

تحلیل آزمایشگاهی رفتار موج فشاری در شرایط فشار مخزن در نمونه‌های ماسه سنگی مخزنی در جنوب باختر استرالیا

هاله عزیزی^۱، حمیدرضا سیاه‌کوهی^۲، برایان ایونز^۳، ناصر کشاورز فرج‌خواه^۴ و عزت‌اله کاظم‌زاده^۴

^۱ دانشجوی دکترا، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی کربین، پارس، استرالیا.

^۴ استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۲/۲۰

چکیده

در فیزیک سنگ، توصیف ویژگی‌های فیزیکی سنگ مخزن مانند تخلخل و تراکم‌پذیری از تحلیل اطلاعات به دست آمده از فرایند عبور امواج صوتی از داخل سنگ به دست می‌آید. حساسیت سرعت امواج لرزه‌ای به متغیرهای مهم مخزن مانند تخلخل، رخصاره‌ها، سیال‌های منفذی، درجه اشباع و فشار منفذی از سال‌ها پیش شناخته شده است. از میان عوامل یادشده تغییرات دو متغیر تخلخل و درجه اشباع سهم بیشتری در تغییر سرعت امواج صوتی دارند و مطالعات بسیاری نیز در این زمینه انجام شده است. دامنه امواج صوتی نیز تابعی از امپدانس‌های صوتی، شامل سرعت لرزه‌ای و چگالی سنگ‌های مخزن است. بنابراین از میان متغیرهای نام برده شده، سنگ‌شناسی، نوع سیال و درجه اشباع از تأثیرگذارترین متغیرها بر امواج لرزه‌ای هستند. در این نوشتار روند تغییرات متغیرهای مهم موج یعنی سرعت، دامنه و بسامد نسبت به دو متغیر مهم مخزن یعنی تغییرات فشار محصور و فشار منفذی سنجیده شده‌اند. نمونه مورد مطالعه ماسه‌سنگی بوده و آزمایش‌ها در شرایط فشار مخزن انجام شده‌اند. امواج الاستیک با بسامدهای مشخص از نمونه گذر کرده و ثبت شده‌اند؛ سپس متغیرهای موج عبوری استخراج و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

کلیدواژه‌ها: فیزیک سنگ، شرایط فشار مخزن، طیف دامنه، تغییرات بسامدی، تغییرات سرعت

*نویسنده مسئول: هاله عزیزی

E-mail: azizihaleh@yahoo.com

۱- پیش‌گفتار

می‌یابد، ولی در اختلاف فشارهای کوچک‌تر، افزایش محسوسی در عامل کیفیت موج تراکمی دیده می‌شود. در زمینه اشباع تکه‌ای (patchy saturation) و اثر آن بر سرعت و تضعیف امواج الاستیک پژوهش‌های فراوانی شده است (Johnson, 2001 ; Gist, 1994 ; Lebedev & Stewart, 2009; Mavko & Mukerji, 1998 ; Knight et al., 1998 ; Krzikalla & Müller, 2007; Pride et al., 2004 ; Müller et al., 2008 ; Hoeksema, 1994).

(Anselmetti & Eberli (1993 وابستگی سرعت امواج تراکمی و برشی را به فشار روی نمونه‌های کربناتی تحت فشار همه‌جانبه و فشارهای منافذ گوناگون بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان می‌دهد که افزایش سرعت در فشارهای کم برای نمونه‌های نامتراکم و با سرعت‌های پایین‌تر بیشتر است در حالی که نمونه‌های سخت و با سرعت‌های بالا، معمولاً کمتر تحت تأثیر فشار قرار می‌گیرند؛ به‌ویژه اگر در فشارهای کمتر قرار گیرند. قاسمی و همکاران (۱۳۸۴) اثر متغیرهای مختلف را بر روی سرعت انتشار امواج الاستیک به صورت آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگ کربناتی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سرعت انتشار امواج تراکمی در اثر اشباع افزایش می‌یابد ولی سرعت امواج برشی در سنگ‌های اشباع از سیال، تغییرات ناچیزی نسبت به همان سنگ‌ها در حالت خشک نشان می‌دهد. افزایش فشار مؤثر در هر دو حالت خشک و اشباع سبب افزایش سرعت می‌شود ولی آهنگ افزایش سرعت امواج تراکمی بیشتر است. ولی (۱۳۸۸) تأثیر شکل هندسی منافذ سنگ‌های کربناتی را بر سرعت امواج کشسانی مطالعه کرد. وی از نمونه‌های طبیعی مخزنی برای اندازه‌گیری سرعت‌های V_p و V_s در شرایط خشک و اشباع از آب که تحت تأثیر فشارهای مختلف در حد فشارهای مخزن هستند، استفاده کرد و در پایان دریافت که در نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای سرعت بیشتر و در نمونه‌های با تخلخل حفره‌ای ریز سرعت کمتر از معادله متوسط زمانی است و همچنین نمودار سرعت امواج کشسان بر حسب چگالی نشان از این دارد که تأثیر نوع کانی در

