

# کاربرد ضرایب الاستیک (LMR) در تعیین خصوصیات مخزنی در محیط آزمایشگاهی و انطباق با خطوط لرزه‌ای در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

پژوهش نفت

سال هفدهم  
شماره ۲-۵۶  
صفحه ۱۳۹-۱۳۰، ۱۳۸۶

جعفر ولی\*، عزت‌اله کاظم‌زاده و حسام آلوی بختیاری  
پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مطالعات اکتشاف و تولید  
valij@ripi.ir

## چکیده

مطالعات فیزیک سنگ را می‌توان به بخش‌های تئوری، آزمایشگاهی و کاربرد آن در تحلیل داده‌های لرزه‌ای تقسیم کرد. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و تحلیل آن، نقشی حیاتی در اکتشاف و توسعه میدان‌های نفتی دارد. اندازه‌گیری خصوصیات لرزه‌ای سنگ‌های مخزن، اساس فیزیکی مورد نیاز برای لرزه‌شناسی اکتشافی و تفسیر و آشکارسازی جنس سنگ به همراه هیدروکربن، نظارت و مشاهده تغییرات مخزن و فرایندهای بازیافت بهینه نفت را فراهم می‌آورد. در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از نمونه‌های مغزه سازندهای مورد مطالعه با نوع ماسه سنگی و سنگ آهک برای بررسی‌های اولیه استفاده شده است. ابتدا با مطالعه نگارهای پتروفیزیکی و زمین‌شناسی برای سازند موردنظر در عمق‌های خاص، مغزه‌هایی به صورت پلاگ تهیه شد. سپس پارامترهای فیزیکی از قبیل چگالی، تخلخل و تراوایی نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین شدند. سپس اندازه‌گیری سرعت‌های امواج تراکمی و برشی نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع از سیال در فشارهای مختلف و به‌ویژه در شرایط مخزن صورت گرفت. دامنه امواج در یک ناحیه متخلخل است به طوری که در این ناحیه نمی‌توان به کمک تغییرات

امپدانس صوتی، جداسازی بازتابنده‌ها را به خوبی انجام داد. بنابراین می‌بایست از روش‌های دیگر همانند روش LMR با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت نمونه‌ها استفاده نمود. بر روی ۴۰ نمونه پلاگ از ۴ حلقه چاه اکتشافی در یکی از مخازن جنوب غرب ایران، مقادیر پارامترهای LMR مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شدند. از طرفی مقادیر پارامترهای LMR داده‌های لرزه‌ای به کمک سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در مرحله پیش بر انبارش (Pre Stack) بازتاب‌پذیری امواج تعیین شدند. با استفاده از معکوس لرزه‌ای بازتاب‌پذیری امواج به تخمین امپدانس‌های S و P پرداخته شد که بتوان مقاطع لرزه‌ای با پارامترهای  $\mu, \rho$  و  $\mu, \rho$  را ایجاد کرد. همبستگی خوب بین نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی فیزیک سنگ و داده‌های پیش بر انبارش لرزه‌ای و همچنین داده‌های نمودار چاه، برای نوع جنس سنگ وجود دارد هرچند این روش یک روش مطمئن برای تعیین و جداسازی اشباع سیالات مخزن (آب و نفت) نیست.

واژه‌های کلیدی: سرعت‌های امواج تراکمی و برشی، ماسه سنگ، سنگ آهک، نسبت پواسون، ضرایب لامه، پیش بر انبارش

## مقدمه

برای ارزیابی دقیق تأثیر پارامترهای مخزن بر روی خواص الاستیک سنگ‌های مخزن، تئوری فیزیک سنگ به همراه انجام عملیات آزمایشگاهی لازم و ضروری است. نتایج آزمایشگاهی باید به وسیله تئوری‌ها تفسیر و مدل‌سازی شوند تا به عنوان اطلاعات ورودی برای تفسیر لرزه‌ای به کار روند [۱].

اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت امواج سنگ‌های مخزن، یکی از راه‌های اساسی مورد نیاز برای شناسایی و آشکارسازی جنس سنگ است. اگرچه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در مقیاس بسیار کوچکی، خصوصیات مخزن را بررسی می‌کند ولی استفاده توأم از آن و نگارها و مقاطع لرزه‌ای در توصیف مخزن بسیار کارآمد هستند. محدودیت مذکور را می‌توان با مغزه‌گیری‌های بیشتر از نقاط مختلف سازند کاهش داد.

یکی از راه‌های تعیین جنس سنگ، محاسبه و تحلیل ضرایب الاستیک می‌باشد. برای تعیین جنس سنگ در یک محیط همگن و همسان‌گرد علاوه بر نیاز به اطلاعات مربوطه به سرعت‌های انتشار امواج P و S، چگالی سنگ نیز باید معلوم باشد [۲]. ابتدا مقادیر ضریب پواسون بر حسب سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در شرایط خشک و اشباع برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. پس از رسم مقادیر ضریب پواسون بر حسب تخرخل و یا نسبت سرعت‌های امواج برشی و تراکمی و نظایر آن مشاهده می‌شود که نمونه‌ها بر حسب نوع جنس سنگ به سادگی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. همچنین ضرایب لامه با استفاده از داده‌های سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در شرایط اشباع از سیال مخزن برای تمامی نمونه‌ها محاسبه شده است. طبق تعریف مقدار (Incompressibility)  $\lambda$  به شاره درون حفره و  $\mu$  (Rigidity) نیز به نوع ماتریکس سنگ حساس می‌باشد. مقادیر ضریب پواسون و لامه با هدف تفکیک نوع جنس سنگ از نمونه‌ها به دست می‌آید [۳].

