



## ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای

سید علیرضا یوسفی\*، بهزاد مهرگویی، غلامحسین نوروزی، حسین معماریان، دانشکده فنی دانشگاه تهران

### چکیده

امروزه مهندسان نفت در برنامه‌ریزی‌های برداشت از منابع هیدروکربنی، علاوه بر هدف گذاری تولید بیشتر از منابع، کاهش هزینه‌های مربوط به عملیات جاری را نیز مورد توجه قرار می‌دهند. این دیدگاه جز با شناخت رفتار سنگ امکان پذیر نیست. از این رو، ژئومکانیک، که شاخه‌ای از علوم زمین است، به بررسی رفتار سنگ تحت تأثیر تنش‌های وارد بر آن می‌پردازد. این شاخه به‌عنوان نگرشی تازه به رفتار مکانیکی سنگ مطرح شده است و بیش از چند سال از عمر آن نمی‌گذرد اما اهمیت خود را در پیش‌بینی رخدادها به اثبات رسانده است. در سال‌های اخیر، استفاده از ژئومکانیک در تعیین برنامه اکتشاف و توسعه میدان، به‌عنوان یک عامل اصلی بوده است. در حالی که ساخت مدل ژئومکانیکی در یک میدان، به محدوده‌ی وسیعی از داده‌ها نیاز دارد، اما در مراحل اولیه‌ی اکتشاف و توسعه‌ی میدان، داده‌های موجود، محدود به داده‌های چند چاه و لرزه‌نگاری است. بنابراین، استفاده از این داده‌های محدود برای بررسی سه‌بعدی رفتار ژئومکانیکی بسیار اهمیت پیدا می‌کند. توانایی محاسبه‌ی مستقیم همه‌ی پارامترهای ژئومکانیکی از داده‌های لرزه‌نگاری وجود دارد، هرچند دقت این محاسبات وابسته به وضوح برداشت داده‌های لرزه‌نگاری است. در این مقاله، مدل‌سازی ژئومکانیکی در حالت یک‌بعدی و سه‌بعدی و کاربرد داده‌های لرزه‌ای برای ساخت مدل سه‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین کاربرد مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در پیش‌بینی پایداری دیواره چاه است. اما مدل‌های سه‌بعدی ژئومکانیکی در مقیاس‌های بزرگ‌تر برای پیش‌بینی‌های مهندسی و مدیریت و برنامه‌ریزی برداشت میادین هیدروکربوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: مدل ژئومکانیکی، مدل سه‌بعدی، داده‌های لرزه‌ای

### مقدمه

نشست سطوح روباره استفاده می‌شود. از طرفی، پارامترهای مخزنی از قبیل: تخلخل سازند، تراوایی و فشار ته چاه را می‌توان با استفاده از محاسبات ژئومکانیک به‌دست آورد [۳]. برنامه‌ریزی عملیات نفتی با رویکرد مقابله با خطرات ژئومکانیکی که با استفاده از مدل ژئومکانیکی امکان‌پذیر است، صرفه‌جویی‌های زیادی را به‌دنبال خواهد داشت.

اهمیت دیگر ژئومکانیک با توجه به نقش شاخص رفتارهای سنگ مخزن و روباره در مهندسی نفت شکل می‌گیرد، به‌طوری‌که ژئومکانیک در تمامی چرخه‌ی عمر مخزن هیدروکربنی اثر گذار است؛ به همین دلیل، مدیریت ژئومکانیک بسیار مهم است [۳]. تعیین مکان مناسب برای چاه، انتخاب بهترین مسیر برای حفاری، پیش‌بینی مشکلات و راه‌حل‌های حین حفاری، برنامه‌ریزی برای تکمیل چاه مناسب در انتهای حفاری و در نهایت، ارائه بهترین روش انگیزش چاه، مهم‌ترین و پُرخرج‌ترین عملیات در مهندسی نفت به‌شمار می‌رود. این عملیات با بهره‌گیری از یک مدل ژئومکانیکی در کنار سایر مدل‌های

مطالعه رفتارهای سنگ مخزن با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن، می‌تواند الگویی از تعادل سنگ را نشان دهد. دخالت‌های انسانی مانند حفاری، تولید و یا تزریق باعث برهم خوردن تعادل موجود در ساختار سنگ می‌شود؛ نتایج این تغییرات را می‌توان تحت عنوان مکانیک سنگ مطالعه کرد [۳]. از طرفی، استفاده از مکانیک سنگ برای محیط‌های زیرزمینی، «ژئومکانیک» نامیده می‌شود [۱]. در ابتدا، استفاده از ژئومکانیک محدود به بررسی رفتار سنگ بکر در مقیاس کوچک و سپس، نتیجه‌گیری از آن در مقیاس میدانی بوده، اما اخیراً، برای توصیف و همچنین مکانیک توده‌ی سنگ توسعه پیدا کرده است. تعبیر و تفسیرهای پیشرفته ژئومکانیک با لرزه‌شناسی، مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته و پدیده‌های جابجایی در ارتباط است [۱ و ۲].

در صنایع مهندسی نفت، از ژئومکانیک برای پیش‌بینی پارامترهای مهمی مانند: تنش‌های برجای سنگ، مدول‌های الاستیک و مقدار

\*نویسنده‌عهددار مکاتبات (Alireza.yousefi@ut.ac.ir)

مدل ژئومکانیکی در سه بُعد در چند سال اخیر مرسوم شده است؛ زیرا ویژگی‌های ژئومکانیکی به ویژه مدول‌های الاستیک، به‌طور مستقیم بر روی امواج لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند [۵]. علاوه بر مدول‌های الاستیک، اندازه و جهت تنش‌ها نیز با استفاده از داده‌های لرزه‌ای قابل محاسبه است. با محاسبه‌ی مدول‌های الاستیک و اندازه و جهت تنش‌های حوضه یا میدان، مدل ژئومکانیکی سه‌بُعدی ساخته می‌شود.

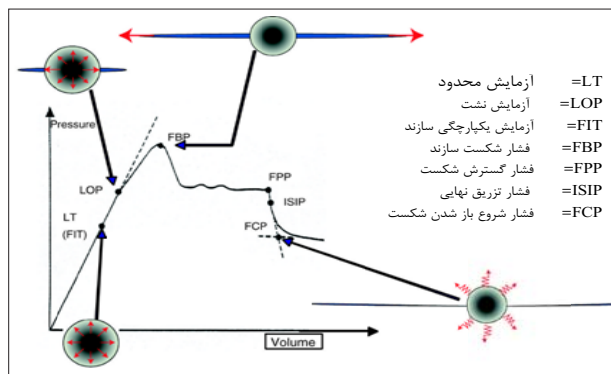
### ۱- کاربردهای مدل ژئومکانیکی

استفاده از پیش‌بینی‌های ژئومکانیکی در قسمت‌های مختلف مهندسی نفت به‌عنوان مرحله‌ای مهم در برنامه‌ریزی‌ها مطرح شده است. از پیش‌بینی ریسک حفاری در اولین چاه تا افزایش حداکثری تولید هیدروکربن از مخزن، ژئومکانیک مخزن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزار تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به گسترده‌ی کاربرد، می‌توان نقش ژئومکانیک را در زمینه‌های زیر معرفی کرد [۱ و ۳ و ۴ و ۶ و ۷ و ۸]:

- مهندسی حفاری: شامل پیش‌بینی فشار منفذی، تعیین محل حفاری چاه و مسیر حفاری، پایداری چاه، خزش نمک و ژئومکانیک حفاری در زمان واقعی می‌باشد.
- تکمیل چاه: مدیریت تولید ماسه، مشبک کاری بهینه و ژئومکانیک برای انگیزش اطراف چاه را شامل می‌گردد.
- مهندسی مخزن: شامل فشردگی و نشست سطح زمین، یکپارچگی پوش سنگ، ژئومکانیک دینامیکی مخزن و آنالیز آب‌بندی گسل، است.

