، اغلب بین فشار شاره و فشار شکست مخزن اختلاف کمی وجود دارد. برای کنترل حفاری، وزن گل حفاری باید در این بازه قرار بگیرد. اگر فشار ناشی از گل حفاری کمتر از فشار شاره سازند باشد، شاره از سازند به چاه نفوذ پیدا می کند و این مسئله باعث فوران و از دست رفتن چاه می شود. از سوی دیگر اگر فشار گل حفاری بیشتر از فشار سازند باشد، سبب می شود تا دیواره سازند دچار شکستگی شود و گل حفاری از دست برود.

با توجه به مطالبی که گفته شد، اهمیت پیش بینی فشار

فشار منفذی یکی از مهم ترین پارامترهای مخزن در بحث اکتشاف و حفاری اکتشاف منابع هیدروکربوری است که اطلاع از چگونگی توزیع آن در منطقه برای حفاری ایمن و اقتصادی ضرورت دارد. این کمیت به فشاری اطلاق می شود که روی شاره های موجود در فضای خالی یک سازند وارد می شود. علاوه بر این آگاهی از مقدار فشار منفذی باعث می شود تا با طراحی صحیح وزن گل حفاری و پوشش جداره چاهها (Well casing)، بتوان فشارهای غیرعادی (Abnormal pressure) خطر آفرین را کنترل کرد. فشار غیرعادی یکی از مفاهیم مهم در اکتشاف و بهره برداری از منابع عمیق است. آگاهی از مقدار فشار

برآورد فشار با در نظر گرفتن این اطلاعات لرزه‌ای صورت می‌گیرد و دقت برآوردها در فضای بین چاه‌ها افزایش می‌یابد (نصرت، ۱۳۸۶).

## ۲ تعاریف

سازندهای با فشار عادی، در حین رسوب‌گذاری و دفن، توانایی حفظ ارتباط هیدرولیکی خود را با سطح دارند. فشار منفذی یا فشار سازند به فشاری اطلاق می‌شود که روی شاره‌های موجود یک سازند وارد می‌آید. این فشار شاره درون تخلخل‌ها برابر با فشار هیدروستاتیک ستون آب سازند است که از سطح وارد می‌شود. فشار ناشی از وزن موثر ستون شاره در هر عمق را فشار هیدروستاتیک می‌گویند. به فشار هیدروستاتیک فشار عادی نیز گفته می‌شود (دوتا و همکاران، ۲۰۰۲).

$$P_H = \rho_f gz \quad (1)$$

فشار روباره در هر عمقی، نتیجه مجموع وزن ماتریس سنگ و شاره‌های درون تخلخل‌های سازند موردنظر است. از آنجاکه فشار روباره با عمق افزایش می‌یابد، به آن تنش قائم نیز می‌گویند. در اکثر موارد، مقدار فشار منفذی در یک عمق خاص بین مقدار فشار هیدروستاتیک و فشار روباره قرار می‌گیرد. فشار روباره را گاهی فشار دربرگیرنده (Confining pressure) و فشار لیتوستاتیک (Lithostatic pressure) نیز می‌نامند. مقدار این فشار به چگالی سنگ‌ها و شتاب گرانش زمین بستگی دارد و به کمک نمودارهای چگالی چاه‌ها قابل محاسبه است. فشار روباره با عبارت زیر بیان می‌شود:

$$S = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (2)$$

فشار موثر یا فشار جزئی ( $\sigma$ ) فشاری است که روی چارچوب جامد سنگ وارد می‌شود. بنا به اصل ترزاقی (۱۹۴۳)، به صورت اختلاف بین فشار روباره ( $s$ ) و فشار منفذی ( $p$ ) تعریف می‌شود:

$$\sigma = S - P \quad (3)$$

منفذی و آگاهی از وجود مناطق دارای فشار غیرعادی تا حدود زیادی آشکار می‌شود. علاوه بر این، وجود اطلاعات فشاری در منطقه به برآورد کارایی یک تله نفتی، یافتن مسیرهای مهاجرت هیدروکربن در سازند، شناسایی تله‌های چینه‌ای و وضعیت پوش سنگ‌ها کمک شایانی می‌کند.