اگر عمل معمول پردازش داده‌های لرزه‌ای پس از انبارش را در تعیین امپدانس صوتی مد نظر قرار دهیم و با نادیده گرفتن اثر AVO در مقاطع لرزه‌ای، می‌تواند نتایجی در عدم تطابق بین داده‌های لرزه و لاگ چاه و همچنین نتایجی در

تعیین امپدانس صوتی ایجاد شود [۴]. روش تغییرات دامنه بر حسب فاصله AVO، روشی مناسب برای تعیین حجم سیال و نسبت پواسون می‌باشد. دامنه بازتابنده با زاویه فرود در مرز بین دو لایه به خواص الاستیکی و فیزیکی آن نواحی بستگی دارد [۵]. معادله Zoepprits، ضریب عبور و بازتاب را برای یک موج به صورت تابعی از زاویه فرود نشان می‌دهد، هر چند این معادله رابطه دامنه را با پارامترهای فیزیکی مختلف به خوبی نشان نمی‌دهد، ولی یک مقدار تخمینی از معادله Zoepprits برای تحلیل ساده‌تر دامنه به وجود می‌آورد [۶]. برای رسیدن به مفاهیم کامل معادله Zoepprits، دانستن مقادیر واقعی و دقیق سرعت موج P، چگالی و نسبت پواسون الزامی است [۷].

Smith & Gidlow به کمک پردازش برانبارش CMP و با تصحیح CDP و تعیین بازتابنده‌های امواج S و P و تحلیل نسبت پواسون، توانسته‌اند به خصوصیت تفکیک نوع جنس سنگ مخزن به همراه تخرخل در مقاطع لرزه‌ای دست یابند [۸]. Goodway و همکاران، روش LMR را برای تعیین نوع جنس سنگ و تغییرات جنس سیال مخزن مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۹]. در این روش به صورت تخمینی بازتابنده‌های امواج S و P را به امپدانس این امواج تبدیل کرده و سپس تخمین امپدانس به حاصل ضرب ضرایب لامه در چگالی تبدیل می‌شود. مهم‌ترین اطلاعات مفید این روش همان تعیین سختی و تراکم‌پذیری است که به نوع سیال حفرات و ماتریکس سنگ وابسته است.

در واقع به کمک این روش اطلاعات و مشخصه مشابه که توسط نمونه‌های پلاگ به دست آمده است را می‌توان به مقاطع لرزه‌ای تعمیم داد. روش فوق در مطالعه مدل‌سازی مخزن و کاهش ریسک خطای تخمین خصوصیات مخزن نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در این بررسی ابتدا در مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی فیزیک سنگ نمونه‌های مغزه و در مورد ضرایب الاستیک و کاربرد آن‌ها در چگونگی تعیین نوع جنس سنگ و همچنین تخرخل نمونه‌های آزمایشگاهی و در بررسی وسیع‌تر در امتداد یک خط لرزه‌ای دو بعدی توضیحاتی ارائه شده است. سپس در مورد آماده‌سازی و اندازه‌گیری ابعاد

به بازگشت را خاصیت کشسانی جسم می‌گویند. در حیطه کشسانی نیز دو پارامتر تنش<sup>۱</sup> و کرنش<sup>۲</sup>، که تنش بر اثر اعمال نیرو بر واحد سطح و کرنش نیز تغییر وضعیت جسم از حالت اولیه بر اثر اعمال تنش به وجود می‌آید و بنا بر تعریف در حیطه کشسانی با حذف نیرو، شکل به حالت اولیه باز می‌گردد. بر اساس قانون هوک رابطه بین تنش و کرنش در یک جسم در محیط کشسانی به صورت خطی است [۱۰]. یکی از راه‌های تعیین جنس سنگ با استفاده از تعیین ضرایب الاستیک می‌باشد. برای تعیین ضرایب الاستیک در یک محیط همگن و همسان گرد به سرعت‌های انتشار سرعت‌های امواج P و S نیز نیاز می‌باشد، چگالی سنگ نیز باید معلوم باشد به همین منظور مقادیر ضرایب الاستیک بر حسب سرعت‌های امواج تراکمی، برشی و چگالی به صورت روابط (۱) بیان شده است [۲]:

$$K = \rho(V_p^2 - 4/3V_s^2) \quad (1-1)$$

$$\mu = \rho V_s^2 \quad (2-1)$$

$$\delta = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2(V_p/V_s)^2 - 2} \quad (3-1)$$

$$E = 2\mu(1 + \delta) \quad (4-1)$$

که در آن  $V_p$  سرعت موج طولی،  $V_s$  سرعت موج عرضی،  $\rho$  چگالی،  $K$  مدول بالک،  $\mu$  مدول برشی،  $\delta$  نیز نسبت پواسون و  $E$  مدول یانگ می‌باشد.

طبق تعریف، به نسبت تغییر قطر یا پهنای جسم به تغییر طول جسم (در امتداد نیروی اصلی)، در شرایط الاستیک ضریب پواسون گفته می‌شود و به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\delta = \frac{-\Delta W/W}{-\Delta L/L} \quad (2)$$

که در آن  $-\Delta W/W$  نسبت تغییرات پهنای جسم و  $-\Delta L/L$  نسبت تغییرات طول جسم تعریف می‌شود.

بر طبق رابطه (۳-۱)، مقادیر مختلف نسبت سرعت‌های تراکمی و برشی و نسبت پواسون می‌تواند به صورت روابط (۳) نوشته شود [۱۱]:

$$V_p/V_s = \sqrt{2} \quad \delta = 0 \quad (1-3)$$

$$V_p/V_s = 1.5 \quad \delta = 0.1 \quad \text{حالت گاز} \quad (2-3)$$

فیزیکی، تخلخل و تراوایی آن نمونه‌ها و اندازه‌گیری سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در شرایط خشک و اشباع و در فشارهای مختلف شرح مختصر داده شده و در نهایت یک نتیجه‌گیری از موارد یاد شده به دست آمده است.

