

جداسازی نمونه‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی ضرایب پواسون و لامه در شرایط مخزن برای یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران

جعفر ولی^{۱*}، فریبرز طالبی^۲ و حسام آلوکی بختیاری^۳

^۱ مری پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۲ کارشناس ارشد پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
^۳ مری پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۸۳/۳/۱۹، پذیرش نهایی: ۸۶/۱۰/۲۵)

چکیده

هدف از این بررسی جداسازی لیتولوژی برای نمونه‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگی با استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای تراکمی و برشی و همچنین ضرایب پواسون و لامه در شرایط مخزن در محیط آزمایشگاهی است. در این بررسی تعداد ۵ نمونه ماسه‌سنگ از سازند گدوان و ۳۴ نمونه سنگ آهک از سازند سروک مربوط به ۴ حلقه چاه اکتشافی در ناحیه جنوب غرب ایران به شکل استوانه (پلاگ) تهیه و پس از آماده‌سازی چگالی، تخیل و تراوایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری سرعت‌های V_s و V_p در شرایط خشک و اشباع از آب و همچنین در دما و فشارهای متفاوت، به خصوص در فشار و دمای مخزن آماده شدند. با استفاده از دستگاه پیشرفته مستقر در شرکت TRC ژاین اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت در دو حالت خشک و اشباع از آب در فشارهای متفاوت صورت گرفت.

با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری سرعت نمونه‌ها، محاسبه ضرایب پواسون و لامه و رسم نمودارهای نسبت سرعت امواج تراکمی و برشی و همچنین ضرایب پواسون و لامه در حالت‌های گوناگون، می‌توان نمونه‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگ را در محیط آزمایشگاهی برحسب نوع لیتولوژی نمونه‌ها از یکدیگر جدا کرد. هدف اصلی این بررسی، استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای تراکمی و برشی و همچنین ضرایب پواسون و لامه در جداسازی لیتولوژی مغزه‌ها در شرایط مخزن و در محیط آزمایشگاهی است.

واژه‌های کلیدی: سنگ آهک، ماسه‌سنگ، لیتولوژی، سرعت امواج تراکمی و برشی، چگالی، ضرایب پواسون و لامه

Lithology discrimination using Poisson's and Lamé coefficients under reservoir condition—a laboratory test-on samples from a field in the southwest of Iran

Vali, J¹., Talebi, F². and Aloki Bakhtiary, H³.

¹Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

²Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

³Researcher, Exploration and Production Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 8 Jun 2004, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Introduction: In the rock physic evaluation, experimental results are interpreted by theory, therefore both experimental data and theory are necessary for rock physics study. The

main research in theories has been done by Gassman (1951) and Biot (1956). Also laboratory tests have been performed by Han et al (1986), Eberhart-Philips et al (1989), Wang and Nor (1992) and Wang (2000).

Poisson's ratio and Lamé coefficients are the main data for discrimination of two kind of lithology, especially limestone and sandstone, in the reservoir.

In this study, Poisson's ratio and Lamé coefficients have been calculated by measuring V_p and V_s in saturated samples as a laboratory test. Also λ, ρ and μ, ρ have been calculated using porosity, density, compressional and shear waves velocities of plug samples. λ is more sensitive to fluids within the pores whereas μ is affected by rigidity of rock samples.

In this research, after sample preparations, density, porosity and permeability of the samples were measured. Then compressional and shear wave's velocities were measured in both dry and water saturated conditions at several pressures, especially reservoir pressure. Finally, limestone and sandstone samples were separated by expanding Poisson's ratio and Lamé coefficients in various diagrams.

Methodology: Core plugging was accomplished as vertical plugs with 3.81cm diameter and 6cm length. Porosity, permeability and density of samples were measured to calculate bulk and shear modules in the rock physic models. Corrected density was calculated from measured density in dry condition and compared with resistivity log density together.

According to petrophysical parameters plug samples were classified into three classes, as sandstones with more than 18% porosity and limestones with more than 10% porosity and the last one limestone with less than 10% porosity.

Acoustic wave velocities were measured in dry and water saturated conditions at several confining pressures, such as 30 Gpa for the Sarvak samples and 45Gpa for the Gadvan samples as their reservoir pressure.

Density, compressional and shear wave velocities are the three main rock physics parameters for lithology prediction of reservoir rock.