برای پیش‌بینی فشار منفذی روش‌های زیادی وجود دارد که به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: یک دسته روش‌هایی که فشار را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند، مثل آزمایش‌های درون‌چاهی. دسته دیگر روش‌هایی هستند که با اندازه‌گیری مقدار انحراف خصوصیات فیزیکی سازند نسبت به حالت نرمال و واسنجی کردن مقدار این تغییرات با تغییر فشار، فشار را اندازه‌گیری می‌کنند (چوپرا و هافمن، ۲۰۰۶). واضح است که دقیق‌ترین مقدار فشار با کمک روش آزمایش‌های درون‌چاهی به دست می‌آید. همچنین استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی (Well logging)، لرزه‌نگاری درون‌چاهی (Borehole seismic)، نیم‌رخ لرزه‌نگاری قائم (Vertical seismic profiling) و لرزه‌نگاری سطحی (Surface seismic) از دیگر روش‌های موجود هستند (بدری و همکاران، ۲۰۰۰).

به جز روش استفاده از داده‌های لرزه‌ای، سایر روش‌ها مستلزم حفر چاه در منطقه‌اند و این مسئله بیانگر آن است که نتایج حاصل از این روش‌ها، در تعیین مسیر چاه و کاهش خطرات احتمالی کمکی نمی‌کند ولی می‌تواند به مشخص شدن روند فشار در چاه‌های بعدی، کمک کند. در نتیجه استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری سطحی، با توجه به اینکه محدوده وسیعی از میدان تا اعماق زیاد را مورد بررسی قرار می‌دهد و مقدار فشار با دقت زیادی قابل برآورد است، به‌مثابه یکی از باصرفه‌ترین و قابل‌اطمینان‌ترین روش‌های برآورد فشار شناخته شده است. نکته قابل‌توجه در این روش آن است که به دلیل وجود اطلاعات لرزه‌ای در فضای بین چاه‌های موجود،

شکل ۱ آمده است:

از رسم متقابل (cross-plot) این دو متغیر در مقابل هم، ضریب همبستگی در حدود ۵۰ درصد به دست آمده است (شکل ۲) که بیانگر این مسئله است که می توان از این برآوردگر برای درون یابی سرعت برانبارش استفاده کرد.

سپس واریوگرافی این داده ها در دو منطقه بالا و پایین افق سروک صورت گرفت. بعد از واریوگرافی و به دست آوردن پارامترهای کوکریجینگ با استفاده از این برآوردگر درون یابی عملی شد. مرحله بعد محاسبه اختلاف بین سرعت لرزه ای و سرعت نمودار صوتی در محل چاه بود. به این منظور با توجه به تفاوت دو نوع سرعت، ابتدا سرعت حاصل از پردازش با استفاده از رابطه DIX از سرعت RMS به سرعت لایه ای تبدیل شد (دن بوئر و همکاران، ۲۰۰۶).

$$V_{int_i}^2 = \frac{t_i V_{RMS_i}^2 - t_{i-1} V_{RMS_{i-1}}^2}{t_i - t_{i-1}} \quad (4)$$

سپس با محاسبه مقدار سرعت بازه ای در محل چاه، اختلاف آن با نمودار صوتی چاه محاسبه شد که به آن کمیت اصلاح سرعت (velocity correction factor) می گویند. به این ترتیب با به دست آوردن کمیت اصلاح سرعت و جمع کردن آن با مکعب سرعت اولیه، مکعب سرعت تصحیح شده ای به دست خواهد آمد که دارای تفکیک پذیری بهتری نسبت به مکعب سرعت اولیه می باشد.

### ۲-۳ ساخت مکعب فشار موثر

در این بخش به منظور محاسبه فشار موثر در کل مکعب داده ها با استفاده از رابطه باورز (۱۹۹۲)، ابتدا باید ضرایب این رابطه را به دست آورد. با توجه به اینکه فشار موثر از تفاضل فشار روباره و فشار منفذی به دست می آید، ابتدا فشار روباره در محل چاه ها با انتگرال گیری از نمودار

فشار موثر کمیت اصلی در کنترل روند تحکیم سنگ های رسوبی است و هر شرایطی در یک عمق معین که باعث کاهش فشار موثر شود، روند تحکیم را کاهش می دهد و باعث فشار غیر عادی (یا فشار زیاد) می شود.