### اندازه‌گیری آزمایشگاهی فیزیک سنگ

اطلاعات اولیه برای تعیین ضرایب LMR با اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک بر روی ۴۰ نمونه مغزه از ۴ حلقه چاه اکتشافی در شرایط فشار و دمای مخزن اخذ شده است. با بررسی خصوصیات پتروفیزیکی، از نمونه‌های ماسه سنگ با تخلخلی در محدوده ۱۸/۳ تا ۲۲/۴ درصد و همچنین سنگ آهک با تخلخلی در محدوده ۰/۶ تا ۲۹/۴ درصد استفاده شده است. عمق مورد مطالعه برای سنگ آهک مربوط به سازند A حدود ۲۶۳۴ الی ۲۸۹۴ متر با محدوده حداکثر فشار مؤثر و یا در شرایط مخزن حدود ۳۰ GPa و همچنین برای ماسه سنگ مربوط به سازند B نیز عمق آن حدود ۳۸۵۰ متر و فشار مؤثر در شرایط مخزن حدود ۴۵ GPa می‌باشد. مقدار ضریب لامه بر حسب سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در شرایط اشباع از آب برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شده است. پس از محاسبه مقادیر  $\mu$ ،  $\rho$  و  $\delta$  (حاصل ضرب چگالی در ضریب لاندا و چگالی در ضریب برشی) و با توجه به اینکه کلیه مشخصه‌های نمونه‌ها از قبیل مقادیر تخلخل و نوع جنس سنگ هر نمونه معین بود. با رسم نمودارهای مقادیر  $\mu$ ،  $\rho$  بر حسب  $\delta$ ، می‌توان نمونه‌ها را به دسته‌های مجزا شامل ماسه سنگ با تخلخل خوب و سنگ آهک با تخلخل زیاد و همچنین سنگ آهک با تخلخل اندک تقسیم‌بندی کرد. مقادیر ضریب پواسون و لامه نیز با هدف تفکیک نوع نمونه‌ها به دست آمد. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسبت پواسون برای نمونه‌های ماسه سنگ در محدوده ۰/۲ =  $\sigma$  و برای نمونه‌های سنگ آهک نیز در محدوده ۰/۳ - ۰/۳۵ =  $\sigma$ ، در شرایط فشار و دمای مخزن قرار گرفته است.

### نئوری

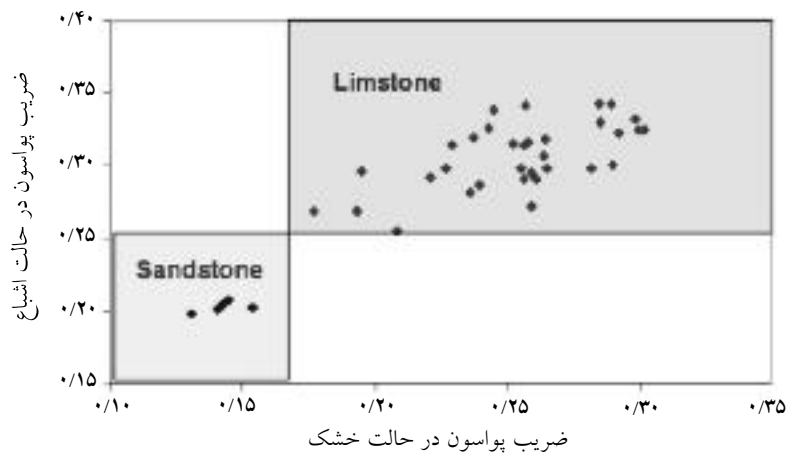
#### ضرایب الاستیک

توانایی برای مقاومت در مقابل تغییر شکل و تمایل جسم

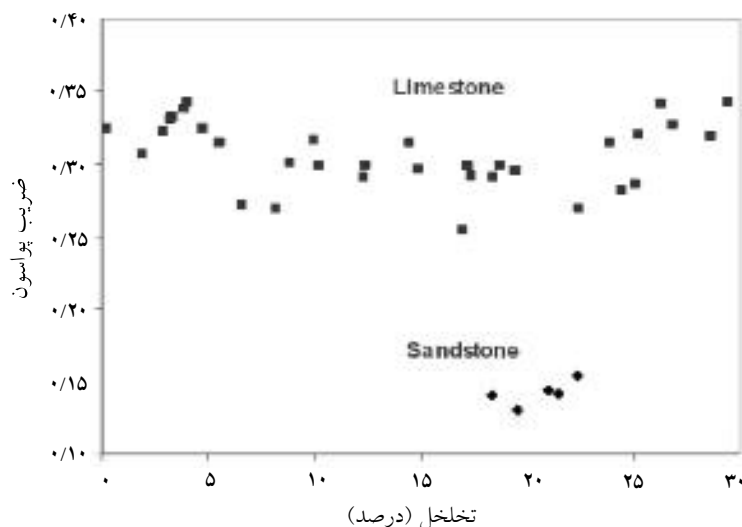
1. Stress  
2. Strain

به همین منظور مقادیر ضریب پواسون بر حسب سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  طبق رابطه (۳-۱) در شرایط خشک و اشباع محاسبه شده است. پس از رسم مقادیر ضریب پواسون در حالت خشک و اشباع از آب در نمونه‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که نمونه‌ها بر حسب نوع جنس سنگ از یکدیگر تفکیک می‌شوند (شکل ۱). در ضمن تفکیک جنس سنگ بر حسب مقادیر ضریب پواسون، سنگ در حالت اشباع از آب بر حسب تخلخل نیز بررسی شده است (شکل ۲). همچنین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و فرایند ارزیابی مخزن و در پی آن مقادیر تخلخل سازند را می‌توان مشابه با شرایط آزمایشگاهی در مقطع لرزه‌ای نیز به دست آورد (شکل ۳).