Two kinds of lithology (sandstone and limestone) with different Poisson's ratio are detached after calculation and plotting of Poisson's ratio in both dried and water saturated states. In fact the Poisson's ratio for dried and saturated conditions is more than 0.17 and 0.25 respectively for limestone samples and lower than 0.17 and 0.25 for the sandstone samples.

Lamé coefficient (λ, ρ and μ, ρ) were calculated by using density, compressional and shear wave velocities in water saturated and reservoir conditions. By drawing μ, ρ versus λ, ρ as a cross plot, the samples are divided into three divisions as sandstone with more than 18% porosity and limestones with higher than 10% porosity and the last one limestone with lower than 10% porosity.

Results:

- Prediction of lithology (limestone and sandstone) using Poisson's ratio under reservoir condition by plotting various diagrams.
- Discrimination of lithology at reservoir condition using Lamé coefficients in plotted μ, ρ versus λ, ρ .
- Poisson's ratio and Lamé coefficient which are used for lithology-a laboratory test- accompaniment reservoir characterizations software which interpret 2D or 3D seismic data could be extended for predicting the lithology of all the formations in a field.

Key words: Limestone, Sandstone, Lithology, Comprssional and shear, Waves velocity, Density, Poisson and Lamé coefficients

۱ مقدمه

فراهم می‌آورد. اگرچه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی خصوصیات مخزن را در مقیاس بسیار کوچک، بررسی می‌کنند ولی استفاده توأم آنها با نگارهای پتروفیزیکی و مقاطع لرزه‌ای در توصیف مخزن بسیار کارآمد و مقرون به صرفه است. در ضمن محدودیت پیش گفته را می‌توان با مغزه‌گیری‌های بیشتر از نقاط متفاوت سازند کاهش داد. همچنین به کمک نرم‌افزارهای موجود می‌توان خصوصیات مخزن را در طول خطوط لرزه‌ای پیش‌بینی کرد.

یکی دیگر از راه‌های تعیین لیتولوژی، استفاده از ضرایب لامه است. به همین منظور، مقدار ضرایب لامه برحسب سرعت امواج تراکمی و برشی در شرایط اشباع از آب، برای نمونه‌ها در محیط آزمایشگاهی محاسبه شد. سپس مقادیر $\mu.p$ و $\lambda.p$ با توجه به اینکه کلیه مشخصه‌های نمونه‌ها از قبیل مقادیر تخلخل و نوع لیتولوژی در محیط آزمایشگاه قابل تعیین‌اند، محاسبه می‌شوند. در ضمن طبق تعریف، مقدار λ به شاره درون حفره و μ به نوع خمیره سنگ حساس است. مقادیر ضرایب پؤاسون و لامه با هدف تفکیک نوع نمونه‌ها به دست آمده است (وانگ و نور، ۱۹۹۲b).

در این مقاله ابتدا در مورد آماده سازی و اندازه‌گیری چگالی، تخلخل و تراوایی نمونه‌ها توضیحات مختصری ارائه می‌شود. سپس در مورد اندازه‌گیری سرعت‌های V_p و V_s در شرایط خشک و اشباع از آب و در دما و فشارهای متفاوت به خصوص دما و فشار مخزن شرح داده شده است. همچنین در مورد محاسبه ضرایب پؤاسون و لامه در نقش یکی از مقدمات مورد نیاز برای شناسایی و آشکارسازی لیتولوژی با استفاده از نمودارهای گوناگون

بررسی‌های فیزیک سنگ را می‌توان به دو بخش نظری و آزمایشگاهی تقسیم کرد. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نقشی حیاتی در اکتشاف و توسعه میدان‌های نفتی دارند. برای مثال اندازه‌گیری خصوصیات لرزه‌شناسی سنگ‌های مخزن، اساس فیزیکی مورد نیاز برای لرزه‌شناسی اکتشافی و تفسیر و آشکارسازی لیتولوژی به همراه هیدروکربور را دربرآورد خصوصیات و نظارت و مشاهده تغییرات مخزن و فرآیندهای بازیافت بهینه نفت، فراهم می‌آورد. پیش‌بینی لیتولوژی در نمونه‌های سنگ و همچنین استفاده از داده‌های لرزه‌ای در فرایند برآورد خصوصیات مخزن و محاسبه ضرایب پؤاسون و لامه می‌تواند در توصیف مخزن بسیار کارآمد باشد.

