

مقایسه پیش‌بینی فشار منغذی با استفاده از روش مرسوم سرعت لرزه‌ای و روش بر پایه داده‌های مقاومت صوتی

ایرج مداحی^۱، علی مرادزاده^{۲*} و علی نجاتی کلاته^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۶

چکیده

در تحقیق حاضر فشار منغذی و مکانیسم ایجاد آن در یکی از میادین جنوب غرب کشور با استفاده از دو روش: (۱) سرعت حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، (۲) استفاده مستقیم از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای، مورد تخمین قرار گرفته و نتایج مقایسه شدند. ابتدا با انجام وارون‌سازی لرزه‌ای، مکعب داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به دست آمد و سرعت لرزه‌ای از آن استخراج شد. با انجام برازش بین داده‌های فشار موثر از یک طرف و داده‌های سرعت لرزه‌ای و مقاومت صوتی از طرف دیگر، روابط بین این داده‌ها تعیین و مدل‌های اولیه به دست آمدند و سپس با اعمال تصحیحات لازم برای هر دو مدل، ضرائب کالیبراسیون مورد نیاز نهایی شدند و در برگردان داده‌های مذکور به مکعب تنش موثر مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه مکعب تنش موثر در هر دو مدل به مکعب فشار منغذی تبدیل شدند. نتایج حاصل از این تحقیق، اعم از تفکیک لایه‌های مخزنی و نیز دارا بودن ضریب همبستگی (R) بالا بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایش فشار چاه (۹۱٪) برای روش سرعت و (۹۲٪) برای روش مقاومت صوتی) و همچنین خطای استاندارد پایین، نشان‌دهنده توانایی قابل قبول روش‌های لرزه‌ای به کار گرفته شده در این تحقیق برای پیش‌بینی فشار منغذی در مخازن کربناته هستند. در نهایت با مقایسه نتایج، نشان داده شد که روش به کارگیری مستقیم داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای در پیش‌بینی فشار منغذی که برای اولین بار توسط مولفین مقاله در مخازن کربناته مورد استفاده قرار گرفته است، بهبود قابل ملاحظه‌ای در میزان تفکیک لایه‌های مخزنی در مقایسه با روش مرسوم سرعت داشته است، به طوری که وضوح تفکیک مخازن سروک و ایلام بیشتر شده و لایه مخزنی کم ضخامت بورگان آشکار شد و نیز لایه مخزنی فلهیان که در روش سرعت به درستی تفکیک نشده بود در روش جدید به درستی و با فشار منغذی بیشتر از لایه‌های بالایی و پایین خود شناسایی شد.

کلمات کلیدی: فشار منغذی، فشار موثر، مکانیسم بارگذاری، سرعت وارون‌سازی، مقاومت صوتی لرزه‌ای

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: a_moradzadeh@ut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3771.2719)

مقدمه

مکانیزم‌های ایجاد فشارهای بالا در رسوبات زیرسطحی، معمولاً به دلیل تراکم نامتوازن و یا از انبساط سیال درون حفرات ناشی می‌شوند [۱]. تراکم نامتوازن وقتی اتفاق می‌افتد که میزان خروج سیال از منافذ کمتر از میزان رسوب‌گذاری باشد، که در نتیجه آن، سیال محبوس شده و موجب ایجاد فشارهای بالا ضمن افزایش ضخامت رسوبات می‌شوند. در حالی که انبساط سیال ناشی از افزایش حجم و فشار در داخل فضای محبوس شده به دلایل: بلوغ کروژن، انبساط حرارتی آب و آب‌گیری در سخت‌شدگی رس‌ها اتفاق می‌افتد [۲].

پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری، امروزه یکی از موضوعات مهم در طراحی و ارزیابی چاه‌ها است، که در تعیین وزن گل حفاری و ایجاد تعادل در فشار سیال داخل چاه موثر بوده و کلید حفاری ایمن و اقتصادی در رسوبات دارای فشار زیاد است. فشار منفذی که با استفاده از اندازه‌گیری‌های مستقیم مثل RFT^۱ در چاه و بعد از حفاری تعیین می‌شود، می‌تواند بر اساس روش‌هایی غیرمستقیم لرزه‌ای، قبل از حفاری نیز مورد پیش‌بینی قرار بگیرد. در این‌گونه روش‌ها، فشار منفذی قبل از حفاری با استفاده از برازش بین یک نشان‌گر لرزه‌ای و فشار مؤثر و براساس روابط تجربی شناخته شده‌ای قابل محاسبه و تخمین است. از جمله روابط تجربی مهمی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار استفاده شده‌اند، می‌توان به روابط ایتون [۳] و باورز [۴] اشاره نمود. البته به دلیل تجربی و غیرمستقیم بودن این روابط، پیش‌بینی فشار منفذی از داده‌های لرزه‌ای دارای عدم قطعیت‌هایی است و این به دلیل آن است که عوامل زیادی به غیر از فشار، در تغییرات داده‌های لرزه‌ای مؤثر هستند. به عنوان مثال عواملی مانند تغییرات لیتولوژیکی، رخساره‌ای، دما، فرآیندهای ساختمانی، میزان رسوب‌گذاری و تراکم سنگ، دپازنز کانی‌ها (به خصوص کانی‌های رسی) و بلوغ کروژن در فشار سازند مؤثر بوده و در

مطالعات فشار می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند. با این حال در بیشتر مواقع، یک انحراف مهم در تخلخل از روند تراکم نرمال، مؤید فشارهای بالا بوده و این مسئله شناسایی آن را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی ممکن می‌سازد که به نوبه خود بیانگر عامل اصلی فشارهای غیرعادی به ویژه در لایه‌های شیلی است [۵].

اولین مطالعات پیش‌بینی فشار منفذی احتمالاً به سال ۱۹۶۵ بر می‌گردد که به وسیله هاتمن و جانسون در ضمن استخراج خواص شیل‌ها صورت گرفت که روش آنها بر پایه انحراف از روند خط نرمال در سرعت صوت اندازه‌گیری شده در نگارهای چاه استوار بود [۶]. پنه باکر نیز با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای به پیش‌بینی فشار منفذی پرداخت [۷]. گاردنر و همکاران رابطه‌ای بین گرادیان تنش روباره و گرادیان فشار نرمال سیال (فشار هیدرواستاتیک) و فشار سازندی پیشنهاد دادند [۸]. از سال ۲۰۰۰ به بعد، روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه اطلاعات لرزه‌ای به یکی از آنالیزهای رایج در مناطقی تبدیل شد که با مشکل فشار مواجه بودند. این روش به خصوص در خلیج مکزیک به سرعت گسترش یافت، به نحوی مطالعه جامعی بر روی ۷۰۰ بلوک نفتی این منطقه که شامل ۲۰۰۰ چاه بودند توسط کلی و همکاران انجام شد [۹]. با توجه به اینکه سرعت لرزه‌ای حاصل از پردازش از توان تفکیکی زیادی برخوردار ناست، لینرت و همکاران سعی کردند از ترکیب سرعت حاصل از توموگرافی لرزه‌ای با داده‌های چاه که به نوعی اطلاعات چاه را در مدل سرعت وارد می‌کند در پیش‌بینی فشار منفذی در خلیج مکزیک استفاده نمایند [۱۰]. همچنین ریاحی و سلیمانی روش باورز را برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخزن میدان ماسه سنگی منصوری به کار بردند [۱۱].