(۳-۳) حالت اشباع از آب  $\delta=0.33$   $V_p/V_s=2$   
 (۴-۳) حالت سیالات ( $V_s=0$ )  $\delta=0.5$   $V_p/V_s=\infty$   
 در تعیین جنس سنگ<sup>۱</sup> از سرعت امواج، ( $V_s$  و  $V_p$ ) به دست آمده برای تعیین نسبت پواسون (رابطه ۳-۱) برای هر نمونه سنگ (مغزه) در هر فشار متفاوتی کاربرد دارد [۱۲].  
 طبق تعریف نسبت پواسون، نسبت کرنش عمود به کرنش موازی در تنش یک محوری است که در یک جهت خاص در سنگ به کار می‌رود، از این رو نسبت پواسون، یک وابستگی فشاری دارد. حدود مقادیر کرنش موازی فقط در این مقادیر محاسبه می‌شود نه برای کرنش عمود. بدین ترتیب با کاهش فشار، نسبت پواسون افزایش می‌یابد [۱۳].



شکل ۱- پیش‌بینی جنس سنگ نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس نسبت‌های پواسون در حالت‌های اشباع از آب و حالت خشک در شرایط فشار مخزن



شکل ۲- تفکیک نمونه‌های آزمایشگاهی توسط ضریب پواسون بر حسب تخلخل، در این حالت نمونه‌های سنگ آهک و ماسه سنگ از یکدیگر قابل تفکیک است



شکل ۳- نسبت ضریب پواسون در مقطع لرزه‌ای و پیش‌بینی تخلخل سازندهای مختلف به سمت رنگ سیاه: مخزن با تخلخل مناسب، به سمت رنگ سفید: مخزن با تخلخل ضعیف

از محاسبه مقادیر  $\mu * \rho$  و  $\lambda * \rho$  برای کلیه نمونه‌ها و با توجه به اینکه کلیه مشخصه‌های نمونه‌ها از قبیل مقادیر تخلخل و نوع جنس سنگ هر نمونه مشخص می‌باشد، معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\lambda * \rho = I_p^2 - 2I_s^2 \quad (6)$$

$$I_p = V_p * \rho, \quad I_s = \mu * \rho, \quad I_s = V_s * \rho \quad \text{که}$$

در معادله فوق مقادیر  $V_p, V_s, \rho, I_p, I_s$  به ترتیب سرعت موج طولی، عرضی، چگالی، امپدانس صوتی موج تراکمی و برشی نمونه‌ها می‌باشند. بنابراین می‌توان نمونه‌ها را به دسته‌های مجزا شامل ماسه سنگ با تخلخل خوب و سنگ آهک با تخلخل زیاد و همچنین سنگ آهک با تخلخل اندک تقسیم‌بندی کرد. مقادیر ضریب پواسون و لامه با هدف تفکیک نوع نمونه‌ها به دست آمده است:

$$\lambda * \rho < 25 \quad \text{ماسه سنگ با تخلخل مناسب دارای محدوده}$$

$$\mu * \rho > 20 \quad \text{سنگ آهک با تخلخل مناسب دارای محدوده}$$

$$\text{و } 25 < \lambda * \rho < 65$$

$$\text{سنگ آهک با تخلخل اندک دارای محدوده } \mu * \rho > 40$$

$$\text{و } \rho > 65$$

برای تعیین جنس سنگ می‌توان از ضرایب لامه به عنوان پارامترهای مفید سود برد، به همین دلیل مقدار ضرایب لامه برحسب سرعت‌های امواج تراکمی و برشی طبق روبرط

از جمله ضرایب دیگر در حیطه کشسانی نیز می‌توان به ضریب یانگ، بالک و ضرایب لامه اشاره کرد. طبق تعریف ضریب یانگ نسبت تنش قائم به کرنش قائم و ضریب بالک نیز تغییر حجم یک جسم بر اثر تنش همه جانبه تعریف می‌شود که به آن ضریب تراکم‌پذیری نیز می‌گویند. ضریب برشی و ضریب لاندا جزو ضرایب لامه محسوب می‌شوند. بنابر تعریف نسبت تنش برشی<sup>۱</sup> به کرنش برشی<sup>۲</sup> را ضریب برشی (تغییر شکل بدون تغییر حجم) می‌گویند که این ضریب در گازها و مایعات صفر است [۱۰].

$$\mu = \frac{F/A}{\phi} = \frac{P_{12}}{\phi} \quad \mu = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$\lambda = \rho(V_p^2 - 2V_s^2) \quad \lambda = K - 2/3 \mu \quad (5)$$

در رابطه فوق  $F/A$  تنش برشی،  $\phi$  زاویه تغییر شکل،  $V_s$  سرعت موج عرضی،  $V_p$  سرعت موج تراکمی،  $\rho$  چگالی و  $\mu$  ضریب برشی،  $K$  مدول بالک و  $\lambda$  ضریب لاندا می‌باشد. برای ضریب لاندا نمی‌توان همانند سایر ضرایب کشسانی تعریف مشخصی در نظر گرفت زیرا مقدار  $\lambda$  در فیزیک سنگ به شاره درون حفره و  $\mu$  نیز به نوع ماتریکس سنگ حساس می‌باشد.

