

## مطالعات فشار منفذی و کاربرد آن در حوضه خزر جنوبی با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای

سعید ساجدی، علی جعفری، شرکت نفت خزر

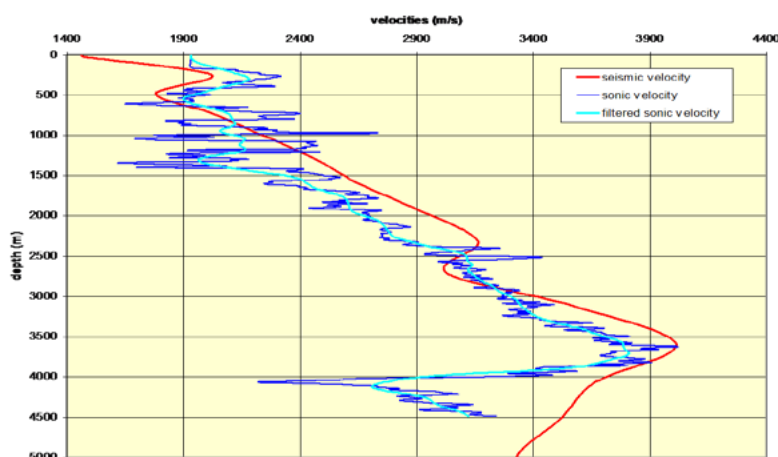
است که در سکانس‌های رسوبی تخریبی شیل پایه، تخلخل، تابعی از میزان تنش عمودی موثر<sup>۱</sup> است. تنش عمودی موثر یا همان فشار ماتریکس سنگ، برابر است با فشار وزن طبقات فوقانی منهای فشار سیالات منفذی. از آنجایی که سرعت و تخلخل به شدت به یکدیگر وابسته هستند، این امکان وجود دارد که تنش عمودی موثر را به عنوان تابعی از سرعت بیان کرد.

شده برای طراحی چاه و لوله‌های جداری در چاه‌های اکتشافی حفاری شده در حوضه خزر جنوبی استفاده شده است. جزییات روش مورد استفاده در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

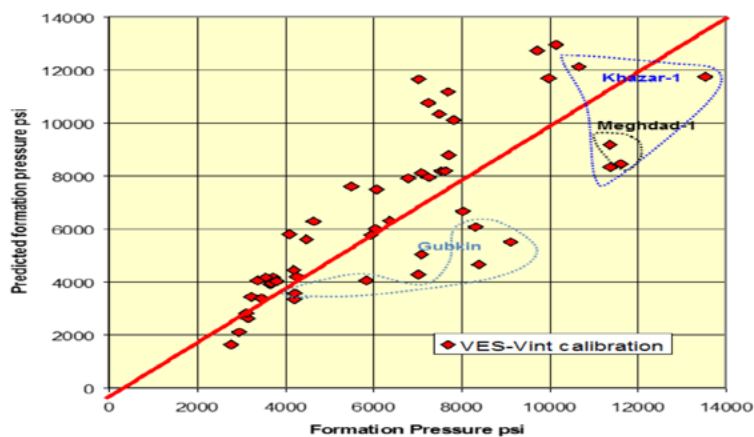
### ۱- روش مورد استفاده در مطالعات فشار منفذی حوضه خزر جنوبی

