

سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران

نوشته: مهدی قاسمی*، دکتر مجید نبی بیدهندي** 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 5 MPa و مقادیر فشار مؤثر از 5 MPa تا 60 MPa انتخاب شده است. بسامد مرکزی برای موج P برابر 1 MHz و برای موج S برابر 0.6 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 به‌کارگیری 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 3%- تا 1%+ است. پاشش بیوت برای سرعت امواج تراکمی کمتر از 3/ درصد و برای سرعت امواج برشی کمتر از 5/ 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

1- مقدمه

مطالعات فیزیکی سنگ شامل دو بخش آزمایشگاهی و نظریه است. در آزمایشگاه، اندازه‌گیری‌های سرعت و تضعیف امواج الاستیک در فشار و دماهای مختلف انجام می‌شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف سنگ‌فیزیکی مانند کانی شناسی، تخلخل، اشباع، نفوذپذیری و غیره بر روی ویژگی‌های لرزه شناسی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. کاربرد مطالعات آزمایشگاهی و نظریه سنگ فیزیکی رو به افزایش است. از جمله، مقادیر پارامترهای به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در تصمیم‌گیری برای تولید و یا توسعه مخزن (به دلیل نقشی که در تعیین مشخصات مخزن ایفا می‌کند) تأثیر مهمی دارد. در مطالعات نظریه، مدل فیزیکی سنگ به دست می‌آید که رابطه بین پارامترهای لرزه‌شناسی (مانند سرعت) و پارامترهای سنگ فیزیکی (مانند تخلخل) را بیان می‌دارد. با مدل به دست آمده می‌توان مقاطع مصنوعی لرزه‌ای مخزن را ایجاد کرد و با مقایسه آن، با مقاطع لرزه‌ای حاصل از پیمایش به تفسیر این مقاطع پرداخت و یا تأثیر تغییر پارامترهای مختلف را در ویژگی‌های مقاطع مصنوعی مورد مطالعه قرار داد. از سوی دیگر، می‌توان با تبدیل معکوس مقاطع لرزه‌ای و به دست آوردن پارامترهای متوسط و زمان سیر کلی مخزن، تخلخل کلی و ضخامت مخزن را محاسبه نمود (Marion and Jizba, 1997).

3- نمونه‌های مورد آزمایش و روش کار آزمایشگاهی
نمونه‌های سنگ اولیه، استوانه‌های حفر شده (G1, G2, G4, G5) از یک چاه عمودی در میدان هیدروکربنی فوق است که در محدوده عمق 3758 m تا 3769 m مغزه‌گیری شده بودند. قطراین نمونه‌ها 10 cm و طول آنها از 7 cm تا 10 cm متغیر بود. از هر یک از سنگ‌ها، دو نمونه کوچک‌تر در دو راستای متعام x و z به قطر 5 cm و طول 2/5 مغزه‌گیری شد (x و z به ترتیب نشانگر راستاهای افقی و قائم می‌باشند). نمونه‌های سنگ با محلول تولوئن شسته سپس با حرارت خشک شدند. مشخصات کانی شناسی نمونه‌ها با روش پراش پرتو X (XRD) مطابق جدول 1 به دست آمد. برای سنجش تخلخل از یک تخلخل‌سنج هلیم و برای سنجش نفوذپذیری از یک نفوذسنج نیتروژن استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری تخلخل، نفوذپذیری، چگالی، وزن و مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول 2 آمده است. برای اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج از روش بازتابی استفاده شد (Winkler and Plona, 1982, McCann and Sothcoth, 1992, Best, 1994).

طرح سیستم آزمایشگاهی و شیوه اندازه‌گیری مقادیر سرعت با استفاده از این روش، به‌طورمیسوس بوسیله قاسمی (1381) شرح داده شده است. در این روش، نمونه سنگ بین دو تیغه شیشه‌ای قرار می‌گیرد. یک ترانس دیوسر (transducer) اولتراسونیک که در بالای تیغه شیشه‌ای بالایی قرار گرفته است، سیگنالی را می‌فرستد که پس از عبور از تیغه شیشه‌ای، قسمتی از آن از سطح بالایی نمونه سنگ و قسمت دیگر پس از عبور از سنگ از سطح پایینی