### ۲- مدل ژئومکانیکی یا مدل مکانیکی زمین

یک مدل ژئومکانیکی (مدل مکانیکی زمین<sup>۴</sup> MEM) عبارت است



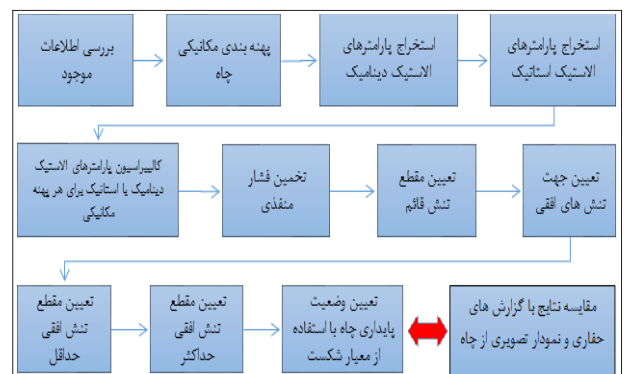
۴ آرمایش XLOT. با انجام این آرمایش در یک رژیم تنش‌ی غیر معکوس، اندازه تنش افقی حداقل محاسبه و اندازه‌گیری می‌شود [۱۷].

مخزنی با اطمینان بیشتری انجام می‌شود.

به‌طور کلی، مدل‌سازی ژئومکانیکی را می‌توان به سه دسته مدل‌سازی یک‌بُعدی، سه‌بُعدی و چهاربُعدی تقسیم‌بندی کرد [۱ و ۳ و ۴]. مطالعه بر روی ساخت مدل‌های یک‌بُعدی ژئومکانیکی بیش از سه دهه‌ی پیش آغاز شده است و امروزه به‌عنوان یک مدل مرسوم از میدان، ارائه می‌شود. اما مدل‌سازی سه‌بُعدی و چهاربُعدی ژئومکانیکی در دو دهه‌ی اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵]. این مطالعات را می‌توان به‌طور جدی از سال ۲۰۰۰ به بعد در گزارش‌های ارائه شده دنبال نمود.

در سال ۲۰۰۱، مارک مینگای<sup>۱</sup> و همکاران برای مطالعه‌ی نقش هیدرولیکی و مکانیکی ترک و شکاف در مخازن شکافدار از کوپل مدل ژئومکانیکی و شبیه‌ساز مخزن استفاده کردند. در سال ۲۰۰۵، برای مطالعه‌ی حفره‌های ایجاد شده در لایه‌های نمکی، میشل پرونو<sup>۲</sup> و همکاران از مدل ژئومکانیکی بهره بردند. سندرین ویدال-گیلبرت<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای مطالعه تغییرات تنش بر جای منطقه در هنگام ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub>، از مدل ژئومکانیکی سه‌بُعدی استفاده کردند. لئوناردو پیرا<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی که از داده‌های لرزه‌ای برای ساخت آن استفاده شده بود، برای کوپل با شبیه‌ساز مخزن استفاده کردند. در سال ۲۰۱۱، ران اشمیت<sup>۵</sup> و همکاران و صفدرخان<sup>۶</sup> و همکاران با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مدل ژئومکانیکی را به ترتیب برای مطالعه یکپارچگی پوش سنگ و اکتشاف شیل‌های گازی استفاده کردند. در سال ۲۰۱۲، لی چو کوا و همکاران<sup>۷</sup> با ساخت مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به مطالعه پایداری چاه در منطقه پرداختند.

هدف مطالعه‌ی حاضر بیان رابطه میان داده‌های لرزه‌ای و مدل ژئومکانیکی سه‌بُعدی است. استفاده از داده‌های لرزه‌ای برای بسط



۱ نمودار مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بُعدی

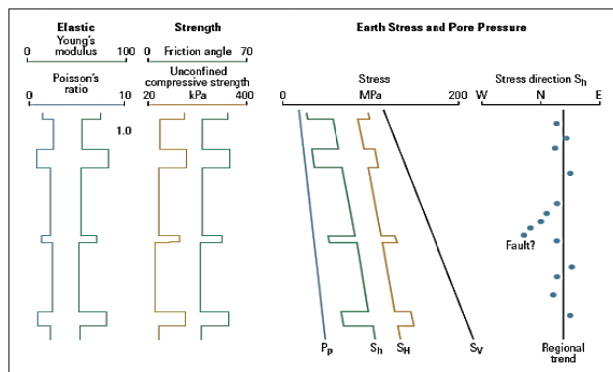


چگالی، قطر سنجی، تخلخل و پرتوزایی گاما، ساخته می شود و مقطعی از عمق در برابر ویژگی های مکانیکی و حالت های تنش سنگ های دیواره و اطراف چاه را تعریف می کند. مدل ژئومکانیکی یک بعدی، مبنایی برای تحلیل های ژئومکانیکی و بررسی تأثیرات مکانیک سنگ در دیواره و اطراف چاه و حوادثی مانند ریزش دیواره، تولید ماسه و غیره است [۳].

مدل یک بعدی ژئومکانیکی شامل مقاومت سنگ (مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت کششی، زاویه اصطکاک)، پارامترهای تغییر شکل (مدول یانگ، نسبت پواسون، مدول های برشی و بالک)، تنش های برجای قائم و افقی و فشار منفذی و در نهایت، ویژگی های لازم برای پیش بینی پایداری است [۳].

مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی در شکل ۱- آمده است. همانگونه که دیده می شود، بعد از بررسی داده های موجود، منطقه از نظر پهنه بندی مکانیکی مورد مطالعه قرار می گیرد، زیرا روابط میان مدول های الاستیک استاتیک و دینامیک برای هر گونه ی سنگی متفاوت است و افتراق گونه های سنگی متفاوت مانند دولومیت، کلسیت، شیل، انیدریت و نمک به عنوان یک پیش نیاز مهم در محاسبه ی ویژگی های مکانیک سنگ در نظر گرفته می شود [۵]. سپس، با استفاده از نمودارهای درون چاهی، پارامترهای الاستیک دینامیکی محاسبه می شود. در مرحله بعد، پارامترهای الاستیک استاتیکی با انجام آزمایش های مخصوص بر روی نمونه های هر یک از پهنه های مشخص شده، به دست می آید. در انتهای این مرحله، با توجه به رابطه ی میان پارامترهای الاستیک و دینامیک برای هر پهنه، نمودار پیوسته پارامترهای الاستیک دینامیکی به نمودار پیوسته الاستیک استاتیکی تبدیل می شود.