روش پیش‌بینی مقادیر فشار بر پایه این نظر

مطالعات پیش‌بینی فشار منفذی نقش موثری در ارزیابی یک حوضه رسوبی از نظر نحوه توزیع مقادیر فشار اضافی در حوضه، تخمین میزان ارتباط بخش‌های مخزنی، قابلیت انتقال‌دهی گسل‌ها و بررسی یکپارچگی سنگ‌پوش‌ها به عهده دارد. در حوضه خزر جنوبی، نرخ بالای رسوبگذاری و فرونشست سریع حوضه، مانع تراکم نرمال رسوبات شده و باعث به وجود آمدن مقادیر قابل توجهی فشار اضافی گردیده است. در حوضه‌هایی مانند حوضه خزر جنوبی، آگاهی از توزیع مقادیر فشار منفذی به منظور ارزیابی اهداف اکتشافی، همچنین حفاری ایمن و بهینه‌سازی هزینه‌ها حائز اهمیت است. روش مورد استفاده در مطالعات فشار منفذی در حوضه خزر جنوبی بر پایه همبستگی<sup>۱</sup> بین سرعت بازه‌ای (که مرتبط با تغییرات تخلخل است) با تنش موثر عمودی استوار است و از داده‌های چاه برای واسنجی<sup>۲</sup> همبستگی استفاده می‌کند. در این مطالعه از دو نوع داده سرعت برای ایجاد همبستگی استفاده شده است: سرعت‌های به دست آمده از نگاره صوتی و سرعت‌های به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای. در ادامه، مقادیر فشار پیش‌بینی شده با استفاده از این دو نوع داده سرعتی به منظور ارزیابی میزان اطمینان از دقت آنها قبل از تفسیر نتایج، با مقادیر فشار اندازه‌گیری شده در چاه‌ها مقایسه شده است. در نهایت، نتایج به صورت مقاطع و نقشه‌ها نمایش داده شده و در ترکیب با مدل‌های موجود ساختمانی و چینه‌شناسی تفسیر گردیده است. فشارهای پیش‌بینی



شکل ۱ | مقایسه سرعت بازه‌ای لرزه‌ای و منحنی سرعت صوتی



شکل ۲ | مقادیر فشار پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر فشار سازند

از نگاره صوتی در محل چاه مقداد-۱ را نشان می‌دهد. این داده‌ها بیانگر این است که سرعت‌های بازه‌ای لرزه‌ای از شکل کلی منحنی سرعت صوتی تبعیت می‌نماید.

نگاره صوتی و داده‌های فشار انجام شد اما به دلیل محدودیت در داده‌های چاه (وجود نگاره‌های صوتی تنها برای تعداد محدودی چاه) امکان یک واسنجی قوی برای کل حوضه وجود نداشت. بنابراین برای غلبه بر این مشکل، یک همبستگی بین سرعت‌های بازه‌ای لرزه‌ای و داده‌های فشار چاه (۱۳ حلقه چاه) انجام شد. مراحل انجام کار به شرح زیر است:

- برای هردو واسنجی (سرعت صوتی- تنش عمودی موثر و سرعت بازه‌ای

به منظور واسنجی یک معادله که برای محل مورد مطالعه کاربرد داشته باشد، می‌توان از داده‌های چاه و سرعت در محل چاه‌ها بهره گرفت. باید توجه داشت که این روش در مناطقی که تنش عمودی موثر امروزین از حداکثر تنش عمودی موثری که رسوبات در طی تاریخچه تدفین خود تجربه کرده‌اند کمتر است، قابلیت به کارگیری ندارد. در این موارد، تفسیر ویژه نتایج در کنار مدل‌های ناحیه‌ای چینه‌ای و ساختمانی مورد نیاز است. از سایر مواردی که ممکن است موجب تفسیر غلط نتایج شود می‌توان به تغییر سرعت حاصل از دلایل دیگر غیر از عامل فشار اشاره کرد؛ مانند تغییرات لیتولوژی یا حضور پیش‌بینی نشده لیتولوژی‌هایی مانند نمک یا گچ و یا تغییرات محلی در دیاژنر. به وجود این محدودیت‌ها در طی تفسیر باید توجه و مدل زمین‌شناسی حوضه را در نظر داشت. روند کار شامل سه مرحله زیر است:

۱- به دست آوردن سرعت بازه‌ای از سرعت‌های برانبارش لرزه‌ای

۲- به دست آوردن رابطه سرعت- تنش عمودی موثر با استفاده از داده‌های چاه به منظور محاسبه تنش عمودی موثر

۳- به دست آوردن رابطه سرعت-چگالی با استفاده از داده‌های چاه به منظور محاسبه فشار طبقات فوقانی

۴- محاسبه مقادیر فشار منفذی در طول خطوط لرزه‌ای

### ۳- به دست آوردن رابطه سرعت- تنش عمودی موثر با استفاده از داده‌های چاه

تخمین مقادیر فشار اضافی نیازمند یک رابطه مناسب بین سرعت و تنش عمودی موثر است. در ابتدا یک واسنجی بین سرعت‌های حاصل از

