

آشکار سازی مخازن پر فشار با استفاده از تغییرات نسبت پواسون در نمونه های

سنگ آهک در یکی از میداین نفت جنوب غرب ایران

ایرج مداحی؛ ابراهیم حسن زاده

پژوهشگاه صنعت نفت

(دریافت: ۸۲/۹/۱؛ پذیرش: ۸۲/۱۰/۲۲)

چکیده

با بررسی داده های آزمایشگاهی در بیشتر سنگ های (ماسه سنگ و آهک) با اشباع گازی نشان داده شد که، نسبت پواسون با افزایش فشار مؤثر (فشار محصور کننده وارد بر سنگ منهای فشار سیال درون حفرات) افزایش می یابد و برعکس در بیشتر سنگ های اشباع از مایع، نسبت پواسون با افزایش فشار مؤثر کاهش می یابد. بنابراین وقتی که رسوبات در ناحیه انتقالی (Transition Zone) از حالت با فشار مؤثر بالا به حالت کم فشار می رسد، نسبت پواسون تقریباً بطور نمائی زیاد می شود. با توجه به اینکه بخش های غیر خطی این منحنی ها، بیشترین رابطه را با فشار حفره ای موجود در رسوبات آبهای عمیق دارند، لذا این اثر در خطرپذیری مربوط به آبهای عمیق مفید خواهد بود. بعلاوه در معکوس داده های لرزه ای قبل از بر انبارش (Pre-Stack) موج P نمودارهای تشخیصی حاصل از این اثر به عنوان یک شاخص بسیار مهم فشار و سیال حفره ای بکار برده می شود.

واژه های کلیدی: سرعت های امواج تراکمی و برشی، نسبت پواسون، فشار مؤثر، فشار حفره ای، لایه های فشار بالا، وارونگی لرزه ای، جریان آبهای کم عمق

مقدمه

مطالعه حاضر بر روی نمونه های مغزه سنگ آهک سازند سروک در یکی از میادین نفتی واقع در جنوب غرب ایران انجام شده است. نمونه ها بشکل استوانه (Plug) تهیه شده و تخلخل و تراوایی آنها اندازه گیری شدند. سپس با استفاده از یک سیستم پیشرفته در مرکز تحقیقات نفت ژاپن (TRC) اندازه گیری آزمایشگاهی سرعت در دو حالت خشک و اشباع از آب در فشارهای مختلف انجام گردید.

نور (۱۹۶۹) احتمالاً اولین کسی بود که کاهش نسبت پواسون را با کاهش فشار مؤثر در گرانیته و دولومیت خشک ثبت کرد. توکسوز و همکاران (۱۹۷۶) ضمن نشان دادن این رابطه همچنین اثر نسبت پواسون را در شناسایی اشباع شدگی سیال بیان کردند. نور و وانگ (۱۹۸۹) بیان داشتند که نسبت V_p/V_s در سنگهای اشباع گازی با افزایش فشار مؤثر افزایش می یابد. وانگ (۱۹۹۷) نیز بوسیله اندازه گیری های آزمایشگاهی سرعت در سنگهای آهکی به این مهم کمک کرد. گرولز و همکاران (۱۹۹۵) و موس و زارت (۱۹۹۸) کاهش سرعت موج تراکمی را با افزایش فشار خلل فرج برای شناسایی لایه های فشار بالا بکار گرفتند.

مفاهیم پایه و تئوری

فشار حفره ای (P_p) وابسته به فشار هیدرواستاتیک (P_h) بوده و به عنوان یک عامل عمل کننده فشاری روی محتوای سیالی خلل و فرج بیان می گردد. فشار هیدرواستاتیک به عنوان فشار حاصل از وزن ستون آب تعریف می شود:

$$P_h = \rho_f g z$$

در حالیکه z ، ρ_f و g به ترتیب ارتفاع ستون سیال، چگالی سیال و شتاب جاذبه هستند. اندازه و شکل ستون تأثیری در فشار هیدرواستاتیک ندارد. چگالی سیال وابسته به نوع سیال، مواد جامد محلول (نمک و کانی های دیگر)، گازهای داخل سیال، دما و فشار می باشد. بنابراین در هر ناحیه چگالی سیال وابسته به عمق می باشد.