### ۳ روش کار

در این بخش مراحل پیش بینی فشار به صورت مرحله به مرحله بیان خواهد شد. این مراحل فهرست وار در زیر آورده شده است:

- واسنجی کردن سرعت حاصل از پردازش با سرعت نمودار صوتی با روش های زمین آماری
- محاسبه ضرایب رابطه باورز در محل چاه ها و محاسبه مکعب فشار موثر با استفاده از ضرایب باورز به دست آمده در محل چاه ها.
- محاسبه مکعب فشار روباره با انتگرال گیری از نمودارهای چگالی در محل چاه ها و پراکندن آن در منطقه با کوکریجینگ.
- محاسبه تفاضل مکعب های فشار موثر و فشار روباره به منظور تولید مکعب فشار منفذی.

### ۱-۳ واسنجی کردن سرعت لرزه ای حاصل از پردازش با سرعت نمودارهای صوتی

در این بخش برای برآورد سرعت در کلیه نقاط میدان، ابتدا بین ردیف های سلول های برانبارشی که دارای تحلیل سرعت هستند، از برآوردگر کوکریجینگ استفاده شد تا تغییرات سرعت با توجه به تغییرات زمین شناسی بهتر حفظ شود. برای کوکریجینگ لازم است که همبستگی لازم بین متغیرهای استفاده شده در برآورد وجود داشته باشد. در این تحقیق متغیر اول برای درون یابی بین سلول های برانبارشی سرعت لرزه ای و متغیر دوم مقاومت صوتی است. مقاومت صوتی نتیجه وارون سازی لرزه ای صورت پذیرفته در مرحله قبل است. نتیجه این وارون سازی در

مقدار ثابت‌های رابطه باورز برای هر منطقه متفاوت است و بهتر است که این ضرایب با بررسی‌های آزمایشگاهی تعیین شود. مقدار  $V_0 = 1700 \text{ m/s}$  با توجه به داده‌های منطقه زیر در آمده است:

$$V = 1700 + 21.9P_{eff}^{0.6} \quad (۴)$$

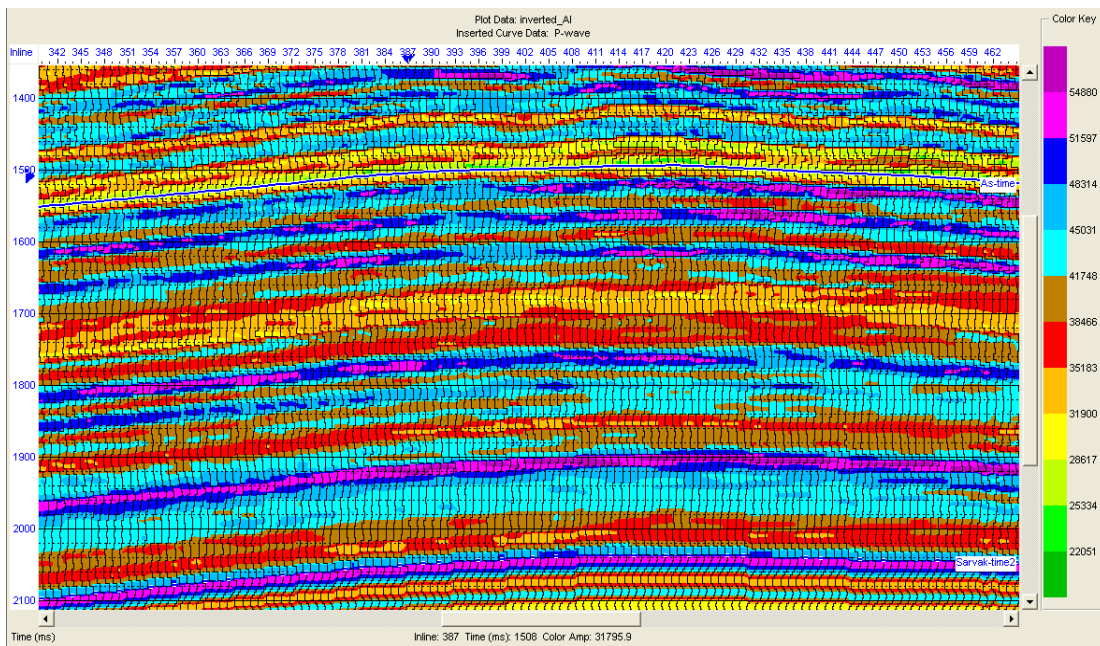
با در دسترس داشتن ضرایب رابطه باورز و اعمال آن به کل مکعب سرعت تصحیح شده، مکعب فشار موثر به دست خواهد آمد (شکل ۳).

