

بررسی روش‌های تخمین فشار منفذی و تخمین فشار منفذی میدان سفید زاخور با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری

محمد علی ریاحی^۱ هیت علمی دانشگاه تهران، موسسه ی ژئوفزیک
جواد جمالی^۲ متخصص برداشت داده های لرزه نگاری، مدیریت اکتشاف

بریم نوری^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت نفت آبادان
سید رضا شادی زاده^۴ بهرام حبیب قلی^۵ هیت علمی دانشگاه نفت، دانشکده صنعت نفت آبادان

چکیده

تخمین فشار منفذی برای پروژه‌های اکتشافی و حفاری از اهمیت زیادی برخوردار است. در طول مراحل اکتشاف، پیش‌بینی فشار منفذی می‌تواند برای ارزیابی عوامل خطر ساز از جمله مهاجرت سیال سازند و یکپارچگی پوش سنگ مورد استفاده قرار گیرد. برای تصمیم‌گیری بهینه در مورد حفاری و برنامه‌ریزی چاه در مناطق تحت فشار غیرطبیعی، انجام پیش‌بینی‌های قبل از حفاری ضروری است. دقت در پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری اجازه می‌دهد تا وزن مناسب برای گل انتخاب و روش کار گذاشتن لوله‌های جداری، بهینه‌سازی شود. بنابراین، ایمنی را از طریق جلوگیری از فروپاشی دیواره چاه، و حفاری‌های اقتصادی را از طریق کاهش هزینه امکان‌پذیر می‌کند.

در این مطالعه، ابتداء روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی بررسی شد. سپس فشار منفذی در یکی از مقاطع دو بُعدی تاقدیس سفیدزاخور با استفاده از تبدیل مدل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی حاصل شد. این مقطع لرزه‌ای دو بُعدی نزدیکترین مقطع لرزه‌نگاری به چاه اکتشافی منطقه است که در حدود ۱۰۰ متر با چاه شماره یک فاصله دارد. نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر افزایش فشار منفذی با عمق در منطقه است و بیانگر وجود یک آنومالی فشاری در سمت چپ مقطع لرزه‌نگاری است.

واژگان کلیدی: فشار منفذی، فشار موثر، سرعت بازه‌ای، رابطه‌ی باورز

مقدمه

۱۹۶۹ [۳]، [۴] و رابطه باورز ۱۹۹۵ [۵]، [۶] اشاره کرد.

پیش‌بینی فشار منفذی از داده‌های سرعت لرزه‌ای ذاتاً نامعلوم و دارای عدم قطعیت است و نیاز به مقادیر سرعت بهینه دارد. بنابراین، عدم اطمینان به‌طور قابل توجهی می‌تواند با استفاده از مدل مناسب سرعت برای منطقه مورد توجه کاهش یابد. در نتیجه، تعیین سرعت بازه‌ای مهمترین کلید برای پیش‌بینی فشار منفذی است.

در این مطالعه، در ابتداء روش‌های پیش‌بینی و تخمین فشار منفذی بررسی می‌شود. سپس، فشار منفذی برای بخشی از مخزن سفیدزاخور با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری محاسبه می‌گردد. داده‌های لرزه‌نگاری با استفاده از نرم‌افزار همسون- راسل (۲۰۰۶) به مدل امیدانس تبدیل شده و با برداشتن اثر چگالی مدل سرعت به‌دست آمده است. با یافتن پارامترهای فرمول باورز برای منطقه، مدل سرعت به مدل فشار منفذی تبدیل شده است.

تاقدیس سفیدزاخور در ناحیه گازخیز استان فارس در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرق شیراز در جنوب میدان گازی "آغار" و شرق میداندین گازی دالان" و "دی" قرار دارد (شکل ۱). وجود گسلی عرضی در میدان، آن را به دو بخش غربی و شرقی تقسیم می‌کند. ساختمان تاقدیس دارای طول تقریبی ۴۰ کیلومتر و عرض ۸ کیلومتر در سطح

در نظر گرفتن وزن گل و گرادیان شکستگی، پارامترهای ضروری جهت داشتن پایداری دیواره چاه، جلوگیری از فوران و هرزروی گل حفار، تولید شن و ماسه و خسارات وارد شده بر مخزن به‌شمار می‌رود. بنابراین، تخمین فشار منفذی برای پروژه‌های اکتشافی و حفاری از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه روش‌های متفاوتی برای پیش‌بینی فشار منفذی بکار برده می‌شود که هر کدام معایب و فواید خاص خود را دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از چاه‌نگاری، لرزه‌نگاری درون چاهی، آزمایشهای فشار درون چاهی، و اطلاعات لرزه‌نگاری اشاره نمود.

گسترده‌ترین تئوری مورد آزمایش و کاربردی این است که اطلاعات لرزه‌ای را به داده‌های فشار منفذی تبدیل کند. برآورد فشار منفذی قبل از حفاری را می‌توان از آنالیز سرعت لرزه‌ای با توجه به تبدیل مناسب سرعت به فشار منفذی با روابط متعددی از روابط بین سرعت- فشار که مناسب منطقه داده شده است، به‌دست آورد. سپس یک مدل سه بُعدی سرعت بدست می‌آید که برای پی‌بردن به تغییرات جانبی در مناطق فشار بالا استفاده می‌شود. از جمله روابط معروفی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار بکار برده می‌شود، می‌توان به رابطه ایتون ۱۹۷۲-

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (maryam.exploration@yahoo.com)

زمین می‌باشد. در این ساختمان سازندهای "آغاچاری"، "میشان"، "گچساران"، و "آسماری" رخنمون دارند. تاقدیس سفیدزاکور نامتقارن و دارای دو قله بوده که شیب دامنه شمالی آن بیشتر است [۱].