فشار روباره یا فشار محصور کننده (P_c) در هر عمق فشاری است که از وزن ترکیب ماده سنگ و سیال داخل حفرات بالای، لایه سنگی مورد نظر حاصل می شود (N.C.Dutta, 2002)

$$P_c = g \sum \rho_b(z) d(z) \quad (2)$$

ρ_b چگالی حجمی وابسته به عمق بوده و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_g \quad (3)$$

بطوریکه ϕ ، ρ_p و ρ_g به ترتیب تخلخل، چگالی سیال و چگالی مواد زمینه سنگ می باشند. فشار روباره وابسته به عمق بوده و با عمق افزایش می یابد.

فشار مؤثر (P_d) فشاری است که روی محیط سنگ جامد عمل می کند و بصورت تفاضل فشار روباره و فشار خلل و فرج بیان می شود:

$$P_d = P_c - P_p \quad (۴)$$

در سیستم SI واحد فشار پاسکال (Pa) و در سیستم انگلیسی پوند بر مجذور اینچ (Psi) تعریف شده است.

$$1 \text{ Pa} = 1.45 \times 10^{-4} \text{ Psi} = 1 \text{ N/m}^2 \quad (۵)$$

یک پاسکال واحد خیلی کوچکی است و در کاربردهای عملی بیشتر MPa (10^6 Pa) بکار برده می شود.

مطلب مهم در مورد فشارمؤثر این است که میزان تراکم پذیری سنگ را کنترل می کند: بطوریکه به هر حالتی که فشارمؤثر در یک عمق کاهش می یابد، به تبع آن میزان تراکم پذیری نیز کاهش خواهد یافت.

سرعت انتشار امواج (تراکمی و برشی) از میان تکه ای از سنگ، سرعت سنگ نامیده می شود که به پارامترهای زیادی مربوط می شود از جمله: نوع سنگ، تخلخل، میزان اشباع، فشارهای حفره ای و محصور کننده، ساختمان حفرات، دما، نوع سیال داخل حفرات، حالت ترمودینامیکی، سیمان شدگی، فرکانس موج وغیره. بعلاوه اینکه این پارامترها مستقل از یکدیگر نیستند ولی توصیف کاملی از این وابستگی ها را می توان از اندازه گیریهای آزمایشگاهی کنترل شده بدست آورد.

واضح است که وابستگی های سرعت به نوع سنگ حائز اهمیت زیادی است، زیرا لایه های سنگ شناختی ضخیم (کربنات، ماسه سنگ، شیل) توزیع سرعت های بزرگ موج P را به نمایش می گذارند. به هر حال سرعت تنها پارامتر تشخیص سنگ شناختی نیست. چند مطلب قابل توجه در این زمینه عبارت است از:

توزیع سرعت های شیل و ماسه سنگ به طور قابل ملاحظه ای همپوشانی دارند.

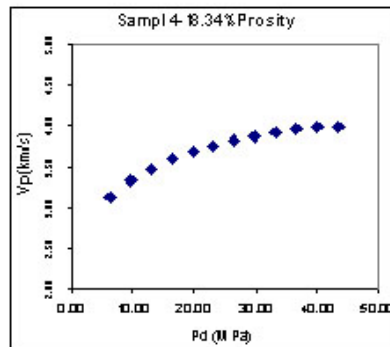
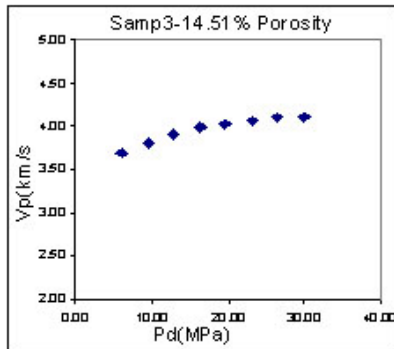
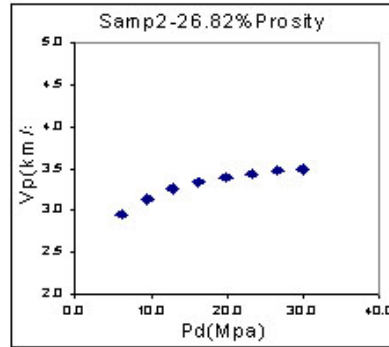
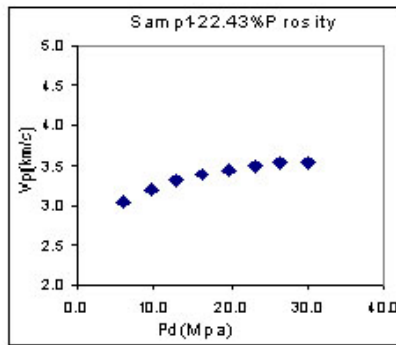
سرعت امواج در طبقات سنگی پر فشار پایین تر از طبقات با فشار هیدرواستاتیک یکسان می باشد. نسبت پواسون به صورت، نسبت تغییر شکل های جانبی به تغییر شکل محوری تعریف شده و