1. Repeat Formation Test (RFT)

از این‌رو نشان نمی‌دهد که آیا روش به‌کار گرفته توانسته است بخش‌های مخزنی را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید یا خیر؟ [۱۶].

از آنجایی که تمامی روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت لرزه‌ای در شیل‌ها و مخازن ماسه سنگی توسعه پیدا کرده‌اند، لذا با توجه به تفاوت‌های اساسی در ساختار حفرات در سازندهای آواری و سازندهای کربناته، احتمالاً محدودیت‌های زیادی را در تخمین فشار منفذی قبل از حفاری در مخازن کربناته می‌توانند داشته باشند. همچنین پیش‌فرض‌هایی مانند: الف) سنگ به‌طور غالب از شیل تشکیل شده است، ب) تغییر تخلخل سنگ فقط از طریق مکانیزم‌های تراکمی کنترل می‌شوند، ج) سرعت‌های لرزه‌ای در یک چگالی مناسب پیک شده‌اند و د) یک منحنی تراکم نرمال مناسب در ستون چینه‌شناسی در دسترس است، در استفاده از سرعت لرزه‌ای در پیش‌بینی فشار منفذی در نظر گرفته می‌شوند که باعث محدود شدن کارایی سرعت لرزه‌ای در پیش‌بینی فشار منفذی در سازندهای پیچیده و غیرآواری خواهد شد.

با توجه به مطالب بالا و به منظور انجام بررسی‌های بیشتر روی توانایی و دقت روش‌های لرزه‌ای، در تحقیق حاضر از روش جدیدی استفاده خواهد شد که به‌طور مستقیم از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای در پیش‌بینی فشار منفذی بهره می‌برد. این اولین بار است که قابلیت روش مذکور برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مزایای این روش حذف یک مرحله از برگردان داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به داده‌های سرعت است که به‌نوبه خود باعث حذف عدم قطعیت‌های ناشی از تبدیل مذکور می‌شود.

بانیک و همکاران مقاومت صوتی لرزه‌ای را برای پیش‌بینی فشار منفذی در خلیج مکزیک به‌کار گرفته و توانستند در زیر لایه‌های نمک، فشار منفذی را به‌درستی تخمین بزنند [۱۲]. لویس و همکاران با تلفیق روش‌های ایتون و یان به پیش‌بینی فشار منفذی درجا در ناحیه‌ای از جنوب کشور چین پرداختند. در هر دوی این روش‌ها، سرعت موج تراکمی باید از خط روند سرعت تراکم نرمال^۱ تعیین شود. اما در روش تلفیقی مذکور نیازی به تعیین خط روند مذکور نبوده بنابراین دقت پیش‌بینی فشار منفذی در مناطق کم عمق به‌طور زیادی بهبود پیدا می‌کند [۱۳]. هاسکین و اوکانور تاثیر خواص سنگ روی داده‌های سرعت را به‌منظور پیش‌بینی فشار منفذی درجا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای در مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه تحقیق آنها نشان داد، در صورتی که از سرعت‌های لرزه‌ای به تنهایی استفاده شود، به‌دلیل تاثیر خواص سنگ و فاکتورهای مختلف از جمله دیاژنوز، مواد ارگانیک^۲ ناهم‌گنی سنگ و ... عمل کالیبراسیون با نگار سرعت چاه به‌درستی صورت نمی‌گیرد و در چنین مواقعی فشار پیش‌بینی شده از مقدار واقعی آن کمتر خواهد بود [۱۴]. همچنین آزادپور و شادمنا من (۱۳۹۵) مکانیزم‌های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران را با استفاده از اطلاعات نمودارهای سرعت، چگالی و تنش موثر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که تراکم نامتوازن مکانیزم اصلی ایجاد فشار در میدان مورد مطالعه بوده است. نتایج این مطالعه با مقادیر آزمایش فشار منفذی در چاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و مطابقت نسبتاً خوبی را نشان داد [۱۵]. آدیم و همکاران (۱۳۹۷) روش باورز را برای پیش‌بینی فشار منفذی از سرعت لرزه‌ای در یکی از میادین کربناته ایران به‌کار گرفتند [۱۶]. مقطع عرضی نشان داده شده در این کار تحقیقاتی فقط ستون چینه‌شناسی سازند مخزنی را شامل بوده

1. V_{pnormal}
2. TOC

تئوری و مرور روش‌های موجود

پیش فرض اصلی این نوع مطالعات بر این است که تغییرات نشان‌گر لرزه‌ای با فشار منفذی از اصول تنش موثر تبعیت می‌کند که برای اولین بار توسط ترزاقی فرمول‌بندی شده است [۱۷]. ترزاقی آزمایشی را برای توصیف تراکم سنگ به سبب فشار روباره در لایه‌های زیر سطحی به وسیله فشار منفذی و تنش موثر قائم، خنثی می‌شود. براساس این نظریه تمامی پارامترهای قابل اندازه‌گیری ناشی از تنش مانند تراکم و تغییرات سرعت امواج الاستیک، تابعی از تانسور تنش موثر می‌باشند. تئوری پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه قانون تنش موثر بایوت [۱۸] و ترزاقی (۱۹۴۳)، رابطه زیر را بین فشار روباره P_0 ، تنش موثر σ_e و فشار منفذی P_p ارائه می‌کند:

$$p_p = \frac{(P_0 - \sigma_e)}{\beta} \quad (1)$$

که در آن β ضریب تنش بایوت می‌باشد. ضریب تنش موثر در سنگ‌هایی که از یک ماده الاستیک واحد تشکیل یافته‌اند تحت تنش‌های متوسط برابر با یک ($\beta=1$) است که در سنگ‌های غیر همگن صدق نمی‌کند. در اکثر عملیات‌های اکتشافی این ضریب برابر با یک فرض می‌شود [۱۹].

