

مقدمه

تخلخل، کاهش چگالی حجمی، کاهش استرس مؤثر، افزایش درجه حرارت، کاهش سرعت لایه‌ای و افزایش نسبت پواسون می‌باشد. سرعت بین لایه‌ای با تغییر هر کدام از این ویژگی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد، در نتیجه تعیین سرعت، کلید اصلی در پیش‌بینی فشار منفذی و مناطق با فشار غیرعادی است [۱].

روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی را می‌توان به دو مجموعه طبقه‌بندی کرد. اول روش پیش‌بینی مستقیم است که فشار منفذی را به‌طور مستقیم با اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی محاسبه می‌کند. از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش کراس پلات و جایگزینی پنه باکر [۳] و فیلیپون [۴] اشاره کرد [۵]. از دیگر روش‌ها متداول، روش استرس مؤثر است. بر طبق اصل استرس مؤثر ترزاقی (۱۹۴۳) [۶] استرس مؤثر از اختلاف فشار روباره و فشار منفذی به دست می‌آید. در این تحقیق نیز با استفاده از اصل ترزاقی و روش استرس مؤثر باور به پیش‌بینی فشار منفذی و مناطق با فشارهای غیرعادی پرداخته خواهد شد.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی کوپال در ۲۵ km جنوب غرب هفتکل و در جهت ادامه چین‌خوردگی تاقدیس آجاجاری واقع شده است. این میدان در فاصله ۶۰ km شرق شهر اهواز، در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی واقع شده است و روند ساختاری تحت‌الارضی آن مانند بسیاری از میداین زاگرس به‌صورت شمال غربی- جنوب شرقی می‌باشد. این میدان از جنوب غرب به میدان مارون، از شمال غرب به میدان رامین و از جنوب شرق با میدان آجاجاری همسایه است (شکل ۱). ابعاد ساختار تحت‌الارضی کوپال ۳۲ km در ۴/۵ km است. شکل کلی میدان به‌صورت یک تاقدیس کشیده و تقریباً متقارن است که دو برجستگی در آن شناسایی شده است.

فشار منفذی به فشار سیال درون منافذ سنگ اطلاق می‌گردد. پیش‌بینی فشار منفذی از اهمیت بسزایی در مراحل مختلف مطالعات مربوط به پروژه‌های هیدروکربنی (اکتشاف، تولید و حفاری) برخوردار است. پیش‌بینی فشار منفذی نه‌تنها برای حفاری ایمن و مقرون‌به‌صرفه است، بلکه برای ارزیابی عوامل خطرزا در فرایند اکتشافی از جمله مهاجرت سیال سازند و لایه‌های نفوذناپذیر امری ضروری است [۱]. وجود مناطق با فشار غیرعادی باعث بروز مشکلات فراوانی نظیر گیر کردن لوله حفاری، فوران چاه، از دست دادن چرخه گل حفاری و... می‌شود. در واقع پیش‌بینی فشار، ابزار مناسب برای نصب صحیح لوله جدار و تعیین چگالی گل حفاری است. همچنین پیش‌بینی فشار منفذی قابل‌اعتماد کمک شایانی به کاهش ریسک خطرات ناشی از حفاری و ایمنی را فراهم و باعث کاهش هزینه‌های مالی و جانی می‌گردد [۲].

در طی فاز اکتشافی، پیش‌بینی فشار منفذی برای کمک به مطالعات تله‌های نفتی، ترسیم مسیر مهاجرت نفت، تجزیه و تحلیل و طبقه‌بندی تله‌های نفتی و ابعاد حوضه رسوبی و به تبع آن، کالیبراسیون برای مدل‌سازی حوضه‌ها که حائز اهمیت است امکان‌پذیر می‌گردد [۱]. لازم به ذکر است که در طی رسوب‌گذاری لایه‌های زمین‌شناختی با رژیم فشارشی عادی، قادر به حفظ ارتباط تا سطح زمین می‌باشند فراهم می‌گردد. در صورت قطع ارتباط سازندها توسط سد ناتراوا، لایه‌ها با فشار غیرعادی مواجه می‌گردند. مکانیسم‌های ایجاد فشار بالا در حوضه‌های رسوبی متفاوت است ولی از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به افزایش تنش و مکانیسم‌های تولید در جای سیال اشاره کرد [۱]. سازندهای پرفشار در مقایسه با سازندهای با فشار عادی در عمق مشابه چندین ویژگی را از خود نشان می‌دهند [۲] که این ویژگی‌ها شامل: افزایش



شکل ۱ موقعیت میدان کوپال در ارتباط با سایر میدان جنوب غرب کشور [۸]

محاسبه می‌گردد.

$$P_{Hy} = \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

در این رابطه P_{Hy} فشار هیدروستاتیک، ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش و h ارتفاع ستون سیال است. در صورت انحراف فشار سازند از فشار هیدروستاتیک در عمق مشابه، فشار غیرعادی ایجاد می‌گردد. فشار روباره در عمق، نتیجه فشار مشترک وزن ماتریکس سنگ و سیال درون منافذ می‌باشد. فشار روباره با افزایش عمق افزایش می‌یابد و به آن تنش قائم و گاهی فشار لیتوستاتیک نیز گویند. فشار روباره را به وسیله روابط تجربی منطقی [۹] یا به وسیله داده‌های نمودار چگالی می‌توان تخمین زد [۲ و ۱۰].

$$S_v = g \int_0^z \rho_{cz} dz \quad (2)$$

در اینجا S برابر با فشار روباره بر حسب g ، pa شتاب گرانشی بر حسب m/s^2 و ρ چگالی بر حسب kg/m^3 است. به منظور محاسبه چگالی از داده‌های سرعت می‌توان از رابطه گاردنر [۱۱] استفاده کرد.

$$\rho = aV^b \quad (3)$$

در این رابطه ρ بر حسب g/cc ، V سرعت بر حسب m/s و a و b ضرایب رابطه گاردنر هستند.

بر طبق اصل استرس مؤثر ترازاقی (۱۹۴۳)، از اختلاف فشار روباره و فشار منفذی به دست می‌آید. (رابطه ۲)

$$\sigma = S_v - P_p \quad (4)$$

که در آن σ استرس مؤثر، S_v فشار روباره و P_p فشار منفذی است. با توجه به رابطه ۲ در صورت محاسبه

برجستگی اصلی که مطالعه پیش رو نیز بر روی آن صورت گرفته در ناحیه شمال غربی میدان قرار دارد و بانام کوپال غربی از آن یاد می‌شود و برجستگی کوچک‌تر در منطقه جنوب شرقی میدان واقع است و بانام ساختمان کوپال شرقی از آن یاد می‌شود و نهایتاً به میدان آجاجاری ختم می‌گردد. در این میدان تا به حال ۵۲ حلقه چاه حفاری شده است که از این تعداد ۵۱ حلقه چاه در ساختمان کوپال غربی قرار دارد. میدان مورد بررسی شامل دو مخزن آسماری و بنگستان است. سازندهای تشکیل دهنده ستون چینه‌ای میدان کوپال بر اساس حفاری از سطح به عمق به ترتیب شامل: سازندهای آجاجاری، میشان، گچساران، آسماری، پابده، گورپی و گروه بنگستان (شامل سازندهای ایلام، سروک، کژدمی) است.

