

سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از

مخازن هیدروکربنی جنوب ایران

نوشته: مهدی قاسمی*، دکتر مجید نبی بیدهندی** و جلال خزانهداری***

Wave Velocities in carbonate rock specimens of a hydrocarbon reservoir in the south of Iran

By: M. Ghassemi *, Dr. M. Nabi-Bidhendi** & J. Khazanehdari***

چکیده

در این پژوهش اثر پارامترهای مختلف بر روی سرعت انتشار امواج الاستیک (تراکمی و برشی) و نتایج اعمال نظریه‌های گاسمن، بیوت و وایلی بر روی داده‌های آزمایشگاهی برای هشت نمونه سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران بررسی شده است. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی کلیه نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع انجام شده است. فشار سیال درون حفره‌های اشباع از نفت سفید، برابر ۵ MPa و مقادیر فشار مؤثر از ۵ MPa تا ۶۰ MPa انتخاب شده است. بسامد مرکزی برای موج P برابر ۱ MHz و برای موج S برابر ۰.۶ MHz بوده و تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق انجام گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سرعت انتشار امواج تراکمی در اثر اشباع افزایش می‌یابد ولی سرعت امواج برشی در سنگ‌های اشباع از سیال، تغییرات ناچیزی را نسبت به همان سنگ‌ها در حالت خشک نشان می‌دهد. افزایش فشار مؤثر در هر دو حالت خشک و اشباع باعث افزایش سرعت می‌شود، اما آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر است. با افزایش تخلخل نمونه‌ها، سرعت‌ها کاهش و با افزایش چگالی نمونه‌ها سرعت‌ها افزایش می‌یابند. با به کارگیری نظریه‌های گاسمن و بیوت مشاهده شد که این نظریه‌ها همخوانی بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. انحراف پیش‌بینی شده در نظریه گاسمن از داده‌های آزمایشگاهی بین ۳٪- تا ۱٪+ است. پاشش بیوت برای سرعت امواج تراکمی کمتر از ۳٪، درصد و برای سرعت امواج برشی کمتر از ۵٪، درصد است. همچنین مشاهده شد که معادله میانگین زمانی وایلی همخوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی ندارد.

کلیدواژه‌ها: سرعت امواج تراکمی و برشی، سنگ کربنات، مخزن هیدروکربن، نظریه‌های گاسمن و بیوت.

Abstract

In this research, effects of different parameters on elastic wave velocities were assessed for eight carbonate rock specimens and different theories applied to laboratory data. Ultrasonic measurements were made on the samples in both dry and saturated states. Pore pressure of fluid (kerosene) was kept constant at 5MPa and the range of effective pressures was from 5MPa to 60 MPa. Central wave frequency of P-wave was 1 MHz and that of S-wave 0.6 MHz. All the experiments were carried out in room temperature.

The results show that by saturating the samples, P-wave velocities will increase but S-wave velocities show negligible changes. An increase in effective pressure causes the velocities to rise in both dry and saturated states, though the rate of P-wave velocity increase is more than that of S-wave. Results also show that wave velocities will increase by increasing the density or decreasing the porosity.

We applied Gassmann and Biot theories to the laboratory data. The results showed that these theories were in agreement with the results of ultrasonic measurements. Gassmann deviation was between -3% and +1%. Biot dispersion for P- and S- wave velocities was less than 0.3 and 0.5 percent, respectively. We also concluded that wyllie's time average equation did not show a good agreement with the laboratory data.

Keywords: P-wave and S-wave velocities, carbonate rocks, hydrocarbon reservoir, Gassmann and Biot theories

۱- مقدمه

و تولید گاز صورت گرفته است. از نظر سنگ شناسی، سازند دالان در سه بخش کربنات بالایی، نار و کربنات زیرین، شامل دولومیت، انیدریت، آهک و مقداری شیل است.

۳- نمونه های مورد آزمایش و روش کار آزمایشگاهی

نمونه های سنگ اولیه، استوانه های حفر شده (G1, G2, G4, G5) از یک چاه عمودی در میدان هیدروکربنی فوق است که در محدوده عمق m ۳۷۵۸ تا ۳۷۱۹ مغزه گیری شده بودند. قطر این نمونه ها ۱۰ cm و طول آنها از ۷ cm تا ۱۰ cm متغیر بود. از هر یک از سنگ ها، دو نمونه کوچک تر در دو راستای متعامد X و Z به قطر ۵ cm و طول ۲/۵ cm مغزه گیری شد (X و Z به ترتیب نشانگر راستاهای افقی و قائم می باشند). نمونه های سنگ با محلول تولوئن شسته سپس با حرارت خشک شدند. مشخصات کانی شناسی نمونه ها با روش پراش پرتو X (XRD) مطابق جدول ۱ به دست آمد. برای سنجش تخلخل از یک تخلخل سنج هلیوم و برای سنجش نفوذپذیری از یک نفوذسنج نیتروژن استفاده شد. نتایج اندازه گیری تخلخل، نفوذپذیری، چگالی، وزن و مشخصات هندسی نمونه ها در جدول ۲ آمده است.

برای اندازه گیری سرعت انتشار امواج از روش بازتابی استفاده شد (Winkler and Plona, 1982, McCann and Sothcoth, 1992, Best, 1994). طرح سیستم آزمایشگاهی و شیوه اندازه گیری مقادیر سرعت با استفاده از این روش، به طور مبسوط بوسیله قاسمی (۱۳۸۱) شرح داده شده است. در این روش، نمونه سنگ بین دو تیغه شیشه ای قرار می گیرد. یک ترانس دیوسر (transducer) اولتراسونیک که در بالای تیغه شیشه ای بالایی قرار گرفته است، سیگنالی را می فرستد که پس از عبور از تیغه شیشه ای، قسمتی از آن از سطح بالایی نمونه سنگ و قسمت دیگر پس از عبور از سنگ از سطح پایینی آن بازتابیده می شود. آنگاه از اختلاف زمان سیر این دو موج بازتاب و معلوم بودن طول نمونه، سرعت محاسبه می شود. این سیستم بازتابی در یک دستگاه فشار بالا قرار می گیرد. بسامد مرکزی ترانس دیوسر موج P برابر ۱ MHz و برای موج S برابر ۰/۶ MHz بود و آزمایش در دمای اتاق انجام گرفت.