برای ارزیابی دقیق و روشن تأثیر پارامترهای مخزن روی خواص کشسانی سنگ‌های مخزن، کارهای آزمایشگاهی و نظری لازم است. نتایج آزمایشگاهی باید با نظریه‌ها، تفسیر و مدل‌سازی شوند تا درحکم اطلاعات ورودی برای تفسیر لرزه‌ای به کار روند (وانگ و نور، ۱۹۹۲a). در بخش نظری، (گاسمن، ۱۹۵۱ و بیوت، ۱۹۵۶) مطالعات اساسی صورت داده‌اند که اکنون با گذشت ۵۰ سال مورد استفاده محققان و صاحب‌نظران صنعت نفت قرار می‌گیرد. در بخش آزمایشگاهی تحقیقات قابل توجهی صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به کارهای (هان و همکاران، ۱۹۸۶؛ ابرهارت-فیلیس و همکاران، ۱۹۸۹؛ وانگ و نور، ۱۹۹۲b و وانگ، ۲۰۰۰) اشاره کرد.

اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت امواج در نمونه‌های سنگ مخزن و محاسبه ضرایب پؤاسون، مقدمات مورد نیاز برای شناسایی و آشکارسازی لیتولوژی را

$$\rho_{\text{matrix}} = \rho_{\text{Dry}} / (1 - \varphi) \quad (1)$$

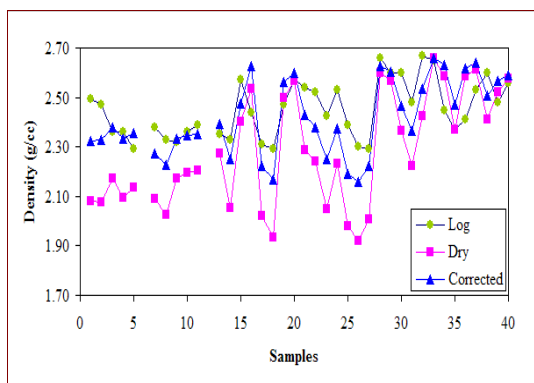
که در آن ρ_{matrix} چگالی خمیره، ρ_{Dry} چگالی در حالت خشک و φ مقدار تخلخل نمونه است.

آنگاه با داشتن مقادیر چگالی خمیره و سیالات (آب و نفت) و اطلاعات مربوط به درصد اشباع نمونه‌ها از هر یک از این سیالات (نگار مقاومت الکتریکی) و همچنین با استفاده از رابطه میانگین (رابطه ۲) می‌توان مقدار چگالی را برای شرایط مخزن در محیط آزمایشگاهی به دست آورد:

$$\rho = \varphi \rho_F (1 - S_W) + \varphi \rho_W S_W + (1 - \varphi) \rho_{\text{matrix}} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی تصحیح شده، ρ_F چگالی سیال (نفت)، ρ_W چگالی آب سازند و S_W درصد اشباع آب و φ مقدار تخلخل در نمونه است.

آنگاه مقادیر چگالی تصحیح شده با چگالی در حالت خشک و چگالی در نگار پتروفیزیکی با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۲). میزان تفاوت این مقادیر حدود ۷ درصد است. از آنجا که سعی بر آن است که مقایسه‌ای بین مقادیر چگالی صورت پذیرد، هر کدام از این مقادیر را به مثابه یک ورودی این بررسی در نظر می‌گیریم.



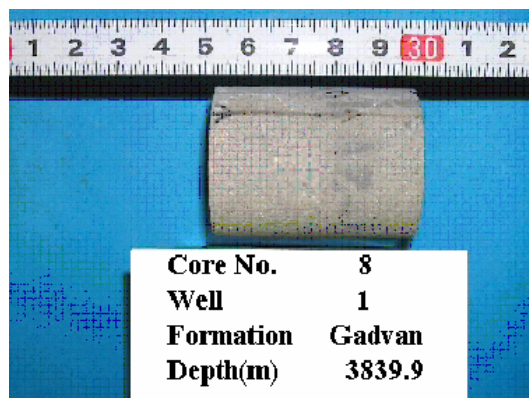
شکل ۲. مقادیر چگالی‌های تصحیح شده، حالت خشک و نگار پتروفیزیکی با یکدیگر مقایسه شدند. این مقادیر به صورت جداگانه در جداسازی لیتولوژی به کار رفته‌اند.

جداسازی نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک به تفصیل توضیحاتی ارائه می‌شود.