می توان آنرا از نسبت سرعت های امواج تراکمی و برشی نیز محاسبه کرد:

$$R = \frac{1}{2}(V_p^2/V_s^2 - 2)/(V_p^2/V_s^2 - 1) \quad (۶)$$

اثر فشار بر سرعت امواج الاستیک و نسبت پواسون

به علت آنکه سرعت امواج الاستیک با فشار مؤثر پیوستگی نشان می‌دهد، چنین داده‌هایی می‌تواند برای پیش‌بینی تغییرات سرعت درجا در سنگهای گازدار و در فشار ثابت طبقات سنگی - فشار محصور کننده- به علت تغییرات فشارحفره‌ای به کار گرفته شود. همچنین به علت تراکم پذیری بالای گاز، سرعت درجا در سنگ گازدار، خیلی نزدیک به سرعت سنگ حاوی هوا در شرایط فشاری یکسان می‌باشد، لذا به راحتی قابل تعمیم به یکدیگر می‌باشند. در شکل ۱ چند نمونه از اثر فشار مؤثر بر سرعت موج تراکمی، در چند نمونه آهکی نمایش داده شده است.



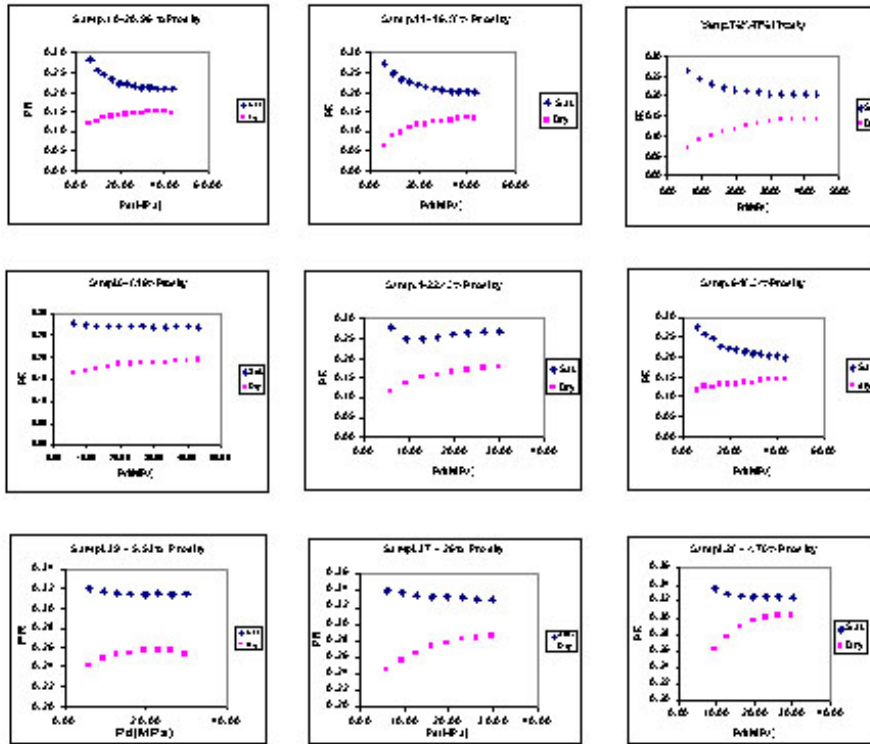
شکل ۱- سرعت موج تراکمی (V_p) در برابر فشار مؤثر (P_d) برای نمونه‌های سنگی کربناته با تخلخل‌های متفاوت.