اندازه گیری فشار منفذی به صورت نقطه ای در محدوده ی مخزن انجام می گیرد. پیش بینی فشار منفذی در مقطع چاه با استفاده از



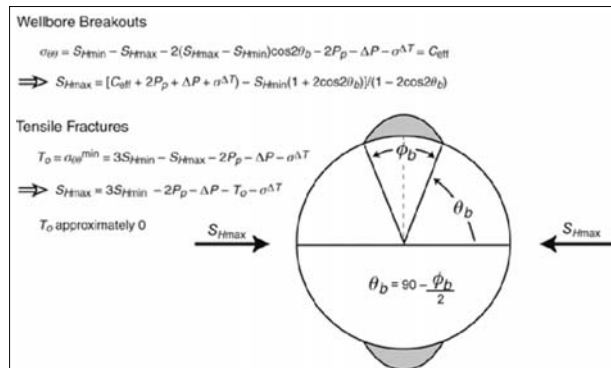
شکل ۱ | یک مدل یک بعدی ژئومکانیکی نمونه [۳].

از ارائه عددی ویژگی ها و حالت های ژئومکانیکی مخزن، میدان و یا حوضه رسوب گذاری [۳]. علاوه بر بیان توزیع عددی ویژگی های سنگ مخزن (مانند تخلخل و چگالی) و سیستم شکستگی، مدل ژئومکانیکی شامل فشار منفذی، حالت های تنش و ویژگی های مکانیکی سنگ است. یک مدل ژئومکانیکی ساده شامل مقاطع عمقی از پارامترهای الاستیک و یا الاستوپلاستیک، مقاومت سنگ و تنش های زمین مربوط به مقاطع چینه شناسی محلی است.

مولفه ی اساسی یک مدل ژئومکانیکی، اطلاعات در مورد حالت تنش های برجا در مخزن است. این مولفه دارای اهمیت بسیاری است. دیواره ی چاه زمانی دچار ریزش می شود که تمرکز تنش در اطراف محیط چاه از مقاومت سنگ بیشتر می شود و یک گسل، زمانی می لغزد که نسبت تنش برشی به تنش موثر نرمال وارده بر سطح گسل، از مقاومت اصطکاکی آن بیشتر شود [۱]. حالت های تنش موجود در میدان بر اساس وزن لایه های روباره، نیروهای تکتونیکی غالب منطقه و هر گونه تغییر فشاری اعمالی توسط دخالت های انسانی (مانند تولید و تزریق)، ایجاد و تغییر می کند [۵]. محاسبه و اندازه گیری مقدار و جهت تنش در عمق با استفاده از روش های معمول اندازه گیری و با توجه به الگوهای تنش کلی و میدانی منطقه محاسبه و اندازه گیری می شود [۱]. این اندازه گیری ها در هنگام حفاری به عنوان یک مولفه ی بسیار مهم مطرح می شوند. مدل ژئومکانیکی به طور کلی، در سه حالت یک بعدی با مرکزیت چاه، سه بعدی در مقیاس مجموعه مخزن پوش سنگ و در نهایت، چهار بعدی بر اساس برداشت های وابسته به زمان، تقسیم بندی می شود که در ادامه، هر کدام به طور کامل شرح داده شده اند.

## ۲-۱- مدل ژئومکانیکی یک بعدی

مدل یک بعدی ژئومکانیکی بر اساس داده های ثبت شده ی نگارهای درون چاهی، شامل نمودارگیری صوتی (موج برشی و تراکمی)،



شکل ۲ | محاسبه اندازه تنش افقی حداکثر با استفاده از میزان بازشدگی براك آوت [۱۷].

آزمایش یکپارچگی سازند برای نصب لوله جداری و یا LOT<sup>۱۵</sup> است، با این تفاوت که مقداری بهینه شده‌اند. در شکل ۲- مراحل این آزمایش آمده است.

بعد از محاسبه تنش افقی حداقل، با استفاده از میزان بازشدگی ریزش چاه در چاه‌های قائم، می‌توان تنش افقی حداکثر را محاسبه کرد. براساس شکل ۳-، میزان تنش افقی حداکثر محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از جهت بازشدگی ریزش چاه، جهت تنش‌های افقی حداقل و حداکثر مشخص می‌شود. ریزش چاه در جهت تنش افقی حداقل رخ می‌دهد.

برای ارزیابی مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی، از آنالیز پایداری چاه (و یا تولید ماسه) استفاده می‌کنند. در ابتدا، با استفاده از خطوط و شرایط ریزش دیواره و شکست القایی، این پدیده‌ها در دیواره‌ی چاه پیش‌بینی می‌شود و سپس، اتفاقات پیش‌بینی شده با رخدادها ثبت شده در گزارش‌های حفاری یا تحلیل‌های نگارهای تصویری دیواره‌ی چاه، سنجیده و صحت مدل ساخته شده مورد آزمایش قرار می‌گیرد [۳]. شکل ۴- یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی

مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی در مقیاس و ابعاد کل مخزن، میدان و یا حوضه رسوبی، عبارت است از نمایش عددی پارامترهای ژئومکانیکی در سه بُعد. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی در سه بُعد به‌طور معمول از سه روش زیر استفاده می‌شود [۵]:

۱- استفاده از روش‌های عددی که بیشتر برای مدل‌سازی پارامترهایی مانند تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- استفاده از روش مدل‌سازی خصوصیات مخزنی: براساس این روش، پارامترهای ژئومکانیکی با یکی از روش‌های مرسوم در مهندسی نفت مانند زمین‌آمار و یا براساس داده‌های لرزه‌ای در سه

نمودارهای الکتریکی در سال ۱۹۶۵ توسط هاتمن و جانسون<sup>۹</sup> ارائه شد. سایر محققان مانند مٹیو و کلی<sup>۱۰</sup> ۱۹۶۷، ایتون<sup>۱۱</sup> ۱۹۷۵، فاستر و والن<sup>۱۲</sup> ۱۹۶۶ روابط دیگری را ارائه دادند. این تکنیک‌ها بر اساس استفاده از داده‌های لرزه‌ای و میزان نفوذ نمودارهای مورد استفاده، گسترش داده شدند. جدیدترین روش با استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای، تخلخل و میزان رس موجود توسط ابره‌ارت-فیلیپس، هان و زوباک<sup>۱۳</sup> در سال ۱۹۸۹ ارائه شد. به‌عنوان مثال، ایتون (۱۹۷۵، ۱۹۷۶) گزارشی در مورد استفاده از یک توان تجربی به‌همراه تنش نرمال ماتریکس برای پیش‌بینی فشار منفذی ارائه داد. این مقدار تعریف شده، با آزمایش و خطا بر روی داده‌های فشار واقعی محاسبه شده بود. معادله نهایی ایتون (۱۹۷۵) برای محاسبه فشار منفذی با استفاده از مقاومت الکتریکی سازند به‌صورت زیر است:

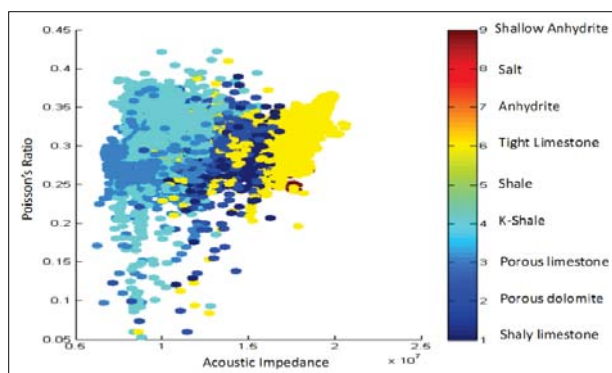
$$P = OBG - [OBG - NHG] \left[ \frac{R_O}{R_n} \right]^n \quad (1)$$

که در آن، P فشار منفذی پیش‌بینی شده، OBG فشار روباره، NHG شیب هیدرواستاتیک نرمال،  $R_O$  مقاومت مشاهده شده،  $R_n$  مقاومت روند تراکم عادی و  $n$  یک تعریف تجربی است.

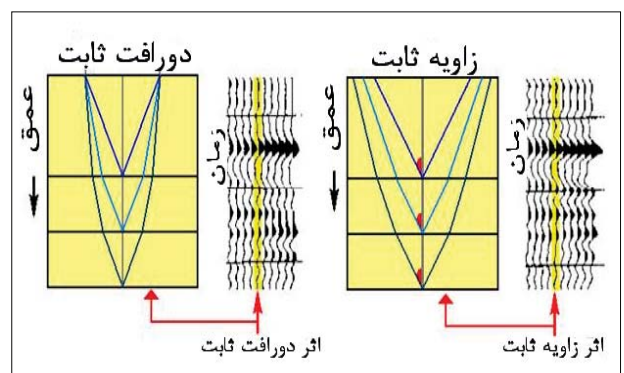
امتداد یکی از تنش‌های اصلی منطقه به‌طور معمول به موازات امتداد چاه قائم است. به‌دست آوردن اندازه تنش‌های اصلی با محاسبه تنش قائم شروع می‌شود. این تنش بر اساس معادله ۲- در یک عمق مشخص برابر با مجموع وزن لایه‌های روباره در آن عمق است. این مقدار برابر است با میزان حاصل ضرب شتاب جاذبه (g) در مجموع چگالی ثبت شده توسط نگار چگالی در امتداد یک چاه قائم.

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

تنش افقی حداقل، به‌صورت مستقیم با استفاده از XLOT<sup>۱۴</sup> و Minifrac Tests قابل اندازه‌گیری است. این آزمایش‌ها بسیار شبیه



شکل ۶ | رسم امپدانس صوتی بر حسب نسبت پواسون برای مشخص کردن گونه‌های سنگ‌شناسی منطقه [۵]



شکل ۵ | تبدیل حوزه دورافت به حوزه زاویه ثابت برای داده‌های قبل از برانبارش [۱۷]



حساب می‌آید. پس برای ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی، استفاده از داده‌های لرزه‌ای بسیار ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

### ۲-۲-۱- مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی و داده‌های لرزه‌ای

پس از انتشار امواج لرزه‌ای در محیط‌های ناپیوسته و پیوسته‌ی سنگی، امواج از ویژگی‌های مختلف سنگ از جمله ویژگی‌های فیزیکی آن تأثیر می‌پذیرند [۹]. بنابراین، با استفاده از جواب دریافتی سیستم زمین و بررسی داده‌ها، ویژگی‌های فیزیکی زمین تخمین زده می‌شود.

ویژگی‌های ژئومکانیکی به‌ویژه مدول‌های الاستیک، به‌طور مستقیم بر روی امواج لرزه‌ای تأثیر گذارند [۱۰]. استفاده از داده‌های لرزه‌ای در سه مرحله‌ی مدل‌سازی مدول‌های الاستیک، فشار منفذی و محاسبه اندازه و جهت تنش‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محاسبه پارامترهای الاستیک<sup>۱۷</sup> سنگ مخزن با استفاده از روش وارون‌سازی الاستیک به‌صورت مستقیم امکان‌پذیر است. این پارامترها به‌صورت دینامیک محاسبه می‌شوند. این روش در سه مرحله زیر تکمیل می‌شود [۱۰ و ۳]:

الف) آنالیز داده‌های چاه برای محاسبه ویژگی‌های الاستیک سنگ و ساخت نمودارهای امیدانس الاستیک

ب) استخراج موجک با استفاده از نمودارهای EI و برابارش با زاویه فرودی

ت) انجام وارون‌سازی دامنه در مقابل دور افت<sup>۱۹</sup> و دامنه در مقابل زاویه<sup>۲۰</sup> با مکعب‌لرزه‌ای

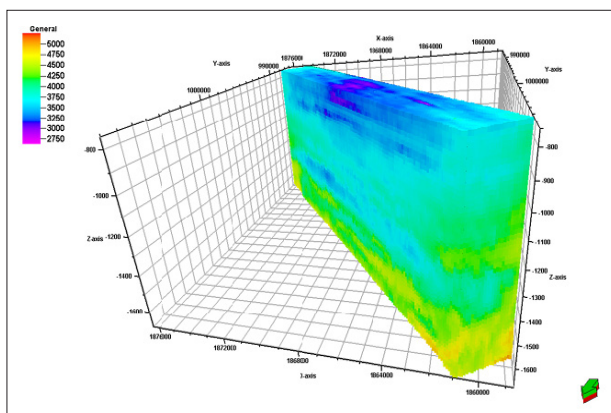
پارامترهای الاستیک دینامیک و برداشت‌های لرزه‌ای مرحله‌ی اول در هنگام ساخت مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی انجام می‌شود. نتایج مرحله اول برای تخمین موجک و انجام مرحله دوم

بعد محاسبه می‌شود؛ این روش بیشتر برای پارامترهای استاتیک و تغییرناپذیر به کار می‌رود.

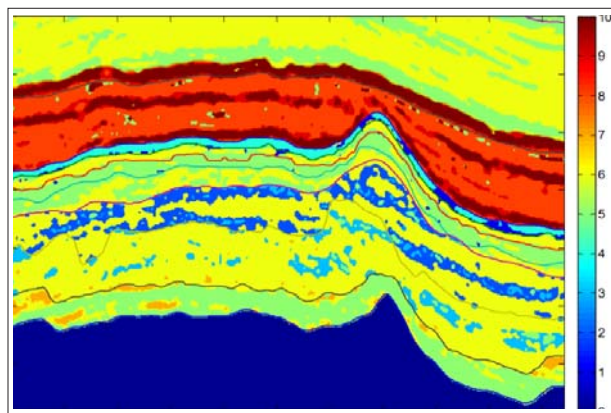
۳- مدل لرزه‌ای ژئومکانیکی: در این نوع مدل‌سازی، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای برداشت شده از میدان، ویژگی‌های ژئومکانیکی به‌طور مستقیم محاسبه و به‌عنوان مدل سه‌بعدی لرزه‌ای ژئومکانیکی ارائه می‌شود.