نخست اندازه گیری مقادیر سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه های سنگ خشک انجام شد و پس از آن، نمونه ها با قرار گرفتن درخلاء به میزان قابل قبول از هوا خالی شده و سپس نفت سفید به عنوان سیال اشباع کننده با فشار ۷ MPa به نمونه ها تزریق شد و برای مدت سه روز، نمونه ها

مطالعات فیزیکی سنگ شامل دو بخش آزمایشگاهی و نظریه است. در آزمایشگاه، اندازه گیری های سرعت و تضعیف امواج الاستیک در فشار و دماهای مختلف انجام می شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف سنگ فیزیکی مانند کانی شناسی، تخلخل، اشباع، نفوذپذیری و غیره بر روی ویژگیهای لرزه شناسی نمونه ها اندازه گیری می شود. کاربرد مطالعات آزمایشگاهی و نظریه سنگ فیزیکی رو به افزایش است. از جمله، مقادیر پارامترهای به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در تصمیم گیری برای تولید و یا توسعه مخزن (به دلیل نقشی که در تعیین مشخصات مخزن ایفا می کند) تأثیر مهمی دارد. در مطالعات نظریه، مدل فیزیکی سنگ به دست می آید که رابطه بین پارامترهای لرزه شناسی (مانند سرعت) و پارامترهای سنگ فیزیکی (مانند تخلخل) را بیان می دارد. با مدل به دست آمده می توان مقاطع مصنوعی لرزه ای مخزن را ایجاد کرد و با مقایسه آن، با مقاطع لرزه ای حاصل از پیمایش به تفسیر این مقاطع پرداخت و یا تأثیر تغییر پارامترهای مختلف را در ویژگی های مقاطع مصنوعی مورد مطالعه قرار داد. از سوی دیگر، می توان با تبدیل معکوس مقاطع لرزه ای و به دست آوردن پاگیری متوسط و زمان سیر کلی مخزن، تخلخل کلی و ضخامت مخزن را محاسبه نمود (Marion and Jizba, 1997).

در این مقاله ابتدا به طور مختصر به شرح زمین شناسی منطقه پرداخته و آنگاه روش کار آزمایشگاهی و نتایج حاصل از آن ذکر می شود. سپس در بخش بعد تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و سنگ فیزیکی بر روی نتایج آزمایشگاهی مورد بحث قرار می گیرد. آنگاه مدل های مختلف فیزیکی سنگ با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده و در نهایت نتیجه گیری آورده شده است.

۲- زمین شناسی منطقه

میدان هیدروکربنی مورد مطالعه در سازند دالان (خوف) در جنوب ایران قرار دارد. این سازند در توالی پرمینی خاورمیانه که از جنوب خاوری ترکیه تا عمان امتداد دارد، قرار گرفته است (Kashfi, 2000). در این سیستم که بیشتر از سنگ های کربنات تشکیل شده، هفت میدان بزرگ گازی جهان قرار دارد. ضخامت سیستم پرمین در عربستان، کمترین، در ایران از متوسط تا زیاد و در عمان بیشترین مقدار را داراست (Edjell, 1997). توالی پرمین در خلیج فارس، به طور عمده با پوش سنگ ها و لایه های زیرین نفوذ ناپذیر محصور شده و شرایط خوبی را از نظر سنگ مخزن فراهم کرده است. تا به حال در این سیستم فقط اکتشاف

در مورد سرعت امواج برشی، اثر اشباع ناچیز است. زیرا مدول برشی مایعات (بوئیه مایعات سبک) تقریباً صفر است و تغییری در مدول برشی سنگ خشک ایجاد نمی‌کند. از سوی دیگر با اشباع سنگ، چگالی آن افزایش می‌یابد. بنابراین، براساس رابطه (۲) انتظار داریم که اشباع سنگ باعث کاهش سرعت امواج برشی در آن شود.

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

شکل ۲ نسبت مدول برشی در حالت اشباع را نسبت حالت خشک برحسب تخلخل نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که این نسبت بجز در مورد یکی از نمونه‌ها (G5X)، بسیار نزدیک به ۱ است. در مورد نمونه G5X در هنگام اندازه‌گیری بر روی نمونه خشک به نظر رسید که نمونه، در فشار بالا، متحمل ترک‌هایی شده که این امر سبب گردید حتی در فشار 50MPa برای احتیاط، اندازه‌گیری انجام نشود. لذا به دلیل وجود چنین ترک‌هایی، سرعت انتشار موج در کلیه فشارها، در حالت اشباع بیش از حالت خشک به دست آمده است و این امر باعث افزایش نسبی مدول برشی در حالت اشباع نمونه G5X شده است. در مورد امواج تراکمی، در تمام نمونه‌ها نسبت‌های مدول بالک در حالت اشباع به حالت خشک افزایش نشان می‌دهد (شکل ۳).

شکل هندسی حفره‌ها نیز در میزان اثر اشباع بسیار مهم است. برای مثال، در سنگ‌های دارای حفره‌های کروی، به دلیل استحکام این منافذ، تاثیر مایع منفذی در افزایش مدول بالک نسبت به سنگ‌های دارای حفره‌های دراز و باریک بیشتر است.

۴-۲- اثر چگالی

با توجه به روابط ۱ و ۲ انتظار داریم با افزایش چگالی پیکره سنگ، سرعت امواج الاستیک کاهش نشان دهد ولی تاثیر افزایش چگالی در افزایش مدول‌های الاستیک بیشتر است. بنابراین همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، افزایش چگالی نمونه‌های سنگ خشک باعث افزایش سرعت در آنها شده است. البته در اینجا هم آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر از امواج برشی است.

۴-۳- اثر تخلخل

سرعت امواج تراکمی و برشی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد، زیرا افزایش تخلخل، تراکم پذیری بیشتر سنگ را در پی دارد. در شکل ۵ نمودار تغییرات سرعت را در برابر تخلخل در نمونه‌های خشک و اشباع شده ملاحظه می‌کنیم. در این شکل، مقادیر سرعت مربوط به نتایج حاصل در فشار مؤثر ۴۰ مگاپاسکال است.

در همین وضعیت نگاه داشته شدند تا به‌طور کامل اشباع شوند. در مرحله بعد، نمونه‌ها بدون تماس با هوا به دستگاه فشار اولتراسونیک منتقل شدند. در تمام آزمایش، فشار سیال منفذی برابر ۵ MPa بود. سرعت امواج الاستیک در محدوده فشارهای مؤثر ۵ MPa تا ۶۰ MPa اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری مقادیر سرعت امواج تراکمی و برشی در فشارهای مختلف توسط قاسمی (۱۳۸۱) ارائه شده است.