### ۳-۳ ساخت مکعب فشار روباره

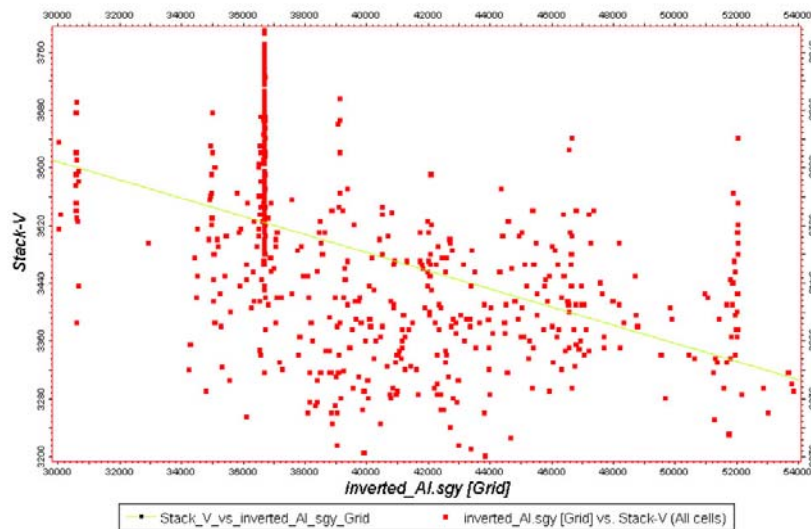
برای محاسبه مکعب فشار روباره، ابتدا باید مقدار این فشار را در محل چاه‌ها محاسبه کرد و سپس در کل مکعب داده‌ها برآورد کرد. در چاه‌ها با توجه به وجود نمودارهای چگالی با استفاده از رابطه فشار روباره و انتگرال‌گیری نسبت به عمق، مقدار فشار روباره محاسبه شده است.

چگالی محاسبه شود. با توجه به آنکه نمودار چگالی از سطح زمین شروع نمی‌شود لذا باید وزن سنگ‌های بالای نقطه اندازه‌گیری را نیز در نظر گرفت. این کار با توجه به زمین‌شناسی منطقه و چگالی متوسط سنگ‌های ناحیه عملی شد.

در مورد چاه‌های موجود در منطقه آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار انجام نشده بود و به منظور آگاهی از میزان فشار تقریبی سازند در اعماق مورد بررسی، از گزارش‌های حفاری چاه‌های منطقه و وزن گل حفاری استفاده شد. با توجه به آنکه وزن گل حفاری به نحوی تعیین می‌شود که فشار ناشی از آن، فشار سازند در عمق سرمته را خنثی کند، این کار درست به نظر می‌رسد (نصرت، ۱۳۸۶). به این ترتیب با در دست داشتن فشار منفذی (فشار گل حفاری) و فشار روباره در محل چاه‌ها، فشار موثر در این محل‌ها قابل محاسبه است. سپس با داشتن فشار موثر و سرعت لرزه‌ای تصحیح شده در محل چاه‌ها، با رسم متقابل آنها رابطه باورز به این نقاط برازش داده شد و ضرایب آن به دست آمد. باید توجه داشت که



شکل ۱. نتایج روش وارون‌سازی بر پایه مدل.

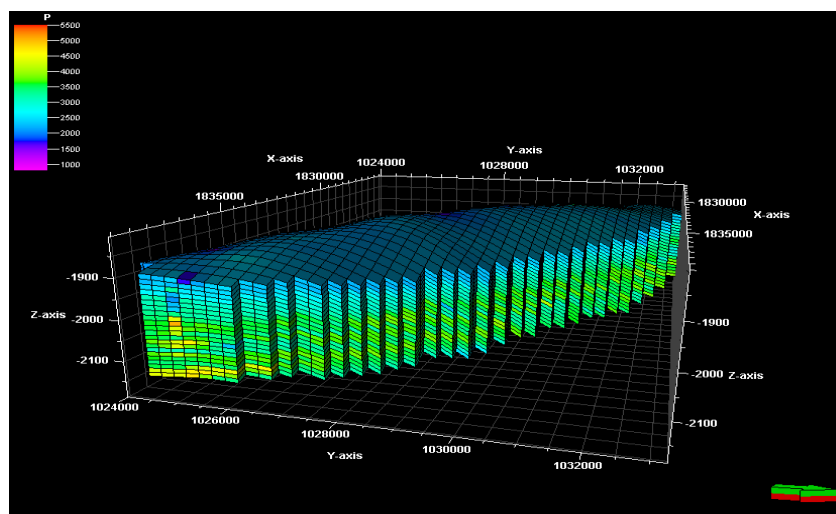


شکل ۲. رسم متقابل و ضریب همبستگی بین متغیر سرعت برانبارش و مقاومت صوتی.