بررسی مدل‌های عددی در بسیاری از مقالات انجام شده است. لذا از تکرار آن در اینجا صرف‌نظر و به بررسی مدل‌سازی سه‌بعدی لرزه‌ای ژئومکانیکی پرداخته می‌شود. هر چه تعداد چاه‌های حفاری شده در مخزن، میدان و حتی حوضه‌ی رسوبی مورد مطالعه بیشتر باشد، داده‌های مورد نیاز برای شناخت دقیق‌تر پارامترهای ژئومکانیکی بیشتر است؛ در نتیجه، مدل‌های ارائه شده برای پارامترهای ژئومکانیکی از دقت بیشتری برخوردارند. از طرفی، با دقت بالاتری می‌توان پارامترها را با هر یک از روش‌های بالا در سه بُعد محاسبه کرد.

برای محاسبه و ساخت یک مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های پیش‌گفته‌ی اول و دوم و با توجه به اطمینان بالای این مدل، لزوم وجود و استفاده از داده‌های گسترده در مقیاس سه‌بعدی بسیار حیاتی است. این داده‌های گسترده، معمولاً با استفاده از داده‌های برداشت شده توسط نگارها و یا داده‌های هنگام حفاری و یا داده‌های لرزه‌ای زیرسطحی تکمیل می‌شوند [۳]. اما در مراحل اولیه‌ی اکتشاف منابع هیدروکربنی، داده‌ها و اطلاعات بسیار محدود است. این داده‌ها در بهترین حالت، شامل داده‌های برداشت شده‌ی سه‌بعدی لرزه و تعدادی چاه اکتشافی است [۳]. با توجه به این داده‌ها (جدول ۱-۱)، فقط امکان ساخت مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی قابل اطمینان وجود دارد. این مدل ساده‌ی ژئومکانیکی اولین پاسخ ژئومکانیکی مخزن به



شکل ۸ | مکعب فشار منفذی بر حسب PSI (۱۶).



شکل ۷ | مقطع سنگ‌شناسی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و چاه‌نگاری و استفاده از کلاس‌بندی بی‌زین [۵]



$$V_p = \left[ \frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$V_s = (\mu/\rho)^{1/2} \quad (4)$$

$$g = \frac{\gamma - 2}{2(\gamma - 1)} \quad (5)$$

$$\gamma = (V_p/V_s)^2 = \frac{K}{\mu} + 4/3 \quad (6)$$

که در آن  $V_p$ ،  $V_s$  و  $\theta$  به ترتیب سرعت موج P و S و نسبت پواسون است.

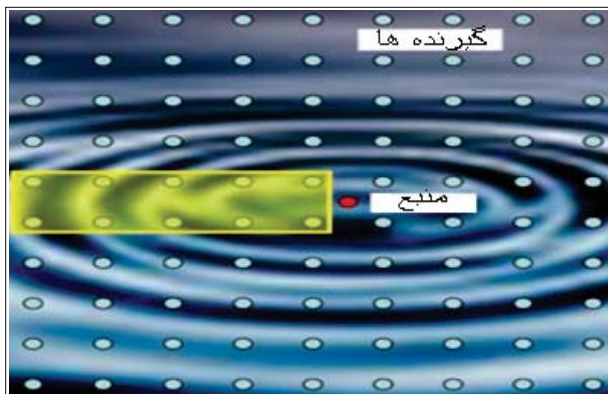
فرآیند AVO با حل معادله ژئوپریتر<sup>۱۱</sup> همراه است، این معادله، صفحه‌ی دقیق دامنه‌های یک موج بازتاب شده‌ی P را به صورت تابعی از زاویه محاسبه می‌کند، اما فهم مستقیم و درستی از اینکه چگونه دامنه‌ها به پارامترهای مختلف فیزیکی مربوط می‌شوند را ارائه نمی‌دهد. در طی دهه‌های گذشته تقریب‌هایی برای معادله ژئوپریتر ارائه شده است؛ اولین تقریب به وسیله بورتفیلد<sup>۱۲</sup>، به دست آمد. اما دو تقریب مشهور ارایه شده عبارتند از:

الف) تقریب آکی-ریچارد و فرایسر<sup>۱۳</sup>: فرمول ارائه شده توسط بورتفیلد به وسیله‌ی ریچارد و فرایسر و همچنین آکی و ریچارد بهبود داده شد. تقریب آکی، ریچارد و فرایسر جذاب بود زیرا بر اساس سه مولفه معرفی شده بود که مولفه اول با سرعت موج P، مولفه دوم با چگالی و مولفه سوم با سرعت موج S مرتبط بودند. فرمول آن‌ها به صورت زیر است.

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] + \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \frac{V_s^2 \Delta \rho}{V_p^2 \rho} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} [\tan^2 \theta - \sin^2 \theta] \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}, \text{ where } \theta_i = \arcsin \left[ \left( \frac{V_{p2}}{V_{p1}} \right) \sin \theta_i \right]$$

$\theta_1$  زاویه برخورد موج تراکمی با سطح جدایش و  $V_{p1}$  و  $V_{p2}$  سرعت لایه‌های افقی ۱ و ۲ است.



شکل ۹ نحوه برداشت داده‌های سه‌بعدی مر سوم و روش Wide-Azimuth. در شکل نوار باریک مستطیلی نشان‌دهنده نحوه برداشت سه‌بعدی مر سوم است [۱۷].

استفاده می‌شوند [۱۱]. در واقع مراحل دوم و سوم، مراحل دوگانه وارون‌سازی هستند. در ابتدا موجک لرزه ای با استفاده از داده‌های نمودار امپدانس الاستیک تخمین زده می‌شود. تخمین طیف دامنه و فاز موجک فقط با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و یا با استفاده از کنترل چاه امکان‌پذیر است [۱۲]. این داده‌ها با روش‌های آماری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و سپس، طیف دامنه و فاز تخمین زده می‌شود. وجود یک یا چند چاه که در آن‌ها داده‌های نمودارهای صوتی و چگالی موجود باشد، امکان تخمین بهتر موجک را فراهم می‌آورد. در مرحله بعد، موجک ساخته شده برای ساختن بازتاب لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و در نهایت، امپدانس صوتی محاسبه شده از بازتاب لرزه‌ای با واقعیت سنجیده می‌شود؛ در صورتی که تخمین موجک اشتباه باشد، تفاوت زیادی مشاهده می‌شود و موجک دیگری انتخاب خواهد شد. این فرآیند تا زمان انتخاب بهترین موجک ادامه خواهد داشت. سپس، با بهترین موجک استخراج شده، مرحله‌ی سوم وارون‌سازی و محاسبه پارامترهای الاستیک، انجام می‌شود [۱۰]. در مرحله سوم، مکعب وارون شده لرزه‌ای AVO پیشنهاد می‌شود. در این حالت، نتایج AVO در نظر گرفته می‌شود و سپس، وارون‌سازی داده‌ها برای رسیدن به این نتایج، با استفاده از موجک استخراج شده در مرحله دوم، انجام می‌پذیرد. فرآیند AVO طی مراحل زیر انجام می‌پذیرد [۱۰]:

### دامنه در مقابل دور افت

هدف اصلی تحلیل AVO به دست آوردن چگالی، سرعت موج P و سرعت موج S است. بر اساس روابط فیزیکی سنگ، سرعت موج P و S و مقدار نسبت پواسون از روابط زیر محاسبه می‌شود:

داده‌های وابستگی <sup>۱۴</sup>	داده‌های نمودارگیری	داده‌های حفاری	داده‌های لرزه‌ای
Microfrac, XLOT	مقاومت الکتریکی سازند	گزارش‌های چاه اکتشافی	مقطع‌های دو بعدی
Kicks and Losses	اشغمی گاما	بررسی‌های هدف‌دار	مکعب سرعت سه بعدی
کنترل ورود گاز و سیال	قطر سنجی‌های چند بازو	اطلاعات منه	تفسیر ساختاری
Cavings	صوتی P و S	نمودارهای زمان عمق	نقشه‌ی نشانگرهای لرزه‌ای
مغزگیری	چگالی بالک	وزن گل	رابطه‌ی زمان عمق
فشارهای به دست آمده از تست‌های سازندی مانند RFT و MDT	تصویر دیواره‌ی چاه	نمودارگیری از گل و سیال حفاری	
NPT			
↓			
مدل مکانیکی زمین یا مدل ژئومکانیکی			
جهت‌های تنش	مقطع تنش Sv, Sh, SH	مقطع فشار منفذی	مقطع مقاومت سنگ
		پارامترهای الاستیک	گسل‌ها
			سر سازندها
↓			
طراحی حفاری چاه و افزایش عملکرد آن			



در سه بُعد رسم می‌شوند و با استفاده از کلاس‌های معرفی شده برای گونه‌سنگ‌های مختلف، میدان مورد بررسی به گونه‌سنگ‌های مورد نظر طبقه‌بندی می‌شود [۵].

روش طبقه‌بندی داده‌های منطقه بر اساس پیچیدگی و توزیع آماری داده‌ها انتخاب می‌شود. هرچند در بررسی‌های زمین‌شناسی با توجه به ویژگی‌های آماری داده‌های لرزه‌ای می‌توان از روش بیزین<sup>۲۵</sup> به عنوان یک نوع روش وارون‌سازی برای طبقه‌بندی داده‌های منطقه استفاده کرد [۱۳ و ۱۵].

به‌طور مثال در شکل ۶- یک نمودار متقاطع امیدانس صوتی در مقابل نسبت پواسون نشان داده شده که برای یک چاه با گونه‌سنگ‌های مشخص رسم شده است. سپس، با توجه به طبقه‌بندی بیزین به عنوان یک روش وارون‌سازی کلاسه‌بندی، میدان مورد مطالعه به گونه‌سنگ‌های مشخص شده تقسیم شده است. در شکل ۷ این تقسیم‌بندی مشخص شده است.

#### محاسبه مقاومت سنگی در سه بُعد

مرحله‌ی بعدی در مدل سه‌بُعدی ژئومکانیکی، محاسبه‌ی مقاومت فشاری محصور نشده ی<sup>۲۶</sup> گونه‌سنگ‌های منطقه است؛ بر اساس روابط به‌دست آمده در مدل یک‌بُعدی ژئومکانیکی، این مقدار در سه بُعد محاسبه می‌شود. روابط محاسبه مقاومت فشاری گونه‌سنگ‌های منطقه، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و نمودارهای چاه اعم از نمودارهای صوتی و مقطع‌های پیوسته‌ای که به‌طور مستقیم از محاسبات این نمودارها حاصل می‌شوند، به‌دست می‌آید [۱۴]. مقاومت کششی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشارشی آن‌ها و معمولاً معادل یک‌دهم مقاومت فشارشی در نظر گرفته می‌شود. زاویه‌ی اصطکاک بر اساس روابط کالیبره شده‌ی آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. این زاویه تابعی از تخلخل و کانی‌شناسی است [۱۴].

#### فشارمنفدی و تنش‌ها

بعد از مدل کردن پارامترهای الاستیک و تخمین اندازه مقاومت فشارشی و کششی در منطقه، مدل کردن اندازه تنش‌های اصلی و مقدار فشار منفدی در سه بُعد با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. تنش روباره یا همان تنش قائم (SV) با جمع چگالی سازندها از سطح تا عمق مورد نظر به اضافه‌ی وزن هر واحد هوا در ستون هوای قرار گرفته در بالای میدان، محاسبه می‌شود. این مقدار چگالی بر اساس مکعب چگالی خروجی از وارون‌سازی دامنه در برابر دورافت به‌دست می‌آید.

ب) تقریب شوئی<sup>۲۴</sup>: از آنجایی که تقریب در معادله ۷- از سرعت موج P و S و چگالی استفاده می‌کند، شوئی در سال ۱۹۸۵ یک تقریبی از معادله ژئوپریتر ارائه داد که در آن، از سرعت موج P و چگالی و نسبت پواسون استفاده می‌شد (معادله ۸).

$$R(\theta) = R_p + \left[ R_p A_0 + \frac{\Delta \theta}{(1-\theta)^2} \right] \sin^2 \theta + \frac{\Delta V_p}{2V_p} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \sigma$$

$$R_p = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{1}{4} \frac{\Delta V_p}{V_p} \right) = \frac{5}{8} \frac{\Delta V_p}{V_p}, \Delta \theta = \theta_2 - \theta_1, A_0 = B - 2(1+B) \frac{1-2\theta}{1-\theta}, B = \frac{\Delta V_p / V_p}{\frac{\Delta \rho}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho}}, \theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$
(۸)

صورت کلی تقاربت معادلات ژئوپریتر به ویژه تقریب شوئی به صورت  $R(\theta) = R_p + G \sin^2 \theta$  می‌باشد. این معادله بر اساس زاویه بازتابش تعریف شده است، اما ثبت داده‌های لرزه‌ای قبل از برابارش در یک دورافت ثابت می‌باشد. بنابراین، باید داده‌ها از حوزه‌ی دورافت به حوزه‌ی زاویه تبدیل شوند (شکل ۵-). این تبدیل با استفاده از معادله ۹- انجام می‌شود.

$$\sin \theta = \frac{XV_{INT}}{tV_{RMS}^2}$$
(۹)

X مقدار دورافت به متر،  $V_{int}$  سرعت بازه مورد محاسبه به متر بر ثانیه، t زمان به ثانیه و  $V_{RMS}$  میانگین سرعت کل لایه‌هاست.

سپس، با استفاده از حل معادلات، مقادیر سرعت موج‌های برشی و تراکمی و چگالی به‌دست می‌آید. این خروجی AVO برای انجام وارون‌سازی به کار می‌رود و برای کل میدان در هر عمق، سرعت امواج لرزه‌ای و چگالی مشخص می‌شود.