۴- بررسی تأثیر پارامترهای محیطی و فیزیک سنگ

۴-۱- اثر فشار و اشباع

شکل ۱ تغییرات سرعت بر حسب فشار را برای هر دو حالت خشک و اشباع در نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش فشار مؤثر، سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های سنگ خشک و اشباع شده افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش فشار مؤثر، ترک‌ها و شکستگی‌های ریزسنگ بسته می‌شوند که خود باعث افزایش مدول‌های بالک و برشی در سنگ می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی در نمونه‌ها، بیش از آهنگ افزایش سرعت امواج برشی با فشار است. لازم به اشاره است که اندازه‌گیری سرعت در حالت اشباع برای نمونه‌های G2، G4 و G5، تا فشار ۵۰ MPa انجام گرفته است. همچنین برای نمونه G5X اندازه‌گیری‌ها در حالت خشک تا فشار ۴۰ MPa انجام شده است. برای همین نمونه، در حالت اشباع به علت مناسب نبودن شکل موج‌های حاصل اندازه‌گیری سرعت موج P در فشار ۵ MPa و سرعت موج S در فشارهای ۵ MPa و ۱۰ MPa امکان پذیر نبود.

همچنین از شکل ۱ دیده می‌شود که سرعت امواج تراکمی در نمونه‌های اشباع شده بیشتر از نمونه‌های خشک است، زیرا مایعات، تراکم پذیری ناچیزی دارند و حضور آنها در منافذ سنگ باعث کاهش تراکم پذیری و در نتیجه افزایش مدول بالک سنگ می‌شود. از سوی دیگر حضور مایع منفذی باعث افزایش چگالی سنگ می‌شود. براساس رابطه ۱ افزایش چگالی در کاهش سرعت امواج تراکمی مؤثر است. اما تاثیر افزایش مدول بالک در افزایش سرعت امواج تراکمی بیش از اثر افزایش چگالی در کاهش سرعت است.

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

که در آن V_p سرعت امواج تراکمی، K مدول بالک، μ مدول برشی و ρ چگالی سنگ است.

۵- مدل سازی فیزیک سنگ

در این مقاله، به اعمال نظریه های گاسمن و بیوت و نیز معادله میانگین زمانی وایلی بر روی داده ها پرداخته شده است. هر یک از مدل های نظری، فرض های اولیه خاص خود را دارند (Wang and Nur, 1992). برای مثال همگن و همسانگرد بودن سنگ، فرض اولیه اغلب نظریه هاست.

۵-۱- نتایج نظریه گاسمن

بر اساس نظریه گاسمن (۱۹۵۱)، مدول بالک سنگ اشباع شده از رابطه ۳ محاسبه می شود.

$$K = K_d + \frac{(1 - K_d)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (3)$$

که در آن، رابطه K مدول بالک سنگ اشباع شده، K_d مدول بالک سنگ خشک (پیکره سنگ)، K_m مدول بالک ماتریکس سنگ، K_f مدول بالک سیال منفذی و ϕ تخلخل است. در این مدل، مدول برشی مایع اشباع کننده، صفر در نظر گرفته می شود. بنابراین بر اساس رابطه ۴، مدول برشی سنگ اشباع شده با مدول برشی سنگ خشک برابر است:

$$\mu = \mu_d \quad (4)$$

که در آن، μ_d مدول برشی سنگ خشک است. پارامترهای K_d و μ_d از مقادیر سرعت های تراکمی و برشی سنگ خشک که در آزمایشگاه به دست آمده اند با کمک روابط ۵ و ۶ به دست می آیند.

$$K_d = \rho_d \cdot V_{pd}^2 - \frac{4}{3} \mu_d \quad (5)$$

$$\mu_d = \rho_d \cdot V_{sd}^2 \quad (6)$$

پارامتر K_m با استفاده از رابطه میانگین گیری ۷ به دست می آید. در صد غلظت کانی های موجود در نمونه ها در جدول ۱ و مقدار تخلخل نمونه ها در جدول ۲ آمده است.

$$K_m = \% \text{dolonite} \times K_{\text{dolonite}} + \% \text{anhydrite} \times K_{\text{anhydrite}} + \% \text{quartz} \times K_{\text{quartz}} \quad (7)$$

که برای مثال در آن K_{dolonite} ، مدول بالک دولومیت و $\% \text{dolonite}$ ، درصد غلظت دولومیت در مغزه نمونه است.

نکته ی مهمی که باید به آن توجه کرد وابستگی قابل ملاحظه K به K_m است. یعنی سرعت امواج تراکمی حاصل از نظریه گاسمن، می تواند به پارامتر ورودی مدول بالک کانی های تشکیل دهنده سنگ (در اینجا دولومیت) حساس باشد. این حساسیت در تخلخل های بالا، بیشتر نسبت به

مقدار مدول بالک سیال منفذی دیده می شود تا نسبت به مدول بالک ماتریکس سنگ. با مراجعه به منابع مختلف که مدول های بالک و برشی کانی های مورد نظر را ارائه داده بودند، مقادیر ارائه شده به وسیله Wang (2000)، بهترین نتیجه را به دست می دهد. بر اساس این مرجع، مدول بالک دولومیت MPa ۹۴۸۰۰ است.

مقدار K_f (مدول بالک نفت سفید) مطابق مقدار ارائه شده به وسیله Schön (1996)، برابر MPa ۱۶۱۳ انتخاب شد. در شکل ۶، نمودارهای مقایسه ای سرعت امواج تراکمی و برشی حاصل از نظریه گاسمن (همچنین شامل نتایج نظریه بیوت) و نتایج آزمایشگاهی برای چهار نمونه که در جهت محور Z می باشند، مشاهده می شود. همان طور که ملاحظه می شود تطابق نتایج حاصل از نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در حد بسیار خوبی است. این نزدیکی در فشارهای مؤثر بالا بیشتر دیده می شود، زیرا به دلیل بسته شدن ترک ها و شکستگی ها در فشار بالا، نمونه سنگ به یک فرض اولیه نظریه گاسمن (همسانگرد بودن سنگ) نزدیک تر می شود. در مورد سرعت های امواج برشی، تفاوت ناچیز پیش بینی نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده، آن است که فرض صفر بودن مدول برشی سیال منفذی به واقعیت نزدیک است. در شکل ۷ به صورت دیگری تطابق بهتر نتایج حاصل از نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای بالا (MPa ۴۰) نسبت به فشارهای پایین تر (MPa ۱۰) برای سرعت های تراکمی، دیده می شود. در شکل (۸) همین مقایسه در مورد سرعت امواج برشی صورت گرفته است.