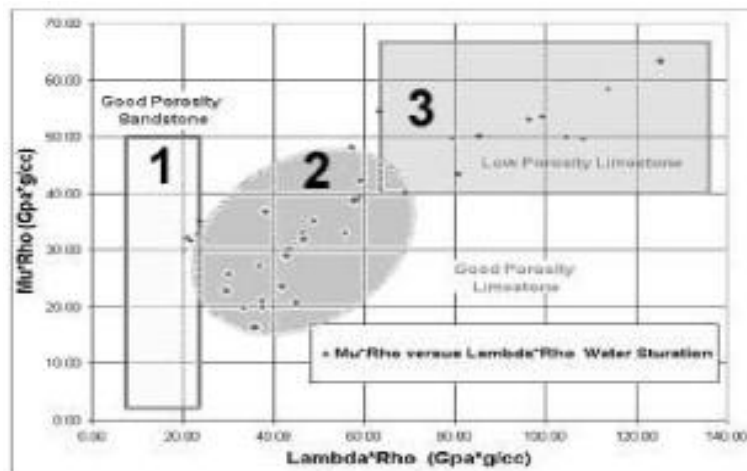
از جمله روش‌های تعیین جنس سنگ به همراه میزان تخلخل، ضرایب لامه است. به همین منظور مقدار ضریب لامه برحسب سرعت‌های امواج تراکمی و برشی در شرایط اشباع از آب برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شد. پس

1. Shear Stress

2. Shear Strain

در شرایط اشباع با آب و نفت نشان می‌دهد. جداسازی نمونه‌های اشباع با آب و نفت در این شرایط بسیار مشکل است هر چند نمونه‌های اشباع با نفت در مقادیر تخلخل بالای ۱۵ درصد از نمونه‌های اشباع با آب از یکدیگر تقریباً جدا شده‌اند. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و فرایند ارزیابی مخزن، می‌توان ضرایب لامه و در پی آن نوع مقادیر تخلخل، نوع جنس سنگ و سیال مخزن را مشابه با شرایط آزمایشگاهی در مقطع لرزه‌ای نیز به دست آورد (شکل‌های ۵، ۸ و ۹).

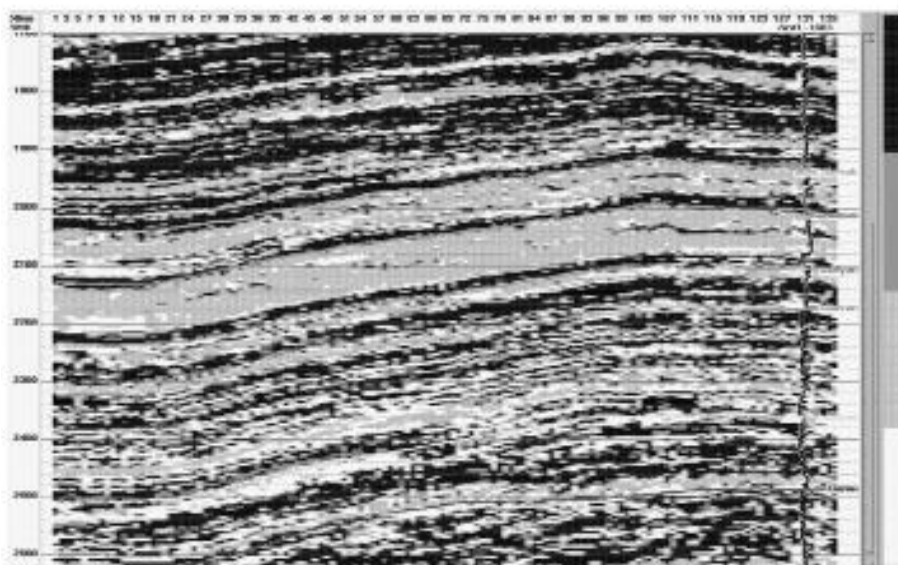
(۴، ۵ و ۶) در شرایط مخزن برای نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه شده است (شکل ۴). شکل ۶، میزان تغییرات  $\mu^* \rho$  را برحسب تخلخل برای کلیه نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان نواحی نمونه‌های با شرایط مناسب مخزنی را از دیگر نمونه‌ها به آسانی تمیز داد. نمونه‌های با شرایط مخزنی مناسب، دارای تخلخل بالای ۱۵ درصد و مقدار  $\mu^* \rho < 4$  می‌باشد. شکل ۷، میزان تغییرات  $\lambda^* \rho$  را برحسب تخلخل برای نمونه‌های



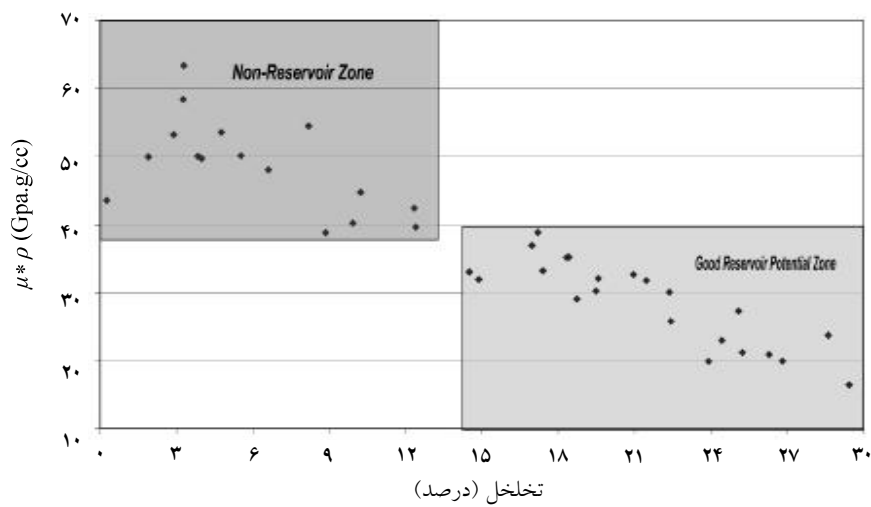
شکل ۴- رسم مقادیر  $\mu^* \rho$  برحسب  $\lambda^* \rho$  برای نمونه‌های آزمایشگاهی سنگ آهک و ماسه سنگ و دسته‌بندی نمونه‌ها به ۳ دسته مجزا با توجه به داده‌های پتروفیزیکی و برحسب نوع سنگ و میزان تخلخل آن‌ها