مطالعات فیزیکی سنگ شامل دو بخش آزمایشگاهی و نظریه است. در آزمایشگاه، اندازه‌گیری‌های سرعت و تضعیف امواج الاستیک در فشار و دماهای مختلف انجام می‌شود. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف سنگ‌فیزیکی مانند کانی شناسی، تخلخل، اشباع، نفوذپذیری و غیره بر روی ویژگی‌های لرزه شناسی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. کاربرد مطالعات آزمایشگاهی و نظریه سنگ فیزیکی رو به افزایش است. از جمله، مقادیر پارامترهای به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در تصمیم‌گیری برای تولید و یا توسعه مخزن (به دلیل نقشی که در تعیین مشخصات مخزن ایفا می‌کند) تأثیر مهمی دارد. در مطالعات نظریه، مدل فیزیکی سنگ به دست می‌آید که رابطه بین پارامترهای لرزه‌شناسی (مانند سرعت) و پارامترهای سنگ فیزیکی (مانند تخلخل) را بیان می‌دارد. با مدل به دست آمده می‌توان مقاطع مصنوعی لرزه‌ای مخزن را ایجاد کرد و با مقایسه آن، با مقاطع لرزه‌ای حاصل از پیمایش به تفسیر این مقاطع پرداخت و یا تأثیر تغییر پارامترهای مختلف را در ویژگی‌های مقاطع مصنوعی مورد مطالعه قرار داد. از سوی دیگر، می‌توان با تبدیل معکوس مقاطع لرزه‌ای و به دست آوردن پارامترهای 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 می‌شود. سپس در بخش بعد تأثیر پارامترهای مختلف محیطی و سنگ‌فیزیکی بر روی نتایج آزمایشگاهی مورد بحث قرار می‌گیرد. آنگاه مدل‌های مختلف فیزیکی سنگ با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و در نهایت نتیجه‌گیری آورده شده است.

2- 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 سنگ‌های کربنات تشکیل شده، هفت میدان بزرگ گازی جهان قرار دارد. ضخامت سیستم پرمین در عربستان، کمترین، در ایران از





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 1 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. در مورد سرعت امواج برشی، اثر اشباع ناچیز است. زیرا مدول برشی مایعات (بویژه مایعات سیبک) 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 (2) انتظار داریم که اشباع سنگ باعث کاهش سرعت امواج برشی در آن شود.

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

شکل 2 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 1 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 3).

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.

4-2 = اثر چگال

با توجه به روابط 1 و 2 انتظار داریم با افزایش چگالی پیکره

آن بازتابیده می‌شود. آنگاه از اختلاف زمان سیر این دو موج بازتاب و معلوم بودن طول نمونه، سرعت محاسبه می‌شود. این سیستم بازتابی در یک دستگاه فشار بالا قرار می‌گیرد. بسامد مرکزی ترانس دیوسر موج P برابر 1 MHz و برای موج S برابر 0/6 MHz بود و آزمایش در دمای اتاق انجام گرفت.

نخست اندازه‌گیری مقادیر سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های سنگ خشک انجام شد و پس از آن، نمونه‌ها با قرار گرفتن درحلاً به میزان قابل قبول از هوا خالی شده و سپس نفت سفید به‌عنوان سیال اشباع کننده با فشار 7 MPa به نمونه‌ها تزریق شد و برای مدت سه روز، نمونه‌ها 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 5 MPa بود. سرعت امواج الاستیک در محدوده فشارهای مؤثر 5 MPa تا 60 MPa اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری مقادیر سرعت امواج تراکمی و برشی در فشارهای مختلف توسط قاسمی (1381) ارائه شده است.

4-4 بررسی تاثیر پارامترهای محیطی و فیزیکی سنگ

4-4-1 اثر فشار و اشباع

شکل 1 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 1 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 50 MPa انجام گرفته است. همچنین برای نمونه $G5x$ اندازه‌گیری‌ها در حالت خشک تا فشار 40 MPa انجام شده است. برای همین نمونه، در حالت اشباع به‌علت مناسب نبودن شکل موج‌های حاصل اندازه‌گیری سرعت موج P در فشار 5 MPa و سرعت موج S در فشارهای 5 MPa و 10MPa امکان پذیر نبود.

همچنین از شکل 1 دیده می‌شود که سرعت امواج تراکمی در نمونه‌های اشباع شده بیشتر از نمونه‌های خشک است،





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

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

پارامتر K_m با استفاده از رابطه میانگین‌گیری 7 به دست می‌آید. در صد غلظت کانی‌های موجود در نمونه‌ها در جدول 1 و مقدار تخلخل نمونه‌ها در جدول 2 آمده است.

$$K^m = \%dolonite \times K_{dolomit} + \% anhydrite \times K_{anhydrite} + \% quartz \times K_{quartz} \quad (7)$$