آزمایشهای متعدد روی نمونه های سنگی مختلف اعم از کربنات، ماسه سنگ و شیل، عمومیت این اثر را نشان می دهد، بطوری که دیده می شود :

- ابتدا افزایش سرعت سریع بوده، ولی به تدریج تغییرات آن کند شده و به یک سرعت نهایی تقریباً ثابت می رسد.

- برای فشارهای مؤثر کم رفتار سرعت خیلی شبیه به رفتار آن در فشارهای مؤثر صفر می باشد. اندازه گیری های دقیق سرعت امواج تراکمی و برشی در رسوبات نرم (مانند لایه های گلی) نشان میدهد، وقتی که فشار مؤثر به مقدار خیلی پایین می رسد، سرعت موج P به سرعت آن در آب نزدیک می شود در حالیکه سرعت موج S به صفر میل می کند، لذا وقتی که رسوبات در ناحیه انتقالی (transition zone) از حالت پر فشار به حالت معلق می رسد، (تا ۶۰۰ متر زیر لایه گلی)، نسبت V_p/V_s تقریباً بطور نمائی زیاد می شود، در نتیجه بخش های غیرخطی این منحنی ها، در فشارهای مؤثر پایین، بیشترین رابطه را با فشار حفره ای موجود در رسوبات آبهای عمیق نشان می دهند، بعلاوه برای نوار جریان آبهای کم عمق (SWF) که در فشارهای مؤثر خیلی پایین (در حدود ۲-۷ MPa) واقع می شوند نیز شاخص هستند.

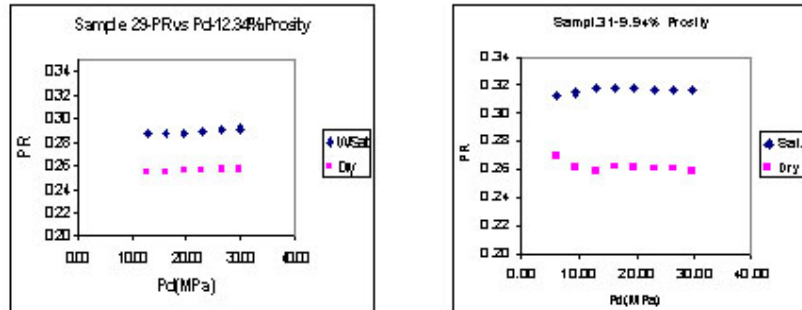
در شکل ۲ نسبت پواسون در مقابل فشار مؤثر در چند نمونه با تخلخل های مختلف برای هر دو حالت خشک و اشباع رسم شده است که با ملاحظه آن دریافت می شود، در حالیکه در سنگهای خشک، با کاهش فشار مؤثر (افزایش تخلخل ناشی از ریز ترکها) PR یا نسبت پواسون کاهش می یابد، در سنگهای اشباع این روند افزایشی است، به طوریکه در فشارهای مؤثر کمتر از ۰/۲ MPa (فشارهای حفره ای بالا) در رسوبات اشباع شده از آب (منحنی بالایی) به مقادیر نسبت پواسون خواهیم رسید، (۰/۴۹۹ < PR). این اثر نه تنها در تشخیص جریان آبهای کم عمق (SWF) بوسیله روشهای لرزه ای معیار مهمی است بلکه در خطرپذیری مربوط به آبهای عمیق، و در معکوس داده های لرزه ای قبل از بر انبارش موج P به عنوان یک شاخص مهم فشار بکار برده می شود.



شکل ۲- تغییرات نسبت پواسون (PR) در مقابل فشار مؤثر (Pd) در ۹ نمونه آهکی برای دو حالت: خشک (نقاط قرمز) و اشباع (نقاط آبی).