شکل ۳ | پوشش عمقی محدود نگاره چگالی

شکل ۴ | داده‌های چگالی-سرعت چاه‌ها در مقایسه با معادلات گاردنر

### ۲- سرعت‌های بازه‌ای لرزه‌ای

برای این مطالعه ۱۴ خط لرزه‌ای به گونه‌ای انتخاب شدند که ضمن ایجاد پوشش از سرتاسر حوضه از محل چاه‌ها عبور کنند. سرعت‌های بازه‌ای در این خطوط از سرعت‌های برانبارش لرزه‌ای به دست آمدند. شکل ۱- مقایسه بین سرعت‌های بازه‌ای حاصل و سرعت به دست آمده

لرزه‌ای- تنش عمودی موثر) داده‌های متناظر سرعت در مقابل داده‌های فشار در RFT در محل چاه‌ها به کار گرفته شد. - با توجه به روابط زیر، یک رابطه سرعت- فشار برای داده‌ها به دست آمد:

$$VES = Ovb - P$$

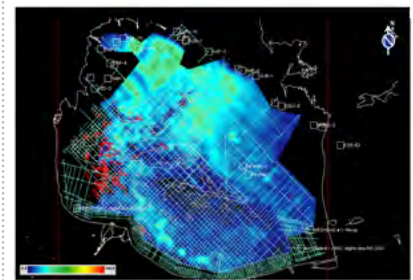
$$VES_{pred} = A * V^B$$

و از آنجا:

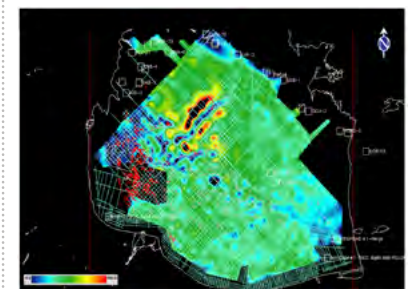
$$P_{pred} = Ovb - VES_{pred}$$

که در آن VES تنش عمودی موثر،  $VES_{pred}$  تنش عمودی موثر پیش‌بینی شده، Ovb فشار طبقات فوقانی، P فشار سیالات منفذی و  $P_{pred}$  فشار سیالات منفذی پیش‌بینی شده است. ضرایب A و B با استفاده از روش برازش کمترین مربعات در محل چاه‌ها به دست آمدند. شکل ۲- مقادیر فشار پیش‌بینی شده را در مقابل مقادیر فشار سازند نشان می‌دهد.

آنچنان‌که از شکل پیداست، رابطه‌ی به‌دست آمده، مقادیر فشار را برای



شکل ۵ | نقشه توزیع مقادیر فشار اضافی در افق‌های کم‌عمق حوضه خزر جنوبی



شکل ۶ | نقشه توزیع مقادیر فشار اضافی در افق‌های مخزنی حوضه خزر جنوبی

چاه‌های خزر-۱، مقداد-۱ و گوبکین-۱ (که در کناره حوضه قرار دارند) کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند که این مساله به دلیل آن است که رسوبات بعد از تراکم اولیه در معرض افزایش فشار منفذی و کاهش تنش عمودی موثر قرار می‌گیرند. اما این کاهش در رابطه سرعت-تخلخل ثبت نمی‌شود. به‌طور کلی رابطه حاصله از واسنجی سرعت بازه‌ای لرزه‌ای- تنش موثر عمودی پیش‌بینی دقیق‌تری برای سایر چاه‌ها ارائه می‌دهد و بنابراین، نتایج حاصله از این رابطه مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۴- به‌دست آوردن رابطه سرعت-چگالی با استفاده از داده‌های چاه