روش بر پایه سرعت لرزه‌ای

باورز معادله ترزاقی را برای پیش‌بینی فشار منفذی به کار گرفت. روش وی نیز مبتنی بر تنش موثر بوده و هر دو عامل تراکم نامتوازن و باربرداری حاصل از انبساط سیال و بالا آمدگی، را به‌عنوان مکانیزم‌های اصلی ایجاد فشارهای غیرعادی در نظر می‌گیرد. سیال منفذی در شرایط تراکم نامتوازن محبوس شده و افزایش فشار ایجاد می‌کند. در این شرایط، عمل تراکم در رسوبات مهار شده و تنش موثر با افزایش رسوب ثابت می‌ماند. باورز برای چنین رسوباتی که تحت مکانیزم تراکم نامتوازن قرار گرفته‌اند، رابطه تجربی زیر را بین تنش موثر و سرعت صوت

ارائه نمود [۴].

$$V = V_0 + A(\sigma_e)^B \quad (2)$$

که در آن: سرعت تراکمی صوت در عمق داده شده، V_0 نیز سرعت صوت در سطح زمین است، σ_e تنش موثر قائم و A و B پارامترهای حاصل از کالیبراسیون رابطه سرعت در برابر داده‌های تنش موثر در چاه‌های آزمایشی می‌باشند. براساس نظر باورز همچنین تینگای و همکاران [۲۰] انبساط سیال می‌تواند سبب افزایش فشار حفره‌ای شده و در نتیجه موجب کاهش تنش موثر در سری رسوبی شود. برای برآورد فشار در نواحی دارای مکانیزم توسعه سیال، ایشان منحنی باربرداری را بین تنش موثر قائم و سرعت لرزه‌ای به‌صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$V = V_0 + A \left[\sigma_{\max} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\max}} \right)^{1/u} \right]^B \quad (3)$$

که در آن u به پارامتر باربرداری معروف بوده و بیانگر حالت پلاستیکی رسوبات می‌باشد، $u=1$ به منزله تغییر شکل کاملاً الاستیک و برگشت پذیر بوده که در این حالت رابطه به شکل ساده و بدون باربرداری رابطه ۳ در می‌آید. اگر $u=\infty$ باشد، رابطه ۳ با تغییر تنش مؤثر به تنش بیشینه^۱ ظاهر خواهد شد که تغییر شکل دائمی و برگشت ناپذیر بودن آن را نشان می‌دهد. یعنی برای تمامی مقادیر تنش موثر کمتر از تنش بیشینه، سرعت برابر با حداکثر است. در واقع تنش بیشینه، مقدار تنش موثر در مرحله شروع باربرداری بوده و به‌عبارت دیگر مقدار بیشینه تنش موثر خواهد بود [۴]. حال با استفاده از رابطه ترزاقی و رابطه ۳ می‌توان نوشت:

$$P_{ulo} = P_0 - (\sigma_{\max})^{1-u} \left(\frac{Vp - Vm}{A} \right)^{\frac{u}{B}} \quad (4)$$

1. σ_{\max}

مزیت این معادله می‌باشد چرا که بسیاری از خواص وارون‌سازی لرزه‌ای در حوزه زمان محاسبه می‌شوند. در نهایت فشار منفذی از رابطه ترزافی رابطه ۱ قابل محاسبه خواهد بود.

موقعیت میدان مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

میدان نفتی مورد مطالعه، در جنوب غربی ایران در ناحیه فروافتادگی دزفول و در هفتاد کیلومتری غرب سوسنگرد به موازات مرز ایران و عراق قرار دارد. میدان مذکور در سال ۱۹۷۸ توسط اطلاعات لرزه‌نگاری مورد شناسایی قرار گرفت و از نظر هندسی از یک طاقدیس تقریباً متقارن و کشیده تشکیل شده و ستون چینه‌شناسی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مخازن اصلی این میدان سازندهای ایلام و سروک بوده و از نظر رسوب‌شناسی جزء مخازن کربناته می‌باشند. همچنین لایه ماسه سنگی بورگان و بخش بالایی سازند کربناته فهلیان از دیگر مخازن نفتی این میدان به حساب می‌آیند که در این مطالعه همگی این مخازن هدف پیش‌بینی‌های فشار منفذی می‌باشند. جهت نیل به هدف از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی میدان، اطلاعات پتروفیزیکی پنج چاه و آزمایش‌های فشار^۲ چهار چاه آن استفاده خواهد شد.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر ابتدا افق‌های مخزنی در داده‌های لرزه‌ای مورد تفسیر ساختمانی قرار گرفت و سپس وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای در ماژول استراتا^۳ از نرم‌افزار همسون راسل انجام شد، به طوری که مکعب داده‌های مقاومت صوتی و سرعت از وارون‌سازی لرزه‌ای مورد استخراج قرار گرفت. در ادامه مکعب چگالی با استفاده از نگار چگالی و داده‌های لرزه‌ای، در ماژول ایمرج^۴ مورد تخمین قرار گرفت.

با اینکه رابطه باورز در حوضه‌های نفتی زیادی از جمله در خلیج مکزیک [۲۱] و حتی در میدان منصوری [۱۱] نیز به کار گرفته شده است لیکن پیش‌بینی‌های فشار منفذی در مناطق کم عمق یا مناطق نامتراکم با این روش، بیش از مقادیر واقعی است. زیرا سرعت صوت در چنین سازندهایی خیلی پایین است.

روش بر پایه مقاومت صوتی لرزه‌ای

روش بر پایه مقاومت صوتی^۱ برای محاسبه تنش موثر ابتدا توسط رسول اف و تونلات مورد بحث قرار گرفت [۲۲]. تفاوت اساسی این روش با روش معمول باورز این است که مقاومت صوتی حاصل از داده‌های لرزه‌ای به صورت مستقیم به جای سرعت لرزه‌ای، در برآورد تنش موثر استفاده شده است. بر پایه یک بازنویسی از رابطه باورز رابطه ۲، از طریق ضرب طرفین در چگالی، معادله مذکور به صورت رابطه‌ای از مقاومت صوتی و تنش موثر در زیر بازنویسی می‌شود:

$$I_p = I_{p0} + A \sigma_e^B \quad (5)$$

در معادلات فوق، I_p ، I_{p0} به ترتیب مقاومت صوتی موج تراکمی در سطح و عمق زمین، σ_e تنش موثر، A و B پارامترهای کالیبراسیون مقاومت صوتی- تنش موثر می‌باشند. معادله ۵ به عنوان معادله تغییر شکل یافته باورز تعریف می‌شود. به طور مشابه فشار روباره P_0 که عموماً به صورت تابعی از چگالی رسوبات روباره نوشته می‌شود، نیز می‌تواند به عنوان تابعی از مقاومت صوتی و به صورت زیر بازنویسی شود:

$$P_0 = g \sum_i \rho_i \Delta z_i = g \sum_i I_{pi} \Delta t_i \quad (6)$$

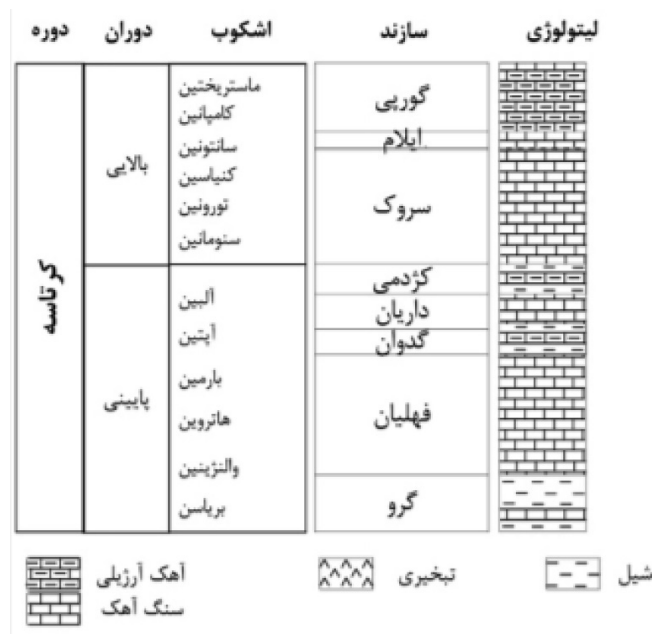
در معادله ۶ علامت جمع (زیگما) روی تمامی نمونه‌های بالای لایه هدف در نظر گرفته می‌شود، I_{pi} و ρ_i به ترتیب چگالی و مقاومت صوتی لایه i ام بوده، Δz_i و Δt_i به ترتیب فواصل نمونه‌ها در زمان و عمق بوده و g شتاب جاذبه زمین می‌باشند. همچنین علامت t (زمان) در معادله فوق، در جمله مربوط به مقاومت صوتی نشان‌دهنده یک نوع

1. Acoustic Impedance (AI)

2. RFT

3. Strata

4. Emerge



شکل ۱ ستون چینه‌شناسی (بدون مقیاس) مخازن میدان مورد مطالعه

به‌دست آمده در بالا، رابطه اولیه بین آنها مطابق شکل ۳ تعیین و پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها، ضرائب کالیبراسیون نهائی با مقادیر $A = 250$ و $B = 0/4$ به‌دست آمدند. همچنین با تعیین $V_0 = 1500$ (m/s) در حین کالیبراسیون، رابطه نهائی بین داده‌های سرعت وارون‌سازی با داده‌های تنش موثر به‌صورت زیر تعیین شد.

$$V = 1500 + 250(\sigma_e)^{0.4} \quad (8)$$

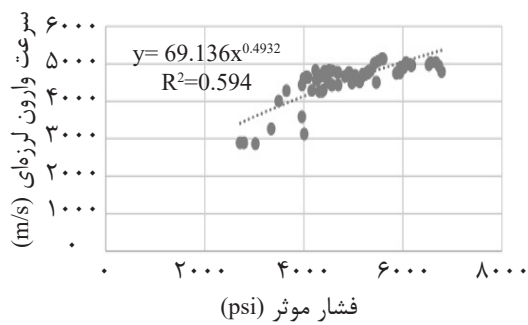
سپس داده‌های سرعت وارون‌سازی به داده‌های فشار موثر برگردانده شد. در ادامه، دقت داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از داده‌های واقعی فشار موثر در چاه ۶ مورد بررسی قرار گرفت که مطابق شکل ۴ ضریب همبستگی نسبتاً بالایی ($R=0/87$) را نشان داده است. در نهایت با بهره‌گیری از رابطه ترزاقی (رابطه ۱)، مکعب فشار منفذی با استفاده از فشار موثر حاصل از سرعت وارون‌سازی و فشار روباره به‌دست آمده در تحقیق، محاسبه شد که در شکل ۵ مقطع عرضی (شرقی- غربی) آن در محل چاه ۲ نشان داده شده است.

همچنین فشار روباره که در هر عمق برابر با تنش قائم ناشی از وزن رسوبات بالایی و سیال داخل آن است با استفاده از مکعب چگالی و ضخامت سلول‌ها در نرم‌افزار پترل^۱ و از رابطه ۷ محاسبه گردید.

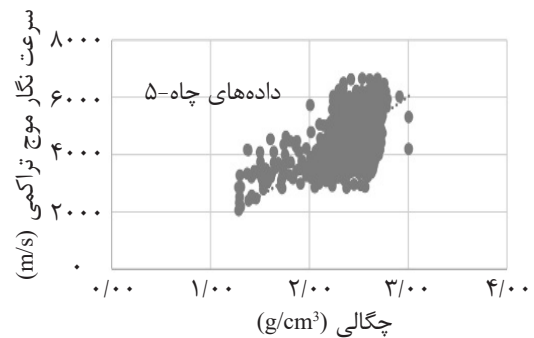
$$P_o = g \rho_b z = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (7)$$

که در آن P_o برابر با فشار روباره، ρ_b چگالی بالک و Z ضخامت قائم رسوبات بالایی می‌باشند. برای انتخاب مکانیزم اصلی موثر در ایجاد فشارهای مخزن، نمودار متقاطع سرعت- چگالی بالک (شکل ۲) در چاه‌های این میدان رسم گردید و نشان داده شد که با افزایش عمق، سرعت و چگالی هر دو افزایش می‌یابند که این نوع رفتار نمودار چه در حالت فشارهای بالا و چه در حالت فشارهای نرمال مربوط به روند تراکم نامتوازن و بارگذاری است [۱].

