

پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از وارون‌سازی و تحلیل سرعت لرزه‌ای

حمیدرضا سلیمانی^{۱*}، محمدرضا سکوتی دیارجان^۲ و محمدعلی ریاحی^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه علوم زمین، دانشگاه شهر نیویورک، ایالات متحده آمریکا

^۲ کارشناس ارشد تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌ای، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۸/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

چکیده

فشار منفذی یا فشار شاره درون حفره‌های سنگ، از جمله کمیت‌های مهم در بحث اکتشاف و حفاری منابع نفت و گاز است. وجود فشار منفذی زیاد باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای از جمله فوران چاه، ناپایدار بودن چاه، گیر کردن لوله حفاری و یا از دست دادن چرخش گل حفاری می‌شود. به همین علت به نظر می‌رسد که پیش‌بینی عددی فشار منفذی، در سازندهای با فشار زیاد، قبل از حفاری امری ضروری برای حفاری ایمن و اقتصادی است. همچنین در زمینه اکتشاف می‌توان از مفهوم فشار منفذی در تحلیل و بررسی مسیرهای مهاجرت نفت و در بررسی کیفیت پوش سنگ استفاده کرد.

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی کمی فشار منفذی از تبدیل سرعت-فشار منفذی، که با چاه‌های منطقه تنظیم شده، استفاده شده است لذا تولید مکعب سرعت لرزه‌ای مناسب در این تحقیق اهمیت ویژه‌ای دارد. باید توجه داشت که سرعت‌های به دست آمده از پردازش داده‌های لرزه‌ای معمولاً به علت کم بودن وضوح و فرض‌های زمین لایه‌ای و برون‌راند هذلولی، دارای دقت کافی برای تحلیل فشار نیست. در تحقیق پیش رو سعی شده است تا با استفاده از داده‌های سرعت برانبارش و وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای، همچنین استفاده از داده‌های نگار سرعت صوتی در چاه‌های منطقه مدل سرعت مناسب بررسی فشار منفذی تولید شود. همچنین برای تبدیل داده‌های سرعت تولید شده به فشار موثر، از رابطه باورز (۱۹۹۵) تنظیم شده با چاه‌های منطقه استفاده شده است. در نهایت نتایج حاصل از اعتبارسنجی حاکی از مناسب بودن مدل فشار منفذی حاصل از این روش است.

واژه‌های کلیدی: فشار منفذی، فشار روباره، وارون‌سازی، زمین‌آمار، فشار هیدرواستاتیک

Porepressure prediction using seismic inversion and velocity analysis

Soleymani, H.¹, Sokooti, M. R.² and Riahi, M. A.³

¹M.Sc. in Geophysics, Erath Science Department, University of New York City, USA

² Seismic Interpretation Specialist, National Iranian Oil Company

³Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 11 Nov 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

Abstract

Pore pressure could be estimated prior to drilling using seismic velocities. Applying this approach, the final calculated pore pressure is highly affected by accuracy of the obtained velocity data. In order to generate an accurate velocity cube with proper resolution, velocities from well logs and post-stack 3-D seismic inversion are used along with stacking velocities from velocity analysis of 3-D seismic data. Using Bowers's effective pressure method (1995), including known velocity and density values at well locations, the coefficients of Bowers's equation could be calculated. Also, through applying Gardener's equation, one could relate velocity to density in each well location and finally,

it is possible to determine overburden stress for the entire survey.

Pore pressure prediction is one of the most important stages in drilling of the new wells. According to Huffman 2002, "pressure prediction at the basin scale can be very powerful in (1) determining where the source rock is actively maturing (2) determining where large scale fluid migration is occurring in a basin (3) predicting the behavior of large regional faults and structures (4) identify the presence of secondary pressure area (5) constraining the porosity model and (6) evaluating the integrity of vertical seal in the basin". Moreover, pressure information prior to drilling can insure economic advantages for safe drilling.

Overpressure is referred to state where the pore fluid pressure exceeds normal hydrostatic pressure at the particular depth. This phenomenon usually results from restriction of the fluid flow due to rapid sedimentation or fluid expansion, which in turn results in increase in pore pressure. Since the pioneer work by Pennebaker (1968), many papers has begun to deals with the pressure prediction prior to drilling. A paper by Dutta (2002) provides a good insight into using seismic based methods and possible pitfalls of using different velocities in estimation of pore fluid pressure. Bowers (1995) suggested an outstanding empirical equation, using data from the Gulf of Mexico which governs the compaction and fluid expansion mechanisms. Since these two mechanisms are the most frequent causes of overpressure, the Bowers's equation is an appropriate approach in most cases. It is important to note that to obtain the desired accuracy, constants A and B (i.e. the virgin curve parameters) in the Bowers's equation should be determined using the available data from offset wells in every survey.

In the process of pressure estimation, overburden pressure needs to be estimated. Hence, Gardner equation (Gardner et al., 1974) is calibrated by calculating related parameters, using available density and velocity logs. Knowing the velocity and having the calibrated Gardner's equation in hand, one can calculate the overburden pressure. Moreover, effective pressure can be acquired with acceptable accuracy using calibrated Bowers's equation. Eventually, porepressure could be estimated using Terzaghi's equation (Terzaghi, 1943). It should be noted again, generating velocities from processing of 3-D seismic data, rock densities and calibrated Bowers's equation are crucial steps, through our workflow.

The final goal of this paper is to present a proper method to generate and validate the 3-D pore pressure model using conventional data for a large survey at Mansouri oil field (one of the Iranian south west oil fields).

It is shown that the accuracy and resolution of the velocity model could be greatly enhanced by using available well logs and a proper geostatistical method. This high resolution velocity model results high resolution pore pressure model which reveals much information concerning reservoir integrity and characterization. The effective pressure is calculated using Bowers's method which is calibrated using measured pressure data at some well locations and at the end; the porepressure is calculated using Terzaghi's equation.

Studying the final pore pressure map reveals that there are no major pressure anomaly within the Asmari reservoir. In addition, a bizarre looking low pressure anomaly in the beginning of the second segment is not due to a real drop in pressure (base on measured pressure in the well). In fact, this error is introduced due to changes in formation petrology at the reservoir seal. It should be noted that the geological study prior to pressure interpretation is an imperative stage in pressure estimation.

Comparison of the predicted pore pressure with the measured pressure at well location which was not included in calibration phase reveals that final pressure estimation is reliable and it is in good agreement with the measured pressure data.

The high resolution pressure data is suitable for well planning and provides detailed information on pressure variation along the future well trajectories. The 3-D pore pressure cube, along with effective pressure, overburden pressure and fracture pressures are obtained and used for regional geomechanical and pressure assessments.

Key words: Pore pressure, Geostatistics, Velocity model, Overburden stress, Effective stress

۱ مقدمه

گرفته است و در اکثر آنها روش‌های ژئوفیزیکی قابلیت مناسبی برای برآورد فشار داشته‌اند. یکی از اولین تحقیقات را محققى به نام پناکر (۱۹۶۸) عملی ساخت. سپس دوتا (۲۰۰۲) در انجمن ژئوفیزیک‌دانان اکتشافی، مقاله‌ای تحت عنوان فشار زیاد به چاپ رساند. دوتا (۲۰۰۲) در این مقاله به روش‌های ژئوفیزیکی مرتبط با فشار منفذی پرداخته است. امروزه با کمک پیشرفت لرزه‌نگاری سه‌بُعدی و چهاربُعدی همچنین سه مولفه‌ای امکان برآورد و پیش‌گویی فشار با اطمینان بیشتر و به‌صورت سه‌بُعدی ایجاد شده است.