فیزیک سنگ پل ارتباطی میان پتروفیزیک، ژئوفیزیک و اطلاعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی است. این علم با انجام اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به دنبال یافتن ارتباط میان متغیرهای استخراج شده از داده‌های چاه‌پیمایی و لرزه‌ای و متغیرهای مخزنی (مانند تخلخل، سنگ‌شناسی و چگونگی پراکنندگی سیال) است. بنابراین فیزیک سنگ را می‌توان کلید کمی کردن تفاسیر ژئوفیزیکی دانست. در حقیقت، کشف و فهم روابط میان لرزه‌نگاری و ویژگی‌های مخزن نقطه تمرکز تحقیقات فیزیک سنگ است. ویژگی‌های سنگ مخزن نقش مهمی در طراحی و اجرای حفاری، برنامه‌ریزی تولید و پایداری چاه دارد؛ همچنین وجود مشکلات در حفاری‌های جهت‌دار و رقابت در کاهش هزینه‌های تولید، از عواملی هستند که سبب افزایش تمایل به استفاده از فیزیک سنگ در مطالعات نفتی شده‌اند. اهداف مهم مطالعات فیزیک سنگ، درک میزان تأثیر پارامترهایی مانند سنگ‌شناسی، تخلخل، تنش، فشار درون منفذی، نوع سیال درون منفذی و میزان اشباع، ناهمسانگردی و درجه شکستگی، دما و بسامد روی سرعت موج لرزه‌ای و میزان تضعیف امواج طولی و برشی در سنگ‌های رسوبی و بالعکس است.

در زمینه‌های یادشده مطالعات و آزمایش‌های بسیاری صورت گرفته است. برای نمونه Toksoz & Kuster (1976) تغییرات سرعت و دامنه امواج لرزه‌ای را در محیط دوفازی بررسی کرده‌اند. ایشان نتیجه گرفتند که یک انکلوژیون یک درصدی، اثری ۱۰ درصدی بر سرعت موج دارد. همچنین با مطالعه نمونه خشک و اشباع از آب دریافتند که بنا بر تأثیر شکل منافذ، تراکم‌پذیری، چگالی سنگ و سیال، سرعت موج تراکمی در نمونه‌های خشک و اشباع از آب تغییر می‌کند؛ در حالی که تغییرات سرعت موج برشی در این دو محیط بسیار کم است. سال‌ها بعد Prasad & Meissner (1992) آزمایش‌هایی را طراحی کردند که در آنها توانایی تراکم‌پذیری در دو حالت خشک و اشباع از آب نیز تغییر می‌کرد. نتیجه مطالعات ایشان نشان داد که عامل کیفیت موج برشی با افزایش اختلاف فشار کاهش

بخش‌های مختلف این محفظه که در تماس مستقیم با سیال قرار می‌گیرند، نسبت به واکنش شیمیایی خنثی هستند. در دو سر این محفظه دو کلاهک (cap) قرار می‌گیرد که در انتهای آنها گیرنده و فرستنده امواج تراکمی و برشی نصب شده‌اند که در ارتباط مستقیم با نمونه (مغزه) هستند (شکل ۲).

سیستم آزمایشگاهی مجهز به تنظیم‌کننده (Regulator) کنترل فشار خروجی (BPR: back pressure regulator) است تا امکان شبیه‌سازی رفتار فشاری واقعی مخزن فراهم شود. برای رسیدن به فشارهای محوری و محصورکننده از پمپ دستی و برای رسیدن به فشار منفذی از پمپ هیدرولیک استفاده شده است. دمای آزمایش نیز منطبق با دمای اتاق بوده است. سیگنال‌ها در رایانه‌ای که دارای نرم‌افزار ویژه این آزمایش است و توانایی نمایش به صورت اسیلوسکوپ را نیز دارد، ذخیره شده است. در شکل ۳-الف تصویری از نگهدارنده مغزه و ترانسیدوسرهای متصل به آن و در شکل ۳-ب تصویری از ترانسیدوسرها که روی کلاهک‌ها نصب شده‌اند، نمایش داده شده‌اند.