که برای مثال در آن $K_{dolomite}$ ، مدول بالک دولومیت و $\%$ dolomite، درصد غلظت دولومیت در مغزه نمونه است. نکته‌ی مهمی که باید به آن توجه کرد وابستگی قابل ملاحظه K به K_m است. یعنی سرعت امواج تراکمی حاصل از نظریه گاسمن، می‌تواند به پارامتر ورودی مدول بالک کانی‌های تشکیل دهنده سنگ (در اینجا دولومیت) حساس باشد. این حساسیت در تخلخل‌های بالا، بیشتر نسبت به مقدار مدول بالک سیال منفذی دیده می‌شود تا نسبت به مدول بالک ماتریکس سنگ. با مراجعه به منابع مختلف که مدول‌های بالک و برشی کانی‌های مورد نظر را ارائه داده بودند، مقادیر ارائه شده به وسیله Wang (2000)، بهترین نتیجه را به دست می‌دهد. براساس این مرجع، مدول بالک دولومیت 94800 MPa است.

مقدار K_f (مدول بالک نفت سفید) مطابق مقدار ارائه شده به وسیله Schön (1996)، برابر 1613 MPa انتخاب شد. در شکل 6، نمودارهای مقایسه‌ای 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 می‌باشند، مشاهده می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌شود تطابق نتایج حاصل از نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در حد بسیار خوبی است. این نزدیکی در فشارهای مؤثر بالا بیشتر دیده می‌شود، زیرا به دلیل بسته شدن ترک‌ها و شکستگی‌ها در فشار بالا، نمونه سنگ به یک فرض اولیه نظریه گاسمن (همسانگرد بودن سنگ) نزدیک می‌شود. در مورد سرعت‌های امواج برشی، تفاوت ناچیز پیش‌بینی نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده، آن است که فرض صفر بودن مدول برشی سیال منفذی به واقعیت نزدیک است. در شکل 7 به صورت دیگری تطابق بهتر نتایج حاصل از نظریه گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای بالا (40 MPa) نسبت به فشارهای پایین‌تر (10 MPa) برای سرعت‌های تراکمی، دیده می‌شود. در شکل (8) همین مقایسه در مورد سرعت امواج

سرعت امواج الاستیک کاهش نشان دهد ولی تاثیر افزایش چگالی در افزایش مدول‌های الاستیک بیشتر است. بنابراین همان گونه که در شکل 4 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.

3-4- 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 5 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 40 مگاپاسکال است.

5- مدل‌سازی فیزیک سنگ

در این مقاله، به اعمال نظریه‌های گاسمن و بیوت و نیز معادله میانگین زمانی واپلی بر روی داده‌ها پرداخته شده است. هر یک از مدل‌های نظری، فرض‌های اولیه خاص خود را دارند (Wang and Nur, 1992). برای مثال همگن و همسانگرد بودن سنگ، فرض اولیه اغلب نظریه‌ها است.

1-5- نتایج نظریه گاسمن

براساس نظریه گاسمن (1951)، مدول بالک سنگ اشباع شده از رابطه 3 محاسبه می‌شود.

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

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 اشباع‌کننده، صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین براساس رابطه 4، 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 و d از مقادیر سرعت‌های تراکمی و برشی سنگ خشک که در آزمایشگاه به دست آمده‌اند با کمک روابط 5 و 6 به دست می‌آیند.





پاشش سرعت (پاشش بیوت) بر اساس نظریه بیوت به وسیله رابطه 11 به دست می‌آید.

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

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 می‌تواند مؤثر باشد. این سازوکار که سازوکار ریان محلی نام دارد، به وسیله Connel and Budiansky (1977) و نیز Mavko and Nur (1978) معرفی شده است. در این پژوهش مقدار پاشش بیوت برای سرعت امواج تراکمی کمتر از 0/3 درصد و برای سرعت امواج برشی کمتر از 0/5 درصد به دست آمد. در شکل 11، نمودار تغییرات پاشش بیوت در برابر تخلخل مشاهده می‌شود.

3-5- معادله میانگین زمانی

بر اساس معادله میانگین زمانی، سرعت امواج تراکمی از رابطه 12 محاسبه می‌شود (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 m/s 1420 انتخاب شد. در شکل 12 نتایج حاصل از این مدل در فشار اتمسفری با نتایج آزمایشگاهی در فشار 5 MPa (و در مورد نمونه‌های G5Y و G5X در فشار 10 MPa) مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این نظریه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان نمی‌دهد. 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.

6- نتیجه گیری

نتایج اصلی حاصل از این پژوهش، به شرح زیر است: با اشباع نمونه‌های سنگ کربنات، سرعت امواج تراکمی نسبت به حالت خشک افزایش یافته اما سرعت امواج برشی تغییر ناچیزی می‌یابد. با افزایش فشار مؤثر، سرعت امواج تراکمی و برشی در نمونه‌های خشک و اشباع شده افزایش می‌یابد اما آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر از سرعت امواج برشی

برشی صورت گرفته است.