میزان انحراف پیش بینی نظریه گاسمن از مقادیر آزمایشگاهی از رابطه ۸ به دست می آید (Wang, 2000):

$$\text{Gassmann deviation}(\%) = \frac{\text{Gassmann } V_p - \text{measured } V_p}{\text{measured } V_p} \times 100 \quad (8)$$

در شکل ۹ میزان این انحراف در فشار مؤثر MPa ۴۰ دیده می شود. همان گونه که ملاحظه می شود، اساساً مقدار این انحراف بین ۳٪- تا ۱٪+ است. علت این انحراف (پاشش ظاهری) را می توان به عوامل مختلفی از جمله شکل هندسی منافذ، پاشش سرعت، عدم تحقیق کامل فرضهای اولیه نظریه گاسمن و خطا در اندازه گیری پارامترهای ورودی رابطه گاسمن، نسبت داد. در شکل ۱۰ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نظریه گاسمن در تخلخل های مختلف مشاهده می شود.

۵-۲- نظریه بیوت

نظریه گاسمن، پاشش سرعت (رابطه سرعت با فرکانس) را لحاظ نمی کند و به عبارت دیگر نظریه گاسمن یک نظریه بسامد پایین است (در محدوده

حاصل از این مدل در فشار اتمسفری با نتایج آزمایشگاهی در فشار ۵ MPa (و در مورد نمونه های G5Y و G5X در فشار ۱۰ MPa) مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، این نظریه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان نمی دهد. از نظر حساسیت سنجی مشاهده شد که نتایج حاصل از این مدل، به V_f خیلی بیشتر از V_m حساس بودند. همچنین این مدل حساسیت زیادی به میزان تخلخل دارد.

۶- نتیجه گیری

نتایج اصلی حاصل از این پژوهش، به شرح زیر است:

- ۱- با اشباع نمونه های سنگ کربنات، سرعت امواج تراکمی نسبت به حالت خشک افزایش یافته اما سرعت امواج برشی تغییر ناچیزی می یابد.
- ۲- با افزایش فشار مؤثر، سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه های خشک و اشباع شده افزایش می یابد اما آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر از سرعت امواج برشی است. در ضمن آهنگ افزایش سرعت در نمونه های خشک بیشتر از همان نمونه های اشباع شده است.
- ۳- با افزایش تخلخل در نمونه های خشک و اشباع شده، سرعت امواج تراکمی و برشی کاهش می یابند ولی آهنگ کاهش سرعت امواج تراکمی بیشتر از امواج برشی است.
- ۴- با افزایش چگالی نمونه های خشک سرعت امواج تراکمی و برشی افزایش یافته اما آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر از امواج برشی است.
- ۵- نتایج حاصل از نظریه های گاسمن و بیوت همخوانی نزدیکی با داده های آزمایشگاهی بویژه در فشارهای مؤثر بالا دارند (به دلیل نزدیک تر شدن سنگ به شرایط همسانگردی).
- ۶- میزان انحراف پیش بینی نظریه گاسمن از مقادیر آزمایشگاهی در فشار ۴۰ MPa در محدوده ۳٪ تا ۱٪ قرار دارد.
- ۷- پاشش بیوت در نمونه های مورد بحث کمتر از ۰/۵ درصد است لذا می توان از آن صرف نظر کرد و نظریه گاسمن را به عنوان مدل فیزیک سنگ نمونه های مورد بحث پذیرفت.
- ۸- نتایج حاصل از معادله میانگین زمانی (مدل وایلی) همخوانی مطلوبی با داده های آزمایشگاهی ندارد، زیرا به طور کلی این مدل در مورد سنگهای کربنات با تخلخل پایین نتایج قابل قبولی را ارائه نمی دهد (Wyllie, 1956).

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه صنعت نفت بویژه از آقایان مهندس هندی و مهندس رودساز برای در اختیار قراردادن نمونه های اولیه سنگ و از آقای مهندس

بسامدهای لرزه ای). Biot (1956) نظریه خود را به گونه ای توسعه داد که هر بسامدی را در بر گیرد. معادلات نظریه بیوت برای بسامدهای بالا در روابط ۹ و ۱۰ آمده است.

$$V_{s\infty}^2 = \frac{\mu_d}{\rho_{11} - \frac{\rho_{12}^2}{\rho_{22}}} = \frac{\mu_d}{\rho_d + (1 - \frac{1}{\alpha})\phi\rho_f} \quad (9)$$

$$V_{p\infty}^2 = \frac{A + [A^2 - 4B(PR - Q^2)]^{1/2}}{2B} \quad (10)$$

که در آن $V_{s\infty}$ سرعت موج برشی، $V_{p\infty}$ سرعت موج تراکمی، ρ_d چگالی سنگ خشک و ρ_f چگالی سیال اشباع کننده سنگ است که برای نفت سفید برابر 800 kg/m^3 می باشد. α یا ضریب پیچایی، برای سنگهای کربنات، ۳ انتخاب می شود. روابط مربوط به دیگر پارامترهای ورودی نظریه بیوت در مقالات Wang (1997) و Wang and Nur (1992) آمده است. در شکل ۶ نمودار تغییرات سرعت های حاصل از نظریه بیوت در مقایسه با نتایج نظریه گاسمن و داده های آزمایشگاهی برای چهار نمونه مشاهده می شود. پاشش سرعت (پاشش بیوت) بر اساس نظریه بیوت به وسیله رابطه ۱۱ به دست می آید.

$$\text{Biot dispersion (\%)} = \frac{V_B - V_G}{V_G} \times 100 \quad (11)$$

که در آن، V_B سرعت امواج تراکمی حاصل از نظریه بیوت و V_G سرعت امواج تراکمی حاصل از نظریه گاسمن است. البته سازوکار دیگری افزون بر سازوکار بیوت در پاشش سرعت می تواند مؤثر باشد. این سازوکار که سازوکار جریان محلی نام دارد، به وسیله O'Connell and Budiansky (1977) و نیز Mavko and Nur (1978) معرفی شده است. در این پژوهش مقدار پاشش بیوت برای سرعت امواج تراکمی کمتر از ۰/۳ درصد و برای سرعت امواج برشی کمتر از ۰/۵ درصد به دست آمد. در شکل ۱۱، نمودار تغییرات پاشش بیوت در برابر تخلخل مشاهده می شود.

۵-۳- معادله میانگین زمانی

بر اساس معادله میانگین زمانی، سرعت امواج تراکمی از رابطه ۱۲ محاسبه می شود (Wyllie, 1956):

$$\frac{1}{V_P} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (12)$$

که در آن V_f سرعت امواج تراکمی در سیال منفذی و V_m سرعت امواج تراکمی در زمینه سنگ است. V_f بر اساس مقدار ارائه شده توسط Schö (1996)، برابر 1420 m/s انتخاب شد. در شکل ۱۲ نتایج

اعضای هیئت علمی بخش فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ تشکر و قدردانی نمایم.