۲-۲. داده‌ها

آزمایش‌های موضوع این پژوهش در ۳۶ حالت مختلف انجام شده‌اند. در برخی از این حالات ترکیبات فشاری تغییر کرده و در مواردی نیز که فشارها ثابت بوده‌اند فرستنده یا گیرنده متغیر بوده‌اند. در جدول‌های ۱ و ۲ ترکیبات مختلف برداشت، خلاصه شده‌اند. در جدول ۱، ۹ ترکیب مختلف فشاری و در جدول ۲، ۴ حالت مختلف برداشت در هر ترکیب فشاری آورده شده است. گفتنی است که در این پژوهش تنها داده‌هایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که ترانسیدوسرهای فرستنده و گیرنده موج فشاری را ارسال یا ثبت کرده‌اند. بنابراین در این نوشتار تنها گروه موج P-P مورد مطالعه قرار گرفت.

چنانکه در جدول ۱ دیده می‌شود در هر ۹ حالت آزمایش، فشارهای شعاعی و محوری یکسان در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین در ادامه مقاله از واژه فشارهای محصورکننده به جای آنها استفاده خواهد شد. در شکل ۴ نمونه‌ای از یک سیگنال عبوری ثبت و طیف بسامدی آن نمایش داده شده است.

۳- رفتار موج فشاری

در ادامه رفتار موج فشاری در ۴ حالت زیر بررسی شده است:

- تغییرات سرعت و دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی و بسامد، در فشارهای محصورکننده ثابت و برابر با ۴۵۰۰ psi.
- تغییرات سرعت و دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصورکننده و بسامد، در فشارهای منفذی ثابت و برابر با ۲۰۰۰ psi.
- پوش دامنه سیگنال‌های موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی در فشارهای محصورکننده ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی ۵۰۰ KHz.
- پوش دامنه سیگنال‌های موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصورکننده در فشار منفذی ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی ۵۰۰ KHz.

در ادامه در مورد هر کدام از ۴ حالت مورد اشاره توضیحاتی داده می‌شود.

۳-۱. تغییرات سرعت و دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی و بسامد در فشارهای محصورکننده ثابت ۴۵۰۰ psi

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تغییر سرعت و دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی در ۴ بسامد مختلف در فشارهای محصورکننده ۴۵۰۰ psi نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده از شکل ۵ را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

چنانکه در شکل ۵ دیده می‌شود، سرعت موج فشاری با افزایش فشار منفذی کاهش یافته است. مطابق این شکل به ازای هر ۱۲/۵ psi افزایش فشار، سرعت موج فشاری به اندازه ۱ m/s کاهش یافته است. ۲ دلیل برای این موضوع می‌توان بیان کرد؛ الف) تماس ضعیف‌تر دانه‌های متخلخل به علت فشار سیال درون حفره‌ای و ب) افزایش مسیر موج در مسیر حفرات (سیال) نسبت به ذرات جامد سنگ.

کنترل ویژگی‌های کشسان، قابل ملاحظه نیست. او عامل اصلی پراکندگی را در نمودارهای سرعت امواج بر حسب تخلخل و نوع منافذ تشکیل‌دهنده تخلخل در سنگ‌های کربناتی دانست.

(Evans et al. (2008) دریافتند که دامنه‌های سیگنال‌های عبوری در محیط دانه ریز اشباع از آب مقطر نسبت به زمانی که محیط دانه درشت باشد، بزرگ‌تر هستند و افت بسامدی و دامنه با افت فشار منفذی در محیط دانه ریز شدت بیشتری دارد. ولی هنگامی که در همان آب CO₂ حل کردند دامنه‌های موج بزرگ‌تر از حالت آب خالص دیده شد. ایشان این پدیده را به افزایش چگالی سیال منفذی نسبت دادند. اگرچه قانون هنری (Henry's law) رفتار حباب‌گونه سیال را توجیه می‌کند ولی آنها مدعی شدند که امواج الاستیک این رفتار را به دقت خوبی نسبت به پیشگوی فشار قانون هنری رصد می‌کند. از یافته‌های مهم دیگر ایشان این بود که تغییرات دامنه و بسامد موج عبوری بسیار سریع‌تر از سرعت موج خود را به نمایش می‌گذارد. آنها این پدیده را ابزاری برای ارزیابی کمی مقدار گاز CO₂ حل شده در آب معرفی کردند. در پژوهش آزمایشگاهی که به تازگی انجام گرفته (Yam & Schmitt, 2011) معلوم شد که در یک نمونه اشباع از سیال محتوی CO₂ تغییرات سرعت امواج الاستیک همخوانی خوبی با مدل بایوت دارد ولی تغییرات دامنه به شدت وابسته به تغییرات فشار منفذی و بسامد بوده است.