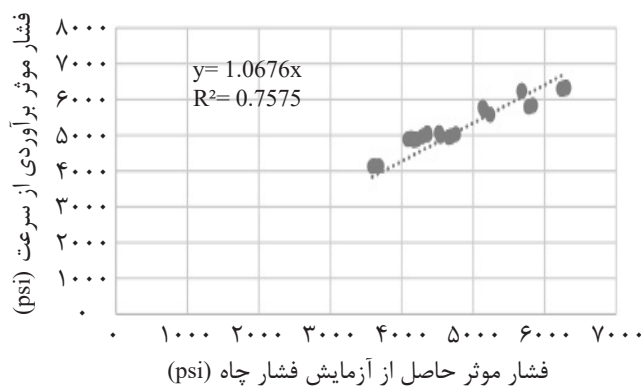
حال با استفاده از آزمایش‌های فشار چاه و داده‌های فشار روباره استخراج شده در محل چاه‌ها، فشار موثر در نقاط هم‌ارز چاهی با بهره‌گیری از رابطه ترزاقی (رابطه ۱) با فرض $\beta=1$ محاسبه شد. سپس با تشکیل نمودار متقاطع و انجام برآزش بین داده‌های سرعت وارون‌سازی و داده‌های فشار موثر



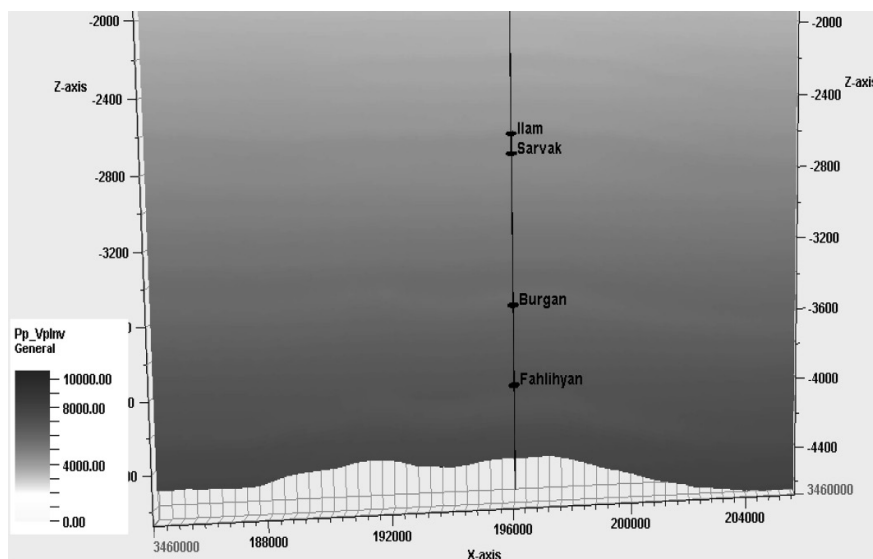
شکل ۳ برآزش بین تنش موثر و سرعت حاصل از وارون سازی



شکل ۲ نمودار مقاطع سرعت-چگالی در چاه شماره ۵ که نشان‌دهنده مکانیزم تراکم نامتوازن در ایجاد فشار است



شکل ۴ برآزش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده با داده‌های واقعی در چاه ۶

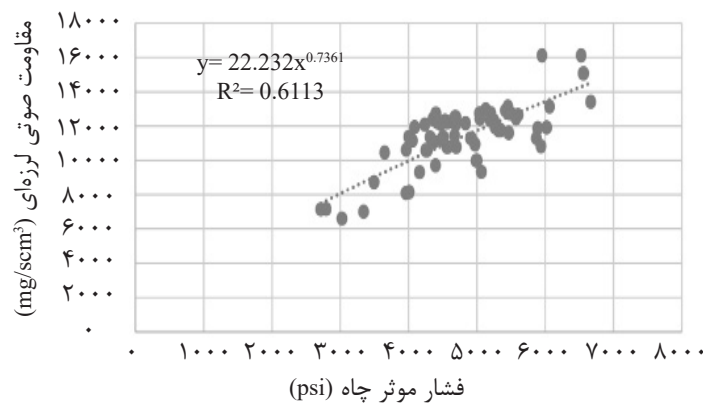


شکل ۵ مقطع عرضی فشار منفذی برآورد شده از سرعت وارون سازی در محل چاه ۲: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار بیشتر (رنگ تیره‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک شده است. واحد محورها در شکل به متر است

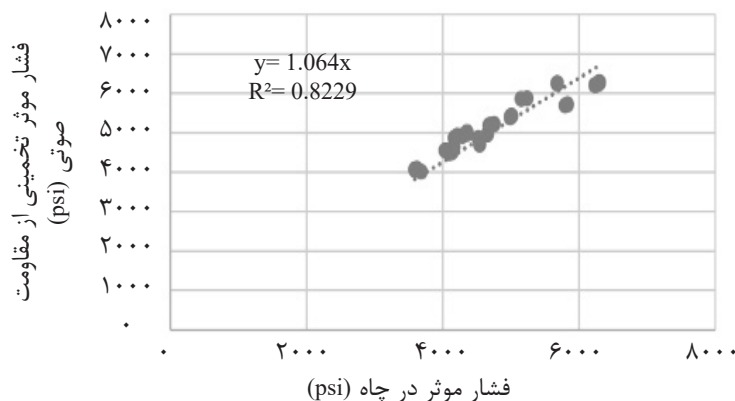
(۹) $I = 3500 + 135(\sigma_e)^{0.65}$

که در آن I_0 مقاومت صوتی لرزه‌ای در سطح زمین بوده و مقدار آن برابر با $(g/cm^3)(m/s)$ با 3500 در حین کالیبراسیون تعیین شد. پس از آن مکعب داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از ضرائب کالیبره شده در فوق به داده‌های فشار موثر برگردانده شد. در ادامه دقت داده‌های پیش‌بینی شده در محل چاه ۶ مورد آزمون قرار گرفت و نشان داده شد که ضریب همبستگی آن با داده‌های چاه همان‌طوری که شکل ۷ نشان می‌دهد بالا (۰/۹۱) است. لازم به ذکر است که اطلاعات این چاه جهت به‌دست آوردن ضرائب کالیبراسیون و رابطه ۹ به‌کار گرفته نشده نبود. حال با بهره‌گیری مجدد از رابطه ترزاقی (۱) و با استفاده از مکعب فشارهای روباره و موثر برآورد شده از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای، مکعب فشار منفذی مورد استخراج قرار گرفت.

همان‌طور که در مقطع عرضی فوق دیده می‌شود، بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار منفذی بیشتر (با رنگ تیره‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود تا حدی قابل تشخیص هستند، با این حال در این روش فشار منفذی بخش‌های مخزنی بورگان و بخش بالای سازند فهلیان به‌درستی برآورد نشده و فشار بالاتری نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود نشان نمی‌دهند. در ادامه همانند روش سرعت، با تشکیل نمودار متقاطع و با انجام برازش بین داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای و داده‌های فشار موثر به‌دست آمده در محل چاه‌ها، رابطه بین آنها تعیین و ضرائب اولیه براساس معادله بارگذاری باورز (رابطه ۵) به‌دست آورده شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس ضرائب کالیبراسیون A و B پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها نهائی شدند که با مقادیر 135 $A=$ و $B= 0/65$ در رابطه زیر نمایش داده شده است.