ناحیه ۱- سنگ آهک با تخلخل زیاد با محدوده:  $\mu^* \rho > 2$  و  $25 < \lambda^* \rho < 65$  ناحیه ۲- نمونه ماسه سنگ با تخلخل مناسب با محدوده:  $\lambda^* \rho < 25$

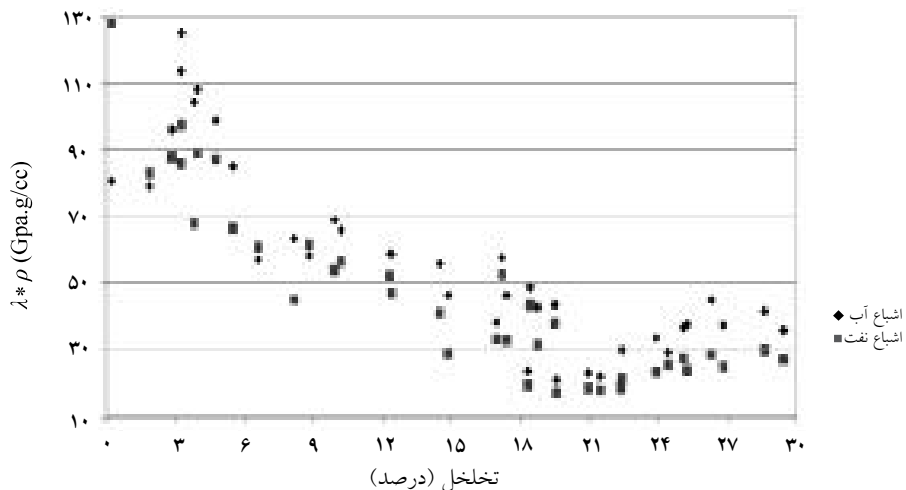
ناحیه ۳- سنگ آهک با تخلخل اندک با محدوده:  $\mu^* \rho > 4$  و  $\lambda^* \rho > 65$



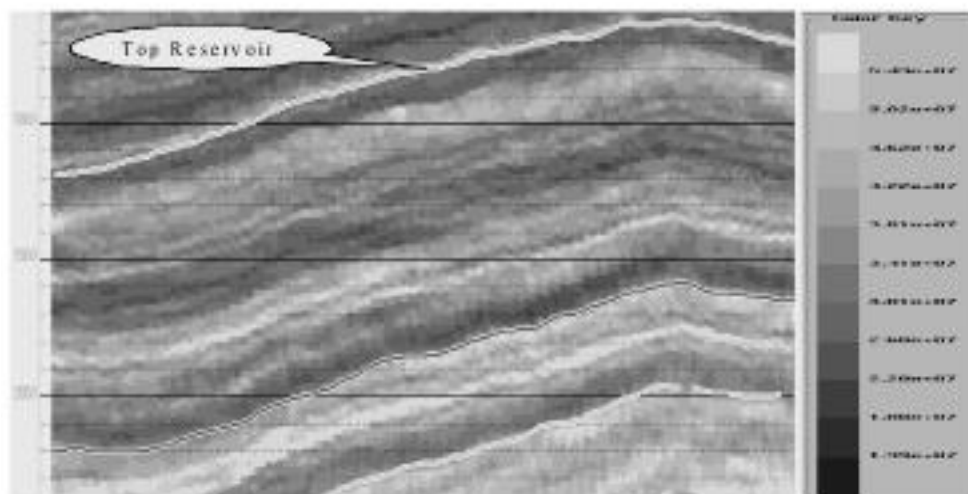
شکل ۵- مقادیر  $\mu^* \rho$  و  $\lambda^* \rho$  اعمال شده بر مقطع لرزه‌ای که از داده‌های شکل‌های (۴) به دست آمده است می‌توان در این حالت نوع جنس سنگ به همراه تخلخل با استفاده از داده‌های ضرایب لامه به دست آورد. (سیاه: مخزن کربناته با تخلخل خوب، خاکستری تیره: مخزن ماسه سنگ با تخلخل خوب، خاکستری روشن: مخزن کربناته با تخلخل ضعیف، سفید: مخزن بدون داده مناسب)



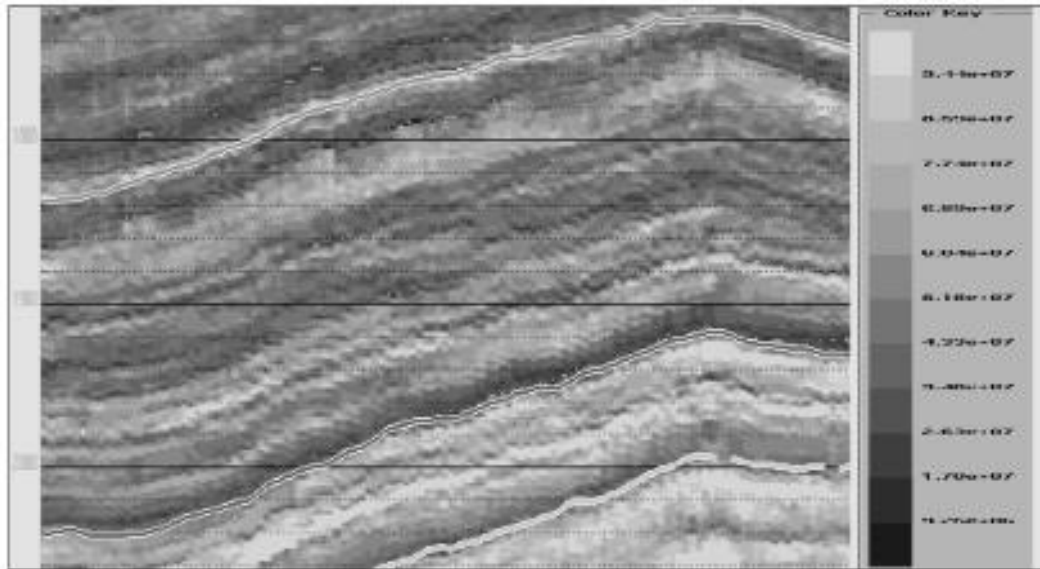
شکل ۶- مقادیر میزان تغییرات  $\mu^* \rho$  را برحسب تخلخل برای کلیه نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی (نمونه‌های با تخلخل بالای ۱۵ درصد و  $\mu^* \rho < 4$  در نواحی خوب مخزنی قرار گرفته‌اند)