۲ مراحل کار

• آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا با بررسی نگارهای پتروفیزیکی و زمین‌شناسی برای سازند مورد نظر در عمق‌های خاص مغزه‌هایی به صورت پلاگ تهیه شدند. قطر این پلاگ‌ها ۳/۸۱ سانتی‌متر و طول آنها ۶ سانتی‌متر است. عمل نمونه‌برداری به صورت عمودی است و به همراه این عمل می‌توان از نمونه‌های اطراف پلاگ نیز برای آزمایش‌هایی از قبیل XRD و تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی استفاده کرد (شکل ۱).

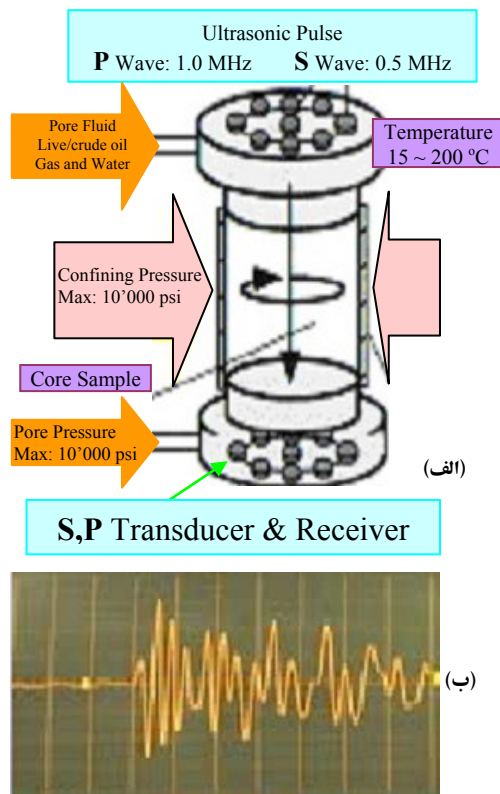


شکل ۱. یکی از نمونه‌های تهیه شده به شکل پلاگ با قطر ۳/۸۱ سانتی‌متر و طول ۶ سانتی‌متر. نمونه‌گیری به صورت عمودی صورت گرفته است.

• اندازه‌گیری چگالی، تخلخل و تراوایی نمونه‌ها

تخلخل نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تخلخل‌سنج مدل ASC300 و به روش تزریق گاز هلیوم اندازه‌گیری شد.

چگالی در حالت خشک با استفاده از اندازه‌گیری ابعاد فیزیکی (قطر، ارتفاع و جرم) قابل محاسبه است. با معلوم بودن مقدار چگالی در حالت خشک و مقدار تخلخل، مقدار چگالی خمیره قابل محاسبه است:



شکل ۳. (الف) نحوه عملکرد دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج کشسان روی مغزه‌های مورد آزمایش، شامل فرستنده و گیرنده امواج S و P، ماکزیموم فشار همه جانبه، فشار شاره، تغییرات دمای نمونه و بسامد امواج S و P. (ب) یک نمونه از زمان رسید اولیه امواج کشسان دریافت شده با گیرنده که در اسیلوسکوپ قابل مشاهده است.

۳ روش تعیین لیتولوژی با استفاده از ضرایب کشسان یکی از راه‌های تعیین لیتولوژی، استفاده از ضرایب کشسانی (ضرایب پؤاسون و لامه) است. برای تعیین ضرایب کشسانی در یک محیط همگن و همسانگرد، علاوه بر اینکه اطلاعات مربوط به سرعت انتشار امواج P و S مورد نیاز است، چگالی سنگ نیز باید معلوم باشد (وایت، ۱۹۸۳).

• تعیین ضرایب پؤاسون

در شکل ۴ کاهش سرعت برحسب افزایش تخلخل مشاهده می‌شود اما نمی‌توان رابطه‌ای منطقی برای نوع

میزان تراوایی نیز به صورت افقی و به فاصله یک سانتی‌متر از یکدیگر و در چهار جهت متفاوت تعیین می‌شود. این اندازه‌گیری با دستگاه PDPK صورت گرفته است. در نهایت می‌توان مقدار تراوایی را با متوسط‌گیری مقادیر به دست آمده محاسبه کرد.