روش مطالعه

روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی در عمق‌های مختلف بر پایه انحراف خواص سازند از حالت نرمال استوار است. به طور معمول امواج لرزه‌ای با دانستن این واقعیت که مناطق با فشار بالا دارای سرعت پایین‌تر و مقاومت بیشتری نسبت به مناطق با فشار عادی در همان عمق هستند وابسته است [۱]. فشار منفذی یا فشار سازندی به عنوان فشار سیال درون منافذ سازند تعریف می‌گردد [۷]. بنابراین فشار سیال منفذی برابر با فشار هیدروستاتیک ستون آب، اغلب فشار عادی نامیده می‌شود. فشار هیدروستاتیک بر طبق رابطه زیر

می‌تواند به‌کاربرده شود. در ادامه مراحل پیش‌بینی فشار منفذی در میدان کوپال بررسی می‌شود.

آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های سرعت امواج لرزه‌ای موجود در میدان مورد مطالعه، سرعت برانبارش می‌باشد (شکل ۲-الف). سایر داده‌ها شامل داده‌های موقعیت و مسیر چاه‌ها، مارکرهای زمین‌شناسی (سر سازند)، داده‌های نمودارهای چاه پیمایی شامل نمودار صوتی و چگالی، داده‌های آزمایش تکرار سازند (RFT) درون سازند آسماری و درنهایت اطلاعات گزارش‌های حفاری چاه‌های ناحیه (گرافیک لاگ) و وزن گل حفاری نیز از دیگر داده‌های در دسترس است.

پس از فراخوانی داده‌های سرعت برانبارش باید این داده‌ها را از سرعت RMS توسط رابطه دیکس [۱۸] به سرعت لایه‌ای تبدیل کنیم. چراکه نمودارهای چاه پیمایی سرعت لایه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و برای انطباق این دو نوع سرعت، سرعت لرزه‌ای RMS باید توسط رابطه دیکس به سرعت لایه‌ای تبدیل شود [۷].

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

به‌منظور ملایم کردن نمودارهای چاه پیمایی به حذف اثر فرکانس‌های بالا به کمک نرم‌افزار مورد استفاده پرداخته شد. در پایان داده‌های وزن گل حفاری برای استفاده، به داده‌های فشار در واحد psi تبدیل شد.

روش ساخت مدل

در مدلسازی انجام شده جهت تعیین فشار منفذی مراحل زیر صورت گرفته است:

ساخت مکعب سرعت: در این تحقیق برای محاسبه مکعب چگالی، از تنش مؤثر و گرادیان روباره استفاده گردیده است، لذا این مکعب می‌بایست دارای داده‌های سرعت از سطح مبنا تا پایین‌ترین افقی باشد که قصد تخمین فشار منفذی را داریم.

استرس مؤثر، می‌توان با در دست داشتن فشار روباره فشار منفذی را محاسبه کرد. استرس مؤثر به‌عنوان فشار درون چارچوب جامد سنگ تعریف می‌شود. در نتیجه استرس مؤثر، فشردگی فضای متخلخل درون سنگ‌های رسوبی را کنترل و به‌وسیله مطالعات آزمایشگاهی تعیین می‌گردد [۱۲-۱۴]. در حال حاضر روابط تجربی مورداستفاده در محاسبه استرس مؤثر را می‌توان به سه دسته: روابط استرس مؤثر- تخلخل، روابط استرس مؤثر- سرعت و روابط استرس مؤثر- مدول الاستیک، تقسیم نمود [۵]. از جمله روابط معروفی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار بکار برده می‌شود می‌توان به رابطه‌های ایتون [۱۵] و باور [۱۶] اشاره کرد. روش باور روش استرس مؤثر- سرعت می‌باشد که در آن از منحنی دست‌نخورده و منحنی باربرداری برای برآورد فشار مؤثر استفاده می‌شود [۱۷]. رابطه باور به‌صورت ساده را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$V = V_0 + A \cdot \sigma^B \quad (5)$$

که در آن V سرعت برحسب m/s، V_0 سرعت در استرس مؤثر صفر در رسوبات نامتراکم در سطح استرس مؤثر A و B ضرایب رابطه باور و $V\sigma$ استرس مؤثر در عمق برحسب psi است. در صورت وجود فرایند باربرداری رابطه باور به شکل زیر تغییر می‌کند:

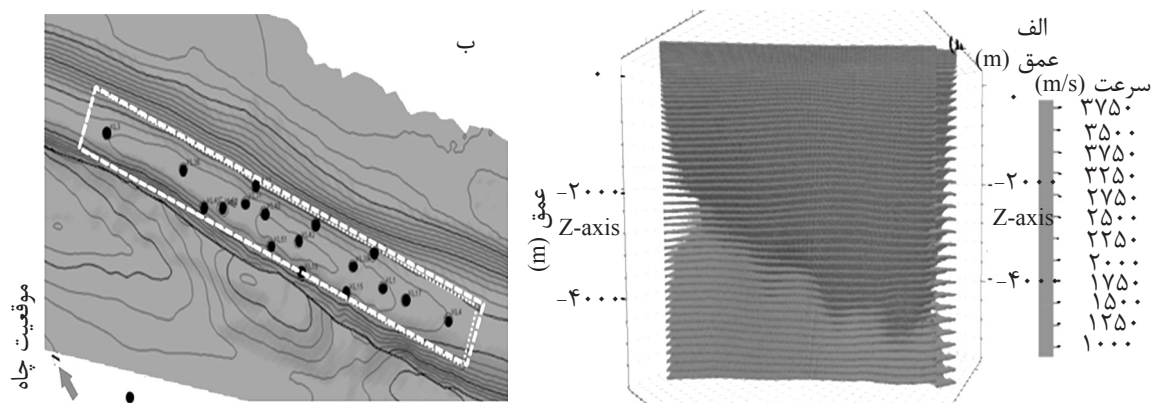
$$V = V_0 + A \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}^{(U-1)}} \right)^B \quad (6)$$

که در آن U ثابت باربرداری و σ_{max} حداکثر استرس مؤثر برای باربرداری است:

$$\sigma_{max} = \left(\frac{V_{max} - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (7)$$

V_{max} حداکثر سرعت مشاهده شده است.