میزان انحراف پیش‌بینی نظریه گاسمن از مقادیر آزمایشگاهی از رابطه 8 به دست می‌آید (Wang, 2000):

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

در شکل 9 میزان این انحراف در فشار مؤثر 40 MPa دیده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، اساساً مقدار این انحراف بین 3%- تا 1%+ است. علت این انحراف (پاشش ظاهری) را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله شکل هندسی منافذ، پاشش سرعت، عدم تحقیق کامل فرضیه‌های اولیه نظریه گاسمن و خطا در اندازه‌گیری پارامترهای ورودی رابطه گاسمن، نسبت داد. در شکل 10 مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از نظریه گاسمن در تخلخل‌های مختلف مشاهده می‌شود.

2-5- نظریه بیوت

نظریه گاسمن، پاشش سرعت (رابطه سرعت با فرکانس) را لحاظ نمی‌کند و به عبارت دیگر نظریه گاسمن یک نظریه بسامد پایین است (در محدوده بسامدهای لرزه‌ای). (Biot 1956) نظریه خود را به گونه‌ای توسعه داد که هر بسامدی را در برگیرد. معادلات نظریه بیوت برای بسامدهای بالا در روابط 9 و 10 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 اشباع‌کننده سنگ است که برای نفت سفید برابر kg/m^3 800 می‌باشد. ϕ یا ضریب پیچاپیچی، برای سنگهای کربنات، 3 انتخاب می‌شود. روابط مربوط به دیگر پارامترهای ورودی نظریه بیوت در مقالات (Wang 1997) و (Wang and Nur, 1992) آمده است. در شکل 6 نمودار تغییرات سرعت‌های حاصل از نظریه بیوت در مقایسه با نتایج نظریه گاسمن و داده‌های آزمایشگاهی برای چهار نمونه مشاهده می‌شود.





مطلوبی با داده‌های آزمایشگاهی ندارد، زیرا به طور کلی این مدل در مورد سنگهای کربنات با تخلخل پایین نتایج قابل قبولی را ارائه نمی‌دهد (Wyllie, 1956).

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه صنعت نفت بویژه از آقایان مهندس هندی و مهندس رودساز برای در اختیار قراردادن نمونه‌های اولیه سنگ و از آقای مهندس امیری‌بشلی برای در اختیار قراردادن برخی مقاله‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی تشکر و قدردانی می‌شود. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نمونه‌های سنگ در آزمایشگاه فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ انگلستان انجام شده است و لازم می‌دانیم از همکاری پرفسور C. McCann، دکتر T. Astin و J. Sothcott اعضای هیئت علمی بخش فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ تشکر و قدردانی نمایم. مؤلف دوم لازم می‌داند از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای اعطای فرصت مطالعاتی به نامبرده برای انجام آزمایشها در آزمایشگاه فیزیک سنگ دانشگاه ردینگ سپاسگزار می‌نماید.

است. در ضمن آهنگ افزایش سرعت در نمونه‌های خشک بیشتر از همان نمونه‌های اشباع شده است.

با افزایش تخلخل در نمونه‌های خشک و اشباع شده، سرعت امواج تراکمی و برشی کاهش می‌یابند ولی آهنگ کاهش سرعت امواج تراکمی بیشتر از امواج برشی است.

با افزایش چگالی نمونه‌های خشک سرعت امواج تراکمی و برشی افزایش یافته اما آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر از امواج برشی است.

نتایج حاصل از نظریه‌های گاسمن و بیوت همخوانی نزدیکی با داده‌های آزمایشگاهی بویژه در فشارهای مؤثر بالا دارند (به دلیل نزدیک‌تر شدن سنگ به شرایط همسانگردی).

میزان انحراف پیش‌بینی نظریه گاسمن از مقادیر آزمایشگاهی در فشار 40 MPa در محدوده 3%- تا 1% قرار دارد.

پاشش بیوت در نمونه‌های مورد بحث کمتر 0/5 درصد است لذا می‌توان از آن صرف‌نظر کرد و نظریه گاسمن را به عنوان مدل فیزیک سنگ نمونه‌های مورد بحث پذیرفت.