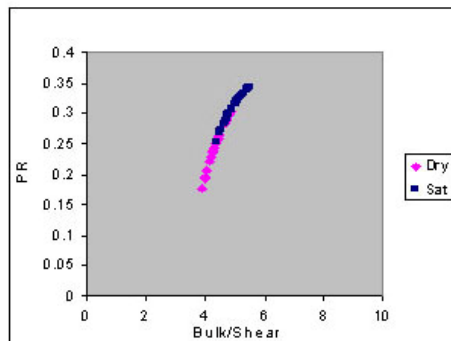
از نظر تئوری، فرض بر این است که تغییرات سرعت و مدول‌های الاستیک در مقابل فشار، ناشی از باز بودن (برای کاهش فشار مؤثر) و بسته بودن (برای افزایش فشار مؤثر) ترک‌های ریز در سنگ می‌باشد. همچنین نمونه‌ها همگن فرض شده و بنابراین ریزترک‌ها بطور همگن در فضا گسترده شده‌اند. در واقع فشار مؤثر کمتر، همراه با تعداد زیادتری از ریزترک‌های موافق، در نمونه‌های سنگی تحت آزمایش می‌باشد. وقتی که نمونه در جهت محوری تحت فشار قرار داده می‌شود، ریزترک‌ها تا حدی با این تغییر شکل همساز شده و بنابراین در جهت کاهش انبساط پهلویی در مقایسه با حالت فاقد ریزترک، عمل می‌کنند، لذا می‌توان گفت که ریزترک‌های بیشتر، تغییر شکل‌های کوچکتر و در نتیجه نسبت پواسون کوچکتری را نمایش می‌دهد. به هر حال با اینکه روندهای فوق‌الذکر تقریباً عموماً وجود دارد ولی در نمونه‌های دیگری و در شکل ۳

نشان داده شد که این روند ممکن است به صورت مخالف هم مشاهده شود، و علت آن این است که تغییرات نسبت پواسون، به تخلخل و همچنین به مدول های الاستیک نمونه آزمایشی وابسته بوده و باید با استفاده از جایگزینی سیال و درسنگهای خشک نیز آزمایش شوند.



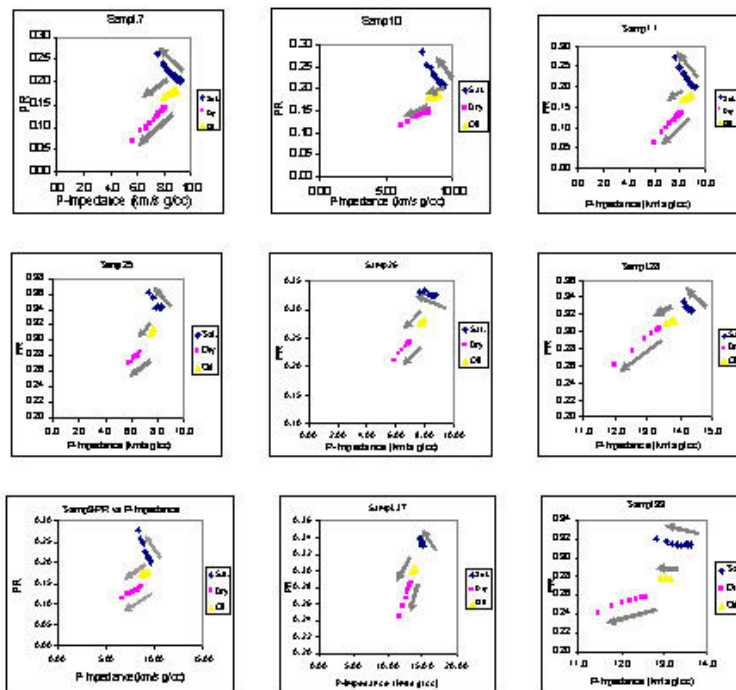
شکل ۳- تغییرات نسبت پواسون (PR) درسنگهای خشک (نقاط قرمز) و اشباع (نقاط آبی) در مقابل فشار مؤثر (Pd) برای دو نمونه با روند متفاوت.

افزایش نسبت پواسون با افزایش فشار حفره‌ای (کاهش فشار مؤثر) دارای اساس فیزیکی است. بطوریکه هرچه فشار حفره‌ای بالاتر یا سنگ سست تر باشد، افزایش نسبی بزرگتر درمدول بالک بین سنگهای خشک و اشباع دیده می‌شود. چون درحالی که ضریب برشی برای حالت خشک و اشباع تقریباً یکسان است (Gassmann, 1951)، نسبت پواسون درنمونه‌های اشباع بزرگتر از نمونه‌های خشک- به ویژه درسنگهای نرم- می‌باشد(شکل ۴).



شکل ۴- تغییرات نسبت ضریب بالک (Bulk) به ضریب برشی (Shear) درمقابل نسبت پواسون (PR) برای دو حالت: خشک(نقاط قرمز) و اشباع (نقاط آبی).