هر فرایند یا شرایطی که باعث کاهش استرس مؤثر شود، مناطق با فشار غیرعادی را ایجاد می‌کند. در مناطق با فشار بالا، سیال منفذی بخشی از وزن لایه‌های بالا را تحمل می‌کند. کاهش استرس مؤثر و افزایش تخلخل باعث کاهش سرعت موج درون سنگ می‌شوند، در نتیجه ارتباط استرس مؤثر - سرعت، تخلخل و سنگ‌شناسی در مطالعه فشار منفذی



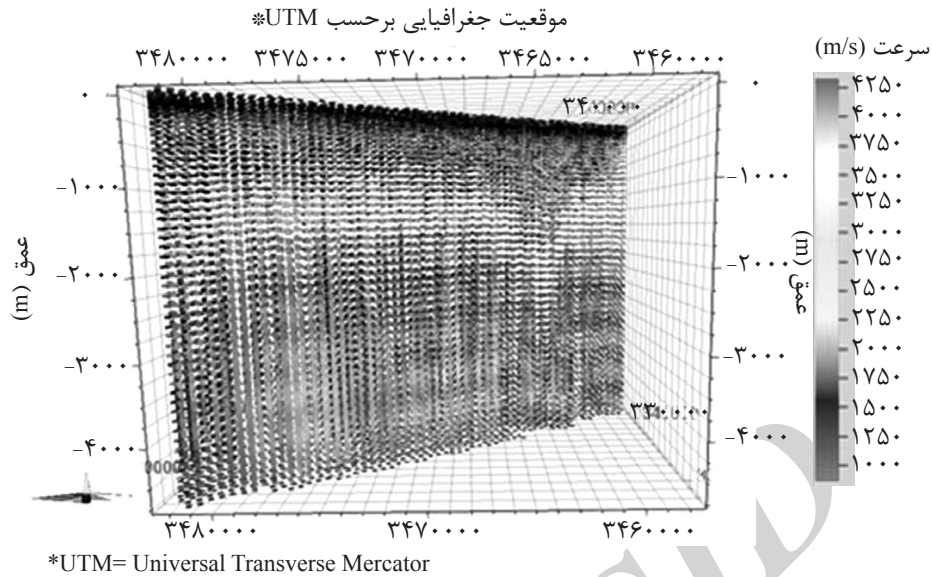
شکل ۲ الف-سرعت امواج لرزه‌ای موجود در میدان مورد مطالعه (سرعت برانبارش)؛ ب- مرز پروژه. این مرز دارای ابعاد تقریبی ۳ در ۲۸ km و آزیموت ۱۵۰ درجه است. دایره سیاه‌رنگ نشان‌دهنده محل چاه‌ها و سطوح هم‌زمان نشان داده‌شده افق آسماری می‌باشد.

سرعت لرزه‌ای موجود بیشترین انطباق را با سرعت حاصل از نمودارهای چاه پیدا کند. پس از فراخوانی داده‌های سرعت لرزه‌ای در سلول‌های مدل، به علت پراکندگی و ناپیوستگی داده‌های سرعت بازه‌ای (شکل ۲ - الف)، تمام سلول‌های مدل دارای مقدار نمی‌شوند (شکل ۳). واریوگرام مشابه واریانس بوده اما برخلاف واریانس که حول میانگین بیان می‌شود، واریوگرام اختلاف بین دو نمونه را اندازه‌گیری می‌کند. نحوه محاسبه واریوگرام به این صورت است که کل اعداد نمونه‌ها (برای مثال، نگار تخلخل، سرعت لرزه ای و یا مقادیر فشار منفذی) را به صورت جفت نقاط از هم کم نموده، به توان دو رسانده و باهم جمع و بر تعداد کل داده‌ها تقسیم می‌کنند (تا این مرحله شبیه به واریانس است). در نهایت این عدد را بر دو تقسیم می‌کنند که به همین دلیل به آن نیم واریانس می‌گویند. پس از محاسبات، به ازای هر فاصله عمقی، یک عدد نیم واریانس برای متغیر مورد نظر به دست می‌آید. با رسم نقاط در مقابل فواصل مختلف بین نمونه‌ها، منحنی خاصی ایجاد می‌گردد. اگر نقاط مورد نظر باهم همبستگی داشته باشند (یعنی مقادیر جفت نمونه‌ها نزدیک به هم باشد)، آنگاه واریانس آن‌ها به صفر نزدیک‌تر می‌شود. از واریوگرام‌ها (بعنوان مثال شکل ۴ الف و ب)، کمیت‌های تخمین کریچینگ به دست می‌آید.

در این تحقیق انتهای سازند ایلام به‌عنوان پایین‌ترین افق انتخاب گردید. گام اول در تولید یک مدل انتخاب مرز مدل است. مرز مدل طوری انتخاب شد که بالاترین نقطه تاقدیس در سازند آسماری و همچنین چاه‌هایی که دارای اطلاعات RFT هستند را در برگیرد (شکل ۲-ب). این مرز دارای ابعاد حدودی ۲۸ در ۳ km است و آزیموت آن ۱۵۰ درجه است. بعد از مشخص شدن محدوده، مدل به سلول‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود. در پایان سرعت بین لایه‌ای درون مدل فراخوانی شده و مدل آماده مراحل بعد می‌گردد (شکل ۳).

کالیبره کردن سرعت لرزه‌ای به وسیله سرعت حاصل از نمودارهای صوتی

با توجه به اینکه سرعت امواج حاصل از لرزه‌نگاری از فرآیند محاسباتی در مرحله پردازش به دست می‌آیند، بنابراین با سرعت دقیق امواج در سنگ تفاوت پیدا می‌کند، به‌خصوص آنکه در میدان مورد مطالعه، تنها سرعت موجود، سرعت برانبارش است. با توجه به آن که سرعت حاصل از نمودارهای صوتی چاه عمدتاً تغییرات بسیار بالایی دارد و تقریباً سرعت واقعی امواج درون سنگ را نشان می‌دهد [۱۹]. جهت بهبود وضوح تغییرات و تصحیح سرعت‌های لرزه‌ای موجود جهت انطباق بیشتر با خصوصیات زمین‌شناسی، یک مرحله تصحیح سرعت توسط روش‌های زمین‌آماری انجام شد تا



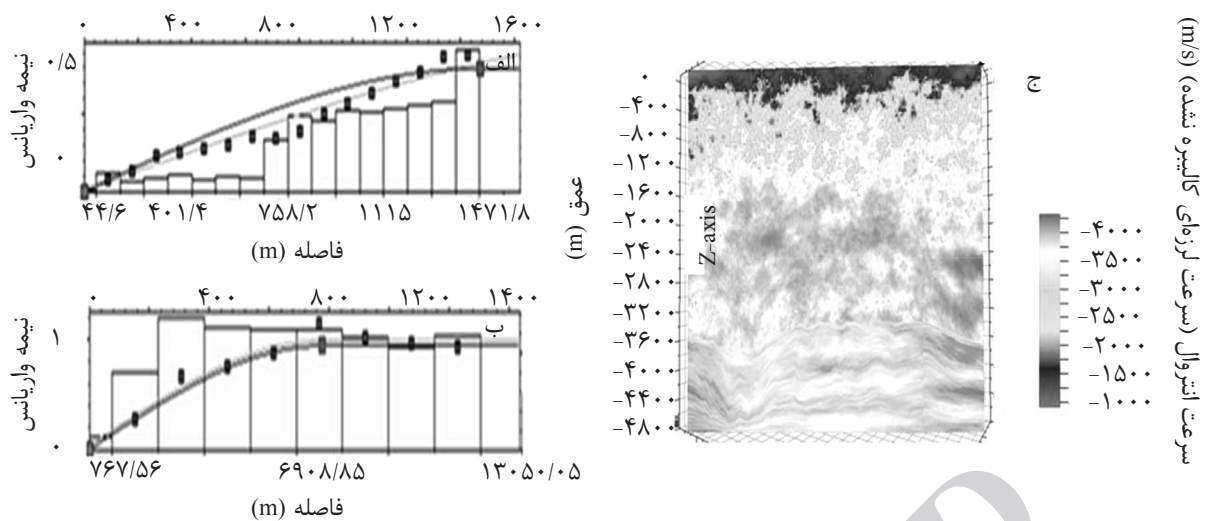
شکل ۳ سرعت بین لایه‌ای فراخوانی شده درون مدل

واریوگرافی انجام می‌شود و ساختار فضایی و ارتباط بین داده‌های کمیت اصلاح سرعت مشخص (شکل ۵ الف و ب) و این کمیت در محل اولیه سرعت امواج لرزه‌ای تخمین زده خواهد شد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه نمودار صوتی در همه محدوده عمقی مدل داده‌ها وجود ندارد و همچنین به دلیل شعاع تأثیر اندک کمیت اصلاح سرعت در جهت قائم، این کمیت در همه نقاط دارای سرعت لرزه‌ای در شکل ۴ ج به دست نخواهد آمد و کمیت اصلاح سرعت فقط درون مخزن آسماری حاصل خواهد شد و بخش‌های بالایی و پائینی مدل فاقد تخمین باقی خواهد ماند و مقدار کمیت اصلاح سرعت در این نقاط برابر صفر خواهد بود.