نتایج حاصل از معادله میانگین زمانی (مدل وایلی) همخوانی

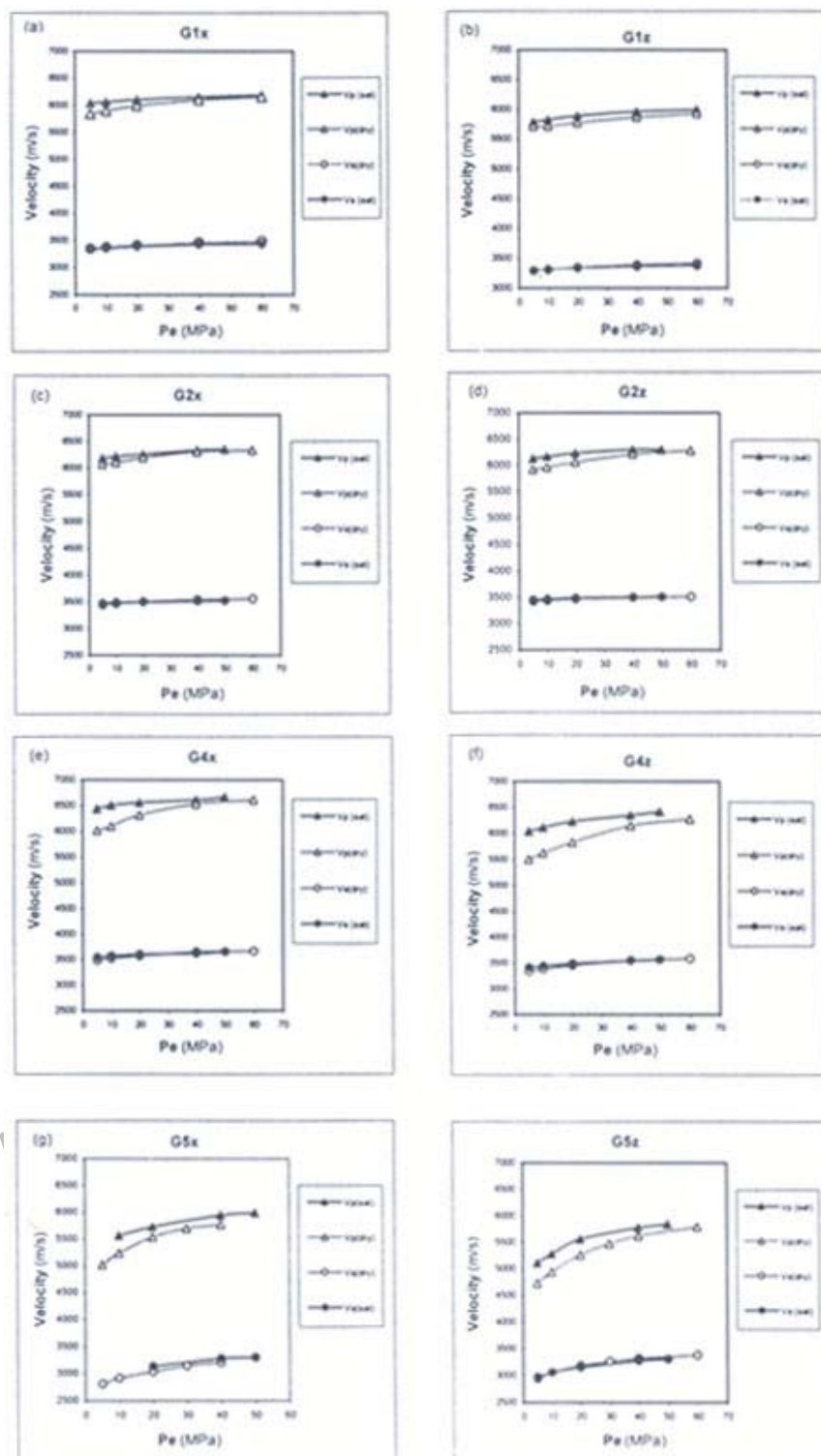
جدول 1- مشخصات کانی‌شناسی نمونه‌های مورد آزمایش.

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

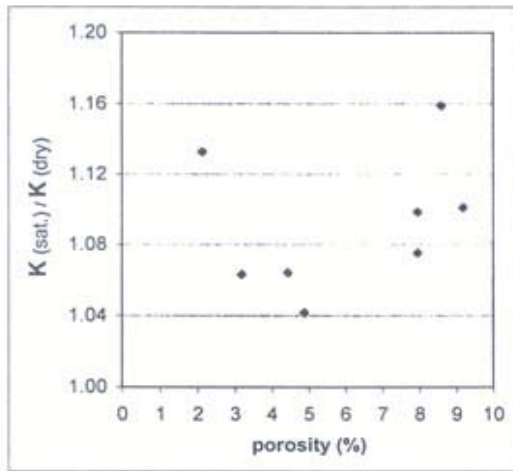
جدول 2- نتایج اندازه‌گیری مشخصات هندسی، وزن، چگالی، تخلخل و نفوذپذیری هشت نمونه سنگ کربنات.