شکل ۶ برازش بین فشار موثر و مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای



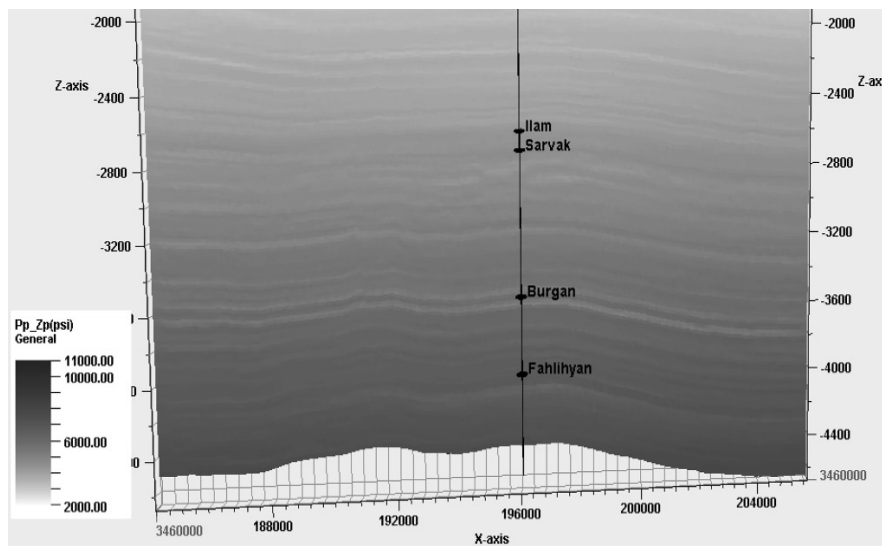
شکل ۷ برازش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده از مقاومت صوتی با داده‌های واقعی در چاه ۶

فشار چاه‌ها (۴ چاه) و داده‌های پیش‌بینی شده به‌روش سرعت لرزه‌ای برازش انجام شد و مطابق شکل ۹ ضریب همبستگی بین آنها برابر ۰/۹۱ و همچنین خطای استاندارد میانگین یا خطای استاندارد^۱ فشار منفذی پیش‌بینی شده به‌کمک رابطه زیر به میزان ۷۹ psi تعیین شد.

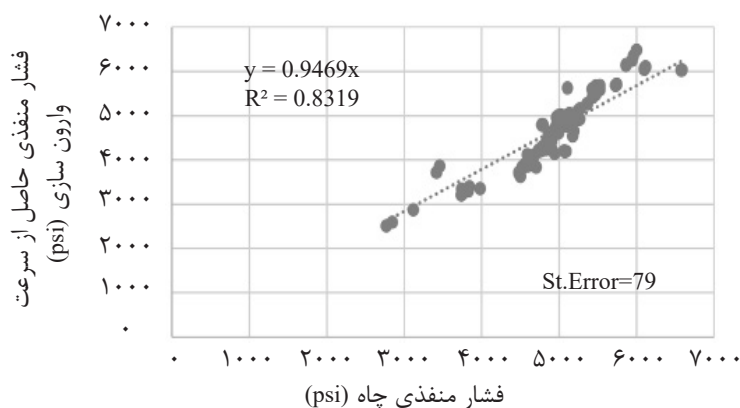
$$SE_x = S/\sqrt{n} \quad (10)$$

که در آن n تعداد نمونه فشار منفذی و S انحراف معیار آن است.

همان‌طور که در مقطع عرضی (شرقی - غربی) نمایش داده شده از مکعب فشار منفذی شکل ۸ دیده می‌شود، همه بخش‌های مخزنی (سازندهای ایلام، سروک، فهلیان و بخش بورگان) بوضوح با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود (رنگ‌های تیره‌تر) قابل تفکیک می‌باشند که نشان‌دهنده توانایی بالای این روش در پیش‌بینی فشار مخزنی در مخازن کربناته مورد مطالعه است. در نهایت برای تعیین عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی شده فشار منفذی از هر دو روش، ابتدا بین داده‌های آزمایش



شکل ۸ مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از داده مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای در محل چاه ۲: بخش مخزنی با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص است. واحد محورها در شکل به متر است.

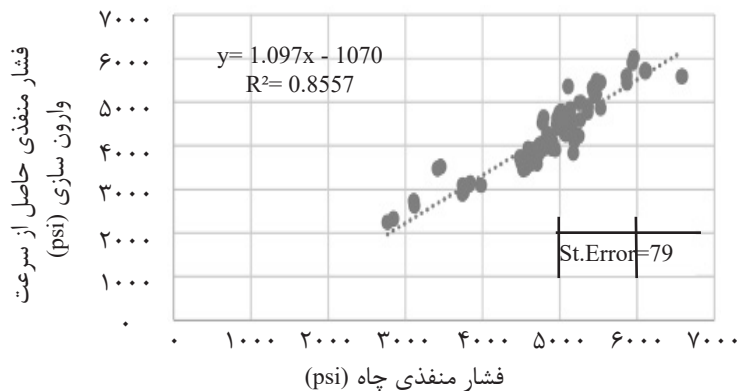


شکل ۹ نمودار متقاطع و ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده از سرعت وارون‌سازی و داده‌های آزمایش چاه‌ها

1. Standard Error of the Mean (SEM) or Standard Error (SE)

آمد (شکل ۱۰). همچنین میزان خطای استاندارد فشار منفذی پیش‌بینی شده برای این روش نیز مقدار $33/7$ psi تعیین شد که بیانگر دقت بالا و قابل قبول بودن مدل پیش‌بینی است.

همین‌طور برآزش بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده از روش مقاومت صوتی لرزه‌ای با داده‌های آزمایش فشار چهار چاه انجام شد و ضریب همبستگی نسبتاً بالایی ($0/925$) به دست



شکل ۱۰ نمودار ضریب همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی فشار منفذی و آزمایش فشار چاه‌ها

برگرداندن مقاومت صوتی به سرعت اجتناب شده و به‌نوبه خود موجبات کاهش خطای پیش‌بینی را فراهم می‌نماید. بررسی نتایج پیش‌بینی‌ها در برش‌های عرضی نشان می‌دهند که مدل جدید به‌خوبی توانسته است لایه‌های پرفشار و مخزنی (سازند ایلام و بخش بالایی سازند سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان) را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید. همچنین تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه نتایج مدل‌ها، اعم از میزان انطباق و ضریب همبستگی و خطای استاندارد بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های فشار در چاه‌ها، نشان داد که روش به‌کارگیری مستقیم از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای از دقت بیشتری نسبت به روش سرعت برخوردار می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از دو روش برای تخمین فشار منفذی در یک مخزن کربناته بهره گرفته شد. در روش اول از داده‌های سرعت وارون‌سازی لرزه‌ای استفاده شد. خروجی این مدل تا حدی توانست لایه‌های مخزنی اصلی (سازند ایلام و بخش بالایی سازند سروک) را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید ولی قادر به تفکیک لایه‌های مخزنی بورگان و فهلیان نبوده است. در کل نتایج حاصل از این مدل چندان رضایت بخش نبوده، لذا جهت بهبود نتایج، از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به‌صورت مستقیم و برای اولین بار در ایران در یک مخزن کربناته در استخراج فشار منفذی استفاده شده است. مزیت این روش نسبت به روش‌های معمول (روش سرعت) این است که در این روش از مراحل اضافی مانند

مراجع

- [1]. Swarbrick R., Lahann R., O'Connor S. and Hoskin E., "June. limitations of seismic pore pressure prediction-what is the alternative?," In 75th EAGE Conference & Exhibition-Workshops, 2013.
- [2]. Perry Jr, E.A. and Hower J., "Late-stage dehydration in deeply buried pelitic sediments," AAPG Bulletin, Vol. 56, Issue 10, pp. 2013-2021, 1972.