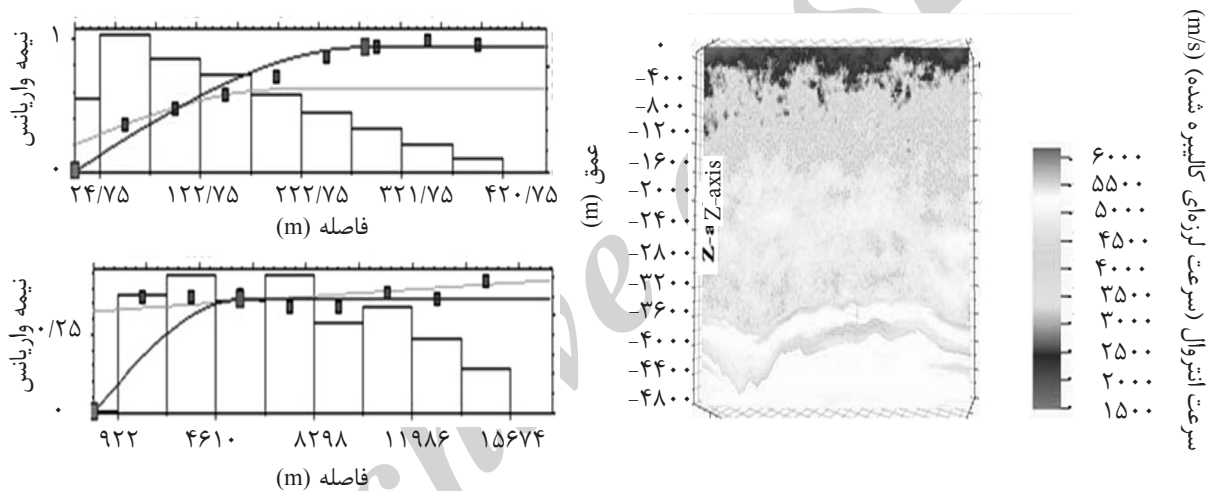
پس از انجام تخمین، سرعت لرزه‌ای (شکل ۴ ج) با مقدار کمیت اصلاح سرعت در هر نقطه جمع شده و سرعت حاصل از لرزه‌نگاری با سرعت حاصل از نمودارگیری کالیبره خواهد شد (شکل ۵ ج). لازم به یادآوری است این روش جهت تخمین فشار منفذی در میدادین بزرگ و فاقد چاه‌های زیاد که امکان تغییرات جانبی سرعت وجود دارد، توسعه داده‌شده است [۲۰].

در نتیجه جهت محاسبه اختلاف بین سرعت دقیق نمودار صوتی و سرعت امواج لرزه‌ای، ابتدا باید با استفاده از مقادیر سرعت برانبارش موجود در سلول‌های دارای داده، مقادیر سایر سلول‌های بدون داده را در کل مدل و چاه‌ها با استفاده از روش‌های درونیابی تخمین زد. قبل از انجام درونیابی، ابتدا باید از اطلاعات موجود واریوگرافی به عمل آورد.

پس از واریوگرافی و مشخص شدن ساختار فضایی داده‌های سرعت بین لایه‌ای فراخوانی شده در مدل و محاسبه پارامترها درونیابی (شکل ۴)، به درونیابی از داده‌های سرعت بین لایه‌ای (شکل ۳) پرداخته شود و مقدار سرعت بین لایه‌ای در کل سلول‌های مدل تخمین زده شد (شکل ۴ ج). با محاسبه سرعت لرزه‌ای در کل محدوده مدل اختلاف بین سرعت نمودار صوتی و سرعت لرزه‌ای به صورت یک‌به‌یک محاسبه شد. این کمیت، کمیت اصلاح سرعت لرزه‌ای است. با توجه به این که نمودارهای چاه‌پیمایی فقط در محدوده چاه‌ها وجود دارد کمیت اصلاح نیز فقط در محدوده چاه‌ها دارای مقدار می‌گردد. به منظور محاسبه کمیت اصلاح در محدوده کل مدل، مجدداً روی این کمیت



شکل ۴ (الف و ب) واریوگرام‌های رسم شده از داده‌های سرعت بین لایه‌ای فراخوانی شده درون مدل رسم شده در جهت اصلی میدان: الف- قائم و ب- افقی. و ج- سرعت بین لایه‌ای فراخوانی شده در درون مدل



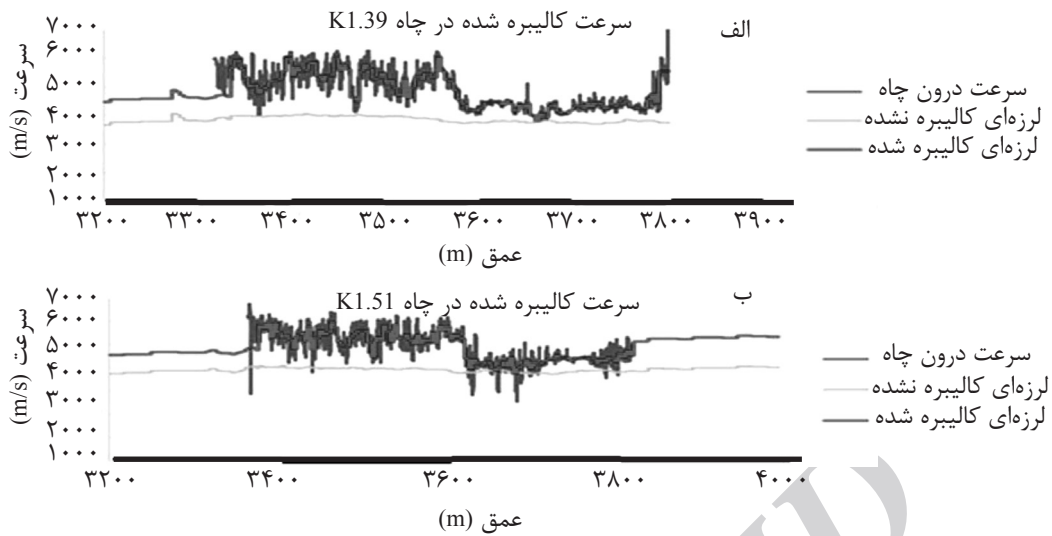
شکل ۵ (الف و ب) واریوگرام‌های رسم شده از داده‌های کمیت اصلاح سرعت رسم شده در جهت اصلی میدان: (الف) قائم و (ب) افقی؛ (ج) سرعت حاصل از لرزه‌نگاری کالیبره شده با سرعت حاصل از نمودار صوتی

[۱۶]، ابتدا نیاز به محاسبه ضرایب این رابطه است. با توجه به این که استرس مؤثر طبق اصل ترازقی (رابطه ۴) از تفاضل فشار روباره و فشار منفذی به دست می‌آید و با توجه به اندازه‌گیری فشار منفذی در چاه‌ها توسط آزمایش‌های درون‌چاهی، در صورت محاسبه فشار روباره درون چاه‌ها می‌توان استرس مؤثر را در نقاط دارای اندازه‌گیری فشار منفذی محاسبه کرد. برای محاسبه فشار روباره درون چاه‌ها می‌توان با استفاده از (رابطه ۲) و انتگرال‌گیری از داده‌های نمودار چگالی به محاسبه فشار روباره درون چاه‌ها پرداخت.