به‌طور کلی بازتاب‌های لرزه‌ای تابع امپدانس صوتی (سرعت ضرب در چگالی) است که فشار مخزن تاثیر شدیدی روی این پارامتر دارد. از طرف دیگر نقش شاره سازند را نمی‌توان روی سرعت صوتی نادیده گرفت. موج‌های برشی و تراکمی پاسخ متفاوتی به شاره سازند، سنگ‌های متفاوت و همچنین فشار مخزن می‌دهند.

به‌طور کلی دو دسته روش برای برآورد فشار منفذی و تنش موثر وجود دارد. این روش‌ها یا بر پایه روابط تجربی که از داده‌های آماری به‌دست آمده‌اند قرار دارند و یا براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیک سنگی استوارند. در کل اکثر روش‌ها از سرعت‌های به‌دست آمده از اطلاعات لرزه‌ای در برآورد فشار منفذی استفاده می‌کنند. از بنیان‌گذاران این روش‌ها می‌توان از محققانی چون دوتا (۱۹۸۷) و فرتل (۱۹۹۴) نام برد. یکی از روش‌های معمول واسنجیدن سرعت سونیک در مقابل سرعت‌های به‌دست آمده از نگار صوتی اندازه‌گیری‌های

در بسیار از میدان‌های نفتی جهان همانند دریای شمال، خلیج مکزیک، غرب آفریقا، دریای خزر و همچنین میداین نفتی جنوب غرب ایران، وجود فشار منفذی زیاد در حفاری این مناطق گزارش شده است. در مناطقی با احتمال برخورد به فشار منفذی زیاد، برآورد و پیش‌بینی دقیق فشار منفذی و گرادیان گسستگی نقش مهمی در فرایند برنامه‌ریزی در اکتشاف و حفاری‌های عمیق دارد.

اگرچه هدف اصلی در برآورد فشار منفذی تهیه اطلاعات فشار در زیر مته است، ولی استفاده از این تحقیقات در مراحل قبل از حفاری با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و مدل‌های سنگی، در حین حفاری به شکل به‌روزرسانی اطلاعات و بعد از حفاری به‌منظور پشتیبانی و بهبود ارزیابی فشار منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برآورد فشار منفذی قبل و بعد از حفاری را می‌توان با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای که در آن فرایند تراکم نامتوازن سازوکار اصلی ایجاد فشار منفذی زیاد باشد، با استفاده از تبدیل‌های سرعت به فشار منفذی با موفقیت به انجام رساند. باید توجه داشت که سرعت‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این‌گونه تحقیقات باید برآورد مناسبی از سرعت بازه‌ای سنگ باشد، و همچنین دارای وضوح مناسبی به‌منظور اهداف برنامه‌ریزی چاه باشد.

۲ تعریف‌ها و نظریه

روش‌های ژئوفیزیکی عمدتاً بر پایه تاثیر فشار مخزن بر سرعت لرزه‌ای عمل می‌کنند (اکثرأ سرعت موج طولی). در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت

باعث می‌شود تا منحنی باربرداری به منحنی دست‌نخورده کاهش یابد. $U=\infty$ عنوان‌کننده سازند کاملاً برگشت‌ناپذیر است، این فرض از آنجا ناشی می‌شود که برای همه مقادیر تنش موثر کمتر از σ_{max} ، سرعت برابر سرعت حداکثر است. در عمل مقدار U بین ۳ تا ۸ متغیر است. σ_{max} از رابطه زیر محاسبه می‌شود σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \left(\frac{V_{max}-5000}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (۳)$$

به‌منظور تبدیل داده‌های سرعت به چگالی از رابطه گاردنر (۱۹۷۴) که از یکی معروف‌ترین روابط مورد استفاده در لرزه‌نگاری است استفاده شده است. شکل کلی رابطه گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) به‌صورت زیر است:

$$\rho = aV^b \quad (۴)$$

که در این رابطه، ρ چگالی برحسب gr/cc ، V سرعت برحسب m/s ، a و b ضرایب ثابتی هستند که در مناطق گوناگون، متفاوت هستند. در رابطه فوق اگر استفاده از داده‌های چاه برای به‌دست آوردن ثابت‌های معادله مقذور نباشد، a و b مقدار $۰/۲۵$ در نظر گرفته خواهد شد. در این تحقیق به‌علت وجود نگار سرعت صوتی و چگالی در همه چاه‌ها (حدود ۳۰ چاه) ضرایب رابطه گاردنر به‌طور دقیق تعیین خواهد شد.

فشار روباره در عمق موردنظر عبارت است از فشار اعمال شده ناشی از وزن رسوبات و شاره درون فضای منفذی سنگ. این مفهوم را می‌توان با عبارت زیر نشان داد:

$$S = g \int_0^z \rho_{b(z)} dz \quad (۵)$$

در اینجا، ρ_b چگالی بالک است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_g \quad (۶)$$

در رابطه اخیر، ϕ تخلخل است و مقداری بین ۰ تا ۱ دارد. ρ_f چگالی شاره سازند برحسب kg/m^3 ، g شتاب

فیزیک سنگی است. در یک رژیم فشاری عادی و در غیاب اشباع هیدروکربور، انتظار می‌رود که سرعت صوتی با عمق افزایش یابد. هر انحرافی از این روند را می‌توان مربوط به فشار غیرعادی و یا وجود بی‌هنجاری‌های دیگر (مثل اشباع از گاز) دانست.

پیشتر گفته شد که فشار سازندی که از میزان فشار هیدرواستاتیک در عمق مشابه منحرف شود درحکم فشار غیرعادی در نظر گرفته می‌شود. فشارهای غیرعادی را می‌توان از راه تغییرات شدید در سرعت لرزه‌ای با عمق پی‌جویی کرد. اکثر روابط تجربی برای پیش‌گویی فشار منفذی براساس بررسی‌های موردی و داده‌های حقیقی به‌دست آمده است.

در تحقیق پیش رو از روش باورز (۱۹۹۵) برای تبدیل سرعت بازه‌ای به فشار موثر استفاده شده است. روش باورز روشی بر پایه تنش موثر است که در آن از منحنی‌های دست‌نخورده و باربرداری و رابطه بین این دو برای برآورد فشار استفاده می‌شود. در این رابطه دو سازوکار باربرداری و فرایند نبود تحکیم لحاظ شده است. رابطه باورز به‌صورت ساده را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$\sigma = \left(\frac{V-5000}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (۱)$$

که در آن، V سرعت و برحسب ft/s و σ تنش موثر برحسب psi است، A و B پارامترهایی هستند که می‌توان آنها را با واسنجیدن داده‌های سرعت در مقابل تنش موثر به‌دست آورد.