چنانچه ملاحظه شد پژوهش‌ها و آزمایش‌های فیزیک سنگ در راستای مطالعه تغییرات سرعت و دامنه امواج الاستیک نسبت به تغییرات فشار (محسوری یا منفذی) معادل با فشار مخزن، همزمان با تغییر بسامد موج، در یک محیط اشباع از سیال نسبتاً کم بوده است. در این پژوهش سعی بر آن است که در شرایط فشار مخزن و دمای ثابت اتاق راهی پیش گرفته شود تا مغزه یا نمونه ابتدا تحت فشار محسوری و سپس تحت فشار منفذی قرار گیرد. سپس امواج الاستیک (در این مطالعه موج تراکمی) با بسامد چیره ۵۰۰ KHz از این نمونه گذر کرده و سپس ثبت شوند. سپس مطالعه بر روی روند نسبی تغییرات متغیرهای موج انجام می‌شود.

۲- آزمایش‌ها

در این بخش ابزار آزمایشگاهی برداشت داده‌های پژوهش معرفی و سپس اطلاعات کلی از داده‌های برداشت شده ارائه می‌شود. گفتنی است که طراحی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی را، نگارندگان خود انجام داده‌اند.

۲-۱. معرفی ابزار آزمایشگاهی برداشت

داده‌های استفاده شده در این نوشتار در آزمایشگاه تراوانسج سیلابی دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی کرین استرالیا برداشت شده‌اند. نمونه مورد مطالعه ماسه سنگی با جرم حجمی ۲/۱۲۲ گرم بر سانتیمتر مکعب و ابعاد ۳/۷۸ سانتیمتر قطر و ۸/۰۸ سانتیمتر طول بوده است. نمونه پس از خشک شدن و آماده‌سازی مقدماتی، در یک پوشش پلیمری قرار داده شده تا نسبت به نفوذ سیالات اعمال‌کننده فشار محوری محافظت شود. نمونه پوشش داده شده در درون یک نگهدارنده مغزه قرار داده شده است ولی در پیرامون آن چشمه و گیرنده پیزوالکتریکی (transducers) گذاشته شده است تا امکان ارسال و دریافت امواج صوتی فراهم شود. در شکل ۱ چگونگی قرارگیری نمونه و ترانسیدوسرها به صورت نمادین نمایش داده شده است. چنانکه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود نمونه از اطراف تحت فشار محصورکننده (فشار شعاعی) P_{ax} بوده و به آن فشار کلاهک P_{ax} اعمال می‌گردد. در این شرایط فشار منفذی نمونه P_p نمایش داده شده است. در شکل ۱، OD معرف قطر خارجی کلاهک، ID معرف قطر داخلی کلاهک، r شعاع مغزه و P_{axial} معرف فشار محوری مؤثر است که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (\pi(OD)^2 - \pi(ID)^2) \\ A_2 &= \pi r^2 \end{aligned} \right\} \sigma = P_{axial} = \frac{P_{ax} * A_1}{A_2} \quad (1)$$

۳-۳. پوش دامنه موج فشاری در فشارهای محصورکننده ثابت

در شکل ۹ مجموعه‌ای از پوش دامنه متعلق به سیگنال‌های گذر کرده در شرایط ثبات فشار محصور و تغییر فشار منفذی است که همگی در یک شکل رسم شده‌اند. چنانچه ملاحظه می‌شود، پوش‌های دامنه (منظور قدرمطلق تبدیل هیلبرت سیگنال است) بر هم منطبق هستند و تمایز ویژه‌ای دیده نمی‌شود. شکل ۱۰ نیز نمای دیگری از این شرایط است.

۳-۴. پوش دامنه موج فشاری در فشار منفذی ثابت

شکل ۱۱ مجموعه‌ای از پوش دامنه متعلق به سیگنال‌های گذر کرده در شرایط ثبات فشار منفذی و تغییر فشار محصور است که همگی در یک شکل رسم شده‌اند. چنانچه دیده می‌شود، پوش‌ها نسبت به حالت پیش که بر هم منطبق بودند، نسبتاً از هم جدا شده‌اند ولی جدایش آنها از هم خیلی روشن نیست. شکل ۱۲ نیز نمای دیگری از این شرایط است.