پس از کالیبره کردن سرعت امواج لرزه‌ای با سرعت حاصل از نمودارهای چاه، با مقایسه بین سرعت نهایی حاصل از تصحیح سرعت با سرعت حاصل از نمودارهای چاه در محل چاه‌های ۳۹ و ۵۱، دقت فرآیند تصحیح سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۶). همان‌گونه که در شکل مشخص است تصحیح سرعت از دقت قابل قبولی برخوردار است. از این مکعب در ادامه برای پیش‌بینی فشار مؤثر و روباره کمک گرفته می‌شود.

ساخت مکعب استرس مؤثر

به‌منظور محاسبه فشار مؤثر از طریق رابطه باور



شکل ۶ مقایسه بین سرعت نهایی حاصل از تصحیح سرعت با سرعت حاصل از نمودارهای چاه در محل چاه‌های الف-۳۹، ب-۵۱ و بررسی دقت فرآیند تصحیح سرعت لرزه‌ای

فرآیند باربرداری، می‌توان از رابطه باور ساده برای ایجاد رابطه بین فشار مؤثر و سرعت امواج لرزه‌ای استفاده نمود [۲۰]. لازم به ذکر است در شکل ۷-ب به دلیل رسم راحت‌تر منحنی، مقادیر V_0-V در مقابل فشار مؤثر رسم شده است و مقادیر محور قائم مقدار V_0-V است. جهت برازش رابطه باورز با توجه به اطلاعات لرزه‌نگاری موجود ابتدا سرعت در فشار مؤثر صفر (یا در سطح) باید انتخاب شود. با توجه به داده‌ها (شکل ۲) مقدار $V_0 = 988 \text{ m/s}$ برای این منطقه انتخاب شد. در ادامه به کمک روش‌های برازش رابطه ۵ به داده‌ها برازش می‌شود. با برازش رابطه باور ضرایب این رابطه A و B به ترتیب $216/58$ و $0/3407$ به دست آمد و رابطه نهایی باور در منطقه مورد مطالعه به صورت زیر حاصل شد:

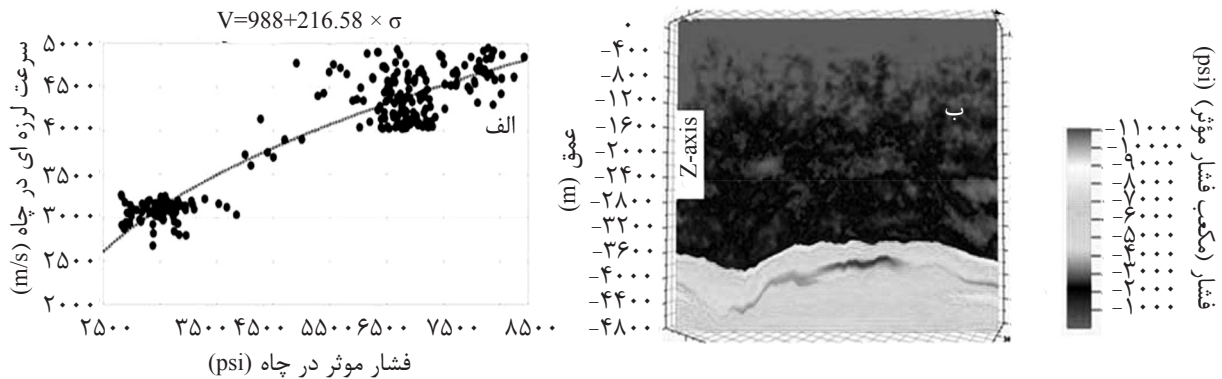
$$V = 988 + 216.58 \times \sigma^{0.3407} \quad (9)$$

البته بهتر آن است که ضرایب رابطه باور با انجام مطالعات آزمایشگاهی شناسایی شود. پس از تعیین ضرایب رابطه باور، می‌توان با اعمال رابطه ۹ بر روی مکعب سرعت تصحیح شده امواج لرزه‌ای (شکل ۵-ج)، این مکعب را به مکعب فشار مؤثر برحسب psi تبدیل کرد (شکل ۷-ب).

باید توجه داشت که نمودارهای چاه پیمایی از سطح شروع نمی‌شود و وزن سنگ‌های بالای نمودار در انتگرال‌گیری لحاظ نمی‌شود. به منظور حل این مسئله، می‌توان از رابطه تجربی ذکر شده در برخی منابع برای محاسبه فشار روباره در لایه‌های بالای نمودارهای چاه پیمایی و اضافه کردن مقدار حاصل به مقدار اندازه‌گیری شده استفاده نمود. برخی از این روابط مقدار چگالی را به صورت تابعی از عمق محاسبه می‌نمایند [۱۷]. پس از محاسبه فشار روباره درون چاه‌ها با تفاضل مقدار فشار روباره و فشار منفذی، مقدار استرس مؤثر در نقاط دارای فشار منفذی محاسبه می‌گردد.

پس از محاسبه استرس مؤثر در نقاطی که در آن‌ها آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار منفذی درون چاهی انجام شده است، می‌توان میزان سرعت امواج لرزه‌ای را نیز در محل همین نقاط در چاه‌ها از روی اطلاعات سرعت لرزه‌ای تصحیح شده (شکل ۵-ج) استخراج نمود. پس از استخراج سرعت می‌توان نمودار سرعت امواج را در مقابل استرس مؤثر در محل چاه‌ها رسم کرد (شکل ۷-ب).