۱- بررسی روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی

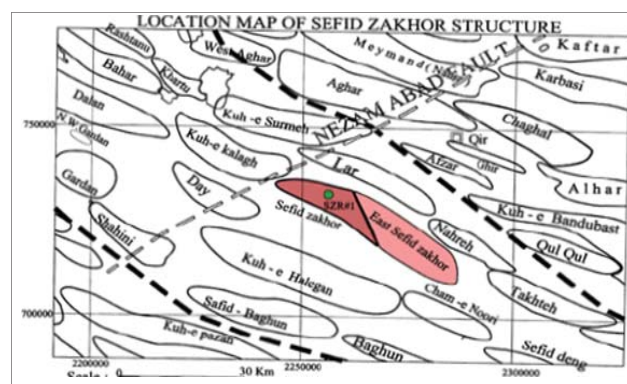
به‌طور معمول، برای پیش‌بینی فشار منفذی دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد؛ روش‌های مستقیم به روش‌هایی مانند آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار درون‌چاهی گفته می‌شود که فشار منفذی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کنند [۲]. در روش غیرمستقیم با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی، میزان انحراف این ویژگی‌ها از حالت نرمال، اندازه‌گیری می‌شود و ارتباط این انحراف با تغییرات فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱- استفاده از نمودارهای چاه‌نگاری در پیش‌بینی ناحیه فشار غیر نرمال

تغییرات فشار منفذی باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی سنگ مانند میزان فشردگی سنگ، تخلخل و ویژگی‌های الکتریکی می‌شود. این تغییرات همانند یک آنومالی در نواحی فشار غیر نرمال در مقایسه با حالت نرمال ظاهر می‌شود. تقریباً تعیین نواحی فشار غیر عادی از طریق نمودارهای چاه، روشی کیفی محسوب می‌شود.

۱-۱-۱- نگار صوتی

نگار صوتی به تغییرات فشار حساس است زیرا بین تخلخل، فشردگی، فشار منفذی، و پارامترهای صوتی رابطه وجود دارد [۷]. افزایش عمق، افزایش فشردگی و کاهش تخلخل را در پی دارد. بنابراین، مدول بالک و مدول برشی افزایش و تراکم پذیری کاهش می‌یابند [۸]. با تغییر این پارامترها، سطح تماس دانه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، سرعت موج صوتی افزایش پیدا خواهد کرد. اما در نواحی پر فشار، نرخ فشردگی، کاهش و حتی متوقف خواهد شد و در نتیجه، معکوس می‌شود. روابطی که بین سرعت و فشار حاکم است (رابطه ایتون و رابطه باورز)،



موقعیت جغرافیایی میدان سفیدزاکور.

در مورد سرعت لرزه‌ای و سرعت نگار صوتی یکسان است. اما ضرایب ثابت متفاوت بوده و این، به علت تفاوت در فرکانس اندازه‌گیری این دو نوع سرعت است [۸]. نگار صوتی رزولوشن بالاتری دارد.

۱-۱-۲- نگار چگالی

تئوری پیش‌بینی مناطق فشار غیر نرمال بر پایه نگار چگالی مانند تئوری حاکم بر نگار صوتی است. بدین صورت که در حالت نرمال با افزایش عمق و کاهش تخلخل و افزایش فشردگی، چگالی بالک افزایش می‌یابد. در نواحی پر فشار، با توجه به عدم افزایش فشردگی و عدم کاهش تخلخل، روند افزایشی چگالی با عمق کاهش و یا متوقف می‌شود. نگار چگالی برای محاسبه فشار روباره مورد استفاده قرار می‌گیرد (معادله ۱) [۹]، [۱۰]، [۱۱].

$$S = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (1)$$

که در آن g شتاب گرانشی و ρ_b (مدول بالک) است و از معادله (۲) محاسبه می‌شود [۹]:

$$\rho_b = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_g \quad (2)$$

که در آن φ تخلخل، ρ_f چگالی سیال و ρ_g چگالی دانه‌های سنگ است. در صورت نبود نگار چگالی از سطح زمین تا عمق مورد نظر چگالی میانگین از رابطه تراوگوت [۱۲] استفاده می‌شود (معادله ۳).

$$\overline{\rho(h)} = 16.3 + \left(\frac{h}{3125}\right)^{0.6} \quad (3)$$

$$\overline{P_{ob}} = g \cdot \overline{\rho(h)}$$

اما داشتن اطلاعات چگالی از منطقه مورد مطالعه، دقت و صحت محاسبه فشار روباره مخزن را بالا می‌برد و نتایج حاصل از محاسبات تبدیل سرعت به فشار منفذی، قابل اعتماد خواهد بود. در نواحی پر فشار و غیر مستحکم، شیب منحنی‌های نگار صوتی و نگار چگالی منفی است (شکل ۲).

۱-۱-۳- نگار مقاومت الکتریکی

افزایش فشار منفذی باعث کاهش تماس دانه‌ها و افزایش فضای متخلخل می‌شود. بنابراین، رسانایی الکتریکی سنگ به سیال درون منفذی وابسته می‌شود. فرض کنید که سیال درون فضای متخلخل هیدروکربوری باشد، در این صورت، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. تغییرات مقاومت الکتریکی به شدت وابسته به نوع سیال و لیتولوژی منطقه است. بنابراین، در تعیین نواحی پر فشار، باید نگار مقاومت الکتریکی با احتیاط به کار رود [۱۳]، [۱۴]. برای تبدیل مقاومت الکتریکی به فشار منفذی از رابطه ایتون (۱۹۷۵) استفاده می‌شود (معادله ۴):

$$P_{pore} = P_{ovb} - (P_{ovb} - P_{pn}) \left(\frac{R_a}{R_n}\right)^{1.2} \quad (4)$$

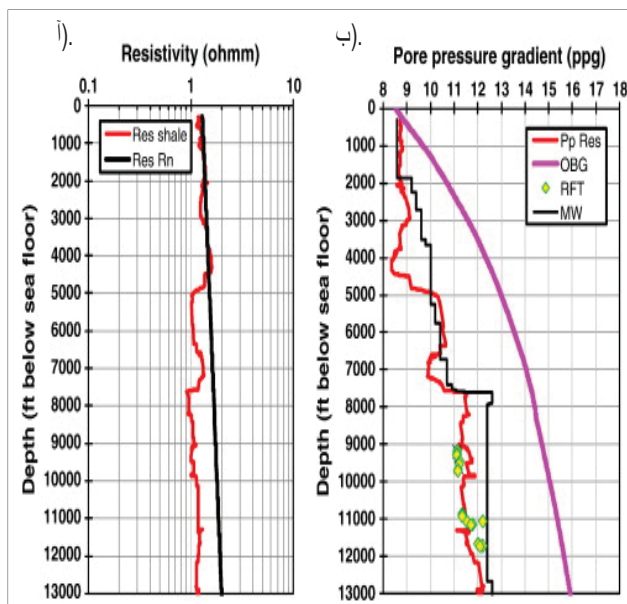
تخلخل تاثیر می گذارند [۱۵].