- [3]. Eaton B. A., "The equation for geopressure prediction from well logs," Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Society of Petroleum Engineers, September-1 October, Dallas, Texas 1975.
- [4]. Bowers G. L., "Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides under compaction," SPE Drilling & Completion, Vol. 10, Issue 02, pp. 89-95, 1995.
- [5]. Bachrach R., Noeth S., Banik N., Sengupta M., Bunge G., Flack B., Utech R., Sayers C., Hooyman P., den Boer L. and Leu L., "From pore-pressure prediction to reservoir characterization: A combined geomechanics-seismic inversion workflow using trend-kriging techniques in a deep water basin," The Leading Edge, Vol. 26, Issue 5, pp. 590-595, 2007.
- [6]. Hottmann C. E. and Johnson R. K., "Estimation of formation pressures from log-derived shale properties," Journal of Petroleum Technology, Vol. 17, Issue 06, pp. 717-722, 1965.
- [7]. Pennebaker E. S., "Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure," World Oil, Vol. 166, pp. 73-77, 1968.
- [8]. Gardner G. H., Gardner L. W. and Gregory A. R., "Formation velocity and density: the diagnostic basics for stratigraphic traps," Geophysics, Vol. 39, Issue 6, pp. 770-780, 1985.
- [9]. Kelly M. C., Skidmore C. M. and Cotton R. D., "Pressure prediction for large surveys," SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, pp. 1239-1242, 2005.
- [10]. den Boer L., Sayers C. M., Noeth S., Hawthorn A., Hooyman P. J. and Smith M., "Using tomographic seismic velocities to understand subsalt overpressure drilling risks in the Gulf of Mexico," Offshore Technology Conference, 2011.
- [11]. Soleymani H. and Riahi M. A., "Velocity based pore pressure prediction—A case study at one of the Iranian southwest oil fields," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 94, pp. 40-46, 2012.
- [12]. Banik N., Koesoemadinata A., Wagner C., Inyang C. and Bui H., "Predrill pore-pressure prediction directly from seismically derived acoustic impedance," SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, pp. 2905-2909, 2013.
- [13]. Yu L., Sun S. Z., Liu Z., Dong N., Ma Y., Yang W. and Rongrong "A new method for pore pressure prediction using logging and seismic data," Society of Exploration Geophysicists, In SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 3234-3238, 2015.
- [14]. Hoskin E. and O'Connor S. A., "The Influence of Rock Properties on Velocity Data with Respect to Pressure Prediction—with Particular Focus on Seismic Velocity Data," Journal of Earth Sciences, Vol. 2, pp. 19-34, 2016.
- [۱۵]. آزادپور م. و شادمنامن ن., "بررسی مکانیزم‌های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران," مجله پژوهش نفت، شماره ۸۸، صفحات ۱۴۷-۱۶۰، ۱۳۹۵.
- [۱۶]. آدییم ع، ریاحی م. ع. و باقری، م., "تخمین فشار منفذی به روش های ایتون و باورز با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و چاه‌پیمایی،" نشریه پژوهش‌های کاربردی ژئوفیزیک، دوره ۴، شماره ۲، صفحات ۲۶۷-۲۷۵، ۱۳۹۷.
- [17]. Terzaghi K., "Earth pressure and shearing resistance of plastic clay: a symposium: liner-plate tunnels on the Chicago (IL) subway," Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, Issue 1, pp. 970-1007,

1943.

[18]. Biot M. A. and Willis D. G., "*The elastic coefficients of the theory of consolidation*," J. appl. Mech, Vol. 24, pp. 594-601, 1957.

[19]. Gurevich B. A., "*A simple derivation of the effective stress coefficient for seismic velocities in porous rocks*," Geophysics, Vol. 69, Issue 20, pp. 393-397, 2004.

[20]. Tingay, M. R., Hillis, R. R., Swarbrick, R. E., Morley, C. K., and Damit A. R., "*Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei*," AAPG Bulletin, Vol. 93, Issue 1, pp. 51-74, 2009.

[21]. Zhang J., "*Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches*," Earth-Science Reviews, Vol. 108, Issue 1-2, pp. 50-63, 2011.

[22]. Rasolofosaon P. and Tonellot T., "*U.S. Patent No. 7,974,785*," Washington, DC, U.S., Patent and Trademark Office, 2011.



Comparison of Pore Pressure Prediction Using Conventional Seismic Velocity and Acoustic Impedance-Based Methods

Iraj Maddahi¹, Ali Moradzadeh*^{1,2} and Ali Nejati Kalateh¹

1. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

2. School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Iran

a_moradzadeh@ut.ac.ir (A. Moradzadeh).

DOI: 10.22078/pr.2019.3771.2719

Received: May/11/2019

Accepted: July/17/2019

INTRODUCTION

Pre-drilling pore pressure prediction is one of the most important issues in the design and evaluation of wells. It is effective in determining the weight of drilling mud, balancing the fluid pressure inside the well and also is a key to safe and economical drilling in high pressure sediments. The pore pressure, which is determined using direct measurements such as RFT in the well after drilling, can also be predicted by indirect seismic methods before drilling.

Pore pressure was predicted by Pennebaker in 1968 using seismic velocity [1]. From 2000 onwards, pore pressure prediction based on seismic data have become one of the most common analyzes in areas with high pressures. Soleimani and Riahi in 2012 applied the seismic velocity method to predict pore pressure in the

Mansouri sandstone reservoir [2]. Banik et al 2014 applied seismic acoustic impedance to pore pressure prediction in the Gulf of Mexico. Moreover, they were able to accurately estimate sandstone reservoir pore pressure beneath the salt layers [3].