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

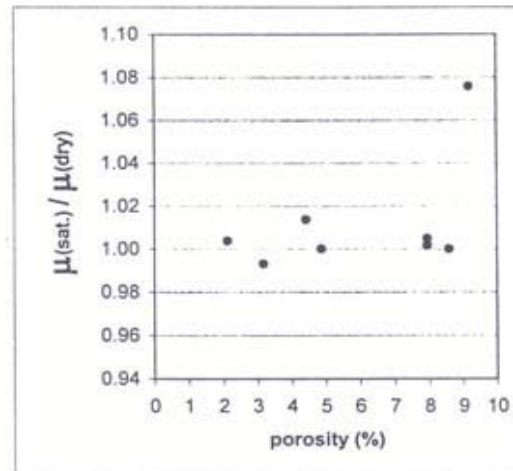




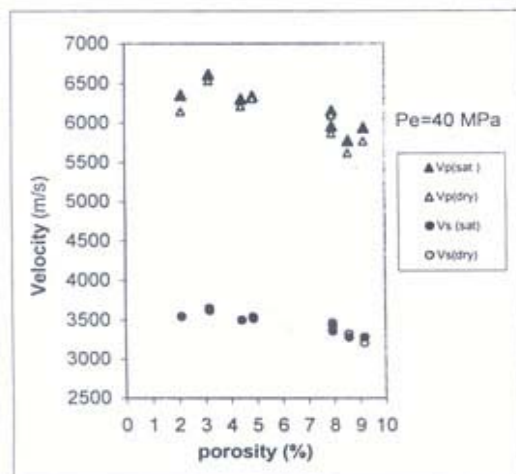
شکل 1- تغییرات مقادیر سرعت در مقابل فشار مؤثر در هشت نمونه سنگ کربنات در حالت‌های خشک و اشباع .



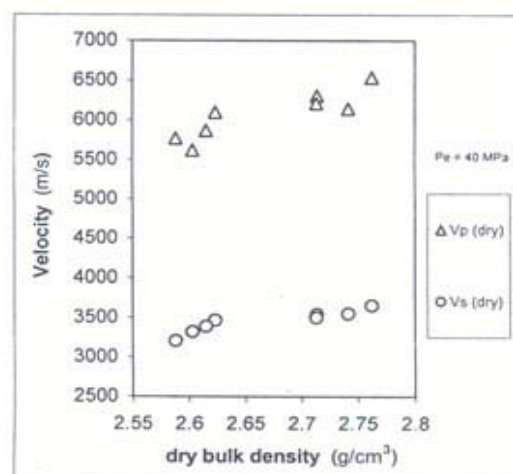
شکل 3- نسبت مدول بالک در حالت اشباع به مدول بالک در حالت خشک برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار مؤثر 40 MPa.



شکل 2- نسبت مدول برشی در حالت اشباع به مدول برشی در حالت خشک برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار مؤثر 40 MPa.

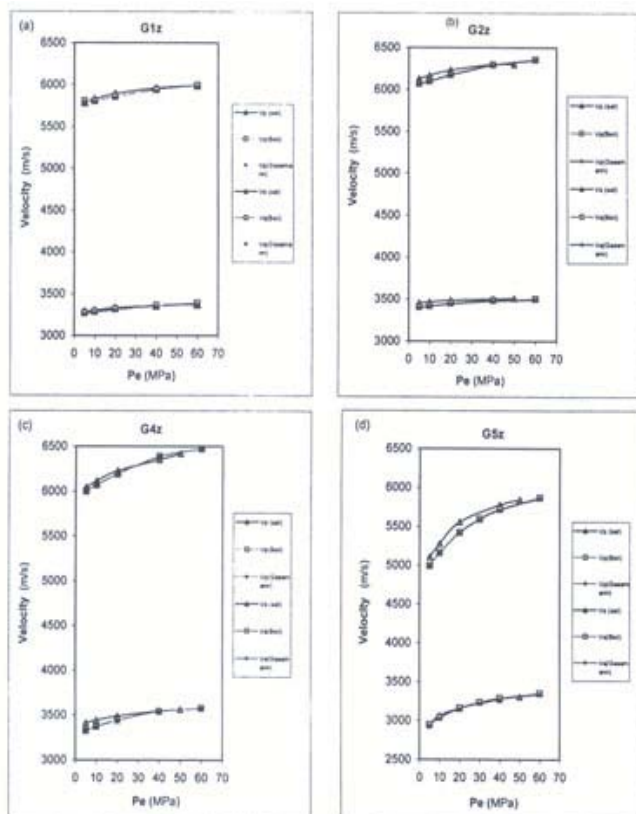


شکل 5- سرعت امواج تراکمی و برشی در مقابل تخلخل برای هشت نمونه سنگ کربنات در حالت خشک و اشباع شده در فشار مؤثر 40 MPa.