۴- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که دیده شد، در مخزن ماسه‌سنگی مورد مطالعه در جنوب باختر استرالیا، با افزایش فشار محصور و روند سرعت صعودی بوده است. علت افزایش فشار را می‌توان به کاهش تخلخل، بهبود شرایط تماس دانه‌ها، بسته شدن درزه و شکاف‌های ریز میکروسکوپی و به عبارتی منسجم شدن توده سنگ و بالا رفتن ضرایب الاستیسیته نسبت داد. ولی در شرایطی که فشار منفذی رو به افزایش و فشار محصور ثابت بود، رفتار عکس روند بالا بود و با افزایش فشار منفذی، سرعت، روند نزولی ولی با نرخ تقریباً ثابت نشان داد. علت این پدیده را نیز می‌توان افزایش دانسیته محیط و ازدیاد فاصله دانه‌ها دانست. در هر دو حالت یادشده پوش دامنه امواج رسم شد ولی نشان داد که اختلاف محسوسی وجود ندارد.

سیاسگزاری

بدینوسیله از دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی کرنتین استرالیا که امکان استفاده از آزمایشگاه تراوانسج سیلابی را برای نگارندگان فراهم کردند، تشکر می‌شود. همچنین از آقایان امین نبی‌پور و محمد سرمدی که در انجام آزمایش‌ها کمک فراوانی کردند، سیاسگزاری شود. در پایان لازم است از اعضای محترم هیأت علمی دانشکده مهندسی نفت و دانشکده ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی کرنتین که در طراحی، ساخت و نصب ترنسدیوسرها همکاری کردند سیاسگزاری شود.

با توجه به بیشتر مراجع ژئوفیزیکی انتظار می‌رود که سرعت موج فشاری تابعی از بسامد نباشد. ولی نتایج آزمایش‌های انجام شده حقیقت ظریفی را آشکار ساخته است. مطابق شکل ۵، در فشارهای منفذی ثابت، با افزایش بسامد، سرعت موج فشاری افزایش یافته است. برای نمونه در فشار منفذی ۲۰۰۰ psi، با افزایش بسامد از ۲۵۰ KHz به ۱۵۰۰ KHz، سرعت موج فشاری از ۳۵۰۰ m/s به ۳۵۳۰ m/s افزایش یافته است. البته این افزایش سرعت کمتر از یک درصد است و شاید به همین دلیل هم است که تغییرات سرعت نسبت به تغییر بسامد را در مراجع نادیده گرفته‌اند؛ ولی حقیقت این است که این تغییر کم وجود دارد.

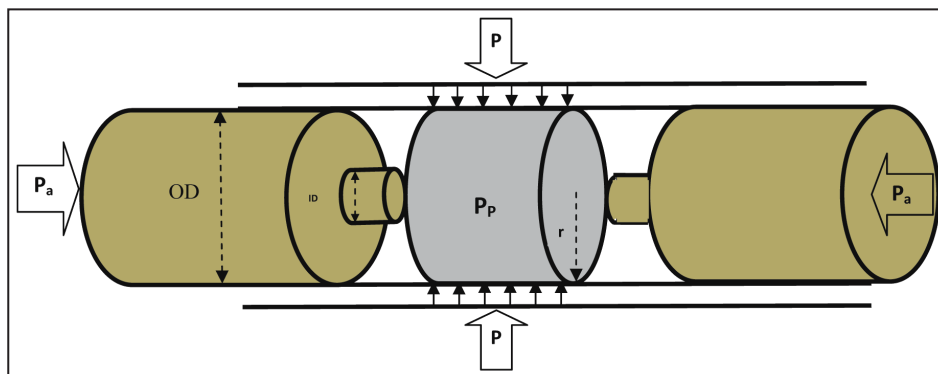
ولی رفتار دامنه موج فشاری تفاوت‌های بنیادین با رفتار سرعتی آن دارد. این حقیقت به روشنی در شکل ۶ دیده می‌شود. برای بیان روشن‌تر رفتار دامنه موج فشاری به ازای تغییرات فشار منفذی و بسامد در فشارهای محدودکننده ثابت، حقایق زیر مورد اشاره قرار می‌گیرند:

دامنه نیز در حالتی که فشار مؤثر ثابت ولی فشار منفذی متغیر و در حال افزایش است، روند نزولی دارد (شکل ۶). در این حالت کاهش ۱۸ درصدی در دامنه به ازای افزایش هر psi فشار منفذی دیده می‌شود.