شکل ۷- میزان تغییرات  $\lambda^* \rho$  را برحسب تخلخل برای نمونه‌های در شرایط اشباع با آب و نفت (نمونه‌های اشباع با آب و نفت در مقادیر تخلخل بالای ۱۵ درصد و دارای مقادیر  $\lambda^* \rho < 60$  تقریباً از یکدیگر جدا شده‌اند)



شکل ۸- مقادیر تغییرات  $\mu^* \rho$  در مقطع لرزه‌ای نمونه‌های به سمت رنگ سیاه: مخزن کربناته با تخلخل خوب، نمونه‌های به سمت رنگ سفید: مخزن کربناته با تخلخل ضعیف



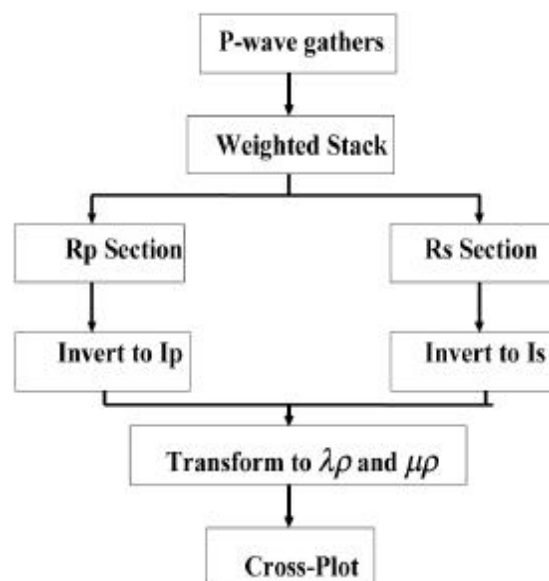
شکل ۹- مقادیر تغییرات  $\rho$  را برحسب تخلخل در مقطع لرزه‌ای (در این حالت نمی‌توان نوع سیال حفرات را به‌خوبی از یکدیگر تفکیک کرد)

مناسب انتخاب شد، سپس با پردازش پیش برانبارش و با حفظ دامنه، بازتابنده‌های امواج S و P تعیین شدند. با عمل معکوس لرزه‌ای می‌توان مقدار امیدانس (حاصل ضرب سرعت در چگالی) را برای امواج S و P تعیین کرد سپس با تبدیل تخمین امیدانس به حاصل ضرب ضرایب لامه در چگالی (رابطه ۶)، می‌توان در گستره وسیعی (حداقل در این مقطع) به بررسی خصوصیات مخزن شامل نوع جنس سنگ و تخلخل و تا حدود کمی نوع سیال مخزن پی برد. نمودار زیر نحوه چگونگی تعیین پارامترهای لامه را نشان می‌دهد.

#### معکوس لرزه‌ای AVO

معادله Zoepprits، وابسته به ضریب بازتاب و تابعی از زاویه فرود در خصوصیات مخزنی سنگ کاربرد دارد و در حالت معمول نیز برای تعیین خواص مخزنی سنگ، پاسخ داده‌های لرزه‌ای پیش برانبارش لازم است، بنابراین باید پردازش پیش برانبارش لرزه‌ای با هدف حفظ دامنه واقعی بر روی داده‌های لرزه‌ای انجام گیرد.

در این مطالعه یک خط لرزه‌ای دو بعدی در نزدیک یکی از چاه‌های مورد مطالعه با داده‌های نسبت سیگنال با نویز





در زمان عبور موج را اندازه‌گیری کرد. معمولاً دمای نمونه مقداری ثابت و برابر با دمای مخزن می‌باشد. اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی در دو حالت خشک و اشباع از آب اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها توسط سیستم اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک در مرکز تحقیقات و تکنولوژی شرکت نفت ژاپن<sup>۱</sup> انجام شده است. همچنین در این سیستم، شبیه‌سازی مخزن تا عمق ۵۰۰۰ متری و اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک برای شماره‌های مختلف مانند آب، نفت و گاز امکان‌پذیر است. از طرفی سیستم، توانایی اعمال ماکزیمم فشار همه جانبه فشار شماره به ترتیب ۱۴۰ GPa و ۷۰ GPa را دارا می‌باشد. حدود تغییرات دمای نمونه حدود ۱۵-۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. زمان رسید اولیه امواج الاستیک دریافت شده توسط گیرنده به وسیله اسیلوسکوب مشاهده می‌شود.