در شرایط وجود سازوکار باربرداری (Unloading)

باورز رابطه (۲) را پیشنهاد کرده است.

$$\sigma = \sigma_{max}^{(1-U)} \left(\frac{V-5000}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (۲)$$

که در آن، A و B همانند رابطه قبل است. پارامتر باربرداری U معیاری از رفتار پلاستیک رسوبات است. $U=1$ بیان‌کننده تغییر شکل ثابت است به این علت که

هستند و سایر لایه‌ها پایین‌تر از سطح تماس آب-نفت قرار دارند.

مخزن آسماری در ۱۳۴۲ با حفر چاه شماره MI-1 کشف و تولید از میدان از ۱۳۵۳ آغاز شد. نفت این مخزن زیراشباع است و سطح تماس اولیه آب-نفت در آن در عمق ۲۲۷۲ متر برآورد شده است. سه تیغ مخزن در عمق ۲۱۴۳ متر قرار دارد و بر این اساس ارتفاع ستون نفتی در آن برابر ۱۲۹ متر برآورد می‌شود. به دلیل ارتباط آبدار مخزن آسماری در میدان نفتی مورد مطالعه با مخزن آسماری اهواز، عملکرد مخزن میدان نفتی مورد مطالعه تحت تأثیر عملکرد مخزن اهواز قرار داشته است.

در این میدان تا به حال حدود ۶۰ حلقه چاه حفر شده است که از بین این چاه‌ها، داده‌های ۳۵ چاه در این تحقیق موجود بوده و مورد بررسی قرار گرفته است که در شکل ۱ محل آنها مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه این چاه‌ها در سه تیغ مخزن و راس تاقدیس حفر شده‌اند. میدان مورد بررسی دارای سه مخزن نفتی آسماری، بنگستان و خامی است که تحقیق حاضر روی مخزن آسماری صورت گرفته است. همچنین در شکل ۲ سراسازندهای تفسیر شده آسماری و پابده در مکعب لرزه‌ای نشان داده شده است.

جاذبه زمین برحسب m/s^2 و h ارتفاع عمودی ستون شماره برحسب m است.

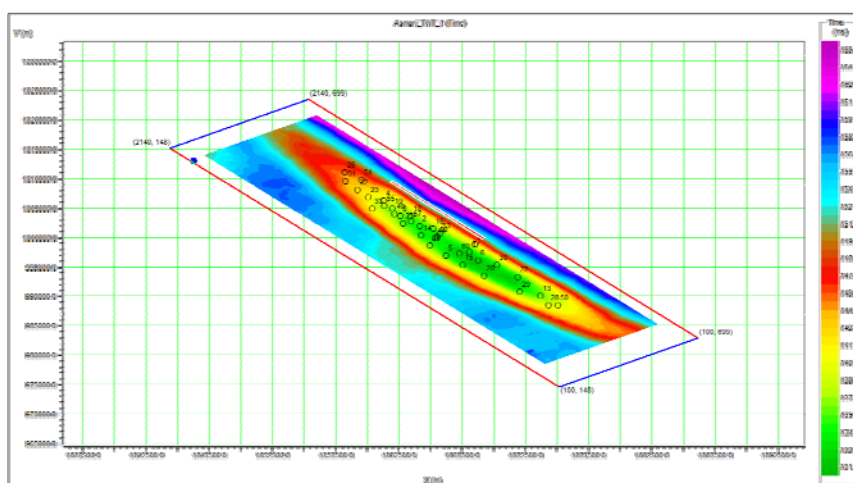
فشار موثر تفاضلی با نماد σ نمایش داده می‌شود و عبارت است از فشاری که بر چهارچوب جامد سنگ وارد می‌شود. براساس اصل ترازاقی (۱۹۴۸)، و در حالت ساده شده فشار موثر از تفاضل فشار روباره S و فشار منفذی P حاصل می‌شود.

$$\sigma = S - P \quad (7)$$

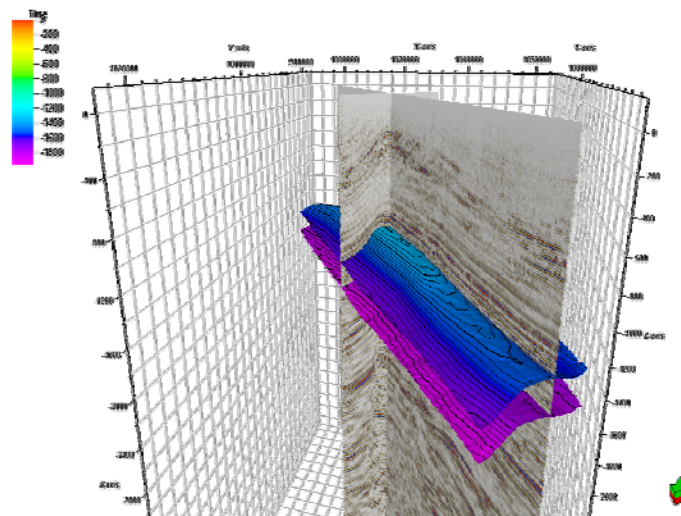
۳ بررسی فشار منفذی در میدان مورد تحقیق

۱-۳ تاریخچه و زمین‌شناسی

میدان نفتی مورد مطالعه در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی در حدود ۶۰ کیلومتری جنوب اهواز قرار گرفته است. این میدان از سمت شمال غرب به میدان اهواز و از سمت غرب در مجاورت میدان آب تیمور و از شمال شرق در مجاورت میدان شادگان قرار دارد. طول میدان در سطح تماس آب-نفت حدود ۳۹ کیلومتر و عرض آن حدود ۳/۵ کیلومتر است. امتداد این میدان مانند بسیاری از میادین ناحیه زاگرس در جهت شمال غربی- جنوب شرقی است. میدان نفتی مورد مطالعه سازند آسماری به ۸ لایه تقسیم‌بندی شده است که فقط لایه‌های ۱ تا ۳ حاوی نفت



شکل ۱. موقعیت چاه‌های استفاده شده در این تحقیق. همچنین نقشه سطوح هم‌زمان برای بخش بالایی سازند آسماری.



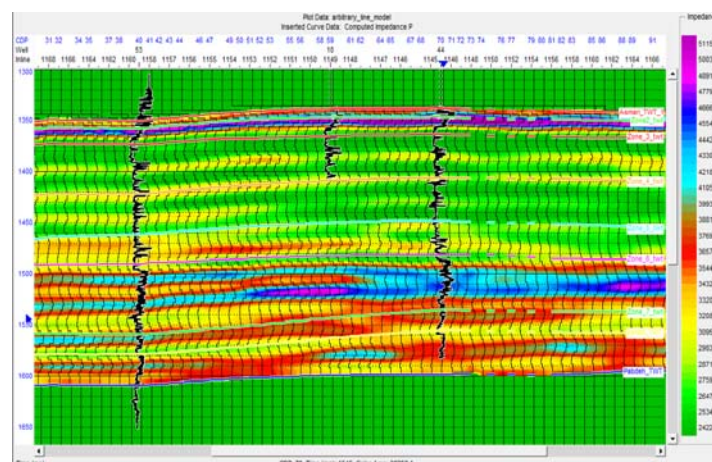
شکل ۲. سرسازنداق آسماری (افق بالایی) و پابده (افق پایینی) در مکعب لرزه‌ای.