۱-۱-۵- معایب و فواید استفاده از چاهنگاری در تخمین فشار

معمولاً داده‌های چاهنگاری در تخمین کیفی فشار منفذی بکار برده می‌شوند و توانایی تخمین دقیقی از فشار منفذی را ندارند. همچنین روابط مورد استفاده در تخمین فشار منفذی تجربی هستند. این روابط تنها برای نواحی اطراف چاه دقت مناسبی دارند و برای فضای بین چاهی قابل اعتماد نیستند. امروزه از شبکه‌های عصبی مصنوعی نگرهای مختلف چاه برای تخمین کمی فشار از روی داده‌های چاهنگاری استفاده می‌شود و تخمین فشار منفذی بین چاهی نسبت به روش‌های پیشین از دقت بیشتری برخوردار است. اما باید این نکته را در نظر گرفت که تمام این روش‌ها برای بعد از عملیات حفاری در چاه صورت می‌پذیرد و دقت بالا تنها در ناحیه چاهی حاصل می‌گردد. در استفاده از چاهنگاری عدم قطعیت در فضای بین چاهی زیاد است. همچنین باید توجه داشت که به علت نفوذ گل حفاری در ناحیه ی دست خورده، داده‌های چاهنگاری تحت تاثیر این ناحیه قرار می‌گیرند که میزان خطا را بالا می‌برد.

۱-۲- پروفایل قائم لرزه‌ای

امروزه روش‌های لرزه‌ای درون چاهی کاربردهای متفاوتی پیدا کرده‌اند که



۳ شکل فشار منفذی محاسبه شده به روش رابطه مقاومت الکتریکی ایتون همراه با روند خطی فشردگی وابسته به عمق در یک تجزیه و تحلیل چاه پساب عمیق در خلیج مکزیک، شکل سمت چپ (۱) مقاومت الکتریکی شیل را در مقابل مقاومت الکتریکی نرمال محاسبه شده نمایش می‌دهد. مقاومت الکتریکی در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. شکل (ب) گرادین فشار رویاره را نشان می‌دهد، وزن گل حفاری در حین عملیات حفاری اندازه‌گیری شده است. فشار محاسبه شده مخزن (PpRes)، و فشار اندازه‌گیری شده (RFT) [۱۶].

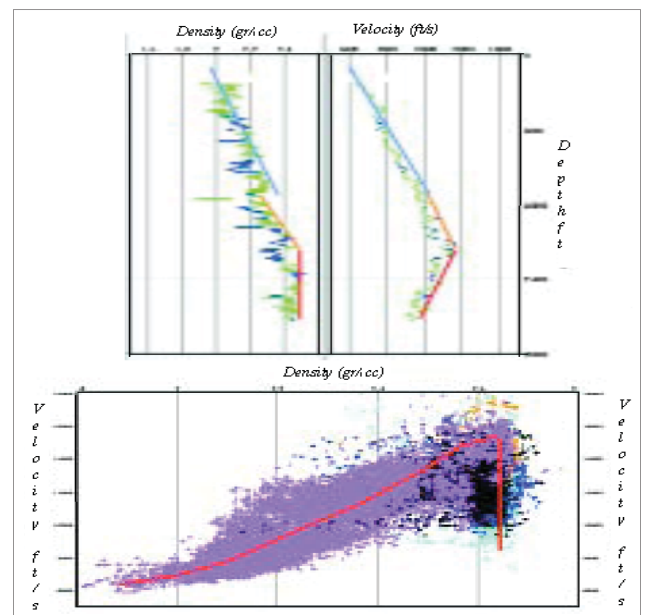
که در آن فشار منفذی، P_{pore} ، فشار رویاره، $P_{p,n}$ ، فشار منفذی حالت نرمال، R_p ، مقاومت الکتریکی مشاهده شده و $R_{p,n}$ مقاومت الکتریکی حالت نرمال است. در شکل ۳، فشار منفذی با استفاده از رابطه مقاومت الکتریکی ایتون همراه با روند خطی فشردگی وابسته به عمق، در یک تجزیه و تحلیل چاه پساب عمیق در خلیج مکزیک محاسبه شده است.

۱-۱-۴- نگرهای تخلخل

فشار موثر از پارامترهای مهم در تعیین تخلخل سنگ است که به صورت نرمال با عمق افزایش می‌یابد و رابطه عکس با تخلخل دارد. روند کاهش تخلخل و افزایش فشار موثر با عمق، در نواحی پرفشار کاهش می‌یابد و یا متوقف می‌شود. به روش تخمین فشار بر اساس تخلخل، روش مبتنی بر تخلخل می‌گویند [۱۵]. در این روش فرض می‌شود که رابطه مستقیمی بین تخلخل اندازه‌گیری شده و فشار وجود دارد. رابطه ترازقی بیانگر اثر فشار موثر بر تخلخل با عمق است (معادله ۵):

$$\phi(z) = 1 - \phi_0 \sigma^{\frac{c}{4.606}} \quad (5)$$

پیچیدگی سنگ‌شناسی و لیتولوژی، باعث عدم دقت در روش مبتنی بر تخلخل می‌شود. زیرا فشار، تنها عامل کنترل‌کننده تخلخل نیست. فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی، پارامترهای کنترل‌کننده دیگری هستند که روی مقادیر



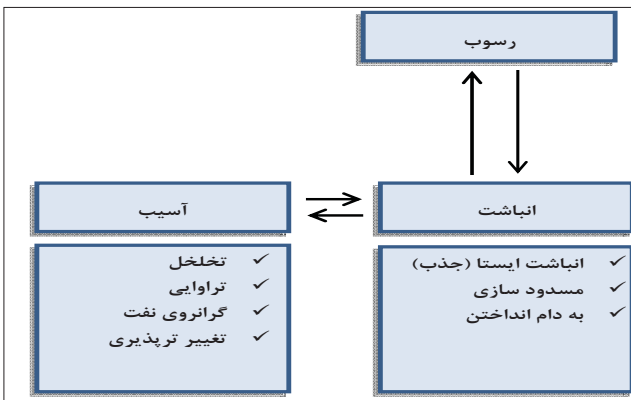
۲ شکل بالا: نگرهای صوتی و چگالی، خواص فیزیکی نرمالی از سنگ‌های فشردده را نشان می‌دهد (روند خطوط آبی)، سنگ‌های با فشردگی کم (روند خطوط نارنجی) و بار برداری (روند خطوط قرمز) نیز مشخص است. پایین: مثالی از روش رسم متقاطع (cross-plot) برای تشخیص بار برداری؛ کاهش ناگهانی سرعت در یک چگالی ثابت نشان‌دهی برای فرایند بار برداری است [۸].