### نتیجه‌گیری

- روش LMR بر اساس مقادیر نسبت پواسون و ضرایب لامه به عنوان تشخیص دهنده جنس سنگ، تخلخل و سیال حفرات با تعیین مقادیر  $\mu^*p$  و  $\lambda^*p$  بر روی داده‌های مغزه در محیط آزمایشگاهی و با انطباق آن بر روی داده‌های لرزه‌ای می‌تواند خصوصیات مخزنی سنگ را مورد بررسی قرار دهد.

- در بررسی مقاطع لرزه‌ای و تعیین خصوصیات مخزنی، مقطع  $\mu^*p$  ابزاری به منظور تشخیص نوع جنس سنگ مخزن به کار می‌رود هر چند مقطع  $\lambda^*p$  به خوبی نتوانسته است نوع سیال مخزن را تشخیص دهد.

- با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و فرایندهای ارزیابی مخزن و مشابه با شرایط آزمایشگاهی در مقطع لرزه‌ای، می‌توان از نتایج داده‌های آزمایشگاهی، روش مناسب و مقرون به صرفه برای ارزیابی مخزن در ابعاد وسیع به دست آورد.

- با توجه به نتایج به دست آمده از حجم واقعی جنس سنگ و به همراه آن تخلخل مناسب برای مخزن می‌توان میزان واقعی هیدروکربن در جای مخزن را پیش‌بینی کرد.

در شکل ۸، تغییرات  $\mu^*p$  در امتداد خط موردنظر نشان داده شده است. تغییرات  $\mu^*p$  در مخزن به زیر لایه‌های با محیط تخلخل مناسب و نامناسب تقسیم می‌شود. با توجه به شکل ۹ جدایش سیال مخزن بر اساس تغییرات  $\lambda^*p$  امکان‌پذیر نیست. در شکل ۷ تنها نمونه‌های با تخلخل بالای ۱۵ درصد را تا حدودی می‌توان نمونه‌های اشباع با آب و نفت را از یکدیگر تفکیک کرد.

### روش کار

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا با بررسی نگارهای پتروفیزیکی و زمین‌شناسی برای سازند موردنظر در عمق‌های خاص، مغزه‌هایی به صورت پلاگ نمونه‌برداری شد. این پلاگ‌ها به صورت استوانه و دارای قطر ۳/۵۸۱ سانتیمتر و طول ۶/۵۳۵ سانتیمتر می‌باشند. از نمونه‌های اطراف پلاگ نیز می‌توان برای کارهای پتروفیزیکی نیز استفاده کرد.

#### اندازه‌گیری چگالی و تخلخل و تراوایی نمونه‌ها

اندازه‌گیری چگالی با توجه به اندازه‌گیری ابعاد فیزیکی (قطر، ارتفاع و جرم) به راحتی قابل محاسبه است. همچنین با پودر کردن مقداری از نمونه، می‌توان میزان چگالی دانه‌ها را نیز به دست آورد. برای اندازه‌گیری تخلخل از دستگاه تخلخل‌سنج مدل 300-ASC و برحسب روش هلیوم استفاده شد. میزان تراوایی نیز به صورت افقی و به فاصله ۱ سانتیمتر از یکدیگر و در چهار جهت مختلف تعیین می‌شود. این اندازه‌گیری توسط دستگاه PDPK انجام شد. در نهایت با متوسط‌گیری مقادیر به دست آمده، می‌توان مقدار تراوایی را محاسبه کرد.

#### اندازه‌گیری سرعت $V_p$ و $V_s$ نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع

برای اندازه‌گیری در شرایط مخزن، ابتدا باید سیستم و نمونه را در شرایط فشار پایدار و دمای موردنظر قرار داد. سپس با تغییر فشار مؤثر از مقدار ماکزیمم فشار به سمت حداقل، می‌توان شرایط متفاوت را در محیط نمونه ایجاد

## منابع

- [1] Wang Z. & Nur A., "Elastic wave velocities in porous media: A theoretical recipe", Geophysics Reprint Series, Vol. 2, pp. 1-35, 1992.
- [2] White J.E., *Underground sound: Application of Seismic wave*, Elsevier, New York, 1983.
- [3] Wang Z. & Nur A., "The Gassmann equation revisited comparing laboratory data with Gassmann prediction", Geophysics Reprint Series, Vol. 3, pp. 8-23, 2000.
- [4] Savic M., VerWest B., Masters A., Sena A. & Gingrich D., *Elastic impedance inversion in practice*, 70<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys., pp. 689-692, 2000.
- [5] Ostrander W.J., "Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence", Geophysics, Vol. 49, pp. 1637-1648, 1984.
- [6] Aki K. & Richards P.G., *Quantitative seismology: Theory and methods*, v.1: W.H. Freeman and Co., 1980.
- [7] Shuey R.T., "A simplification of the Zoeppritz equations", Geophysics, Vol. 50, pp. 609-614, 1985.
- [8] Smith G.C. & Gidlow P.M., "Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas", Geophysical Prospecting, Vol. 35, pp. 993-1014, 1987.
- [9] Goodway W., Chen T. & Downton J., *Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters;  $\lambda\rho$ ,  $\mu\rho$ , &  $\lambda/\mu$  fluid stack*, from P and S inversions, 67<sup>th</sup> Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 183-186, 1997.
- [۱۰] دبلیو-ام - تلفورد و همکاران، ترجمه حسین زمردیان و حسن حاجب حسینی، ژئوفیزیک کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول، صفحه ۳۱۲-۳۰۲، ۱۹۸۴.
- [11] AVO Workshop, Theory and Exercise Hampson-Russel Software Services Ltd, 2002.
- [12] Picket G.R., "Acoustic character logs and their applications in formation evaluation", J. of Petr. Tech., june, pp. 659-667, 1963.
- [13] Domenico S.N., "Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity", Geophysics, Vol. 49. No. 8, pp. 1188-1195, 1984.