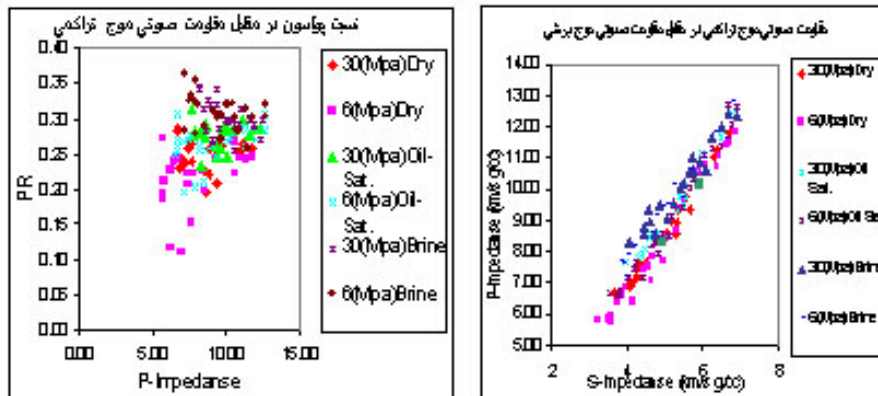
بررسی دیگری که انجام شد (شکل ۵)، نشان داد که با توجه به نوع سیال بین حفره‌ای، با افزایش فشار مؤثر تغییرات نسبت پواسون دارای سه اسلوب متفاوت می‌باشد. در حالت اشباع از آب روند کاهش نسبت پواسون با افزایش فشار مؤثر دیده می‌شود، در حالیکه در حالت‌های اشباع از نفت و گاز این روند افزایشی است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تولید ثانویه و برای مثال در طی تزریق گاز که به علت جایگزینی آن بجای نفت، فشار حفره‌ای افزایش می‌یابد- به عبارت دیگر فشار مؤثر کاهش می‌یابد- مقاومت صوتی موج P دارای روند کاهشی است، در حالیکه برای حالت تزریق آب و جایگزینی آن به جای نفت، نسبت پواسون با افزایش فشار حفره‌ای (کاهش فشار مؤثر) روند افزایشی خواهد داشت، لذا این نوع نمودارها و نتایج آنها در تحلیل عملکرد چاه‌های تزریقی در طی تولید محک مطمئنی می‌باشند. همچنین این داده‌ها در تفسیر اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای برای تخمین تغییرات فشار و سیال بین حفره‌ای در زمان و مکان زمین‌شناسی به کار گرفته می‌شود (وانگ و همراهان- ۱۹۹۸، تورا و لوملی- ۱۹۹۹).



شکل ۵- تغییرات نسبت پواسون در مقابل مقاومت صوتی موج P- برای سه حالت: خشک، اشباع از نفت و آب. فلش‌ها جهت افزایش فشار حفره‌ای (کاهش فشار مؤثر) را نشان می‌دهد.

خواص الاستیک سنگ و نمودارهای تشخیصی

خواص الاستیک سنگها (از جمله: مقاومت صوتی موج تراکمی و نسبت پواسون) می تواند با استفاده از وارونگی داده‌های لرزه ای (Conolly,1998) به دست آورده شود. اما به هر حال بوجود آوردن نمودارهای تشخیصی براساس فیزیک سنگ به آن جهت حائز اهمیت است که در تفسیر این نتایج و در تخمین فشار و سیال حفره ای کمک می‌کند. در شکل ۶ یک مثال از چنین نمودارهایی تهیه گردیده است، که بر پایه اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت اموج الاستیک در فشارهای مؤثر مختلف و در نمونه‌های کربناته، دریکی از میادین نفت جنوب غربی ایران گرفته شده است.



شکل ۶ - سمت چپ: نسبت پواسون (PR) در مقابل مقاومت صوتی موج P (P-Impedance) . سمت راست: مقاومت صوتی موج P در مقابل مقاومت صوتی موج S (S-Impedance)، برای نمونه‌های گازدار، نفتی و آبدار در فشارهای مؤثر مختلف (۶، ۳۰ مگا پاسکال).