استفاده از آنالیز داده‌های سرعتی در روش پروفیل لرزه‌ای قائم و توموگرافی لرزه‌ای، آنومالی‌های سرعت تعیین می‌شوند و از آنها در تعیین زونهای فشار غیر نرمال به صورت کیفی استفاده می‌گردد. علاوه بر اینکه این داده‌ها کیفی هستند، باید حفاری متوقف شود تا برداشت داده انجام شود. این موضوع از مهمترین معایب روش پروفیل لرزه‌ای قائم و توموگرافی لرزه‌ای است.

۳-۱- چاه آزمایشی

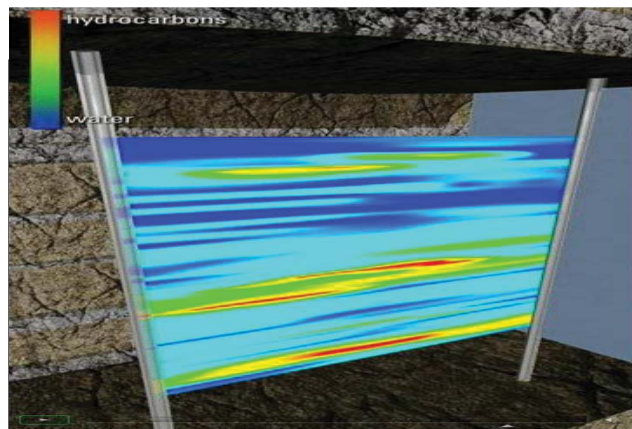
داده‌های حاصل از چاه آزمایشی، دقیقترین اطلاعات را از فشار چاه و یا نواحی اطراف چاه به دست می‌دهند. اما این اطلاعات بعد از حفاری، تنها برای چاه و اطراف چاه بکار می‌روند. بنابراین، نقش کمی در کاهش ریسک حفاری دارند. همچنین، این اطلاعات تنها برای عمق‌های خاصی از مخزن اندازه‌گیری می‌شوند. RFT و DST، دو آزمایش متداول در این روش به شمار



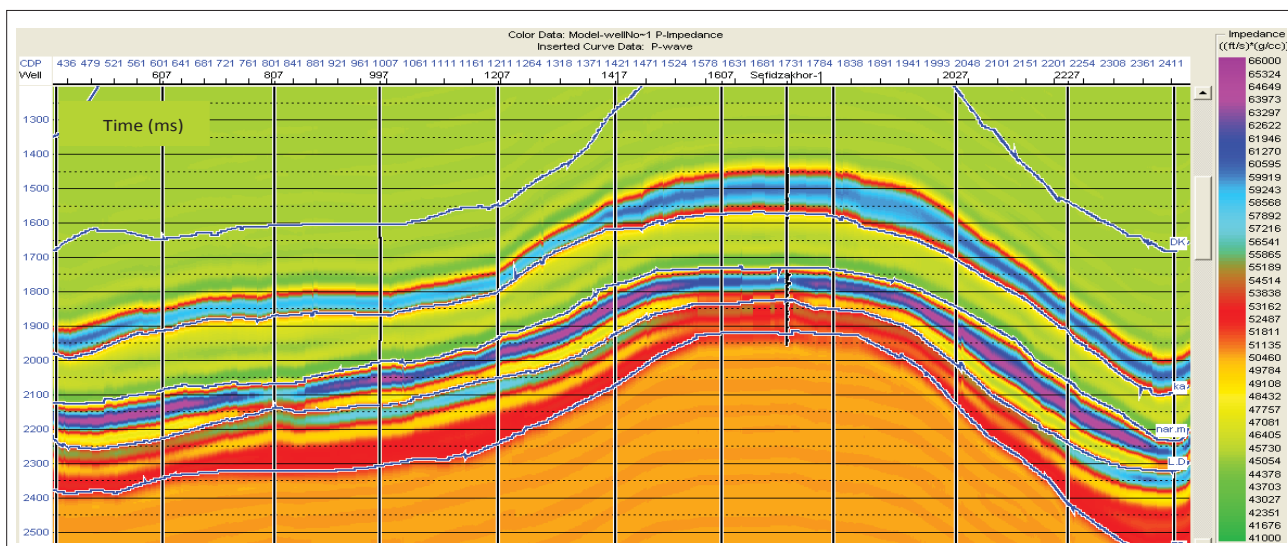
شکل ۶ | مدل اولیه امپدانس صوتی منطقه که از داده‌های چاه ۱ و افق‌های انتخاب شده در منطقه حاصل گردیده است. در ساخت این مدل از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شده است.

می‌توان به کالیبره کردن داده‌های لرزه‌نگاری سطحی، تعیین نواحی پرفشار زیر مته حفاری، و بهبود کیفیت داده‌های لرزه‌نگاری اعماق زیاد با کیفیت پایین داده اشاره کرد. به خصوص اینکه دستگاه‌های نوین، قابلیت اندازه‌گیری سه مولفه موج فشاری و برشی را دارند. بنابراین، اطلاعات کاملی از سیال و زمین‌شناسی سازند می‌توان به دست آورد [۱۷].

در این روش، زمان عبوری موج لرزه‌ای کمتر از برداشت‌های سطحی لرزه‌نگاری است. بنابراین، نسبت سیگنال به نوفه افزایش می‌یابد زیرا گیرنده‌ها نزدیک سطح انعکاسی هستند. رزولوشن داده‌های انعکاسی بیشتر از داده‌های لرزه‌نگاری است. اما داده‌های دورافت صفر گسترش کمی در اطراف چاه دارند و معمولاً داده‌های آن برای اطلاعات زیر مته مناسب است. امروزه شرکت‌های اکتشاف و تولید از توموگرافی متقاطع بین چاهی برای تعیین نوع سیال و جهت حرکت سیال درون ناحیه مخزنی استفاده می‌کنند (شکل ۴). با



شکل ۴ | آنومالی‌های سرعتی حاصل از توموگرافی بین‌چاهی در تعیین آنومالی‌های فشاری و تعیین نوع سیال بین چاه‌ها.