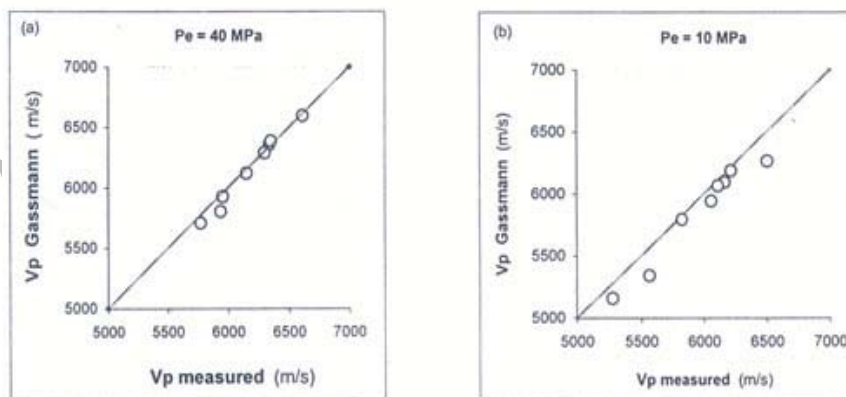


شکل 4- سرعت امواج تراکمی و برشی در مقابل چگالی سنگ خشک برای هشت نمونه در فشار مؤثر 40 MPa.

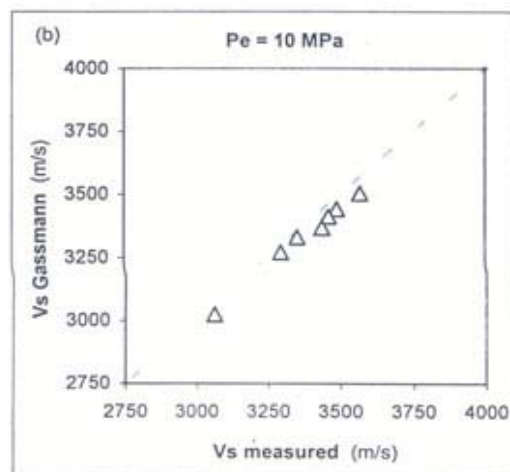
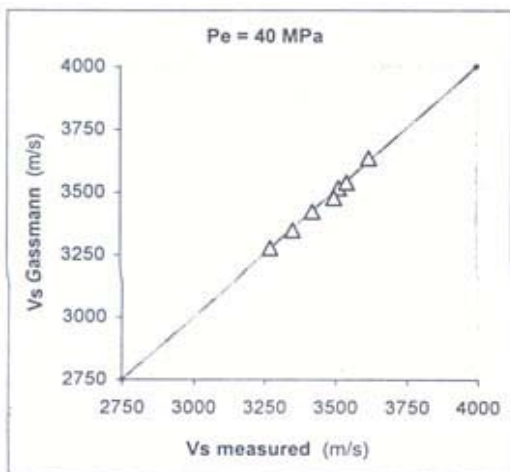




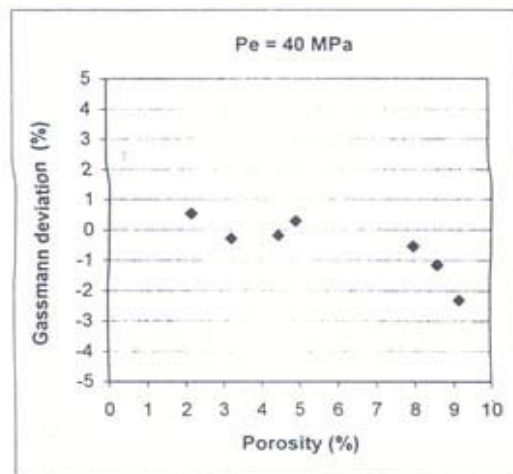
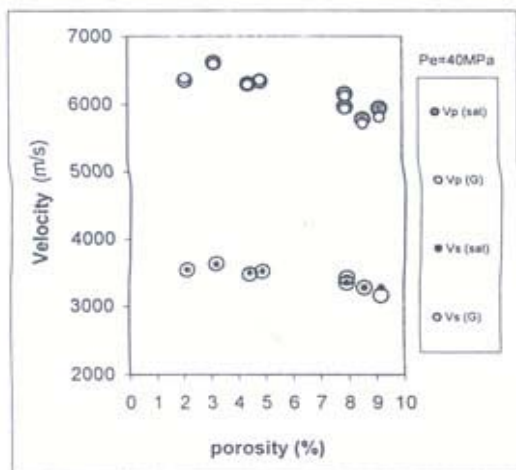
شکل 6- مقایسه سرعت های حاصل از نظریه های گاسمن و بیوت و سرعت های آزمایشگاهی برای چهار نمونه سنگ کربنات در فشارهای مؤثر مختلف (نمونه ها در جهت Z مغزه گیری شده اند).