همان‌گونه که در شکل ۷-ب مشخص است روند داده‌ها بر عدم وجود فرآیند باربرداری تکتونیکی در منطقه تأکید می‌کند. لذا با توجه به عدم وجود



شکل ۷ الف- منحنی استرس مؤثر در مقابل سرعت لرزه‌ای. به دلیل رسم راحت‌تر منحنی، مقادیر $V-V_0$ در مقابل استرس مؤثر رسم شده و مقادیر محور قائم مقدار $V-V_0$ است. V_0 مقدار سرعت اولیه در رسوبات سطح زمین می‌باشد. ب- مکعب استرس مؤثر برحسب psi

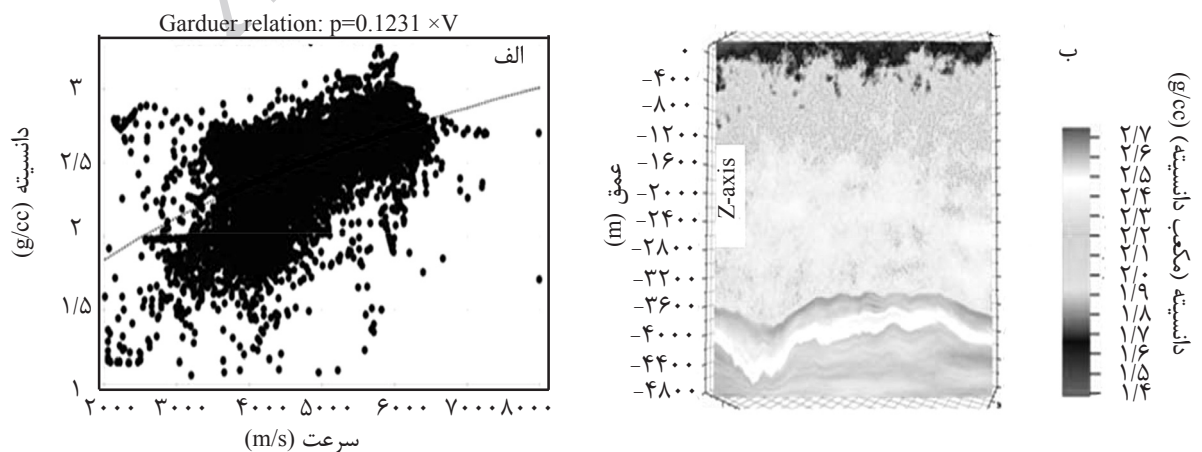
داده‌های مربوط به چاه‌های منطقه (نمودار صوتی و چگالی چاه‌ها)، مقدار دقیق‌تر این ثابت‌ها به دست خواهد آمد. به این منظور ابتدا نمودار چگالی-سرعت برای تمامی چاه‌ها رسم شد. برای محاسبه ضرایب رابطه گاردنر از برازش رابطه گاردنر به نمودار اطلاعات نمودارهای صوتی و چگالی همه چاه‌های منطقه استفاده گردید (شکل ۸-الف). پس از برازش، رابطه کلی گاردنر به شکل زیر به دست آمد:

$$\rho = 0.1231 \times V^{0.3559} \quad (10)$$

با محاسبه ضرایب رابطه گاردنر می‌توان با به کار بردن رابطه ۱۰ بر روی هر نقطه موجود در مدل سرعت لرزه‌ای تصحیح‌شده (شکل ۵-ج) مکعب چگالی سنگ را برحسب g/cc ایجاد کرد (شکل ۸-ب).

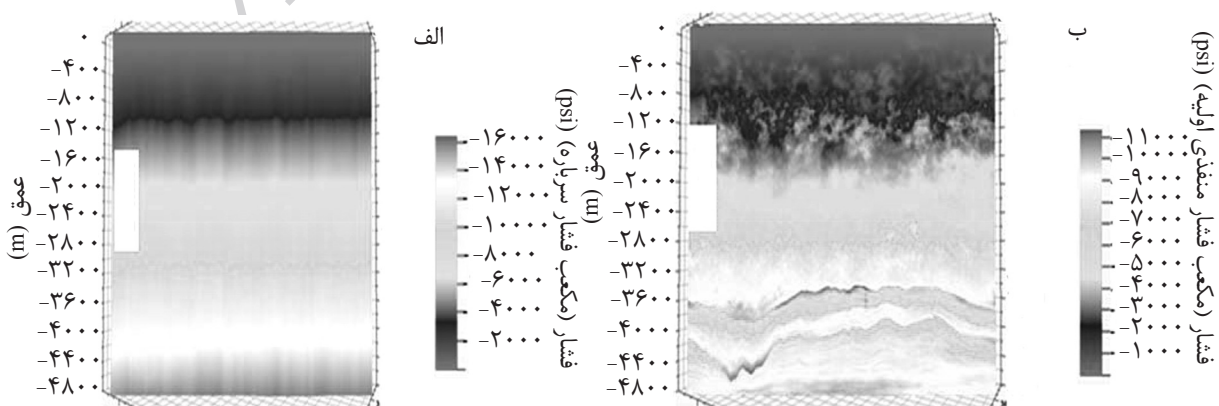
محاسبه مکعب چگالی و فشار روباره

با توجه به رابطه ترزاقی برای محاسبه فشار منفذی، نیاز به محاسبه فشار روباره و فشار مؤثر است. از آنجاکه محاسبه فشار روباره با انتگرال‌گیری از مقدار چگالی به دست می‌آید، برای محاسبه مکعب فشار روباره ابتدا باید مکعب چگالی ایجاد گردد. از معروف‌ترین روابطی که در لرزه‌نگاری برای ایجاد ارتباط بین سرعت و چگالی کاربرد فراوان دارد رابطه گاردنر می‌باشد. برای استفاده از رابطه گاردنر، بر روی مکعب سرعت لرزه‌ای تصحیح‌شده نیاز به محاسبه ضرایب رابطه گاردنر است. در رابطه گاردنر (رابطه ۳)، اگر استفاده از داده‌های چاه مقدور نباشد مقدار a و b برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود، اما در این مطالعه با برازش رابطه گاردنر به منحنی سرعت-چگالی تمامی



شکل ۸ الف- منحنی نمودار سرعت-چگالی و برازش رابطه گاردنر. (ب) مکعب چگالی سنگ برحسب g/cc، ایجادشده از طریق اعمال رابطه گاردنر بر روی مکعب سرعت تصحیح‌شده

سازند تبخیری گچساران یکی از لایه‌های مشکل‌ساز از نظر فشار است، ولی فشار این سازند عمدتاً ناشی از روانگرایی نمک می‌باشد. به‌علاوه با توجه به اینکه این سازند جزء سازندهای تولیدی محسوب نمی‌شود، هیچ‌گونه آزمایش اندازه‌گیری فشار نیز در آن انجام نمی‌شود. لذا با توجه به اهمیت تخمین فشار در این سازند و عدم وجود داده فشار اندازه‌گیری شده در این سازند، به‌منظور جبران کمبود داده مربوط به این سازند، فشار تقریبی این سازند در عمق متوسط آن در چاه‌های مختلف، با استفاده از گزارش‌های حفاری چاه‌های منطقه و وزن گل مورداستفاده در حفاری این سازند، محاسبه شده است. با توجه به آن که وزن گل حفاری به نحوی انتخاب می‌شود که فشار ناشی از گل با فشار سازند برابر یا اندکی بیشتر از آن باشد، این مقادیر صحیح به نظر می‌رسند [۲۱]. پس از محاسبه کمیت اصلاح فشار منفذی، نیاز به تخمین آن در کل مکعب است. لذا باید واریوگرام‌ها مرتبط با این کمیت را محاسبه نمود (شکل ۱۰). در ادامه به تخمین کمیت اصلاح فشار منفذی از محل چاه‌ها به کمک کریجینگ^۱ پرداخته می‌شود و در نهایت با اضافه کردن این مقدار به مکعب فشار منفذی اولیه (شکل ۹-ب) مقدار نهایی پیش‌بینی شده فشار منفذی (برحسب psi) که با مقادیر اندازه‌گیری شده این فشار در چاه‌ها نیز کالیبره شده است، به دست خواهد آمد (شکل ۱۱-الف).