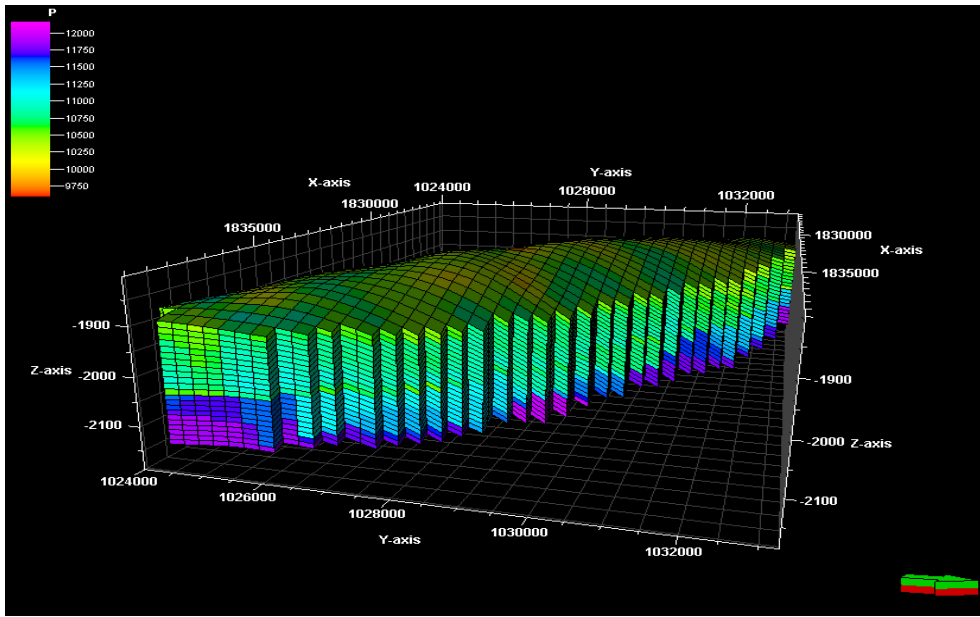
### ۴-۳ ساخت مکعب فشار منفذی

با توجه به اینکه فشار موثر و مکعب فشار روباره هر دو در یک شبکه یکسان وجود دارند و در واقع برای هر نقطه در این شبکه مقادیر این دو فشار وجود دارد، می‌توان با محاسبه تفاضل این دو فشار، مقدار فشار منفذی را در هر نقطه به دست آورد (شکل ۵). مشاهده می‌شود که تغییرات فشار منفذی کم است. یک مقطع بُرش یافته از این مکعب نیز در شکل ۶ دیده می‌شود. این نتیجه

بیانگر آن است که فشار در افق سروک در حدود ۷۰۰۰ تا ۸۰۰۰ PSI در تغییر است و تغییرات فشار زیاد نیست. با دقت در این شکل، دو منطقه با فشار نسبتاً زیاد دیده می‌شود. این تغییر در فشار می‌تواند نتیجه تبدیل نفت به گاز باشد. با توجه به تراکم‌پذیری زیاد گاز و تراکم‌پذیری کم سنگ، تبدیل مقدار کمی گاز به نفت می‌تواند سبب ایجاد فشار زیادی در سازند شود.



شکل ۳. مکعب فشار موثر حاصل از اعمال رابطه باورز روی مکعب سرعت تصحیح شده برحسب PSI.