شکل ۵ | موجک بدست آمده از انطباق بین اطلاعات چاه و داده‌های لرزه‌نگاری به صورت موجک کامل، با ویژگی‌های فرکانس ۲۵ هرتز، طول ۱۲۰ میلی‌ثانیه و فاز مینیمم.

از جمله روابط معروفی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار به کار برده می‌شود، می‌توان به رابطه ایتون (۱۹۷۲) و رابطه باورز (۱۹۹۵) اشاره نمود:

۱-۵-۱- رابطه ایتون

رابطه سرعت-فشار منفذی در سال ۱۹۶۸ توسط ایتون معرفی شد و در سال ۱۹۷۲ توسط خود او اصلاح گردید (معادله ۶) [۴].

$$P_p = P_{ob} - (P_{ob} - P_{hyd}) \times \left(\frac{V_i}{V_n}\right)^k \quad (6)$$

که در آن P_p فشار منفذی تخمین زده شده، P_{ob} فشار روباره، P_{hyd} فشار هیدرواستاتیکی در عمق مورد نظر، و k ثابت ایتون است که برای تمامی مخازن ماسه سنگی برابر با ۳ در نظر گرفته می‌شود. سرعت نرمال در زون شیلی با فشردگی نرمال است و از داده‌های نگار صوتی بدست می‌آید. V_i نیز سرعت بازه‌ای است که از داده‌های لرزه‌ای و فرمول Dix حاصل می‌شود. درحقیقت، این روش، تغییرات روند نرمال به هیدرواستاتیک را می‌سنجد. بزرگترین عیب این روش این است که تنها، لایه‌های شیلی نامتراکم را به‌عنوان عامل فشار غیر نرمال می‌شناسد. همچنین، این روش به پروفایل نرمال شیلی متراکم نیاز دارد، درحالی که ممکن است در همه جا نباشد.

۱-۵-۲- رابطه باورز

رابطه باورز، روش فشار موثر نیز نامیده می‌شود. در سال ۱۹۹۴ باورز رابطه‌ای بین فشار موثر با سرعت ارائه داد [۵]. او تراکم نرمال، تراکم غیر نرمال، و اثر بار برداری را لحاظ نمود. برخلاف رابطه ایتون، علاوه بر این پارامترها به پروفایل نرمال تراکم شیلی نیازی نیست.

$$V = V_0 + AP_{efc}^B \quad (7)$$

که در آن V_0 سرعت در رسوبات نامتراکم اشباع از سیال است. A و B ضرایب کنترل‌کننده تغییرات سرعت با افزایش فشار موثر هستند [۶]. در نواحی‌ای که باربرداری روی داده است، معادله ۷ باید تصحیح شود. بدین منظور حداکثر فشار موثری که در آن باربرداری رخ داده است باید تعیین گردد و مسیر باربرداری توسط یک تابع نمایی از چاه‌های مجاور حاصل گردد. با اثر دادن فاکتور باربرداری، معادله ۷ به معادله ۸ تبدیل می‌شود [۲۰].

$$V = V_0 + A \left(\frac{P_{efc}}{P_{efcmax}^{1-u}}\right)^B \quad (8)$$

که در آن u ثابت باربرداری P_{efcmax} حداکثر فشار موثر برای شروع باربرداری است:

$$P_{efcmax} = \left(\frac{V_{max} - V_0}{A}\right)^{\frac{1}{B}} \quad (9)$$

V_{max} حداکثر سرعت مشاهده شده است. با داشتن ثابت‌های فرمول باورز در منطقه، احتمال پاسخ مناسب در سنگ‌های کربناته افزایش می‌یابد. اگر

می‌روند. نتایج حاصل از داده‌های چاه‌آزمایی برای ارزیابی روش‌های دیگر تخمین فشار منفذی استفاده می‌شود. علاوه بر این، داده‌های چاه‌آزمایی برای بدست آوردن ثابت‌های معادلات تبدیل ویژگی‌های فیزیکی به داده‌های فشار در منطقه مورد مطالعه به کار می‌روند.

۱-۴- داده‌های گرانشی

از بین روش‌های غیر لرزه‌ای، روش گرانشی اهمیت خاصی در تعیین فشار منفذی دارد زیرا شیل، دارای چگالی حجمی پایینی است. در شیل‌های پرفشار، چگالی بین $2100 - 2300 \frac{kg}{m^3}$ متغیر است. استفاده از این روش برای آنومالی‌های فشار در مقیاس‌های بزرگ امکان‌پذیر است و در جایی که نواحی پرفشار پراکنده و به‌صورت توده‌ای بزرگ نیستند، این روش کارایی ندارد. هرچند روش گرانشی پتانسیل مناسبی برای پیش‌بینی نواحی پرفشار دارد اما دارای رزولوشن پائینی است. در مناطق دریایی، جایی که منطقه گذار فشار بالا در حدود هزاران فوت است، این روش کارایی ندارد. در سال ۱۹۶۶ ماسگریو و هیکس [۱۸] برای جداسازی شیل‌های تحت فشار و نمک، از روش عملیات انعکاسی و گرانشی استفاده کردند.

۱-۵-۰- داده‌های لرزه‌نگاری

فشار منفذی می‌تواند از روی داده‌های لرزه‌نگاری حاصل شود. اساس این روش بر پایه این است که هرگونه تغییر فیزیکی سازند روی ویژگی امواج لرزه‌ای اثر می‌گذارد. اکثر برداشت‌های لرزه‌ای قبل از فاز حفاری میدان صورت می‌پذیرد. بنابراین این روش تنها روشی است که نتایج آن می‌تواند برای فاز حفاری مورد استفاده قرار گیرد [۱۹]. تخلخل و فشردگی پارامترهایی هستند که پاسخ‌های لرزه‌ای زیر سطحی را کنترل می‌کنند. این پارامترها تنش موثر را تحت تاثیر قرار داده‌اند. کاهش فشار موثر، افزایش تخلخل و فشار منفذی را در پی دارد. همین مساله باعث کاهش سطح تماس دانه‌ها و در نتیجه کاهش سرعت موج عبوری از میان سنگ می‌شود. اختلاف بین داده‌های نگار صوتی و سرعت لرزه‌ای در فرکانس و مسیر عبور موج است. یکی از چالش‌های پیش‌بینی فشار منفذی با سرعت لرزه‌ای این است که داده‌های سرعت‌های لرزه‌ای و چاه اغلب با هم به‌درستی کالیبره نمی‌شود. وقتی این مساله پیش می‌آید، این سوال مطرح می‌شود که کدام نوع داده بهترین کالیبراسیون را برای داده‌های فشار فراهم می‌کند. علاوه بر تفاوت فرکانس، اثرات دیواره چاه و ناحیه تهاجمی روی داده‌های سرعت چاه اثر می‌گذارد. به‌طور کلی پارامترهای لرزه‌ای همچون سرعت، فاکتور کیفیت، جذب انرژی و سرعت لحظه‌ای به تغییرات فشار حساس است. اما بیشتر مطالعات روی حساسیت سرعت به فشار انجام شده است. درحقیقت، سرعت و فشار موثر، مفاهیم یکسانی برای مدول‌های الاستیسیته سنگ هستند. از دیدگاه ژئومکانیکی، تغییرات فشار باعث تغییر در مدول سنگ همانند نسبت پواسون می‌شود.