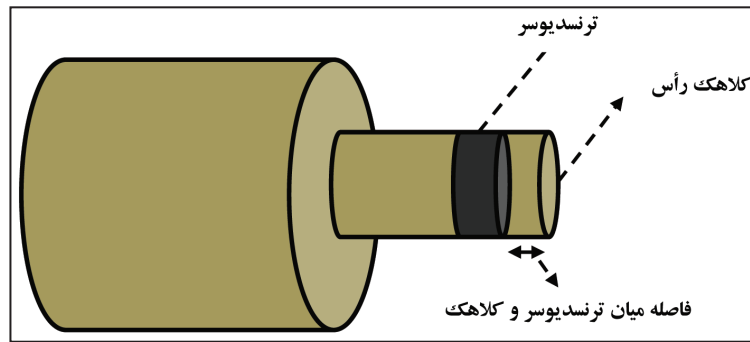
بنابراین از آنجا که تغییرات دامنه موج فشاری نسبت به تغییرات بسامد بسیار محسوس، ولی تغییرات سرعت موج فشاری بسیار نامحسوس است، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که دامنه ویژگی به مراتب مناسب‌تری نسبت به سرعت برای مطالعات فیزیک‌سنگی دارد. این در حالی است که پژوهشگران بسیاری از سرعت موج برای مطالعات فیزیک سنگ استفاده کرده‌اند.

۳-۲. تغییرات سرعت و دامنه موج فشاری در فشار منفذی ثابت

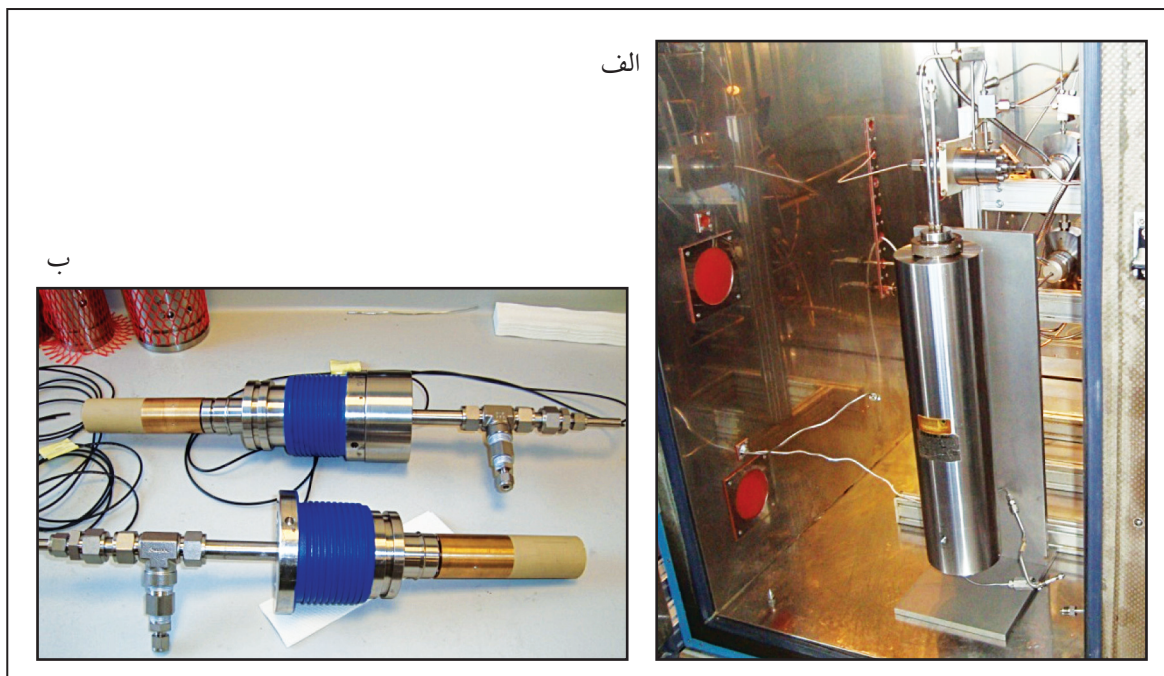
در شکل ۷ روند رو به رشد سرعت موج تراکمی در برابر افزایش فشار محصور دیده می‌شود. در این حالت که فشار منفذی ثابت و برابر ۲۰۰۰ psi است، نرخ رشد صعودی نمودارهای سرعت تقریباً معادل ۷ درصد (m/S psi) است. این بدان معنی است که به ازای هر ۱۴/۳ psi افزایش فشار محصور، سرعت در حدود ۱ (m/s) افزایش داشته است. این موضوع می‌تواند از تماس بهتر ذرات تشکیل‌دهنده ماتریس سنگ در اثر فشار محصور، همراه با کاهش بسیار جزئی در تخلخل سنگ به دست آمده باشد. تغییرات دامنه موج فشاری در حالت فشار منفذی ثابت بر عکس حالت افزایش آن، روند صعودی دارد (شکل ۸). نرخ رو به رشد این روند تقریباً برابر است با افزایش ۱۵ درصد دامنه در برابر افزایش ۱ psi فشار محصور که دلیل آن می‌تواند افزایش Q برآمده از متراکم شدن سنگ باشد.