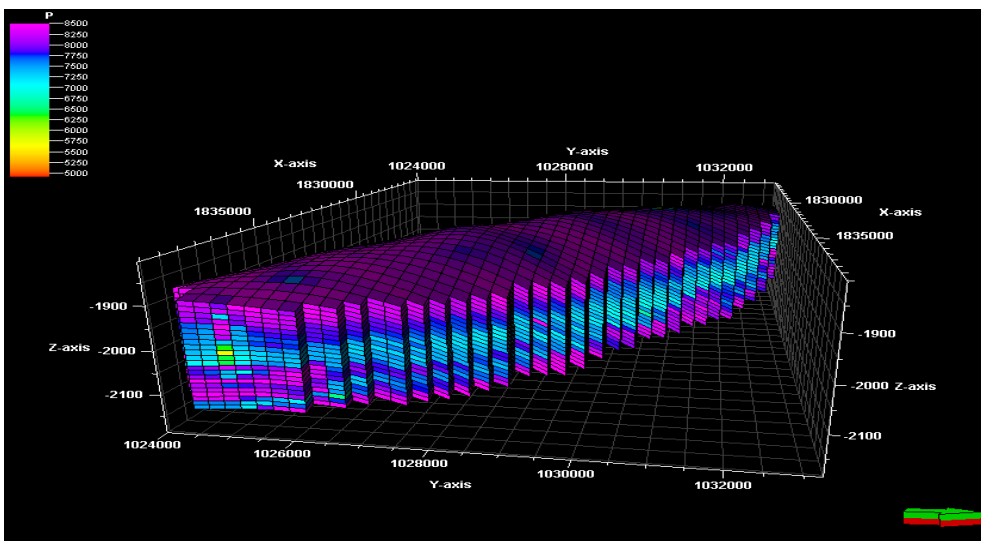


شکل ۴. فشار روباره به‌دست آمده با استفاده از برآوردگر کوکریجینگ برحسب PSI.

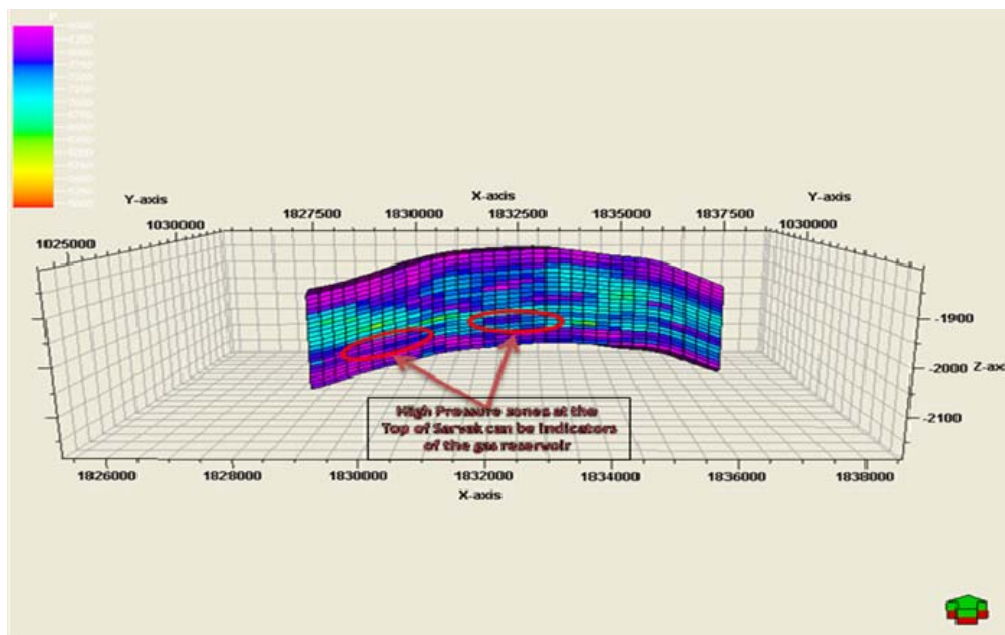
#### ۴ بحث

البته باید به این نکته توجه داشت که فشار منفذی در این چاه‌ها با استفاده از داده‌های تجربی وزن گل حفاری به‌دست آمده و دقتی که از آزمایش‌های درون‌چاهی مانند DST و RFT برای به‌دست دادن فشار منفذی اولیه حاصل می‌شود، بسیار بیشتر است.