با استفاده از خروجی فرآیند وارون‌سازی AVO، پارامترهای الاستیک دینامیکی مورد نظر برای مدل سه‌بُعدی محاسبه می‌شود. پارامترهای محاسبه شده، با استفاده از روابط تبدیل پارامترهای دینامیک به استاتیک برای هر پهنه مکانیکی که در مدل یک‌بُعدی به‌دست آمده‌اند، به پارامترهای استاتیک تبدیل می‌شوند؛ از طرفی، در هر نوع سنگ، میزان نسبت پواسون استاتیک و دینامیک برابر است؛ علت این امر بر اساس فرضی است که از نتایج آزمایشگاهی حاصل شده و بر این اساس، نتایج اختلاف میان نسبت پواسون استاتیک و دینامیک قابل چشم‌پوشی است [۱]. لازمه‌ی تبدیل پارامترهای دینامیک به استاتیک در سه بُعد، تفکیک و پهنه‌بندی مکانیکی سه‌بُعدی مخزن است.

پهنه‌های مکانیکی میدان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای تفکیک می‌شوند. بنابراین، با استفاده از نمودارهای متقاطع لرزه‌ای معرفی شده، برای تفکیک جنس سنگ، گونه‌سنگ‌های مختلف در چاه‌ها کلاس‌بندی می‌شوند. سپس، این نمودارهای متقاطع استفاده شده،

استفاده از روش Azimuthal AVO، جهت تنش‌های افقی<sup>۳۱</sup> بر اساس شکاف‌های (نوع گسلش) موجود در منطقه مشخص می‌شود [۱۸]. اندازه تنش‌های افقی با محاسبه نسبت اختلاف تنش‌های افقی بر اساس وارون‌سازی لرزه و خصوصیات سنگ در مناطق شکافدار قابل تخمین است [۱۷]. با تخمین این مقدار در سه بعد با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و سپس، کالیبره کردن این تخمین با داده‌های چاه بر اساس مقدار تنش‌های افقی اندازه‌گیری شده در آن، می‌توان اندازه تن‌های افقی را در سه بعد میدان محاسبه کرد.

در صورت وجود داده‌های آزمون باریک<sup>۳۲</sup>، توانایی محاسبه مستقیم اندازه و جهت تنش‌های افقی وجود ندارد و داده‌های مربوط به تنش‌های افقی با استفاده از روش‌های عددی مانند المان محدود محاسبه می‌شوند [۱۹]. روش دیگری برای محاسبه‌ی اندازه تنش‌های افقی وجود دارد؛ در این روش، جهت تنش‌ها برابر با جهت کلی میدان در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از رژیم حاکم بر میدان، روابطی میان تنش‌های اصلی برقرار می‌شود. سپس، با استفاده از این روابط، اندازه‌ی تنش‌ها در سه بعد قابل مدل‌شدن است [۱۱].

#### نتیجه‌گیری

توجه به اهمیت بحث ژئومکانیک در طراحی‌های مهندسی نفت ضروری است. بر اساس داده‌های ژئومکانیکی، برنامه توسعه یک میدان، از مکان‌یابی محل استقرار چاه‌ای توسعه‌ای تا برنامه ازدیاد برداشت، مشخص می‌شود. با توجه به اهمیت سودآوری عملیات مهندسی نفت، کاهش هزینه‌های اجرایی عملیات مختلف بسیار قابل توجه است. از طرفی، استفاده از مطالعات ژئومکانیکی کاهش محسوسی را در میزان هزینه‌های اجرایی به وجود می‌آورد. بنابراین، توجه صنعت نفت به مطالعات ژئومکانیکی در بالادستی نفت بسیار افزایش پیدا کرده است.

در مراحل اولیه اکتشاف یک میدان، دامنه اطلاعات موجود نسبت به کل میدان محدود است؛ این اطلاعات به داده‌های چند چاه اکتشافی و یک مکعب لرزه‌ای محدود می‌شود. از این رو، استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی برای شناسایی بهتر میدان مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه‌های موجود و توانایی گسترش مدل ژئومکانیکی در سه بعد، این ویژگی را برای مهندسان نفت به وجود می‌آورد که با پیش‌بینی شرایط مکانیک سنگی میدان، طراحی‌های مورد نیاز برای بهره‌برداری از مخازن، از انتخاب محل و مسیر چاه تا نرخ تولید از مخزن و تزریق به آن را با اطمینان بیشتری انجام دهند.

با فرض تأثیر فشار منفذی بر میزان فشردگی و تخلخل سازند در پی آن، تأثیرگذاری بر سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ، با کالیبره کردن تغییرات فشار منفذی با تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای، به کمک اطلاعات محدود در چاه‌های منطقه، می‌توان مکعب فشار منفذی را محاسبه کرد. این روش به یک میدان سرعت دقیق<sup>۳۷</sup>، با وضوح تغییرات بالا<sup>۳۸</sup> نیاز دارد [۱۵]. در این روش، میزان فشار منفذی به صورت کمی اندازه‌گیری می‌شود. بدین منظور، با استفاده از داده‌های سرعت برانبارش و وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای، مدل سرعت مناسب فشار منفذی تولید می‌شود. سپس، برای تبدیل داده‌های سرعت تولید شده به فشار منفذی، از رابطه باورز کالیبره شده با چاه‌های منطقه استفاده می‌شود [۱۶]. رابطه باورز به صورت ساده عبارت است از:

$$\sigma = \left( \frac{V - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (10)$$

که در آن،  $V$  سرعت بر حسب ft/s و  $\sigma$  تنش موثر قائم بر حسب PSI است و  $A$  و  $B$  پارامترهایی هستند که می‌توان آن‌ها را با کالیبره کردن داده‌های سرعت در مقابل تنش موثر قائم به دست آورد. سپس، مکعب تنش قائم، با استفاده از معادله ۲- و مکعب چگالی محاسبه می‌شود. از طرفی، طبق اصل ترزاقی<sup>۳۹</sup>، در حالت ساده تنش قائم موثر از تفاضل تنش قائم کل و فشار منفذی حاصل می‌شود. با داشتن این تنش قائم کل و موثر، مکعب فشار منفذی به دست می‌آید. (شکل ۸).

$$\sigma = S - P_p \quad (11)$$

تخمین جهت تنش‌های افقی با استفاده از داده‌های برداشتی با روش آزمون پهن<sup>۳۰</sup> انجام پذیر است [۵]. در این روش، امواج مانند رها کردن سنگ در یک برکه که در داخل زمین منتشر و در همه مسیرها به خارج از منبع گسیل می‌شوند. برای ثبت میدانی امواج به اندازه کافی، باید در تمام میدان گیرنده وجود داشته باشد. برآوردهای متعارف سه‌بعدی تنها در نوار باریکی که در شکل ۹- به صورت نوار مستطیل شکل نمایش داده شده است، به ثبت داده می‌پردازد [۱۷]. در چنین برداشتهایی برای رسیدن به بهترین تصویر از زمین، دو گروه داده‌ی برداشتی از آزمون پهن و نمونه‌برداری به اندازه کافی مترکم که بتوان آن را برای نشان دادن کل لرزه میدان استفاده کرد، مورد نیاز است. نحوه برداشت داده‌ها بسته به شرکت پیمانکار می‌تواند تغییر کند. بعد از برداشت داده‌های آزمون پهن با