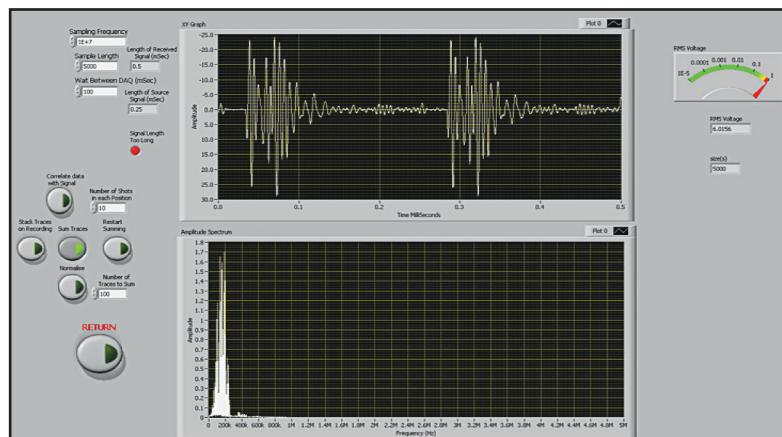
شکل ۱- چگونگی قرارگیری نمونه درون دستگاه آزمایش به صورت نمادین نمایش داده شده است.



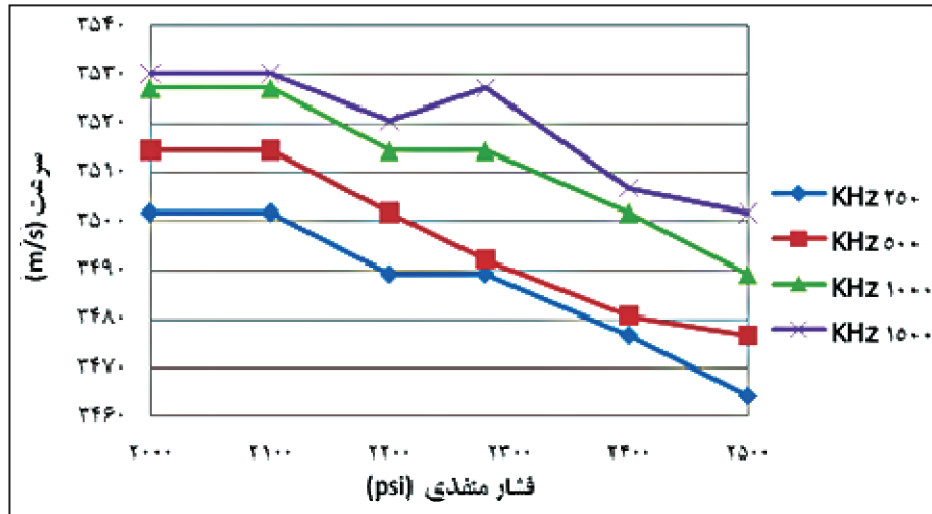
شکل ۲- چگونگی ارتباط نمونه مغزه با ترنسدیوسر و کلاهک رأس



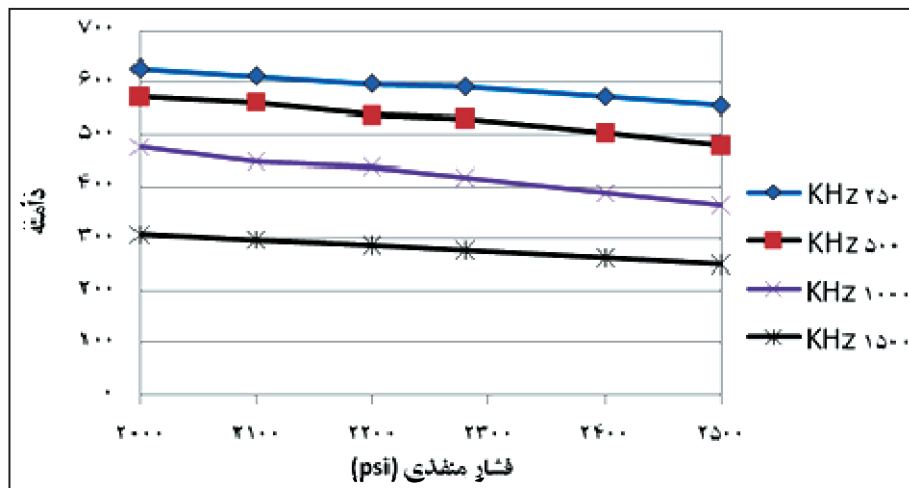
شکل ۳- الف) نمایی کلی از نگهدارنده مغزه و ترنسدیوسرهای متصل به آن؛ ب) ترنسدیوسرها که روی کلاهک‌ها نصب شده‌اند.