مقاومت صوتی به تدریج تغییر می‌کند تا ردلرزه‌های مصنوعی به دست آمده از آن، به همخوانی مناسبی با ردلرزه‌های اصلی برسند. کاربرد، محدوده این تغییرات را تعریف می‌کند. دلیل قرار دادن این محدودیت، جلوگیری از نوفه‌های کوچک و خطاهای مدل‌سازی، و یا قرار گرفتن الگوریتم در مسیر نادرست است. البته این تغییرات در محدوده‌ای منطقی که کاربرد تعریف می‌کند صورت می‌گیرد. در شکل ۳ امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی برای یک مسیر اختیاری که از چاه‌های ۵۳-۱۰ می‌گذرد نشان داده شده است. در این شکل نگار نشان داده شده در محل چاه‌ها امپدانس موج طولی است.

۲-۳ وارون‌سازی بر پایه مدل

برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای از نرم‌افزار مناسبی به نام Hampson and Russell استفاده شده است. این مجموعه نرم‌افزار شامل همه جنبه‌های اکتشاف لرزه‌ای همانند، بررسی خصوصیات مخزن، تجزیه و تحلیل AVO، وارون‌سازی و تفسیر چهاربُعدی است.

بر اساس پیشنهاد خزانه‌داری (۲۰۰۶) برای وارون‌سازی از الگوریتم وارون‌سازی خطی عمومی (GLI) استفاده شده است. در این الگوریتم با فرض اینکه موجک مشخص است، یک ردلرزه مصنوعی با استفاده از این موجک و مدل اولیه ساخته می‌شود. سپس این مدل



شکل ۳. امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی بر پایه مدل، برای یک مسیر اختیاری که از چاه‌های ۵۳-۱۰-۴۴ می‌گذرد.

۳-۳ محاسبه مکعب سرعت لرزه‌ای و روباره

در این مرحله کلیه داده‌های موجود شامل داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بُعدی، داده‌های چاه‌نگاری و سراسازندها، افق‌های تفسیر شده و داده‌های سرعت برانبارش در نرم‌افزار پترل بارگذاری شدند.

نرم‌افزار پترل متعلق به شرکت شلومبرژر یک نرم‌افزار کاربردی جامع برای همه تحقیقات اکتشافی و مخزنی است. این نرم‌افزار به کاربر اجازه تفسیر داده‌های لرزه‌ای، ساخت مدل مخزن مناسب برای شبیه‌سازی، عرضه نتایج شبیه‌سازی، محاسبه حجم، بررسی نقشه‌ها و طراحی راهبرد توسعه و بهره‌برداری از مخزن را در قالب یک مجموعه می‌دهد.

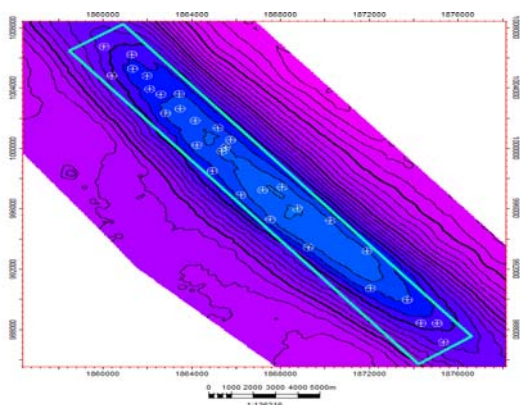
مکعب سرعت مدنظر در این تحقیق برای محاسبه تنش موثر مورد استفاده قرار خواهد گرفت، لذا، باید این مکعب شامل داده‌های سرعت از سطح مینا تا سراسازندها پابده باشد. برای این منظور دو مدل جداگانه در نرم‌افزار ایجاد شده که اولی از سطح تا افق آسماری امتداد دارد و دومی از افق آسماری تا افق پابده که برای تولید سرعت در هر مدل با توجه به داده‌های موجود از روش متفاوتی استفاده شده است.

گام اول در تولید مدل، انتخاب مرز مدل است. مرز مدل در این طرح طوری انتخاب شده است که قله

تاقدیس آسماری را پوشش دهد و همچنین چاه‌هایی که دارای اطلاعات *RFT* (Repeat Formation Tester) هستند درون مرز قرار گیرند. البته به دلیل بالا رفتن سرعت محاسبات و همچنین بالا رفتن درصد خطا در روش‌های زمین‌آماری برای فاصله‌های دورتر از چاه، این مرز محدود به اطراف چاه‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۴). این مرز دارای ابعاد 3×26 کیلومتر است و آزمون آن ۱۴۲ درجه است.

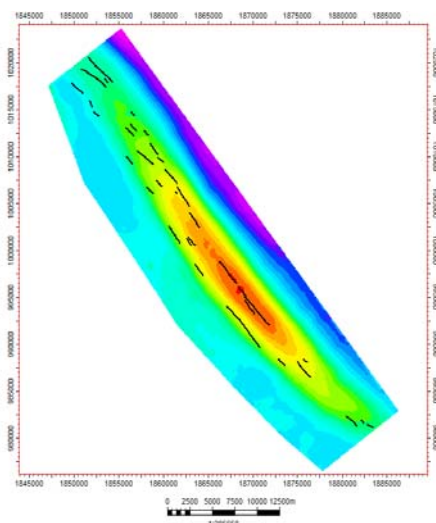
بعد از مشخص کردن محدوده طرح، مدل به سلول‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود، تعداد این سلول‌ها برای مدل در قسمت بالای مخزن $1197510 \times 30 \times 223$ (۱۷۹) در نظر گرفته شده است.

بعد از فراخوانی داده‌های سرعت برانبارش، باید این داده‌ها را به سرعت بازه‌ای تبدیل کرد. برای این کار از رابطه دیکس (۱۹۵۵) در قالب یک برنامه رایانه‌ای استفاده شده است. مسلماً بعد از وارد کردن داده‌های سرعت بازه‌ای در سلول‌های مدل، به‌علت پراکنده بودن و ناپیوستگی داده‌های سرعت، همه سلول‌های مدل دارای مقدار نمی‌شوند و لازم است که با روش مربع مجذور فاصله و با استفاده از مقادیر سرعت برانبارش در سلول‌های دارای مقدار، مقادیر سایر سلول‌های بدون مقدار تعیین شود.

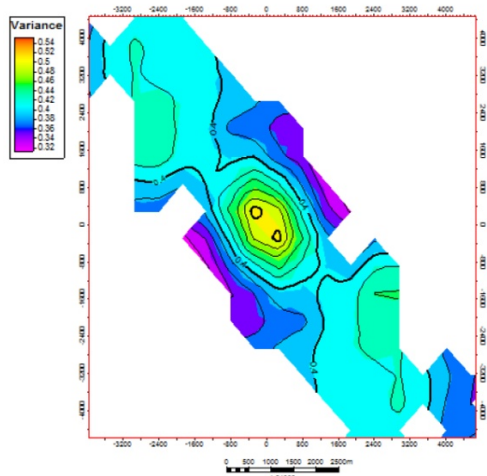


شکل ۴. مرز طرح؛ این مرز دارای ابعاد 3×26 کیلومتر است و آزمون آن ۱۴۲ درجه است و درحکم مرز اصلی در کل طرح مورد استفاده قرار خواهد گرفت. دایره‌های سفیدرنگ مشخص‌کننده محل چاه‌ها است و سطوح هم‌زمان نشان داده شده، افق سازنده آسماری است.