داده‌های لرزه‌ای تعیین گردید. به علت پایین بودن کیفیت مقطع لرزه‌نگاری، ضریب همبستگی ۵۰٪ بین لرزه واقعی و مصنوعی با استفاده از این موجک مورد قبول واقع گردید. شکل ۵ ویژگی‌های موجک حاصل شده برای منطقه را نمایش می‌دهد.

از جمله مهمترین مرحله‌ها برای انجام وارون‌سازی امیدانس صوتی، ساخت مدل اولیه امیدانس صوتی است. مدل اولیه امیدانس صوتی به کمک داده‌های چاه شماره یک میدان و افق‌های "دشتک"، "گنگان"، "دالان بالایی"، و بخش "نار" و با استفاده از روش آماری کریجینگ ساخته شد (شکل ۶). آنالیز وارون‌سازی روی مدل اولیه داده انجام شد تا بهترین پارامترها برای وارون‌سازی امیدانس صوتی در منطقه حاصل گردد. پارامترهای وارون‌سازی برای این خط دوبعدی در جدول ۱ آورده شده است. نتایج این آنالیز، میزان خطای مجذور مربع میانگین‌ها را ۹۶۸۹/۴۷ تخمین زد.

همانطور که در سمت راست شکل ۷ دیده می‌شود، ضریب همبستگی رد مصنوعی و رد داده‌های لرزه حدود ۹۰ درصد با خطای میانگین ۱۴ درصد در نتایج امیدانس صوتی می‌باشد. در سمت چپ این شکل خط قرمز منحنی امیدانس حاصل از وارون‌سازی و خط آبی امیدانس اصلی در محل چاه حاصل از نگارهای چگالی و صوتی را نمایش می‌دهد. پارامترهای حاصل از آنالیز وارون‌سازی بر منطقه اعمال شد و مدل نهایی امیدانس صوتی حاصل گردید. با حذف اثر چگالی مدل سرعت حاصل گردید. در شکل ۸، تغییرات سرعت در سمت چپ تاقدیس بیانگر آنومالی در این ناحیه است.

طبق اصل ترزاقی [۲۱] فشار منفذی از اختلاف فشار روباره و فشار منفذی حاصل می‌گردد. بنابراین فشار روباره و فشار موثر مورد نیاز است. فشار روباره منطقه از رابطه تارگوت حاصل شد و به کل منطقه مورد مطالعه اعمال گردید (معادله ۱۰).

$$\overline{\rho(h)} = 16.3 + \left(\frac{h}{3125}\right)^{0.6}$$

$$\overline{P_{ob}} = g \cdot \overline{\rho(h)} \cdot h \quad (10)$$



شکل ۷ | همبستگی میان رد مصنوعی و لرزه واقعی در محل چاه با خطای ۱۴ درصدی و $RMSE = 9689.47$

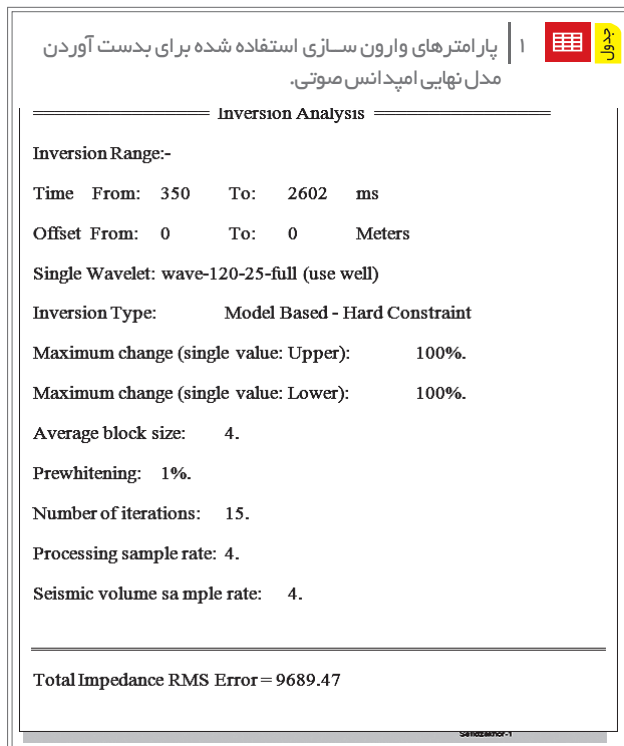
در بعضی نواحی، بخصوص نواحی کرناته، هیچ‌یک از روابط بالا جواب مناسبی برای پیش‌بینی فشار حاصل نکرد، یک رسم متقاطع از داده‌های سرعت-فشار می‌تواند به حل مسأله کمک کند.

۲- مطالعه موردی

در این مطالعه سعی بر آن شده است که داده‌های لرزه‌نگاری دوبعدی بخشی از میدان سفید زاخور به فشار منفذی تبدیل شود. با استفاده از نرم‌افزار همسون-راسل ۲۰۰۶ مدل امیدانس صوتی منطقه حاصل شد و با حذف اثر چگالی از مدل امیدانس صوتی مدل سرعت منطقه ایجاد گردید. سپس با استفاده از رابطه باورز داده‌های سرعت به فشار منفذی تبدیل گردید. به منظور اعمال رابطه حاصل شده بر کل منطقه از برنامه‌نویسی مطلب استفاده شده است.