شکل ۹ الف مکعب فشار روباره ایجادشده با انتگرال‌گیری از مکعب چگالی. ب- مکعب فشار منفذی اولیه ایجادشده از طریق رابطه ترازقی

۱. Kriging: کریجینگ، روش درون‌یابی و برآورد زمین‌آمار است که قادر است براساس مدل برازش شده بر واریوگرام تجربی و نمونه‌های اندازه‌گیری شده در جامعه، نقاط نمونه برداری نشده را بدون ارب و با حداقل واریانس برآورد کند.

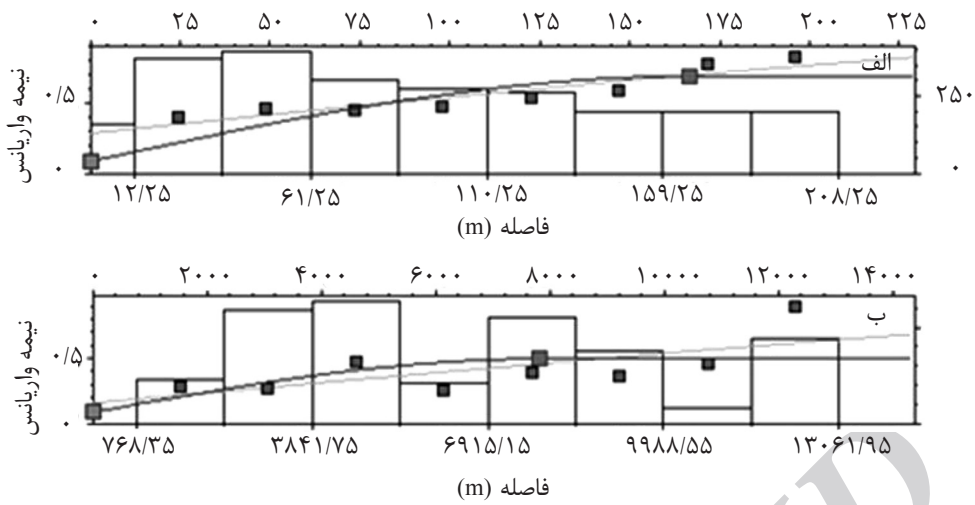
در ادامه با استفاده از رابطه ۲ و انتگرال‌گیری از مکعب چگالی مکعب فشار روباره ایجاد می‌گردد. شکل ۹-الف نشان‌دهنده مکعب فشار روباره برحسب psi است.

ساخت مکعب فشار منفذی

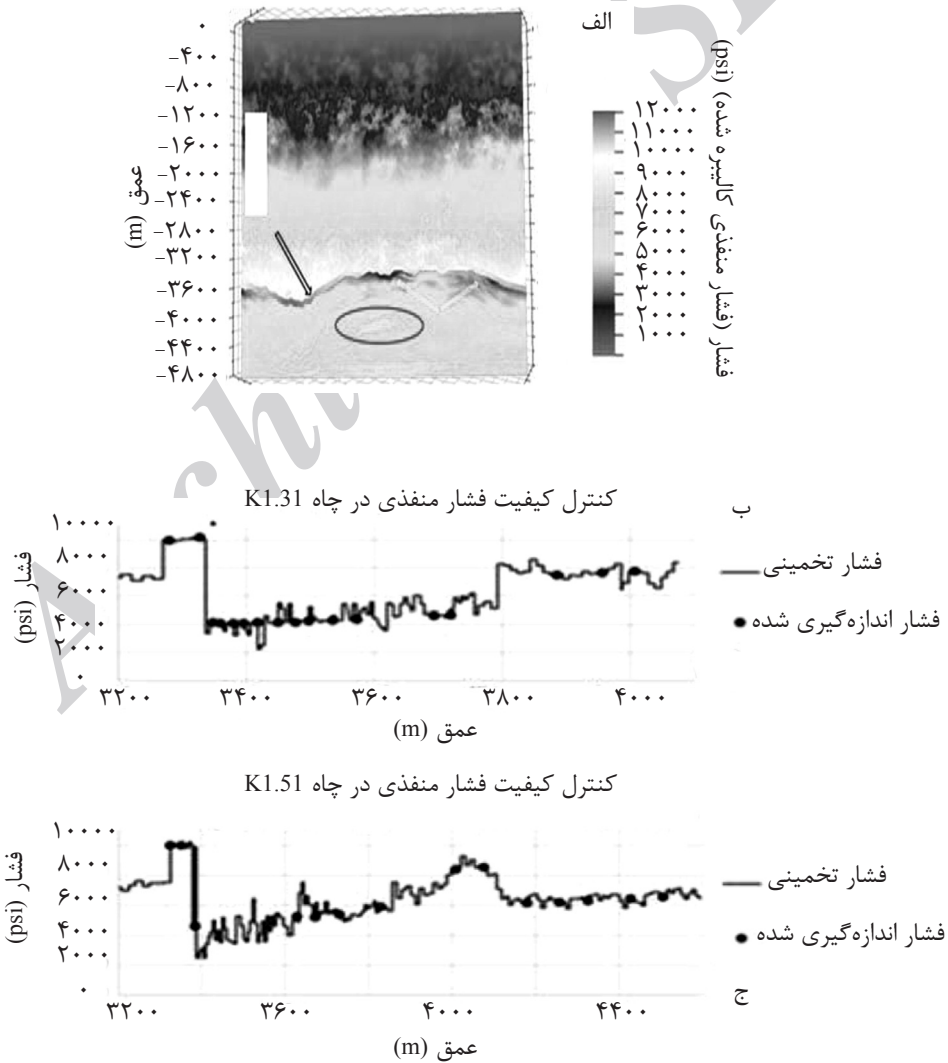
با توجه به محاسبه مکعب استرس مؤثر و فشار روباره می‌توان با استفاده از رابطه ۴ فشار منفذی را محاسبه کرد (شکل ۹-ب). به‌منظور بهبود دقت تخمین فشار منفذی و جبران برآزش ضعیف رابطه باور، یک مرحله تصحیح مکعب فشار منفذی اولیه بر اساس مقادیر فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چاه‌ها انجام گردید.