دارای ناهمسانگردی در جهت راس تا قدیس هستند و باید در واریوگرافی از مدل ناهمسانگرد استفاده کرد. برای شروع واریوگرافی ابتدا باید توزیع داده‌های موردنظر نرمال شود، سپس روند عمودی در داده‌ها باید شناسایی و حذف شود. این کار با یافتن خط رگرسیون در داده‌ها و حذف روند با استفاده از این خط امکان‌پذیر است، البته در نهایت همه این تبدیلات باید به صورت معکوس اعمال و داده‌ها به صورت اولیه برگردانده شوند.



شکل ۵. نقشه تراز افق آسماری و جهت‌گیری گسل‌های اصلی در منطقه (خطوط سیاه‌رنگ).



شکل ۶. نقشه واریوگرام برای داده‌های سرعت صوتی. همان‌طور که مشاهده می‌شود نقشه واریوگرام داده‌های سرعت در فضا، دارای ناهمسانگردی در جهت راس تا قدیس هستند.

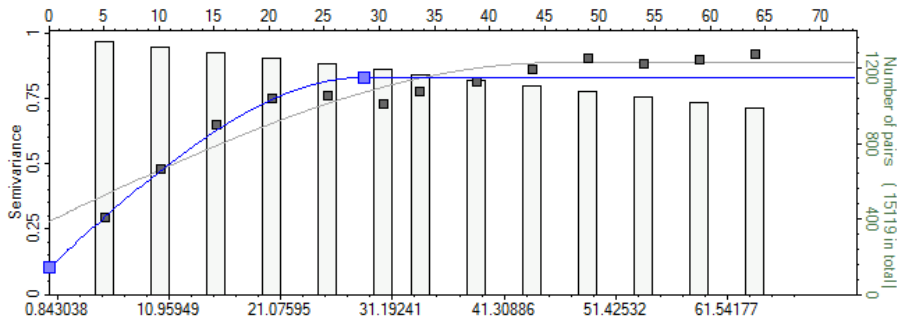
ابتدای مدل دوم از انتهای مدل قبلی یعنی افق آسماری شروع می‌شود و تا افق سازند پابده ادامه می‌یابد. ابعاد افقی سلول‌های مدل 100×100 متر است. ولی تعیین ارتفاع عمودی سلول‌ها مستلزم دقت بیشتری است.

ساخت یک مدل با دقت مطلوب در ناحیه مخزنی بدون تفسیر گسل‌ها امکان‌پذیر نیست. در حقیقت شکل سلول‌های مدل کاملاً تابع گسل‌های ناحیه است. از این رو در میدان مورد بررسی، همه صفحه‌های گسل‌ها تفسیر می‌شوند و باید در مدل نهایی لحاظ شوند (شکل ۵).

در این ناحیه تغییرشکل‌های اساسی در ارتباط با حرکات زمین‌ساختی، باعث تولید ساختمان تاقدیس با جهت محور شمال‌غرب-جنوب‌شرق شده است. امتداد قله این تاقدیس جایی است که گسلش اصلی رخ داده است. امتداد صفحات این گسل‌ها نیز در راستای شمال‌غرب-جنوب‌شرق است.

در این تحقیق برای ساخت مکعب سرعت در مخزن از روش کوکریجینگ که توسط ماترون (۱۹۶۳) پایه گذاری شده، استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های نگار سرعت صوتی در حکم داده‌های اولیه و از داده‌های امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی به‌منزله داده‌های امپدانس صوتی استفاده شده است. داده‌های امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی با داده‌های سرعت لرزه‌ای دارای همبستگی زیادی هستند و با توجه به داشتن وضوح جانبی بالاتر نسبت به داده‌های چاه، می‌توان از آن در حکم داده ثانویه در روش کوکریجینگ استفاده کرد. با رسم نمودار تقاطعی داده‌های وارون‌سازی به روش برپایه مدل و نگار سرعت، ضریب همبستگی 0.76 به دست می‌آید.

در ابتدا با استفاده از نقشه واریوگرام سعی در یافتن جهت محور ناهمسانگردی احتمالی در منطقه می‌شود. در شکل ۶ نقشه واریوگرام برای نگار سرعت صوتی نشان داده شده است. با بررسی این نقشه می‌توان دریافت، همان‌طور که انتظار می‌رفت، داده‌های سرعت در فضا



شکل ۷. واریوگرافی عمودی روی داده‌های نگار سرعت.

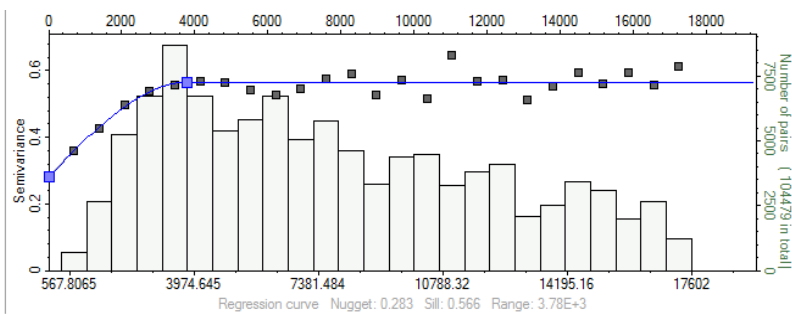
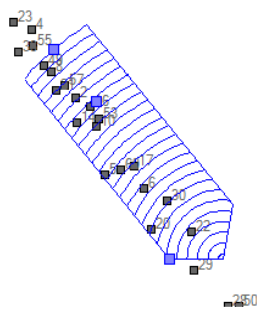
۴. تلورانس زاویه‌ای و لگ: ۵۰٪

پارامترهای واریوگرام شکل ۸ به منزله واریوگرام در جهت اصلی انتخاب و جهت عمود بر آن نیز جهت فرعی نامیده می‌شود. همچنین با استفاده از داده‌های امیدانس صوتی درحکم داده‌های ثانویه و مدل‌های واریوگرافی، داده‌های سرعت صوتی در مکان چاه‌ها درون‌یابی می‌شود. نتیجه این کار، ایجاد مکعب سرعت در محدوده مخزن است (شکل ۹). کنترل کیفی این مکعب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این مکعب سرعت به دست آمده، مهم‌ترین پارامتر قابل استفاده در مراحل بعد است. برای کنترل کیفی آن، نگارهای سرعت صوتی چاه‌های ۴۹ و ۵۰ از ابتدا در محاسبات به کار برده نمی‌شوند و در نهایت بعد از پایان یافتن عملیات شرح داده‌شده و تولید مکعب سرعت، در مکان چاه‌های حذف شده نگار مصنوعی سرعت تولید می‌شود (شکل ۱۰).