اطلاعات برداشتی از میدان، با ویژگی‌های ژئومکانیکی، برای ارائه مدلی با اطمینان بسیار، ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی، باید به این نکته توجه کرد که مدل ساخته شده بر اساس داده‌های محدود به چاه و مقطع‌های لرزه‌نگاری است. به همین دلیل امکان عدم تطابق مدل تخمینی با مقدار واقعی وجود دارد. از این رو مدل ژئومکانیکی با استفاده از داده‌های حین حفاری، به روز می‌شود و اطلاعات و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از خطرات پیش‌روی حفاری را ارائه می‌دهد. ■

برداشت‌های لرزه‌ای بر اساس زمان ارسال و دریافت موج لرزه‌ای است. گذر این موج از لایه‌های سنگی با تأثیرپذیری از خصوصیات مکانیک‌سنگی محیط همراه است. لذا، می‌توان ویژگی‌های ژئومکانیکی را به‌طور مستقیم بر اساس برداشت‌های لرزه‌ای انجام شده تخمین زد. با توجه به مطالعات انجام شده، این تخمین، محاسباتی نزدیک به واقعیت را ارائه می‌دهد. بنابراین، مطالعه و بررسی ارتباط داده‌های لرزه‌ای به‌عنوان اولین

## پانویس‌ها

- |  |   |  |
|--|---|--|
| <sup>1</sup> Marc Mainguy et al.           | <sup>13</sup> Eberhart-Phillips, Han and Zoback | Approximation                                      |
| <sup>2</sup> Michael Bruno et al.          | <sup>14</sup> Extended Leakoff Tests            | <sup>24</sup> Shuey                                |
| <sup>3</sup> Sandrine Vidal-Gilbert et al. | <sup>15</sup> Leakoff Tests                     | <sup>25</sup> Bayesian Classification              |
| <sup>4</sup> Sandrine Vidal-Gilbert et al. | <sup>16</sup> Validation Data                   | <sup>26</sup> Unconfined Compressive Strength      |
| <sup>5</sup> Ron Schmid et al.             | <sup>17</sup> Elastic Inversion                 | <sup>27</sup> Velocity Spectrum                    |
| <sup>6</sup> Safdar Khan et al.            | <sup>18</sup> Elastic Impedance                 | <sup>28</sup> High Resolution                      |
| <sup>7</sup> Li Qiuguo et al.              | <sup>19</sup> Amplitude Versus Offset (AVO)     | <sup>29</sup> Terzaghi                             |
| <sup>8</sup> Mechanical Earth Model        | <sup>20</sup> Amplitude Versus Angle (AVA)      | <sup>30</sup> Wide-Azimuth                         |
| <sup>9</sup> Hottmann & Johnson            | <sup>21</sup> zoeppritz equation                | <sup>31</sup> Differential Horizontal Stress Ratio |
| <sup>10</sup> Matthews & Kelly             | <sup>22</sup> Bortfield, 1961                   | <sup>32</sup> Narrow-Azimuth                       |
| <sup>11</sup> Eaton                        | <sup>23</sup> The Aki, Richards and Frasier     |  |
| <sup>12</sup> Foster and Whalen            |   |  |

## منابع

- [1] D. Zoback, Mark. Reservoir Geomechanics. New York : Cambridge University Press, 2007.
- [2] Geomechanics, Wikipedia. wikipedia. [Online] March 7, 2009. <http://en.wikipedia.org/wiki/Geomechanics>.
- [3] Geomechanics, Schlumberger. Schlumberger Corporation. [Online] 2011. <http://www.slb.com>.
- [4] Baker Hughes. 3D Geomechanical Modeling Adjacent to Salt Bodies. s.l. : Baker Hyghes, 2012.
- [5] Building a Seismic-Driven 3D Geomechanical model in a deep carbonate Reservoir. Mita Sengputa, Janchun Dai, Stefano Volterrani, Nader Dutta, Narhari Sriniv as Rao, Bashar Al-Qadeeri, Vijaya Kumar Kidambi. 2011, SEG, Vol. Annual Meeting.
- [6] Parameter estimation in a One-dimensional Anelastic Medium. Dahl, T., and Ursin, B. 1991, Journal of Geophysical Research, Vol. 96, pp. 20217-20233.
- [7] Analysis of Salt Creep and Well Casing Damage in Hight Prssure and Hight Temperature Environments. Kang Lao, Micheal S. Bruno, Vahid Serajian. Houston, Texas, USA : s.n., May 2012. Offshore Technology Conference.
- [8] 3-D Geomechanical Modeling and Wellbore Stability Analysis in Abu Butabul Field. Li Qiuguo, Xing Zahng, Khalid Al-Ghamari, Labib Mohsin, Fadi Jiroudi, Ahmed Al Rawahi. Abu Dhabi, UAE : s.n., November 2012. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference.
- [9] Computation of Synthetic Seismograms with the Reflectivity. Fuch, K., and Muller G. 1971, Geophys. J. R. Astr., Vol. 23, pp. 417433-.
- [10] Robert E. Sheriff, Lloyd P. Geldart. Exploration Seismology. United States of America : Cambridge University Press, 1995.
- [11] Seismic Derived Geomechanical Properties for Shale Gas Exploitation. Ron Schmid, Darren Schmidt. 2011. Recovery – 2011 CSPG CSEG CWLS Convention .
- [12] Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. Castagna, J.P., Batzle, M.L., and Eastwood, R.L. 1985, Geophysics, Vol. 50, pp. 571581-.
- [13] Advantages of Integrating Geomechanics Modeling and Hydraulics Modeling in Well Planing and Execution. Virgil Hargis, William Fowler. Galveston, Texas, USA : s.n., June 2012. SPE Deepwater Drilling and Completions.
- [14] Aspects of rock physics from laboratory and log data that are important to. Gregory, A.R. 1977. AAPG memoir 26.
- [15] Pore Pressure Prediction Using 3D Seismic Velocity Data: A case study, A carbonate Oil Field, SW Iran. Ehsan Nosrat, Abdolrahim Javaherian, Mahmoud Reza Torabi, Homayoun Behzad Asiri. May 2010, Journal of seismic exploration.
- [16] Velocity based pore pressure prediction—A case study at one of the Iranian southwest oil fields. Hamidreza Soleymani, Mohamad-Ali Riahi. September 2012, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vols. Volumes 94–95, pp. Pages 40–46.
- [17] CGGvertias. [Online] CGG, 2013. <http://www.cggveritas.com/>.
- [18] Towards an optimal workflow for Azimuthal AVO. David Gray, Shangxu Wang. Calgary, Alberta, Canada : s.n., 2009. Frontiers + Innovation – 2009 CSPG CSEG CWLS Convention.
- [19] Wikel, Kurtis R. 3-DIMENSIONAL GEOMECHANICAL MODELING OF A TIGHT GAS RESERVOIR, RULISON FIELD, PICEANCE BASIN, COLORADO. s.l. : Colorado School of Mines, 2008.
- [20] Aki, K., and Richards, P.G. Quantitative Seismology. s.l. : W.H. Freeman and Co., 1979.