مؤلف دوم لازم می داند از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای اعطای فرصت مطالعاتی به نامبرده برای انجام آزمایشها در آزمایشگاه فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ سپاسگزاری نماید.

امیری بشلی برای دراختیار قراردادن برخی مقاله ها و اطلاعات زمین شناسی تشکر و قدردانی می شود.

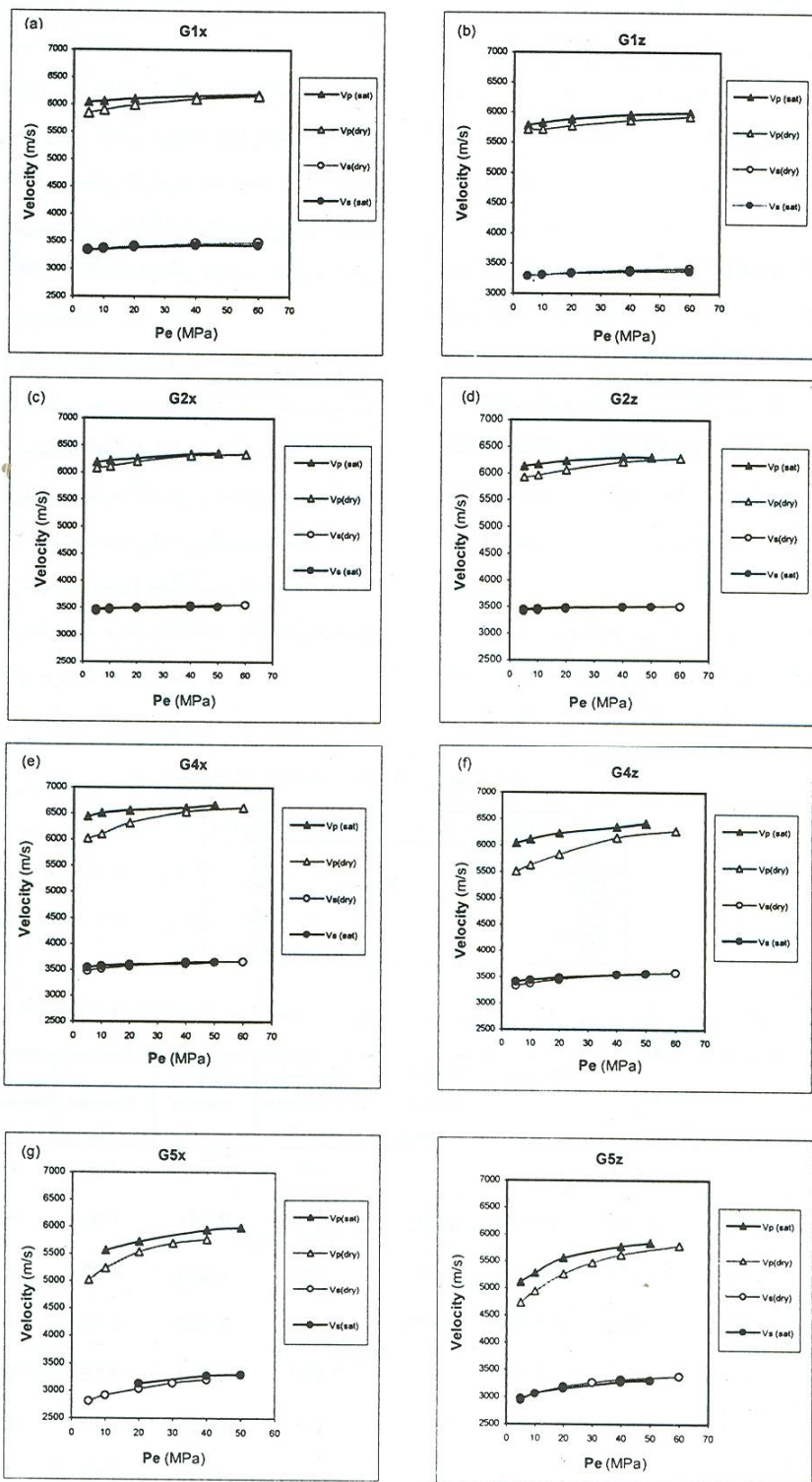
اندازه گیری های آزمایشگاهی نمونه های سنگ در آزمایشگاه فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ انگلستان انجام شده است و لازم می دانیم از همکاری پرفسور C. McCann، دکتر T. Astin و J. Sothcott

جدول ۱- مشخصات کانی شناسی نمونه های مورد آزمایش.

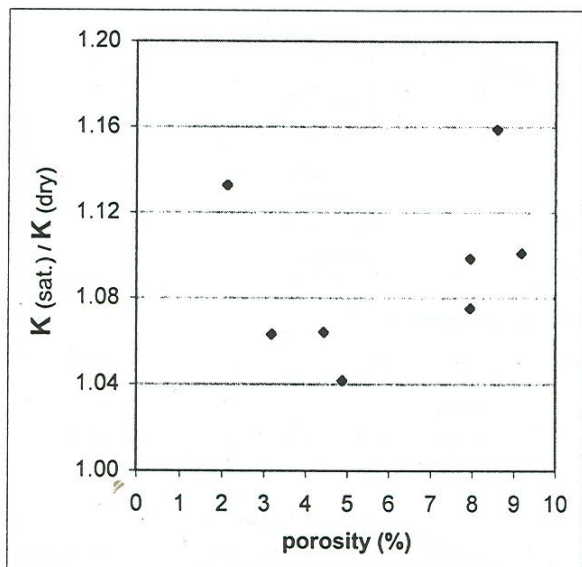
Sample	Anhydrite (%)	Quartz (%)	Dolomite (%)
G1	2	1	97
G2	5	Trace	95
G4	1	0	99
G5	Trace	1	99

جدول ۲- نتایج اندازه گیری مشخصات هندسی، وزن، چگالی، تخلخل و نفوذپذیری هشت نمونه سنگ کربنات.