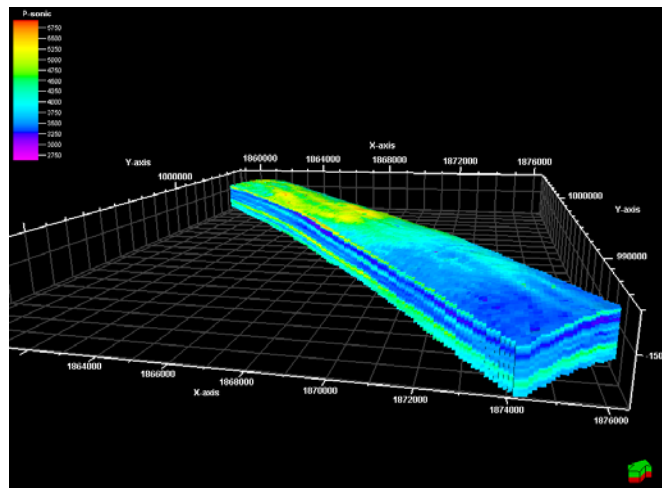
با استفاده از واریوگرافی عمودی مقدار اثر قطعه‌ای پیدا می‌شود. به این علت که داده‌های چاه دارای تعداد نمونه‌های بسیار زیادتری در جهت عمق نسبت به افق هستند. از این رو می‌توان با داشتن جفت‌نقطه‌های بیشتر با دقت بیشتری مقدار اثر قطعه‌ای را مشخص کرد.

با استفاده از شکل ۷ اثر قطعه‌ای حدود ۰/۱ و محدوده عمود ۲۸ متر در نظر گرفته می‌شود. با یافتن مقدار اثر قطعه‌ای به واریوگرافی افقی در ناحیه‌های مدل پرداخته می‌شود. شکل ۸ واریوگرام حاصل شده در یکی از ناحیه‌ها در جهت ۳۲۰ درجه مشاهده می‌شود. با استفاده از این واریوگرام، مقدار بُرد حدود ۳۷۸۰ متر به دست آمد. همچنین برای ایجاد این واریوگرام از پارامترها زیر استفاده شد:

۱. نوع مدل: کروی
۲. پهنای بانده: ۲۷۳۳ متر
۳. شعاع جست‌وجو: ۱۸۰۰۰ متر



شکل ۸. واریوگرافی افقی در جهت ۳۲۰ درجه.



شکل ۹. مکعب سرعت ایجاد شده به روش کوکریجینگ در محدوده مخزن. برای ساخت این مکعب داده‌های نگار صوتی درحکم داده اولیه و داده‌های امپدانس حاصل از وارون سازی به روش بر پایه مدل به‌منزله داده ثانویه استفاده شده است.

رگرسیون دارای معادله زیر است:

$$Y = 0.38 X - 0.9 \quad (9)$$

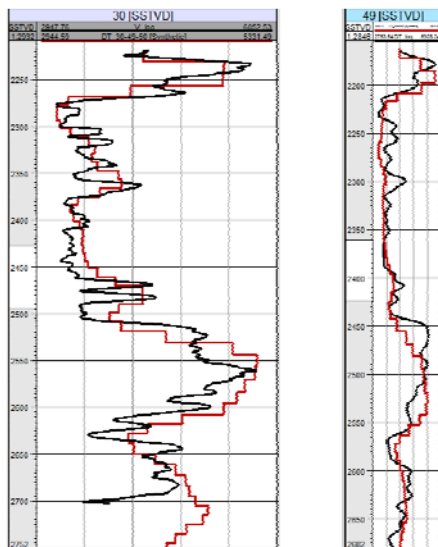
با استفاده از معادله (۹) مقادیر a و b به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۳۷ حاصل می‌شود. با استفاده از رابطه گاردنر، مکعب سرعت به چگالی تبدیل می‌شود که می‌توان با استفاده از این اطلاعات مکعب فشار روباره را ساخت (شکل ۱۳).

بعد از حصول اطمینان از صحت مکعب سرعت لرزه‌ای تولید شده در محدوده مخزن، مکعب سرعت نهایی با استفاده از ترکیب مکعب سرعت حاصل از درون‌یابی داده‌های سرعت برانبارش برای اعماق بالای مخزن و داده‌های سرعت به‌دست‌آمده در این مرحله، تولید می‌شود. در شکل ۱۱ مدل سرعت لرزه‌ای سه‌بُعدی نمایش داده شده است.

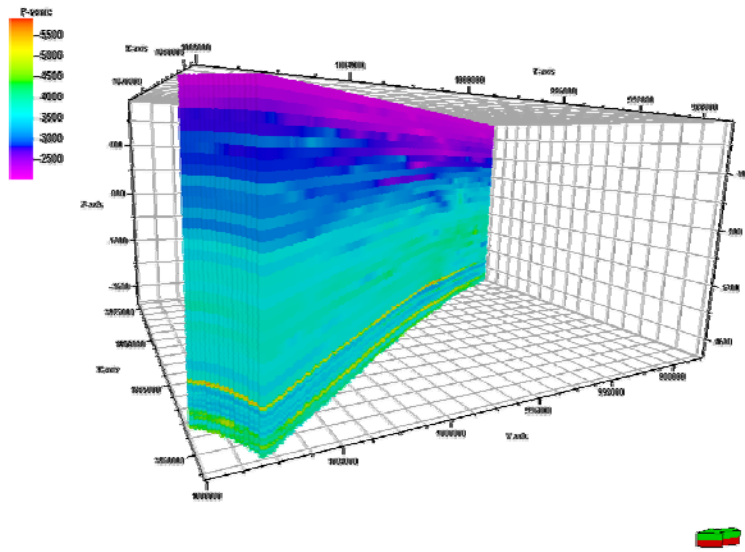
در این تحقیق برای تعیین ضرایب رابطه گاردنر از اطلاعات همه چاه‌ها استفاده شده است. برای این کار ابتدا لگاریتم اطلاعات نگارهای سرعت صوتی و چگالی به صورت نمودار متقاطع رسم می‌شود و بهترین خط روی این داده‌ها برازش می‌شود. این نمودار در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. می‌توان معادله (۴) را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\ln(\rho) = \ln(a) + b \ln(V) \quad (8)$$

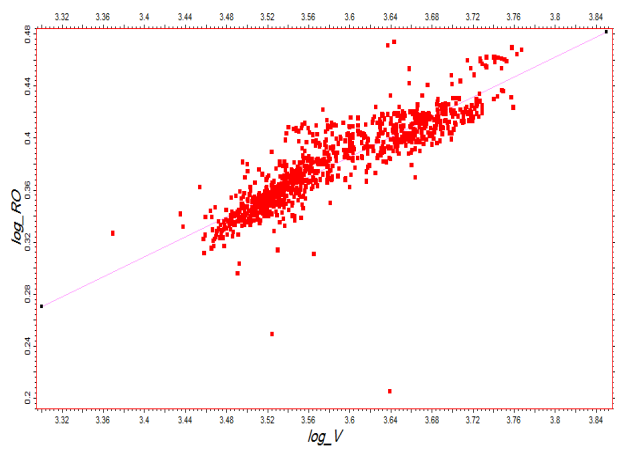
با توجه به رابطه اخیر می‌توان با رسم نمودار لگاریتم سرعت در مقابل لگاریتم چگالی مقادیر a و b را در محل چاه‌ها به‌دست آورد (شکل ۱۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌ها در این نمودار تقاطعی همبستگی خوبی نشان می‌دهند (ضریب همبستگی ۰/۸۸). همچنین خط