۲-۱- روش کار

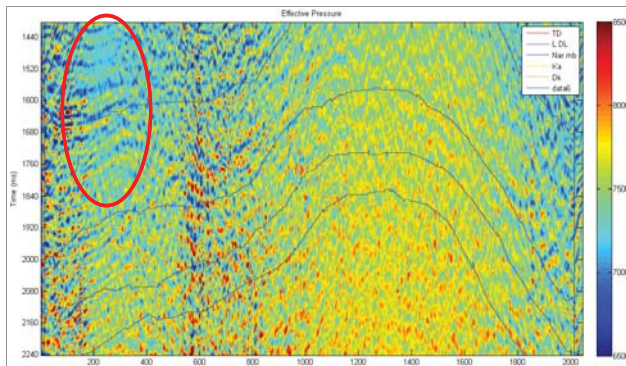
با در اختیار داشتن داده‌های چگالش چاه شماره یک میدان، که در ۱۰۰ متری مقطع لرزه‌ای دوبعدی قرار داشت، نگار صوتی و نگار چگالی، تصحیح عمقی شدند. سپس رد لرزه‌نگاری مصنوعی اطراف چاه با استفاده از داده‌های نگار چگالی و صوتی ساخته شد. برای استخراج موجک منطقه چندین موجک متفاوت با روش‌های آماری، موجک ریکر، و استفاده از چاه، ساخته شد که در نهایت فرکانس ۲۵ هرتز، طول ۱۲۵ میلی ثانیه، و فاز مینیمم به عنوان پارامترهای موجک با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری و



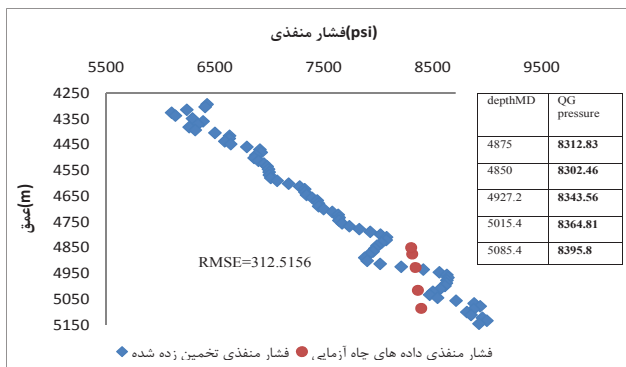
با اعمال این رابطه بر مدل سرعت در خط دویبعدی مورد مطالعه، تصویری از فشار موثر در منطقه حاصل گردید. همانطوری که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در سمت چپ تاقدیس، آنومالی فشاری وجود دارد. با استفاده از اختلاف میان مدل فشار روباره و مدل فشار منفذی به دست آمد که بیانگر وجود یک آنومالی فشار منفذی در ناحیه سمت چپ منطقه بود. با توجه به خروجی داده‌های مدل فشار منفذی در مکان چاه و مقایسه این نتایج با داده‌های فشار منفذی حاصل از چاه آزمایی، میزان خطای مجذور مربع میانگین‌ها (RMSE) در این تخمین معادل با ۳۱۲/۵۱۵۶ psi است. شکل ۱۱ مقایسه بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر چاه آزمایی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان گفت که از میان روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی، دقت روش‌هایی که از داده‌های بعد از حفاری چاه استفاده می‌کنند، تنها در اطراف چاه مناسب است و در فضای بین چاهی از دقت کمی برخوردار است. اکثر این روش‌ها کیفی هستند و تاثیر آنها در کاهش ریسک حفاری



شکل ۱۰ مدل فشار موثر در منطقه که بیانگر آنومالی فشاری در سمت چپ تاقدیس می‌باشد. کمتر بودن فشار موثر نسبت به نواحی مجاور بیانگر بیشتر بودن فشار منفذی در آن محل نسبت به نواحی اطراف می‌باشد.



شکل ۱۱ روند فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه یک تاقدیس سفید زخوری و مقایسه آن با داده‌های چاه آزمایی. همانطوری که مشاهده می‌شود، میزان (RMSE) در این تخمین ۳۱۲۵۱۵۶ psi است.

فشار موثر منطقه با در دست داشتن اطلاعات چاه آزمایی حاصل از ابزار MDT و داده‌های نگار سونیک در چاه یک حاصل گردید. همانطوری که در شکل ۹ دیده می‌شود، با ترسیم این دو داده نسبت بهم طبق رابطه باورز یک رابطه نمایی بین این دو نوع داده با ضریب همبستگی ۷۸/۲۲ درصد به دست می‌آید. این رابطه، به کل منطقه اعمال شد. با در دست داشتن فشار روباره و فشار موثر در منطقه، فشار منفذی از معادله ۱۱ بدست آمد.

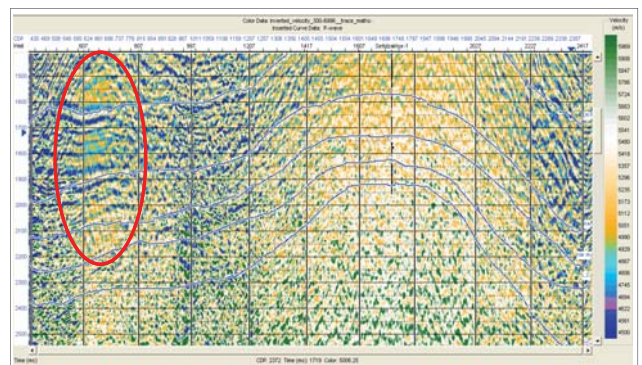
$$P_p = P_{ov} - P_{eff} \quad (11)$$

۲-۲- نتایج و بحث

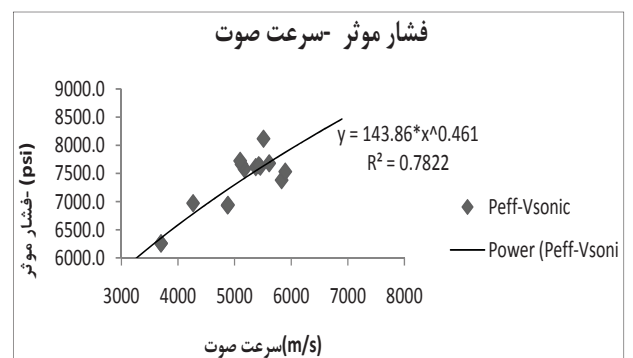
رابطه میان سرعت و فشار موثر با استفاده از داده‌های لاگ صوتی و فشار موثر در ناحیه مخزن و با استفاده از فرمول باورز برای منطقه به صورت معادله (۱۲) حاصل گردید:

$$P_{eff} = 143.86V_i^{0.461} \quad (12)$$

$$R^2 = 0.7822$$



شکل ۱۲ مدل سرعت نهایی بدست آمده در منطقه با استفاده از برداشتن اثر چگالی از مدل نهایی امپدانس صوتی. وجود یک آنومالی سرعتی در سمت چپ تاقدیس مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳ رابطه میان سرعت بازه‌های داده‌های نگار صوتی و فشار موثر در خط لرزه‌ای دویبعدی منطقه سفید زخوری.