کالیبره کردن فشار منفذی اولیه با فشار منفذی چاه‌ها

همان‌گونه که در بخش قبل مشاهده شد، به دلیل برآزش ضعیف رابطه باور و به دلیل ضریب همبستگی پایین امواج لرزه‌ای و استرس مؤثر در داده‌ها، نیاز به یک مرحله تصحیح فشار منفذی می‌باشد. این مرحله تصحیح سبب بهبود دقت تخمین خواهد شد [۲۱]. با توجه به اینکه مکعب فشار منفذی اولیه، کل منطقه را پوشش می‌دهد، جهت استخراج مقدار فشار منفذی اولیه تخمینی در محل چاه‌ها، نیازی به استفاده از کریجینگ و واریوگرافی نیست. در ادامه به‌وسیله تفریق فشار منفذی تخمینی از مقدار فشار منفذی اندازه‌گیری شده درون چاه‌ها مقدار کمیت اصلاح شده فشار منفذی به دست می‌آید. لازم به یادآوری است



شکل ۱۰ واریوگرام‌های رسم شده در جهت اصلی میدان از داده‌های کمیت اصلاح فشار منفذی: الف قائم و ب- افقی



شکل ۱۱ الف- مکعب فشار منفذی نهایی، ب و ج- کنترل کیفیت فشار منفذی تخمینی با فشار منفذی اندازه‌گیری شده

افزایش تخلخل و یا در اثر تغییر لیتولوژی سازند آسماری باشد که در عمق، آسماری بیشتر شیلی می‌شود و میزان کانی‌های رسی در انتهای این سازند افزایش می‌یابد (رس‌ها یکی از عوامل ایجاد فشار بالا هستند). در این تحقیق مشخص شد می‌توان از روش‌های زمین‌آمار به منظور پراکندن داده‌های در نقاط معلوم استفاده کرد و همچنین سرعت‌های لرزه‌ای را می‌توان با این روش تصحیح کرد. همان‌گونه که گفته شد در تبدیل سرعت به فشار، مهم‌ترین بخش استفاده از داده‌های سرعت با وضوح بالا می‌باشد. البته با توجه به وضوح کم داده‌های سرعت برانبارش، استفاده از این داده در تخمین فشار توصیه نمی‌گردد. می‌توان از این روش برای پیش‌بینی فشار درون مخازن و مناطق دارای پیچیدگی فشار استفاده کرد. اطلاعات این تحقیق را می‌توان در برنامه‌ریزی حفاری، تعیین مکان نصب لوله جداری و تنظیم فشار گل حفاری در چاه‌های جدید استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از بخش زمین شناسی مناطق نفت خیز جنوب، اهواز و بخش پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر فراهم آوردن امکانات و اطلاعات مورد نیاز این پژوهش تشکر نمایند.

در پایان به منظور بررسی دقت تخمین فشار منفذی باید مکعب فشار منفذی تولید شده کنترل کیفیت شود. برای این منظور مقدار فشار منفذی تخمین زده شده در محل تعدادی از چاه‌ها از مکعب فشار منفذی استخراج شده و همراه با فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چاه‌ها رسم می‌شود (شکل ۱۱-ب). همان‌طور که از شکل ۱۱-ب مشخص است تخمین از دقت قابل قبولی برخوردار است.

نتیجه‌گیری

نتیجه حاصل از این تحقیق ایجاد مکعب سه‌بعدی فشار منفذی می‌باشد که همان‌گونه که از نتایج اعتبار سنجی مشخص است تخمین از دقت قابل قبولی برخوردار است. این تحقیق روشن ساخت که می‌توان با استفاده از رابطه باور معمولی برای پیش‌بینی فشار داخل مخازن کربناته نیز استفاده کرد. درون این مکعب دو قسمت با فشار غیرعادی شامل سازند پرفشار گچساران به خصوص بخش ۱ گچساران یا پوش سنگ و یک قسمت نیز داخل سازند پایده به‌خوبی در مکعب تخمین نهایی مشخص است. همین‌طور دو قسمت با فشار غیرعادی کم در بخش‌های ابتدایی سازند آسماری مشخص است. همین‌طور که مشخص است لایه‌های پایینی آسماری نسبت به لایه‌های بالایی دارای فشار منفذی نسبتاً زیادتری است که می‌تواند به علت کاهش استرس مؤثر در اثر

مراجع

- [1]. Chopra S. and Huffman A. R., "Velocity determination for pore pressure prediction," The Leading Edge, Vol. 23(12), pp.1502-1515, 2006.
- [2]. Dutta N., Mukerji T., Prasad M. and Dvorkin J., "Seismic detection and estimation of overpressure Part I: The rock physics basis," CSEG Recorder, Vol. 27(7), pp. 58-73, 2002.
- [3]. Pennebaker E. S., "Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure," World Oil, Vol. 166, pp. 73-78, 1968.
- [4]. Fillippone W. R., "Estimation of formation parameters and the prediction of overpressure from seismic data," Presented at the SEG Research Symp. Geo-pressure Studies, Paper R1.4, Dallas, TX, Oct. 17-21, pp. 502-503,

<https://doi.org/10.1190/1.1827121>, 1982.

- [5]. Wang Z. and Wang R., "Pore pressure prediction using geophysical methods in carbonate reservoirs: Current status, challenges and way ahead," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 27, pp. 986-993, 2015
- [6]. Terzaghi K., "Theoretical soil mechanics," John Wiley and Sons, Inc. 526P. ISBN 0-471-85305-4, 1943.
- [7]. Sayers C. M., "An introduction to velocity-based pore-pressure estimation," *The Leading Edge*, Vol. 25(12), pp.1496-1500, 2006.
- [8]. Sherhati S. and Letouzey J., "Variation of structural style and basin evolution in in the central Zagros Izeh zone and Dezful Embayment, Iran," *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 21, pp. 535-554, 2004.
- [9]. Traugott M., "Pore/fracture pressure determinations in deep water," *World Oil*, Vol. 218(8), pp.68-70, 1997.
- [10] Chen T. and Guan Z., "Theory and technology of drilling engineering", The Press of the University of Petroleum, Dongying (China), pp. 166-211, 2000.
- [11]. Gardner G. H. F., Gardner I. W. and Gregory A. R., "Formation velocity and density-the diagnostic basics for stratigraphic traps," *Geophysics*, Vol. 39 (6), pp. 770-780, 1974.
- [12]. Tosaya C. A., "Acoustical properties of clay-bearing rocks", PhD Thesis, Dept. of Geophysics, School of Earth Sciences, Stanford University, USA. p. 147, 1982.
- [13]. Tosaya C. and Nur A., "Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in Rocks", *Geophysical Research Letters*, Vol. 9, pp. 5-8, 1982.
- [14]. Dvorkin J., Moos D., Packwood J. L. and Nur A. M., "Identifying patchy saturation from well logs", *Geophysics*, Vol. 64 (6), pp.1756-1759, 1999.
- [15]. Eaton B.A., "Graphical method predicts geo-pressure worldwide", *World Oil*, Vol. 182, pp.51-56, 1972.
- [16]. Bowers G., "Pore pressure estimation from velocity data: According for overpressure mechanism besides undercompaction", *SPE Drilling and Completion*, Vol. 10 (2), pp. 89-95, 1995.
- [17]. Sayers C., Johnson G. and Denyer G., "Predrill pore-pressure prediction using seismic data", *Geophysics*, Vol. 67(4), pp.1286-1292, 2002.
- [18]. Dix C. H., "Seismic velocities from surface measurements," *Geophysics*, Vol. 20, pp.68-86, 1955.
- [19]. Lee S., Shaw J., Ho R., Burger J., Singh S. and Troyer B., "Illuminating the shadows: tomography, attenuation and pore pressure processing in the South Caspian Sea," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 24(1), pp. 1-12, 1999.
- [20]. Kelly M. C., Skidmore C. M. and Cotton R. D., "Pore pressure prediction for large surveys," *SEG Expanded Abstracts*, Vol. 24, pp. 1239-1243, 2005.

[۲۱] نصرت ا.، «پیش‌بینی فشار منفذی توسط نشانگرهای لرزه‌ای سه‌بعدی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.