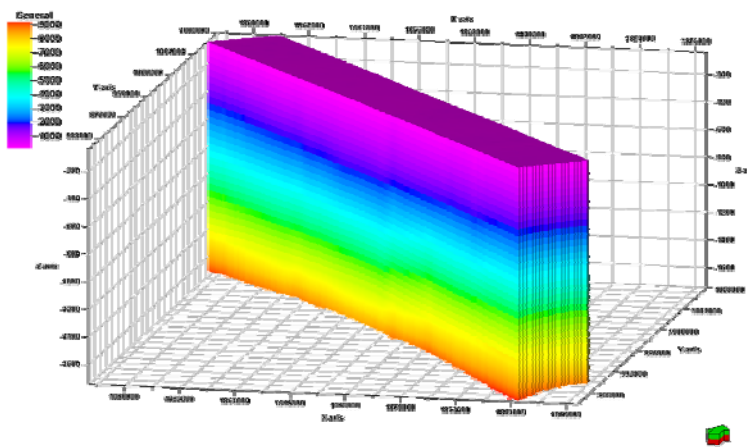
شکل ۱۰. کنترل کیفیت مکعب سرعت لرزه‌ای در دو چاه ۴۹ و ۵۰، داده‌های نگار سرعت هموار شده با منحنی سیاه و داده‌های نگار سرعت مصنوعی از مکعب سرعت با خطوط سرخ مشخص شده است.



شکل ۱۱. مکعب سرعت نهایی.



شکل ۱۲. نمودار لگاریتم چگالی برای همه چاه‌ها (محور عمودی) و لگاریتم سرعت صوتی (محور افقی) است.



شکل ۱۳. مکعب فشار روباره. در این شکل، واحد کلی نقشه بر حسب PSI (۶ Pascals = ۸۹۴,۷۵ PSI) است.

۳-۴ محاسبه تنش موثر و ساخت مکعب فشار منفذی

پس از حفر چاه‌های منطقه، به منظور به دست آوردن مقدار فشار در سازندهای اصلی و تولیدی از آزمایش‌های فشار همانند *RFT* و یا *DST* استفاده می‌شود. در میدان مورد بررسی نیز نتایج این آزمایش‌ها در ۶ چاه موجود است. با بررسی این داده‌ها مشاهده می‌شود که روند افزایش فشار دارای روندی عادی با شیب ثابت است. با استفاده از مکعب فشار روباره محاسبه شده در قسمت قبل و داشتن داده‌های فشار می‌توان فشار موثر را در این چاه‌ها برای چند نقطه محاسبه کرد همچنین با استخراج سرعت لرزه‌ای در این نقاط می‌توان نمودار تنش موثر در مقابل سرعت را در محل چاه‌ها رسم کرد. برای ایجاد رابطه بین داده‌های سرعت و فشار موثر از رابطه باورز استفاده شده است، این رابطه را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد (در رابطه (۱)، $V_0 = 500$ در نظر گرفته شده بود):

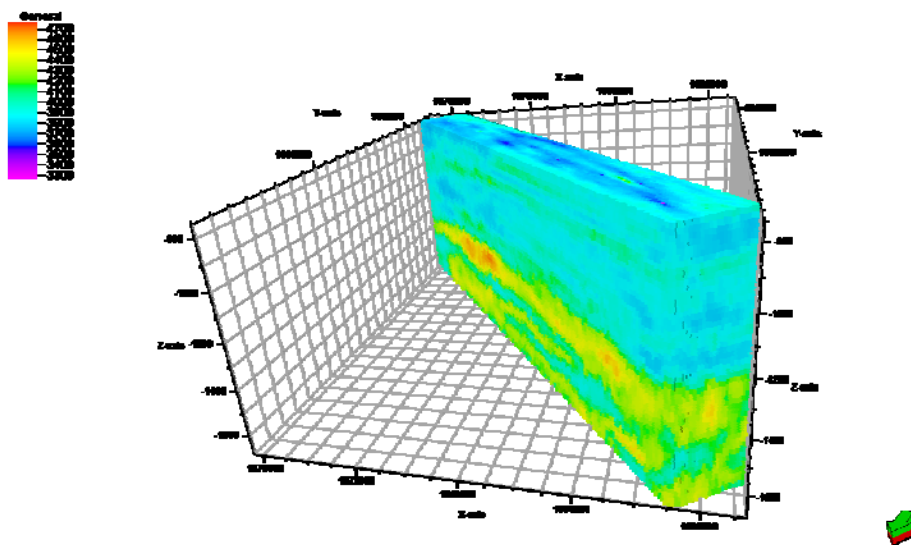
$$V = V_0 + AP_{effective}^B \quad (10)$$

که در این رابطه، V_0 سرعت در فشار موثر صفر برحسب m/s و V سرعت در عمق مورد نظر برحسب m/s است. A و B ثابت‌های رابطه باورز هستند و $P_{effective}$ فشار موثر در عمق مورد نظر برحسب psi است.

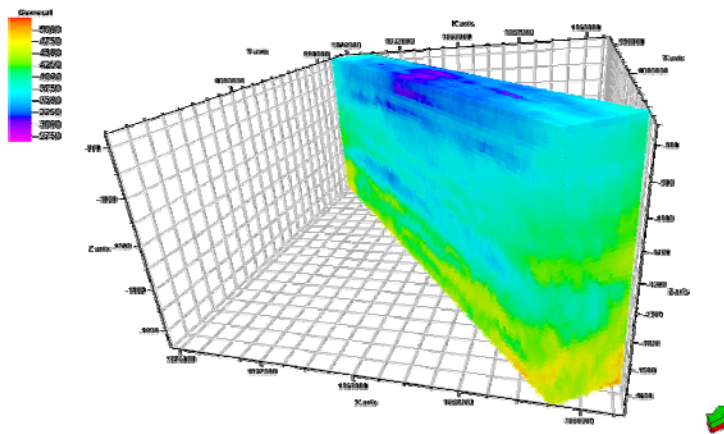
به منظور برازش منحنی و به دست آوردن ضرایب رابطه باورز، ابتدا باید مقدار V_0 انتخاب شود. با توجه به داده‌های سرعت برآینارش مقدار V_0 برابر ۱۸۰۰ در نظر گرفته شده است. با عملی شدن برازش، مقدار ضرایب A و B به ترتیب برابر $۳/۶۷۸$ و $۰/۷۴۳$ به دست می‌آید.

حال با استفاده از رابطه باورز به دست آمده و مکعب سرعت تولید شده، مکعب فشار موثر ساخته می‌شود (شکل ۱۴). در مرحله بعد و با استفاده از رابطه ترزاقی (۱۹۴۳) (رابطه ۷) و مکعب فشار موثر تولید شده، فشار منفذی سه‌بعدی حاصل می‌شود (شکل ۱۵).