نمونه‌ها به سه دسته ماسه‌سنگ با تخلخل بیشتر از ۱۸ درصد و سنگ آهک با تخلخل بیش از ۱۰ درصد و همچنین سنگ آهک با تخلخل کمتر از ۱۰ درصد تقسیم شده‌اند. همچنین برای مقایسه بهتر در شرایط برابر تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با نمونه‌های ماسه سنگ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

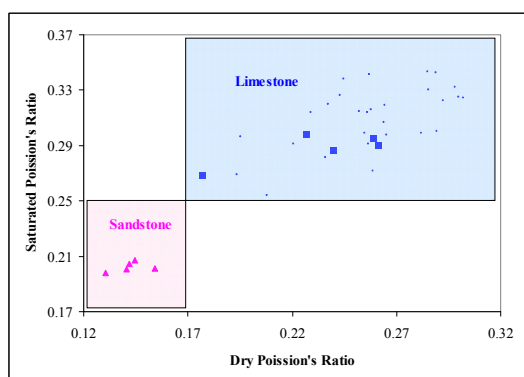
• اندازه‌گیری سرعت‌های V_S و V_P نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع

برای اندازه‌گیری در شرایط مخزن ابتدا باید دستگاه و نمونه در شرایط پایدار فشار و دمای مورد نظر قرار گیرند که این عمل مستلزم زمانی نسبتاً طولانی است. سپس با تغییر فشار مؤثر از مقدار ماکزیموم فشار به سمت حداقل می‌توان شرایط متفاوت را در محیط نمونه ایجاد و زمان عبور موج را اندازه‌گیری کرد.

سرعت امواج تراکمی و برشی در دو حالت خشک و اشباع از آب اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیری‌ها با دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج کشسان در مرکز تحقیقات و فناوری شرکت نفت ژاپن (TRC) صورت گرفت. اندازه‌گیری سرعت امواج کشسان برای شاره‌های متفاوت (آب و نفت) و در مورد سازندهای فوق از فشار همه جانبه حدود ۴۵GPa برای سازند گدوان و حدود ۶GPa برای سازند سروک شروع و به فشار حدود ۳۰GPa رسیده است. معمولاً دمای نمونه مقدار ثابت و برابر با دمای ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

طبق تعریف نسبت پواسون، نسبت کرنش عمود به کرنش موازی در تنش یک محوری در جهتی خاص است و به این لحاظ نسبت پواسون وابستگی فشاری دارد و با کاهش فشار افزایش می‌یابد (دومنیکو، ۱۹۸۴).

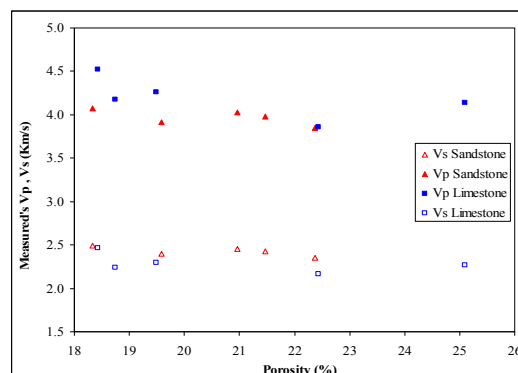
با استفاده از اندازه‌گیری سرعت‌های V_S و V_P در فشار و دمای مخزن در محیط آزمایشگاهی و تعیین نسبت پواسون می‌توان نوع لیتولوژی را برآورد کرد. با محاسبه نسبت‌های پواسون در حالت‌های اشباع از آب و خشک و ترسیم آن نسبت به یکدیگر در یک نمودار، دو نوع نمونه ماسه‌سنگ و سنگ آهک به خاطر تفاوت در مقادیر نسبت پواسون، از یکدیگر تمیز داده می‌شوند (شکل ۶). البته همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تعداد ۵ نمونه ماسه‌سنگ و سنگ آهک با مقدار تخلخل مشابه فقط به خاطر نوع لیتولوژی متفاوت دارای نسبت پواسون متفاوت‌اند.



شکل ۶. نسبت ضریب پواسون در حالت خشک و اشباع از آب نسبت به یکدیگر. سنگ آهک و ماسه‌سنگ از یکدیگر قابل تفکیک است. در این شکل تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل‌های مشابه با ماسه‌سنگ نیز به‌منظور مقایسه، به‌صورت درشت‌تر نشان داده شده است.