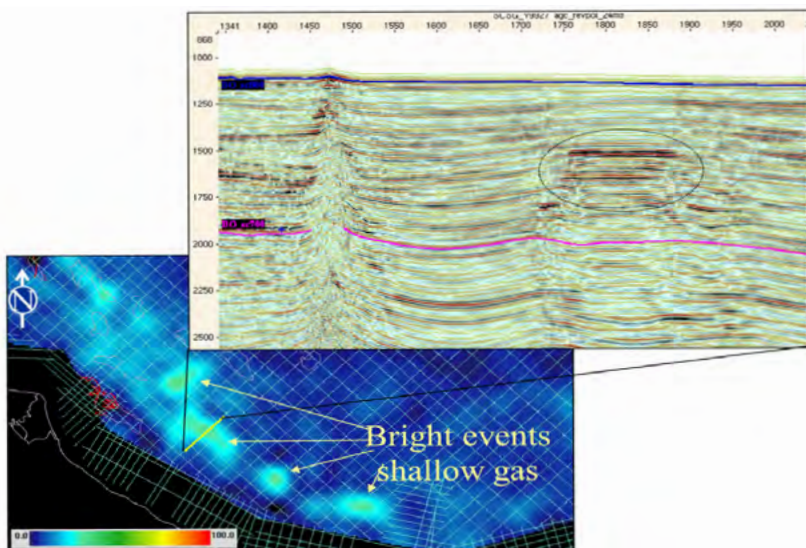
به‌منظور محاسبه مقادیر فشار طبقات فوقانی به‌دست آوردن یک رابطه بین چگالی و سرعت ضروری است. وقتی که داده‌های چاه موجود است، می‌توان یک رابطه تخلخل-چگالی با واسنجی داده‌های نگاره صوتی و چگالی در محل چاه‌ها به‌دست آورد. برای این منظور داده‌های چاه‌های شاه‌دینیز-۶، خزر-۱، مقداد-۱ و میثم-۱

استفاده شدند. متأسفانه نگاره‌های موجود بازه عمقی محدودی را پوشش می‌دهند که برقراری یک همبستگی چگالی-سرعت خوب را غیرممکن می‌سازد (شکل ۳-).

در غیاب یک رابطه مناسب چگالی-سرعت بر اساس داده‌های چاه، شکل‌های مختلف معادلات چگالی-سرعت گاردنر و همکاران برای مقایسه نشان استفاده شد. شکل ۴- نشان می‌دهد که داده‌های موجود چاه به معادلات تجربی گاردنر برای نوع شیل نزدیک‌تر است. یک گزینه دیگر برای به‌دست آوردن مقادیر فشار طبقات فوقانی، استفاده از چگالی ثابت ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. مقایسه نتایج حاصل از این دو گزینه نشان داد که معادله گاردنر مقادیر صحیح‌تری را ارائه می‌دهد و بنابراین، برای استفاده در محاسبه مقادیر فشار طبقات فوقانی انتخاب شد:

$$P = (-0.0115 * V^2) + (0.261 * V) + 1.515$$

که در آن  $\rho$  چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و V سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه می‌باشد.



شکل ۷ | نقاط روشن بر روی مقاطع لرزه‌ای و مقادیر شبه فشار اضافی پیش‌بینی شده توسط مدل

حفاری می‌باشد. در شرکت نفت خزر، در حفاری اولین چاه حوضه خزر جنوبی در میدان سردار جنگل، با توجه به عدم وجود چاه‌های حفاری شده در نزدیکی نقطه مورد نظر و در نتیجه، عدم دسترسی به داده‌های مقادیر فشار درون چاهی، موقعیت اولین چاه حفاری شده در میدان سردار جنگل بر روی نقشه‌ها و مقاطع فشار، مشخص گردید. سپس با استخراج مقادیر فشار در محل چاه، نمودار پیش‌بینی فشار تهیه و در برنامه لوله‌گذاری حفاری چاه سردار جنگل، مورد استفاده قرار گرفت.

### نتیجه‌گیری

نتایج بهره‌گیری از مطالعه و بررسی فشارهای منفذی در حوضه خزر جنوبی در اولین و دومین چاه حفاری شده منطقه، در پیش‌گیری از بروز برخی مخاطرات حفاری آب‌های عمیق، گام مهمی بوده است. انتخاب نوع لوله‌های جداری که بر اساس خواص چینه‌ای لایه‌ها در اعماق متفاوت تغییر می‌کند، در برخی موارد به قدری حائز اهمیت است که پیش از حفاری، مطالعات گسترده‌تری را می‌طلبد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مناطقی که کمبود یا نبود اطلاعات چاه ممکن است مشکلات عمده‌ای را موجب شود، این نوع مطالعه در برنامه کاری قرار گیرد.