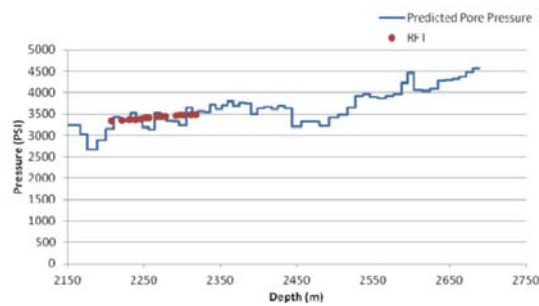
برای اطمینان از نتایج به دست آمده، باید مکعب فشار منفذی تولید شده کنترل کیفیت شود و از صحت برآورد اطمینان حاصل شود. برای این منظور از ابتدای بررسی داده‌های چاه شماره ۴۴ در هیچ یک از مراحل کار مورد استفاده قرار نگرفته تا به منزله معیاری در تشخیص موفقیت بررسی پیش‌بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۱۶ نتایج حاصل از مقایسه این داده‌ها نشان‌دهنده قابل اطمینان بودن فشار منفذی به دست آمده است. در شکل ۱۷ نمودار کلی مراحل ساخت مدل فشار منفذی در میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.



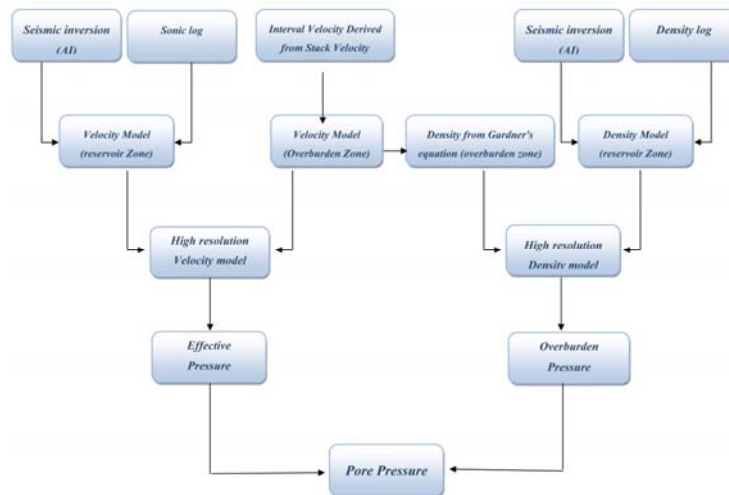
شکل ۱۴. مکعب فشار موثر در از افق آسماری تا افق پایده. در این شکل، مقیاس نقشه رنگ PSI است.



شکل ۱۵. مکعب فشار منفذی از افق آسماری تا افق پایه. در این شکل، مقیاس نقشه رنگ PSI است.



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر فشار منفذی پیش‌بینی شده (خط آبی) و مقادیر RFT در محل چاه ۴۴.



شکل ۱۷. نمودار مراحل ساخت مدل فشار منفذی در میدان منصوری.

چگالی به‌دست آمده از نگارهای چاه هستند. به‌علاوه این داده‌ها دارای نمونه‌برداری جانبی و پراکندگی زیادی نسبت به داده‌های چاه هستند که می‌توان از آن در حکم

۴ نتیجه‌گیری

روشن شد که داده‌های حاصل از وارون‌سازی، دارای ضریب همبستگی زیادی با مقادیر سرعت لرزه‌ای و

توزیع فشار روبه‌رو هستند استفاده کرد.

همچنین اطلاعات فشار منفذی حاصل شده در این تحقیق می‌تواند ابزاری مفید در برنامه‌ریزی برای تعیین یا تنظیم وزن گل حفاری و نصب لوله‌های جداری باشد. هرچند کاربرد اصلی این اطلاعات در برنامه‌ریزی حفاری چاه‌های جدید در منطقه است ولی می‌توان از آن در اکتشاف و بررسی سازوکار گسل‌های منطقه نیز استفاده کرد.

منابع

- Bowers, G. L., 1995, Porepressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanism beside under compactions, SPE Drilling & Completion, June, 89-95.
- Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics*, **20**, 68-66.
- Dutta, N. C., 2002, Geopressure prediction using seismic data, Current status and the road ahead, *Geophysics*, **67**, 2012-2041.
- Dutta, N. C., 1987, Geopressure, Soc. Pet. Eng., Geophys. Reprint Ser., **7**.
- Fertl, W. H., Chapman, R. E. and Holz, R. F., 1994, Studies in abnormal pressure, Elsevier, Amsterdam, 251-2790.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density-the diagnostic basics of stratigraphic traps, *Geophysics*, **39**, 770-780.
- Huffman, A. R., 2002, The future of pore-pressure prediction using geophysical methods, *The Leading Edge*, February 199-202.
- Khazanehdari, J. and Dutta, N., 2006, High-resolution pore pressure prediction using seismic inversion and velocity analysis, SEG/New Orleans 2006 Annual Meeting.
- Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, **58**, 1246-1266.
- Pennebaker, E. S., 1968, Seismic data indicate depth and magnitude of abnormal pressure, *World Oil*, **166**, 73-82.
- Hampson-Russel, 1999, STRATA module: Theory and Guide, May.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B., 1948, Soil mechanics in engineering practice, Wiley, New York, NY, 566.

پارامتر دوم در روش کوکریجینگ برای ساخت مکعب‌های سرعت و چگالی با وضوح زیاد استفاده کرد. همان‌طور که گفته شد، در استفاده از روش‌های تبدیل سرعت-فشار، مهم‌ترین بخش بررسی استفاده از یک مدل سرعت با دقت و وضوح مناسب است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از کنترل کیفیت داده‌های سرعت برآورد شده، می‌توان به این نتیجه رسید که مدل سه‌بعدی سرعت به‌دست آمده دارای تقریب مناسبی از سرعت بازه‌ای است.

از آنجا که مدل سه‌بعدی فشار روباره به‌صورت مستقیم از مدل چگالی به‌دست می‌آید، کنترل کیفیت و همچنین صحت مدل چگالی همانند مدل سرعت، اهمیت ویژه‌ای دارد. در میدان مورد بررسی نشان داده شده که استفاده از رابطه گاردنر با ضرایب به‌دست آمده از چاه‌های منطقه می‌تواند رابطه‌ی مناسبی برای تولید داده‌های چگالی از سرعت بازه‌ای باشد. همچنین باید در نظر داشت، از آنجا که در محاسبه فشار منفذی از داده‌های زیادی استفاده می‌شود و برآوردها و درون‌یابی‌های متعددی در مسیر تولید مدل فشار وجود دارد، در مدل نهایی این عدم قطعیت‌ها، مهم و تاثیرگذار هستند. همچنین باید سعی شود تا با استفاده از انتخاب روش‌های مناسب آماری این عدم قطعیت‌ها به حداقل کاهش یابد.

به‌طورکلی در این تحقیق سعی شد تا با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی و دیگر داده‌های در دسترس و موجود در میدان مورد بررسی، فشار منفذی در مخزن آسماری پیش‌بینی شود. از آنجا که بررسی فشار در مخازن کربناته دنیا بسیار اندک است و تحقیقات زیادی در این مخازن صورت نگرفته، ولی نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر تا حد قابل قبولی رضایت بخش است. با توجه به موجود بودن داده‌های مورد استفاده در این تحقیق و نبود نیاز به برداشت داده جدید و صرف هزینه اضافی، می‌توان از این روش در مخازنی که با مشکل پیچیدگی