METHODOLOGY

The main assumption of this type of studies is that the changes of seismic attributes with pore pressure arises from the principles of effective stress which was first formulated by Terzaghi [4]. The theory of pore pressure (Pp) prediction based on Biot's and Terzaghi effective stress law proposes the following relation between overburden stress P_o and effective stress σ_e (Equation 1):

$$p_p = \frac{(p_o - \sigma_e)}{\beta} \quad (1)$$

where β is the Biot coefficient.

In this study, the seismic horizons of the study area were first interpreted, and 3D inversion of the seismic data was then performed by Strata module of the Hampson Russell (HR) software. Therefore, the cubes of acoustic impedance and velocity data were extracted from seismic inversion.

The density cube was then estimated using the 5 well density logs and seismic data in the Emerge module of the HR software. Afterwards, the overburden pressure, which is equal to the vertical stress due to the weight of the upper sediments and their pores fluid, was calculated using density cube and cell thickness based on relation 2.

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

where P_o is equal to the overburden pressure, ρ_b is the bulk density and z is the vertical thickness of the upper sediments.

Now, using the overburden pressure and the well RFT data, the effective pressure at the location of each well was calculated from Terzaghi relation (Eq. 1) with the assumption $\beta = 1$.

Moreover, by fitting the inversion velocity data to the obtained effective pressure data, the initial relationship between them was established and after making the necessary corrections at the well locations, its final calibration coefficients with $A = 250$ and $B = 0.4$ were obtained. Finally, the relationship between inversion velocity data and effective pressure data was determined as bellow:

$$V = 1500 + 250(\sigma_e)^{0.4} \quad (3)$$

The inversion velocity data were then returned

to the effective pressure data using the above equation, and pore pressure cube was finally calculated using the Terzaghi equation (Equation 1). One sample cross section of the predicted pore pressure cube passing well 2 is depicted in Figure 1.

RESULTS AND DISCUSSION

As it can be seen in Figure 1, the Ilam and Sarvak reservoirs are recognizable (with darker in color) from their upper and lower layers. However, in this method, the Burgan and the Fahlyian reservoirs were not correctly identified.

At the next procedure, by fitting the effective pressure with seismic AI data, their relationships were recognized. The coefficients of the obtained relation were then calibrated at well locations, and their final relation was found as bellow (Equation 4):

$$I = 3500 + 135(\sigma_e)^{0.65} \quad (4)$$

where $I_o = 3500(\text{g/cm}^3) * (\text{m/s})$ is the seismic AI at ground level and adjusted during calibration process.

Then the cube of acoustic impedance data was returned to the effective pressure data using the above relation. Following that, the pore pressure cube was extracted by Terzaghi equation (Eq. 1). Figure 2 illustrates one cross section of the predicted pore pressure cube passing well 2.

In the EW cross section of the pore pressure cube predicted by this method (Figure 2), all reservoirs (Ilam, Sarvak, Fahliyan, and Burgan formations) are clearly detected with more pore pressure than their upper and lower layers (darker colors). This indicates the high capability of this method in predicting reservoir pressure in the carbonate reservoirs.

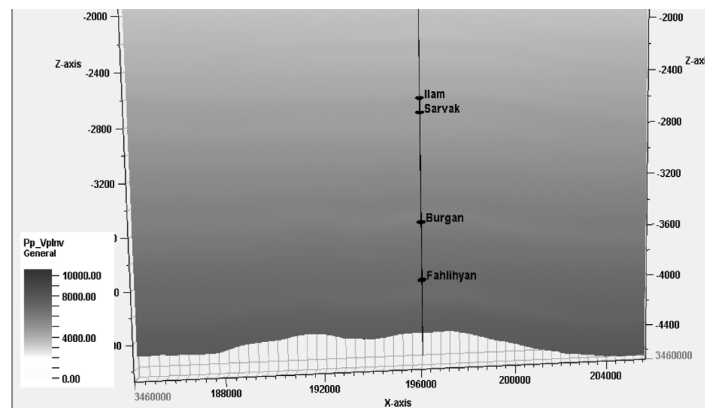


Figure 1: Cross section of pore pressure (psi) estimated by the inversion velocity wherein Ilam and Sarvak reservoir is separated by its higher pressure (darker color) from its upper and lower layers.

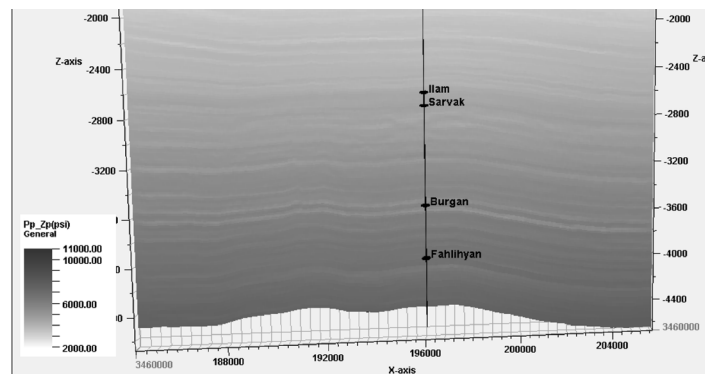


Figure 2: A cross section of the pore pressure (psi) estimated from the AI data at well 2: All four reservoir sections are characterized by more pore pressure than their upper and lower layers.

Finally, the statistical analysis on the results of both inversion velocity and AI based methods indicate that their results are in good agreement with those obtained using RFT test at well locations. So (that) the correlation coefficient (R) between the wells pressure and the predicted pore pressure data is 0.91 for the inversion velocity method while it is 0.93 for the AI based method. Furthermore, the standard error of the predicted data was determined 78 and 33.7 psi for the inversion velocity and AI based methods respectively.

CONCLUSIONS

Statistical analysis and comparison of the models results, including the coefficient of correlation

and standard error between the predicted pore pressure data and the RFT data in the wells, showed that the acoustic impedance method is more accurate than velocity method.

NOMENCLATURES

AI: Acoustic impedance (g/cm^3)*(m/s)

REFERENCE

- [1]. Pennebaker E. S., "Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure," World oil, Vol. 166, pp. 73-77, 1968.
- [2]. Soleymani H. and Riahi M. A., "Velocity based pore pressure prediction—A case study at one of the Iranian southwest oil fields," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 94,

pp. 40-46, 2012.

[3]. Banik N., Koesoemadinata A., Wagner C., Inyang C. and Bui H., "Predrill pore-pressure prediction directly from seismically derived acoustic impedance," SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, pp. 2905-2909, 2013.

[4]. Terzaghi K., "*Earth pressure and shearing resistance of plastic clay: a symposium: liner-plate tunnels on the Chicago (IL) subway,*" Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, Issue 1, pp. 970-1007, 1943.