بیشتر است. با توجه به اینکه داده‌های فشار هیدرولیک در اختیار نبود، نمی‌توان گفت که این آنومالی، بالای فشار نرمال یا پایین آن قرار دارد. همچنین باید توجه داشت که تعمیم دادن تحلیل فشار حاصل به کل منطقه صحیح نیست و لازم است که داده‌های سه‌بعدی، قبل از انبارش برای مدل سرعت به کار رود. این مطالعه نشان می‌دهد که یافتن فشار منفذی از داده‌های لرزه‌نگاری، با در دست داشتن مدل دقیق سرعت بازه‌ای منطقه قابل استناد خواهد بود. با توجه به وجود باربرداری در منطقه و اینکه سازندهای "آجاجاری"، "میشان"، "گچساران" و بخش‌هایی از آسماری هوازده شده‌اند، عدم استفاده از پارامتر باربرداری در فرمول باورز از دیگر عوامل خطای این تخمین است. ■

نسبت به روش‌های اکتشافی مانند داده‌های لرزه‌نگاری خیلی کمتر است، زیرا در ابتدا باید چاه حفر گردد.

بنابراین استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری برای پیش‌بینی فشار منفذی، تنها روش موثر در کاهش ریسک حفاری است. کاهش عدم قطعیت در استفاده از این روش، به شدت به دقتی بودن مدل سرعت و داده‌های فشار روباره و فشار موثر در منطقه وابسته است.

با توجه به نتایج به دست آمده در مطالعه موردی، تاقدیس سفیدزاخور در اطراف خط لرزه‌ای که در اختیار بود، دارای روند فشار منفذی نرمال است (البته بجز در سمت چپ مقطع لرزه‌ای). فشار مخزن در بازه ۹۰۰۰-۷۵۰۰ psi متغیر است. در سمت چپ تاقدیس، فشار منفذی نسبت به نواحی مجاور

منابع

- water: World Oil, Deep water Technology Special Supplement, 68-70, August 1997.
- [13] Babu, S, Sircar, A, A comparative study of predicted and actual pore pressure in Tripura, India, Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels, Vol.2, no.9, 150-160, 2011.
- [14] S. Fooshee, J, The development of pore pressure and fracture gradient prediction model for the Ewing Banks 910 area in the Gulf of Mexico, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Petroleum Engineering, 2009.
- [15] Swarbrick, R. E. Challenges of Porosity-Based Pore Pressure Prediction. CSEG Recorder, 74-77, September, 2002.
- [16] Zhang, J, Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches, Vo.108, Issues 1-2, 50-63, September 2011.
- [17] Badri, M, Gazet, S., and De Tonnac, G. Effective Use of High Density VSP Measurements to Predict Pore Pressure and Estimate Mud Weight Ahead of Drilling in the Mahakam Delta, Indonesia, Presented at the 30th Annual IPA Convention and Exhibition, August 30-Sept. 1, 2005, Jakarta, Indonesia
- [18] Musgrave A. W., Hicks, W. G., Outlining Of Shall Masses By Geophysical Methods, Geophysics, Vol. 31, 711-725, 1966.
- [19] Badri, Sayers. M. A., C., Awad, R, and Graziano, A, A feasibility study for pore-pressure prediction using seismic velocities in the offshore Nile Delta, Egypt, TLE of Geophysics, Vol.19, no.10, 1103-1108. 2000.
- [20] C. Kelly, M, M. Skidmore, Ch, D. Cotton, R, Emerald Geoscience Research Corp. Pressure Prediction for Large Surveys. SEG Annual Meeting, Houston, Texas. 6 - 11, November 2005.
- [21] Terzaghi, K. Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, Inc., 1943
- [1] ابطحی س.ت، معرفی یک میدان (میدان سفیدزاخور-مخزن دهرم)، اکتشاف و تولید، شماره ۵۰، ۱۲-۱۱، مهر ۱۳۸۷.
- [۲] سلیمانی ح، تخمین فشار منفذی در یکی از میدانی جنوب غربی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران-موسسه ژئوفیزیک، ۱۳۹۰
- [3] Eaton, B.A., Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations, Journal of Petroleum Technology, Vol.10, 1353-1360, 1969.
- [4] Eaton, B.A, Graphical method predicts geopressure world, World Oil, Vol.182, 51-56, 1972.
- [5] Bowers, G.L. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for over pressure mechanisms besides under compaction. IADC/SPE Drilling conference proceedings, 515-530, June 1995.
- [6] Bowers, G.L., Detecting high overpressure. The leading edge, 174-177, February 2002
- [7] Alford, J, Coobie. R.B, M. Sayers. C, Tollefsen. E, Cooke. J, Hawthorn. A, C. Rasmus. J, Thomas. R, A sound approach to drilling, Oil Field Review; 68-78, 2005-2006.
- [8] Chopra. S, Huffman. A, Velocity determination for pore pressure prediction. CSEG RECORDER, 29-46, April 2006.
- [9] Dutta. N.C, Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead, Geophysics, Vol.67, no.2, 2012-2041, 2002.
- [10] Dutta. N. C, Deep water geohazard prediction using pre-stack inversion of large offset P-wave data and rock model. Western Geco, Houston, Texas, U.S.- The Leading Edge, 193-198, February 2002.
- [11] Dutta. N.C., J.Khazanehdari. Estimation of formation fluid pressure using high-resolution velocity from inversion of seismic data and a rock physics model based on compaction and burial diagenesis of shales. The Leading Edge, 102-112, December 2006;
- [12] Traugott. M, Pore/fracture pressure determinations in deep