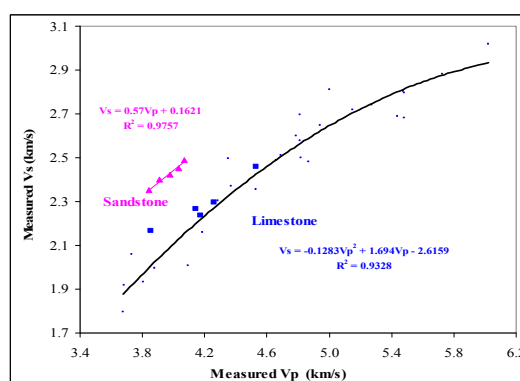
در واقع نسبت‌های پواسون بیشتر از ۰/۱۷ و ۰/۲۵ به ترتیب در حالت خشک و در حالت اشباع از آب، نشان‌دهنده لیتولوژی سنگ آهک و نیز نسبت‌های پواسون کمتر از ۰/۱۷ و ۰/۲۵ به ترتیب در حالت خشک و در حالت اشباع از آب نشان‌دهنده لیتولوژی ماسه‌سنگ هستند.

لیتولوژی بین سرعت و تخلخل نمونه‌ها یافت.



شکل ۴. نمودار کاهش سرعت امواج تراکمی و برشی در حالت اشباع از آب بر حسب تخلخل. تعیین لیتولوژی در این حالت تقریباً امکان‌پذیر نیست. در این شکل تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ نیز به‌منظور مقایسه، به‌صورت نقاط درشت‌تر نشان داده شده است.

سرعت موج برشی را می‌توان برحسب سرعت موج تراکمی برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در شرایط فشار مخزن مورد بررسی قرار داد (شکل ۵). البته در این نمودار به خوبی می‌توان نوع لیتولوژی را جداسازی کرد. برای مقایسه تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ به‌صورت نقاط درشت‌تر نشان داده شده است.



شکل ۵. سرعت موج برشی برحسب سرعت موج تراکمی برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در فشار و دمای مخزن. لیتولوژی به راحتی قابل تفکیک است. در این شکل تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ نیز به‌منظور مقایسه به‌صورت نقاط درشت‌تر نشان داده شده است.

• تعیین ضرایب لامه

برای ضریب تراکم ناپذیری نمی‌توان همانند سایر ضرایب کشسانی تعریف مشخصی در نظر گرفت. مقدار λ در فیزیک سنگ به شاره درون حفره و μ نیز به نوع خمیره سنگ حساس است.

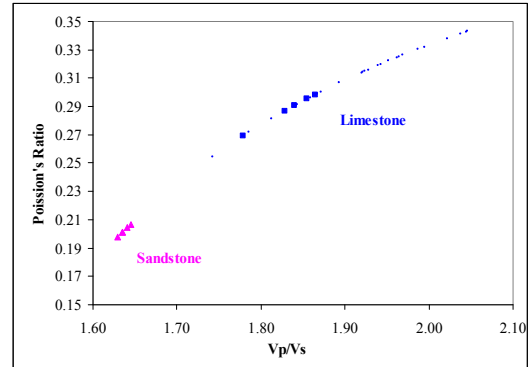
مقادیر ضرایب لامه با استفاده از سرعت امواج تراکمی و برشی در شرایط اشباع از آب برای نمونه‌ها در فشار و دمای مخزن در محیط آزمایشگاهی و مقادیر چگالی تصحیح شده محاسبه شده است. پس از محاسبه مقادیر $\mu.p$ و $\lambda.p$ با توجه به اینکه کل مشخصه‌های نمونه‌ها از قبیل مقادیر تخلخل و نوع لیتولوژی هر نمونه مشخص است، با رسم نمودارهای مقادیر $\mu.p$ برحسب $\lambda.p$ می‌توان نمونه‌ها را به ۳ دسته مجزا شامل ماسه‌سنگ با تخلخل بیش از ۱۸ درصد و سنگ آهک با تخلخل کمتر بیشتر از ۱۰ درصد و همچنین سنگ آهک با تخلخل کمتر از ۱۰ درصد (به ترتیب در نواحی I، II و III در شکل ۹) تقسیم‌بندی کرد. مقادیر ضرایب پواسون و لامه با هدف تفکیک نوع نمونه‌ها به دست آمده است.

از آنجا که به کمک نرم‌افزارهای موجود می‌توان خصوصیات مخزن را بر روی خطوط لرزه‌ای پیش‌بینی کرد، لذا می‌توان در گستره‌ای از مخزن که داده لرزه‌ای موجود است نوع لیتولوژی را پیش‌بینی و جداسازی کرد.