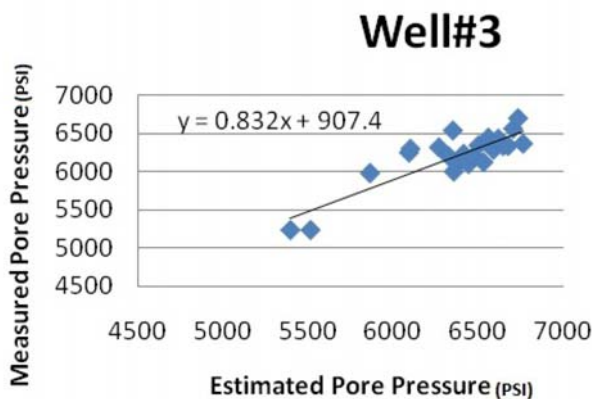
در نهایت برای سنجش میزان صحت کار انجام شده، اعتبار سنجی بر روی مقدار فشار منفذی برآورد شده در محل چاه‌ها و مقدار فشار منفذی اولیه موجود در چاه‌ها صورت گرفت. همان‌طور که در شکل نمایان است (شکل ۷)، نتایج با دقت خوبی قابل قبول است.



شکل ۵. مکعب فشار منفذی برحسب PSI.



شکل ۶. برشی از مکعب فشار منفذی بر حسب PSI و دو منطقه دارای فشار بالاتر.



شکل ۷. اعتبارسنجی فشار منفذی اولیه و فشار منفذی برآورد شده در یک چاه که وزن گل حفاری آنها درحکم فشار منفذی اولیه در نظر گرفته شده است.

### ۵ نتیجه گیری

پس از این بررسی، نتیجه حاصل به صورت مکعب سه بُعدی فشار منفذی در منطقه به دست آمد و نتایج اعتبارسنجی در محل چاه‌ها نشان دهنده دقت مناسب این برآورد است. موارد زیر از جمله نتایج این تحقیق هستند:

- این تحقیق روشن ساخت که در مناطقی که پدیده فشار زیاد و مشکل فشار وجود ندارد، با دقت خوبی می توان فشار منفذی را با استفاده از رابطه باورز معمولی و

رابطه بنیادی ترزاقی به دست آورد. از این مکعب به دست آمده می توان در تحقیقاتی مانند طراحی مسیر چاه، طراحی وزن گل و تعیین محل نصب لوله جداری استفاده کرد.

- همچنین در این مکعب دو ناحیه با فشار نسبتاً زیاد دیده می شود که ممکن است ناشی از تبدیل نفت به گاز باشد. این تبدیل یکی از دلایل ایجاد فشار زیاد در سازندهای گوناگون است.



Pore pressure prediction using well-conditioned seismic velocities, First Break, **24**, 43-49.  
 Dutta, N., Mukerji, T., Prasad, M. and Dvoorkin, J., 2002, Seismic detection and estimation of overpressures part II: field applications, CSEG Recorder, **27**(7), 58-72.

• با این بررسی مشخص شد که می‌توان داده‌های متفاوتی را که در چند نقطه معلوم (محل چاه‌ها) وجود دارند، با روش‌های زمین‌آماری (مانند کریجینگ و کوکریجینگ) در کل منطقه پراکنده کرد.

• همچنین در این تحقیق ثابت شد که سرعت لرزه‌ای حاصل از پردازش با روش‌های زمین‌آماری قابل تصحیح است. برآوردگر کوکریجینگ به خوبی با حفظ تغییرات زمین‌شناسی و لیتولوژیکی می‌تواند کمیت‌هایی که همبستگی خوبی با مقاومت صوتی به‌منزله متغیر دوم دارند را در ناحیه گسترده کند.

• در این تحقیق مزیت نسبی روش برآورد چندمتغیره کوکریجینگ نسبت به کریجینگ معمولی در پراکنده کردن کمیت‌هایی که با افزایش عمق روند آشکار می‌سازند، به اثبات رسید.

• مقاومت صوتی به‌منزله پارامتر مهم مخزن و مشخص‌کننده ویژگی‌های مهم لایه‌های زمین‌شناسی، در این تحقیق نقش مهمی در مراحل گوناگون برآورد داشت.

#### منابع

نصرت، ا.، ۱۳۸۶، پیش‌بینی فشار منفذی توسط نشانگرهای لرزه‌ای سه بعدی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Badri, M. A., Sayers, C. M., Awad, A. and Graziano, A., 2000, A feasibility study for pore-pressure prediction using seismic velocities in the offshore Nile Delta, Egypt, The Leading Edge, **19**, 1103-1108.

Bowers, G. L., 1992, Detecting high overpressure, The Leading Edge, **21**, 174-177.

Chopra S. and Huffman, A., 2006, Velocity determination for pore pressure prediction: CSEG Recorder, **31** (4), 28-44.

Den Boer, L. D., Sayers, C. M., Nagy, Z. R., Hooyman, P. J. and Woodward, M. J., 2006,