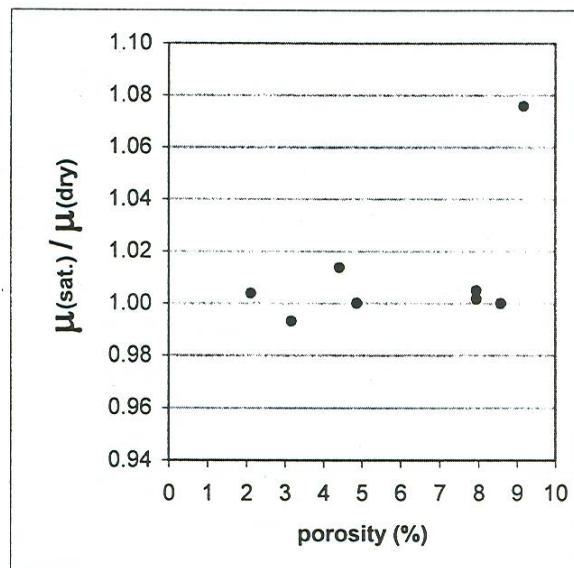
Sample	Length (cm)	Diameter (cm)	Sample weight (g)	Dry bulk density (g/cm ³)	Saturated bulk density (g/cm ³)	Grain density (g/cm ³)	Porosity (%)	Permeability (mD)
G1X	2.4946	4.933	125.093	2.624	2.687	2.850	7.95	0.069
G1Z	2.5293	4.936	126.574	2.615	2.679	2.841	7.95	0.015
G2X	2.5341	4.934	131.475	2.714	2.753	2.853	4.88	0.018
G2Z	2.5292	4.935	131.254	2.713	2.749	2.839	4.43	0.070
G4X	2.5342	4.934	133.853	2.762	2.788	2.853	3.18	0.002
G4Z	2.5291	4.935	132.613	2.741	2.759	2.801	2.12	0.009
G5X	2.5342	4.935	125.495	2.589	2.662	2.850	9.18	0.412
G5Z	2.5292	4.935	125.929	2.603	2.672	2.848	8.59	0.029



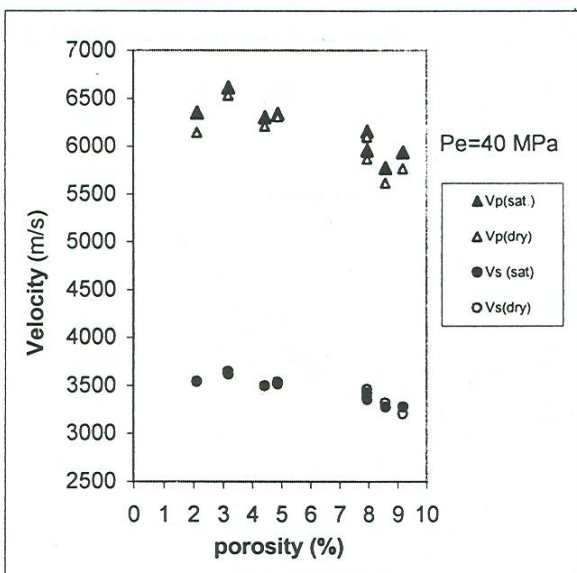
شکل ۱- تغییرات مقادیر سرعت در مقابل فشار مؤثر در هشت نمونه سنگ کربنات در حالت های خشک و اشباع.



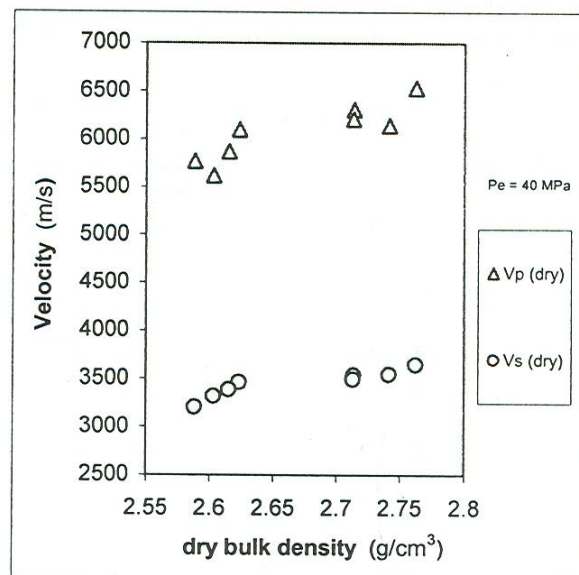
شکل ۳- نسبت مدول بالک در حالت اشباع به مدول بالک در جات خشک برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار مؤثر ۴۰ MPa.



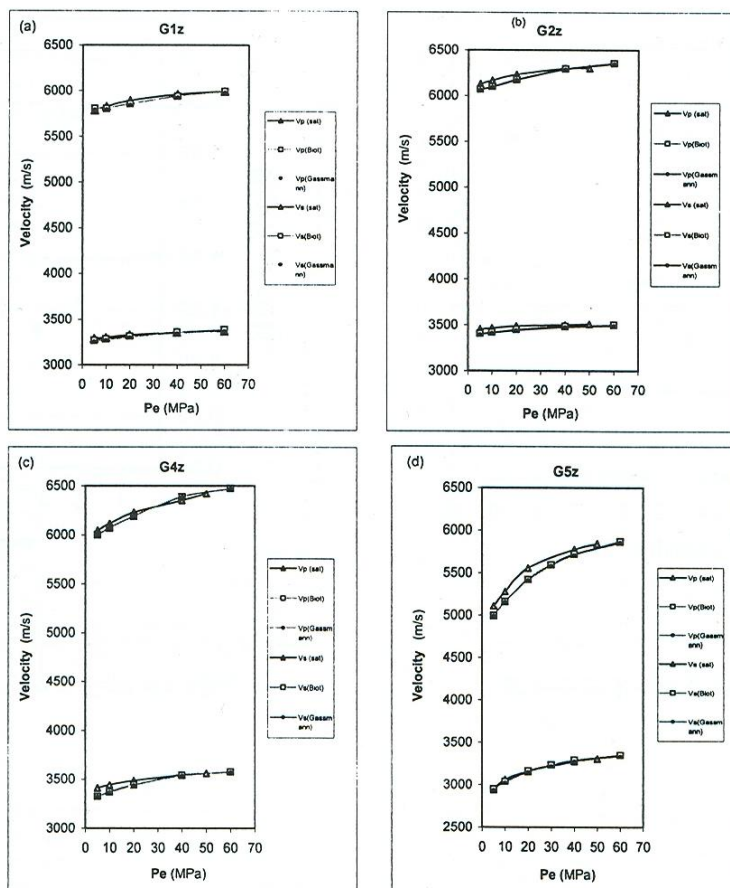
شکل ۲- نسبت مدول برشی در حالت اشباع به مدول برشی در حالت خشک برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار مؤثر ۴۰ MPa.