بنابراین به کمک محاسبه ضرایب پواسون و لامه در محدوده‌ای کوچک مانند محل چاه می‌توان لیتولوژی نمونه‌های مغزه را در محیط آزمایشگاهی از یکدیگر تفکیک کرد و با تلفیق داده‌های چاه و خطوط لرزه‌ای و نیز به کمک بررسی برآورد خصوصیات مخزن در گستره‌ای وسیع، نوع لیتولوژی مخزن را پیش‌بینی کرد.

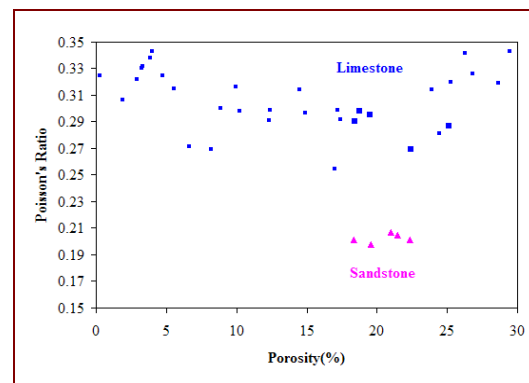
لازم به ذکر است که استفاده از چگالی‌های به دست آمده از سه روش متفاوت در این بررسی فقط به منظور نمایش وابستگی نداشتن روش جداسازی لیتولوژی به روش تعیین چگالی صورت گرفته است (شکل ۹).

همچنین می‌توان تفکیک لیتولوژی را بر روش مقادیر ضریب پواسون در حالت اشباع از آب به نسبت سرعت امواج تراکمی و برشی (V_p/V_s) بررسی کرد (شکل ۷).



شکل ۷. مقادیر نسبت پواسون برحسب نسبت سرعت‌های تراکمی و برشی برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در شرایط مخزن. در این نمودار تفکیک نمونه‌ها امکان‌پذیر است. در این شکل تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ نیز برای مقایسه به صورت نقاط درشت‌تر نشان داده شده است.

از سوی دیگر می‌توان با استفاده از نمودار ضریب پواسون برحسب تخلخل، نوع لیتولوژی مخزن را پیش‌بینی کرد و این امر فقط به خاطر تفاوت در مقادیر نسبت ضریب پواسون در دو نوع لیتولوژی مختلف حاصل می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸. مقادیر نسبت پواسون برحسب تخلخل نمونه‌های ماسه‌سنگ و سنگ آهک در شرایط مخزن. در این نمودار تفکیک نمونه‌ها امکان پذیر است. در این شکل تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ نیز جهت مقایسه به صورت نقاط درشت‌تر نشان داده شده است.

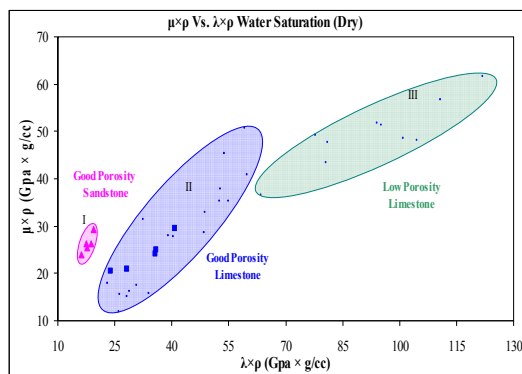
(الف) چگالی در حالت خشک، (ب) چگالی با استفاده از نگار پتروفیزیکی و (ج) چگالی در حالت تصحیح شده. این مقایسه روشن می‌سازد که در هر سه حالت جداسازی صورت می‌گیرد و وابستگی به روش تعیین چگالی وجود ندارد. در این شکل نیز تعداد ۵ نمونه سنگ آهک با تخلخل مشابه با ماسه‌سنگ جهت مقایسه به صورت نقاط درشت‌تر در ناحیه II قرار می‌گیرند.