ممکن است عامل دیاژنز دلیل به وجود آمدن این آنومالی باشد. مقادیر فشار اضافی پیش‌بینی شده در پیشانی دلتای امروزی آمودریا می‌تواند به دلیل فرونشست سریع این ناحیه و توسعه مقادیر فشار منفذی باشد. محتوای گسترده ماسه در این ناحیه و سرعت کمتر ماسه‌ها نسبت به شیل‌ها می‌تواند دلیل دیگر تولید این مقادیر ظاهری فشار اضافی باشد. نقاط روشن متعددی بر روی مقاطع لرزه‌ای قسمت جنوبی حوضه مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حضور بسته‌های گازی کم‌عمق است. حضور گاز باعث آنومالی در سرعت‌های بازه‌ای می‌شود که به کمک رابطه سرعت بازه‌ای لرزه‌ای- تنش موثر عمودی به صورت مناطقی با شبه فشار اضافی نشان داده می‌شود (شکل-۷). نقشه توزیع مقادیر فشار اضافی در حوضه خزر جنوبی نشان‌دهنده شروع مقادیر شدید فشار اضافی در ابتدای ورود به افق‌های مخزنی است.

### ۷- کاربرد روش

همانگونه که شرح داده شد، ایجاد مدل و پیش‌بینی مقادیر فشار منفذی در لایه‌های کم‌عمق و عمیق بر اساس داده‌های سرعتی چاه‌ها و اطلاعات لرزه‌ای و ارائه آنها به صورت نقشه‌ها و مقاطع مقادیر فشارهای اضافی، گام مؤثری در پیش‌بینی مقادیر فشار در مکان مورد

### ۵- توزیع مقادیر فشار اضافی در حوضه خزر جنوبی

مقادیر پیش‌بینی شده فشار بر اساس رابطه سرعت بازه‌ای لرزه‌ای- تنش موثر عمودی برای بازه‌های چینه‌ای مختلف تفسیر شده، محاسبه و به صورت نقشه‌های توزیع مقادیر فشار اضافی بر حسب در صد ارائه شدند. مقادیر فشار اضافی بر حسب در صد بر اساس رابطه زیر محاسبه شدند:

$$\text{Overpressure (\%)} =$$

$$\frac{100 \times (\text{Predicted pressure} - \text{Hydrostatic pressure})}{(\text{lithostatic pressure} - \text{Hydrostatic pressure})}$$

شکل‌های ۵- و ۶ به ترتیب نقشه‌های توزیع مقادیر فشارهای اضافی را برای افق‌های کم‌عمق و افق‌های مخزنی نشان می‌دهد.

### ۶- تفسیر و ارزیابی نتایج

توزیع مقادیر فشار اضافی در افق‌های کم‌عمق نشان می‌دهد که این رسوبات عمدتاً دارای فشار منفذی طبیعی هستند. به نظر می‌رسد مقادیر فشار اضافی ۳۰ درصد پیش‌بینی شده در قسمت شمالی حوضه، مرتبط با یک رخساره لرزه‌ای خاص باشد. این رخساره ممکن است که توسط لایه‌های شیل فوقانی ایزوله شده و قادر به آب‌زدایی موثر نبوده باشد. همچنین

### پانویس‌ها

1- Correlation

2- Calibration

3- Vertical Effective Stress

### منابع

[1] Skempton, A.W. (1960). Effective stress in soils, concrete and rocks. In pore pressure and suction in soils. Published by Butterworth, pp: 4-16.

[2] Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Kan, T.K. (1993). Rocks Physics - The link between rock-properties and AVO response, in Offset-De-

pendant reflectivity- Theory and Practise of AVO Analysis. Eds: J.P. Castagna and M. Backus. Investigations in Geophysics No 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahamam 135-171.

[3] South Caspian Study Group, Pressure study of south Caspian basin, October 2000.