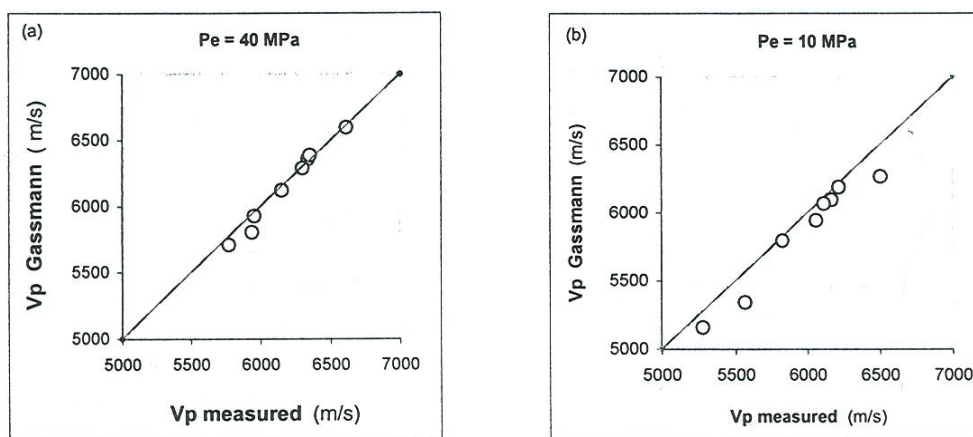
شکل ۵- سرعت امواج تراکمی و برشی در مقابل تخلخل برای هشت نمونه سنگ کربنات در حالت خشک و اشباع شده در فشار مؤثر ۴۰ MPa.



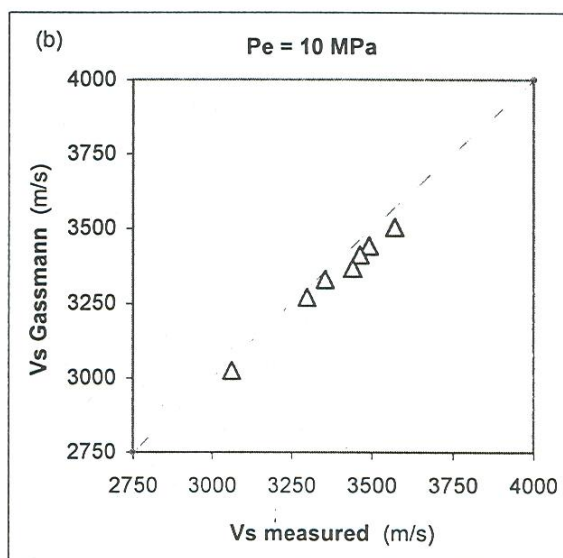
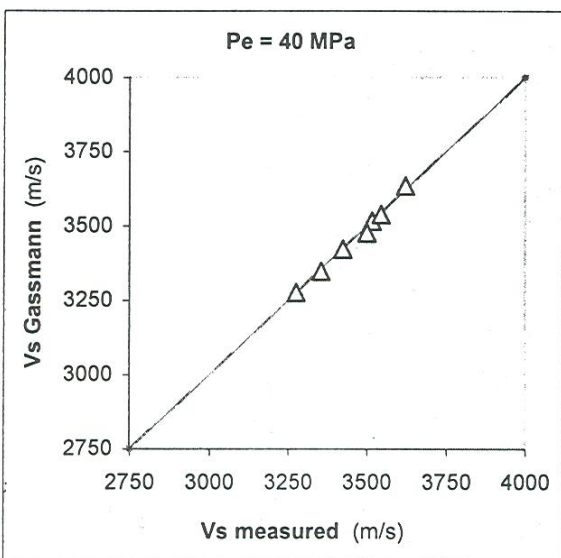
شکل ۴- سرعت امواج تراکمی و برشی در مقابل چگالی سنگ خشک برای هشت نمونه در فشار مؤثر ۴۰ MPa.



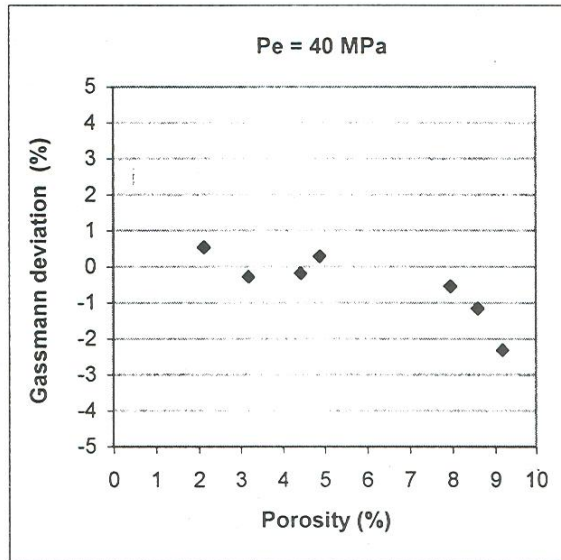
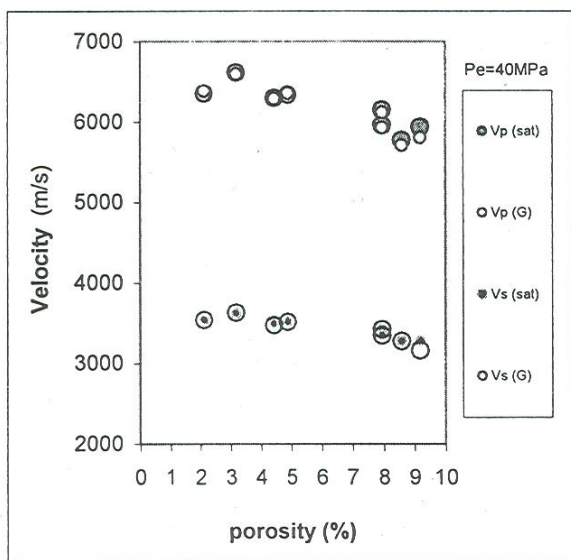
شکل ۶- مقایسه سرعت های حاصل از نظریه های گاسمن و بیوت و سرعت های آزمایشگاهی برای چهارنمونه سنگ کربنات در فشارهای مؤثر مختلف (نمونه ها در جهت Z مغزه گیری شده اند).



شکل ۷- مقایسه سرعت امواج تراکمی حاصل از تئوری گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای مؤثر ۴۰ MPa و ۱۰ MPa برای هشت نمونه سنگ کربنات اشباع شده با نفت سفید.