۴ نتیجه‌گیری

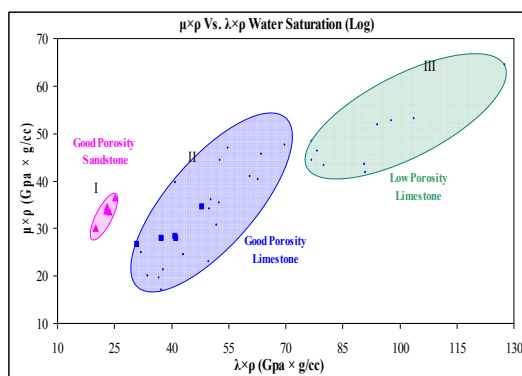
- * یکی از روش‌های مفید و کارآمد در روش‌های لرزه‌ای برای پیش‌بینی لیتولوژی، استفاده از سرعت موج طولی V_p و سرعت موج عرضی V_s در فشار و دمای مخزن است.
- * به کمک اندازه‌گیری آزمایشگاهی سرعت امواج برشی و تراکمی در فشار و دمای مخزن و محاسبه ضریب پواسون می‌توان نوع لیتولوژی را برآورد کرد.
- * به کمک ضرایب لامه (μ و λ) و رسم نمودارهای $\mu.p$ برحسب $\lambda.p$ می‌توان نوع لیتولوژی سازند را پیش‌بینی کرد.
- * مقایسه بین سه روش محاسبه چگالی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی، حالت خشک و حالت تصحیح شده نشان می‌دهد که جداسازی لیتولوژی به استفاده از هر یک از انواع چگالی‌ها وابسته نیست.
- * به کمک محاسبه ضرایب پواسون و لامه می‌توان لیتولوژی نمونه‌ها را در فشار و دمای مخزن در محیط آزمایشگاهی از یکدیگر تفکیک کرد و با استفاده از نرم‌افزارهای موجود در زمینه برآورد خصوصیات مخزن با اتکا به داده‌های لرزه‌ای (دو بعدی و سه بعدی) می‌توان جداسازی لیتولوژی را در سراسر محدوده مخزن، مورد بررسی قرار داد.

منابع

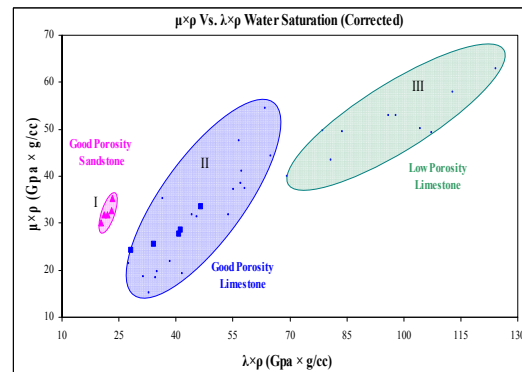
Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid: 1. Low-frequency range, 2. Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Am., 28, 168-191.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. رسم مقادیر $\mu.p$ برحسب $\lambda.p$ برای نمونه‌های سنگ آهک و ماسه‌سنگ و دسته‌بندی نمونه‌ها به ۳ دسته مجزا با توجه به داده‌های پتروفیزیکی و برحسب نوع سنگ و میزان تخلخل آنها.

ناحیه I: ماسه‌سنگ با تخلخل بیشتر از ۱۸ درصد دارای محدوده:

$$25 < \lambda.p < 40 \quad \text{و} \quad 25 < \mu.p < 40$$

ناحیه II: سنگ آهک با تخلخل بیشتر از ۱۰ درصد دارای محدوده:

$$25 < \lambda.p < 65 \quad \text{و} \quad \mu.p > 10$$

ناحیه III: سنگ آهک با تخلخل کمتر از ۱۰ درصد دارای محدوده:

$$\lambda.p > 65 \quad \text{و} \quad \mu.p > 35$$

- Domenico, S. N., 1984, Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity: *Geophysics*, **49**, 1188-1195.
- Eberhart-Philips, D., Han, D. H., and Zoback, M. D., 1989, Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone: *Geophysics*, **54**, 82-89.
- Gassmann, F., 1951, Über die Elastizität poröser Medien. *Vierteljahresschrift d. Naturf. Ges. Zürich*, Jahrg, **96**, 1-23.
- Han, D. H., Nur, A. and Morgan, D. L., 1986, Effective of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: *Geophysics*, **41**, 895-921.
- Wang, Z., 2000, The Gassmann equation revisited comparing laboratory data with Gassmann prediction: *Geophys. Rep. Ser.*, **3**, 8-23.
- Wang, Z., and Nur, A., 1992a, Elastic wave velocities in porous media: A theoretical recipe: *Geophys. Rep. Ser.*, **2**, 1-35.
- Wang, Z., and Nur, A., 1992b, Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir rock: *Geophys. Rep. Ser.*, **12**.
- White, J. E., 1983, *Underground sound: Application of Seismic wave*: Elsevier, New York.