محدوده‌های مختلف در صفحه نسبت پواسون - مقاومت صوتی موج P، شکل سمت چپ برای محتوای سیالی بوضوح قابل تفکیک می‌باشد. و تغییرات مربوط به فشارهای مؤثر مختلف (۶، ۳۰ MPa) نیز بویژه برای حالت خشک (گازدار) قابل شناسایی است. همچنین در صفحه مقاومت صوتی امواج P-S (شکل سمت راست) نواحی مربوط به حالت های خشک (گازدار) و اشباع از نفت و آب به خوبی تفکیک داده می‌شود. اینگونه نمودارها به همراه وارونگی داده‌های لرزه‌ای برای تشخیص فشار و سیال حفره‌ای و جدا سازی اثر هر یک از آنها اهمیت قابل توجهی دارند. توجه این نکته لازم است که در این نوع مطالعات این نمودارها برای تعیین محل و به ویژه نوع سنگ نیز ضروری است.

نتایج

اندازه‌گیری‌ها و نتایج حاصل از این بررسی، ضمن تأیید اثر تئوریک مربوط به کاهش نسبت پواسون با کاهش فشار مؤثر (افزایش فشار حفره ای) درسنگهای گازدار، می‌تواند به عنوان یک پایه فیزیکی در روش جدید بررسی سیال و فشار حفره‌ای و ردیابی لایه‌های فشار بالا، به کار گرفته شود. این روش می‌تواند برای بهبود قابلیت اعتماد روش‌های مرسوم و اصلاحات اخیر آنها (باورز و همکاران، ۱۹۹۴ و موس و زوارت، ۱۹۹۸) استفاده شود که در آنها سرعت موج P، چگالی و تخلخل به کار گرفته می‌شود و سرعت موج S برای تصحیحات مربوط به سیال استفاده می‌گردد. اثر فشار حفره‌ای روی نسبت پواسون سنگ‌های اشباع می‌تواند به دقت از داده‌های سنگ خشک محاسبه شده و سپس به خوبی برای پیش بینی لایه‌های با فشار بالا استفاده شود. همچنین اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگی یک محل، بخصوص می‌تواند در تخمین فشار از داده‌های معکوس لرزه‌ای، در کمی‌سازی اطلاعات و کنترل اثر مشاهده‌ای به خوبی استفاده شود (۱۹۹۶، پیگوت و تادپالی).

References

- Nur, A.M. (1969) *Effect of stress and fluid inclusions on wave propagation in rock*, Ph.D. Thesis, MIT.
- Toksoz, M.N., Cheng, C.H., and Timur, A. (1976) *Velocities of seismic waves in porous rocks*, *Geophysics*, **41**, 621-645.
- Nur, A., and Wang, Z. (1989) *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks: Volume 1, Experimental studies*, SEG Geophysics reprint series **10**.
- Wang, Z. (1997) *Seismic properties of carbonate rocks*, in *Carbonate Seismology*, Palaz, I., and Marfurt, K., eds., SEG Geophysical developments, series **6**, 29-52.
- Grauls, D., Danand, J.P., Beaufort, D. (1995) *Predicting abnormal pressure from 2-D seismic, velocity modeling*, Proceeding OTC Conference, Houston.
- Moos, D., and Zwart, G. (1998) *Predicting pore pressure from porosity and velocity, in pressure regimes in sedimentary basins and their prediction*, Conference proceeding, Houston.
- N.C. Dutta, (2002) *Geopressure Prediction using seismic data: Current status and the road ahead*, *Geophysics*, VOL **67**.NO.6.
- Wang, Z., Cates, M.E., and Langan, R.T. (1998) *Seismic monitoring of a CO₂ flood in a carbonate reservoir: A rock physics study*, *Geophysics*, **63**, 1604-1617.
- Tura, A., and Lumley, D.E. (1999) *Estimating pressure and saturation changes from time-lapse AVO data*, SEG 69th Annual Meeting, Expanded Abstracts, SRC 4.2.
- Bowers, G.I. (1994) *Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides under-compaction*, IADC/SPE 27488.
- Gassmann, F. (1996) *Elasticity of porous media: Über die elastizität poroser medien*, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gessellschaft*, **1-23**, 19.
- Pigott, J.D., Tadepalli, S.V. (1996) *Direct determination of clastic reservoir porosity and pressure from AVO inversion*, SEG 66th Annual Int. Meeting, Extended Abstracts, **2**, 1759-1762.