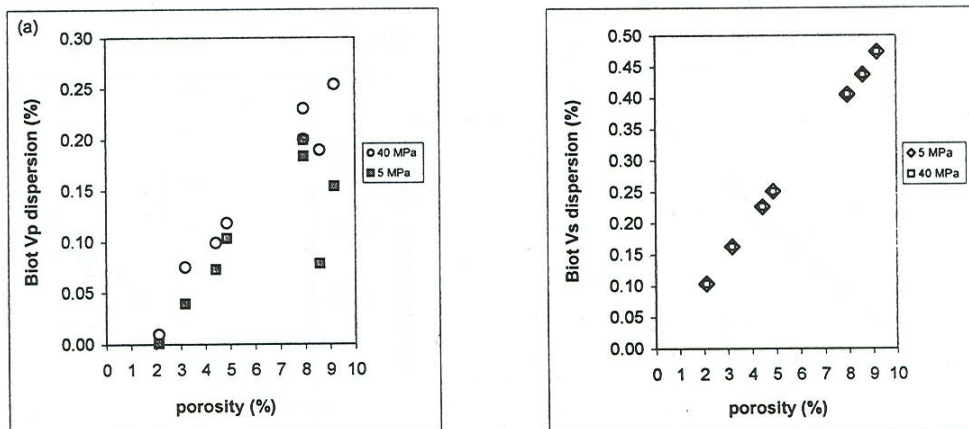


شکل ۸- مقایسه سرعت امواج برشی حاصل از تئوری گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای ۴۰ MPa و ۱۰ MPa.

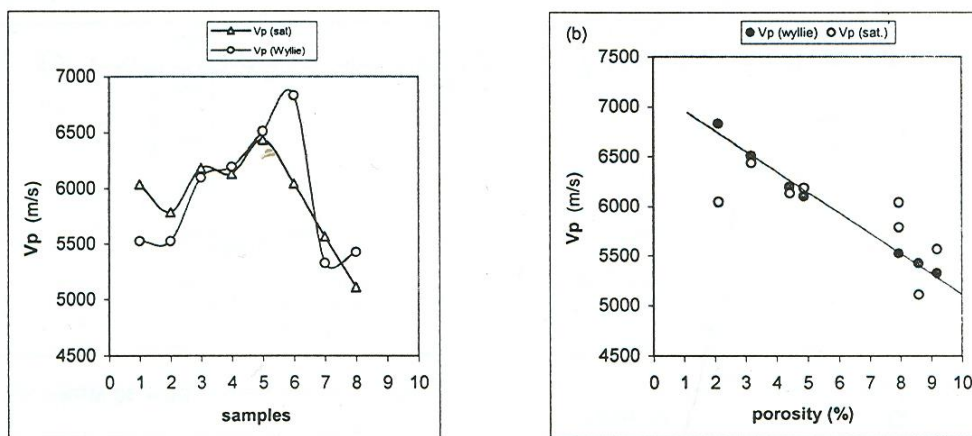


شکل ۱۰- مقادیر سرعت آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تئوری گاسمن در مقابل تخلخل برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار ۴۰ MPa.

شکل ۹- انحراف پیش بینی تئوری گاسمن در فشار ۴۰ MPa.



شکل ۱۱- تغییرات پاشش بیوت در مقابل تخلخل در هشت نمونه سنگ کربنات در فشارهای مؤثر ۵ MPa و ۴۰ MPa.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر سرعت امواج تراکمی حاصل از مدل وایلی در فشار اتمسفر با نتایج آزمایشگاهی در فشار ۵ MPa برای هشت نمونه سنگ کربنات اشباع شده با نفت سفید.

کتابنگاری

قاسمی، م.، ۱۳۸۱- سرعت انتشار امواج در نمونه های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربوری در جنوب ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

Reference

- Best, A. I., McCann, C. and Sothcott, J., 1994- The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks: *Geophysical Prospecting*, 42, 151-178.
- Biot, M. A., 1956- Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range: *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 168-178.

- Edjell, H. S., 1977- the Permian system as an oil & gas reservoir in Iran, Iraq & Arabia, Proc. Second Iranian Geological Symposium, Tehran, 161-201.
- Gassmann, F., 1951- On the elasticity of porous media: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, 96, 1-23.
- Kashfi, M. S., 2000- Greater Persian Gulf Permian-Triassic stratigraphic nomenclature requires study: Oil and Gas Journal, Tulsa, Nov., 6, 36-44.
- Marion, D., Jizba, D., 1997- Acoustic properties of Carbonate rocks: use in quantitative interpretation of sonic and seismic measurements, in carbonate seismology: edited by Ibrahim Palaz and Kurt J. Marfurt, Soc. Explor. Geophys., 75-94.
- Mavko, G. M. and Nur, A. M., 1978- the effect of nonelliptical cracks on the compressibility of rocks: J. Geophys. Res., 83, 4459-4468.
- McCann, C., and Sothcott, J., 1992- Laboratory measurements of the seismic properties of sedimentary rocks, in Hurst, A., Worthington, P. F. and Griffiths, C., Eds., Geological applications of wire-line logs 2, Special Publication of the Geological Society of London.
- O'Connell, R. J., and Budiansky, B., 1977- Viscoelastic properties of fluid saturated cracked solids: J. Geophys. Res. 82, 5719-5736, in Toksöz, M. N. and Johnston, D. H. Eds., 1981, Seismic wave attenuation: Geophysics reprint series, 2.
- Schön, J. H., 1996- Physical properties of rocks, fundamentals and principles of petrophysics, in Handbook of geophysical exploration: Seismic exploration, vol. 18.
- Wang, Z., 1997- Seismic properties of carbonate rocks, in Carbonate seismology: edited by Palaz, I., Marfurt, K. J., Soc. Explor. Geophys., 22-52.
- Wang, Z., 2000- The Gassmann equation revisited: Comparing laboratory data with Gassmann's predictions, in Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks (chapter 1): edited by Wang, Z., Nur, A., Soc. Explor. Geophys.
- Wang, Z., and Nur, A., 1992- Elastic wave velocities in porous media: a theoretical recipe, in Wang, Z., and Nur, A., Eds., Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks: Soc. Explor. Geophys., 1-35.
- Winkler, K. W., and Plona, T. J., 1982- Techniques for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure: Jour. Geophys. Res., 87, 10776-10780.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., 1956- Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: Geophysics, 21, 41-70.

* دانشگاه صنعت نفت

** موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

*** بخش فیزیک سنگ، دانشگاه ردینگ

* The Petroleum University of Technology

** Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran.

*** PRIS, The University of Reading