شکل 7- مقایسه سرعت امواج تراکمی حاصل از تئوری گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای مؤثر 10 MPa و 40 MPa برای هشت نمونه سنگ کربنات اشباع شده با نفت سفید.

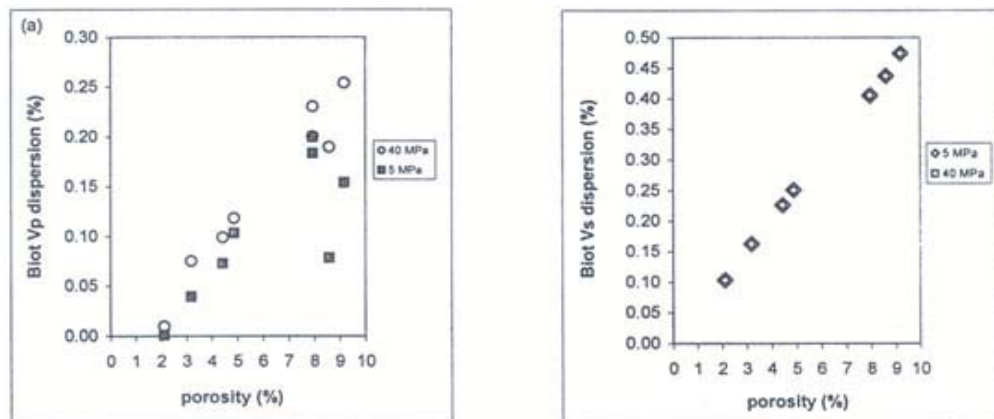


شکل 8- مقایسه سرعت امواج برشی حاصل از تئوری گاسمن با نتایج آزمایشگاهی در فشارهای 10 MPa و 40 MPa .

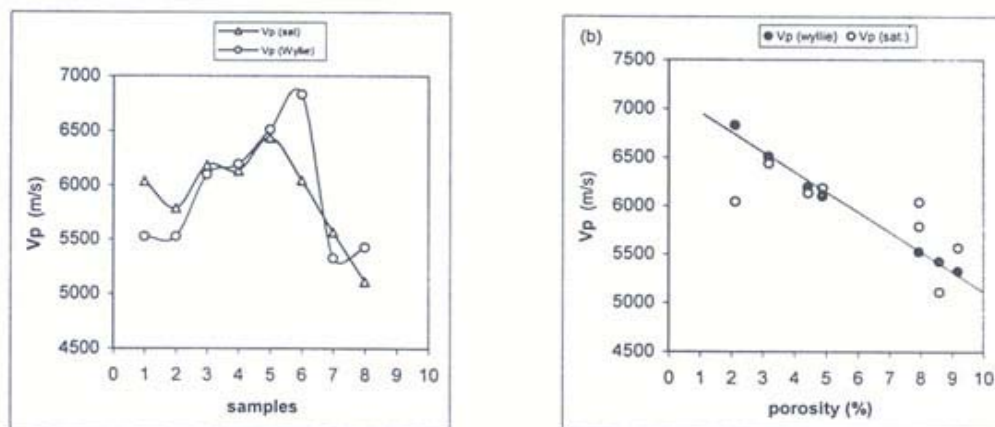


شکل 10- مقادیر سرعت آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تئوری گاسمن در مقابل تخلخل برای هشت نمونه سنگ کربنات در فشار 40 MPa.

شکل 9- انحراف پیش بینی تئوری گاسمن در فشار 40 MPa .



شکل 11- تغییرات پاشش بیوت در مقابل تخلخل در هشت نمونه سنگ کربنات در فشارهای مؤثر 5 MPa و 40 MPa.



شکل 12- مقایسه مقادیر سرعت امواج تراکمی حاصل از مدل وایلی در فشار اتمسفر با نتایج آزمایشگاهی در فشار 5 MPa برای هشت نمونه سنگ کربنات اشباع شده با نفت سفید.

کتابنگاری

قاسمی، م.، 1381- سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربوری در جنوب ایران، پایان‌نامه 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