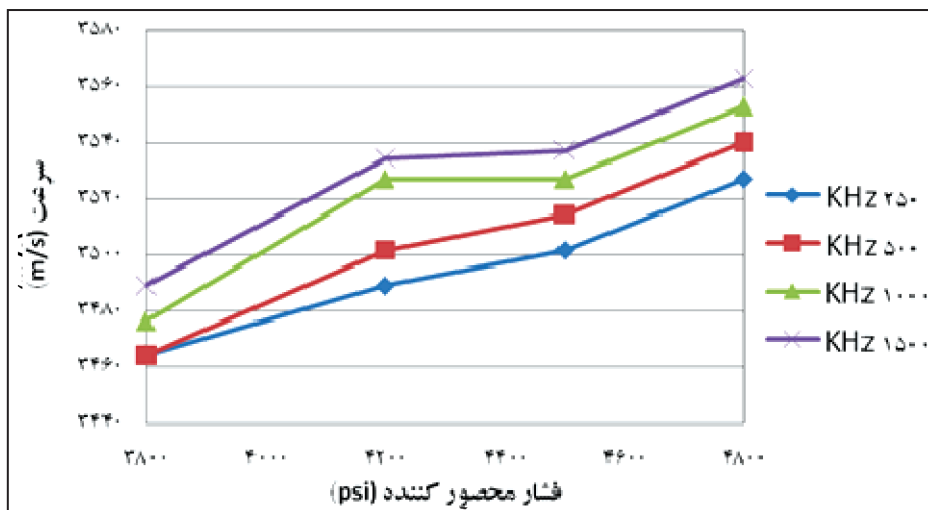
شکل ۴- نمونه‌ای از سیگنال ثبت شده و طیف بسامدی آن



شکل ۵- تغییرات سرعت موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی، در فشارهای محصور کننده ثابت و برابر با ۴۵۰۰ psi.

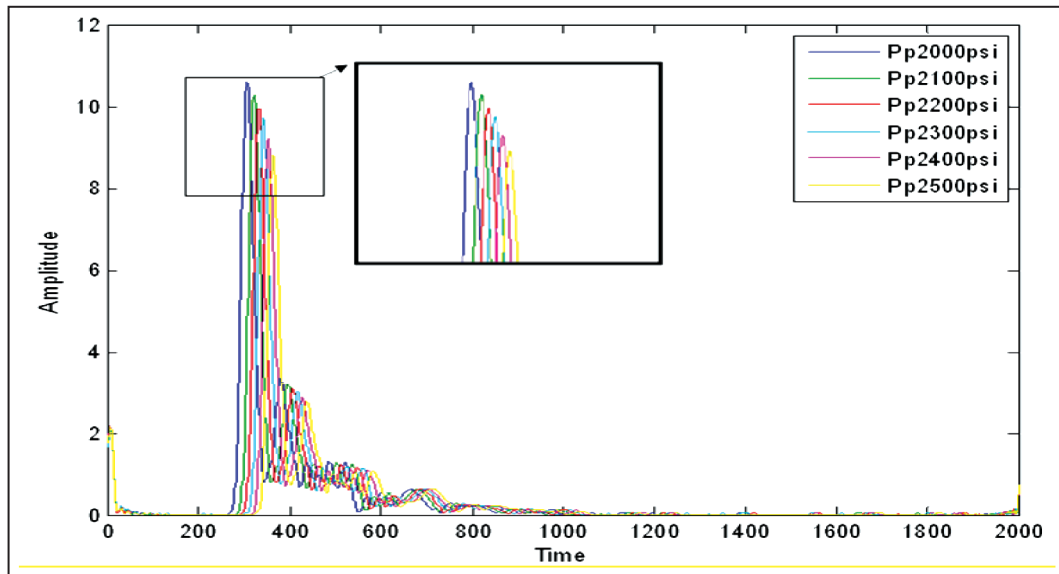
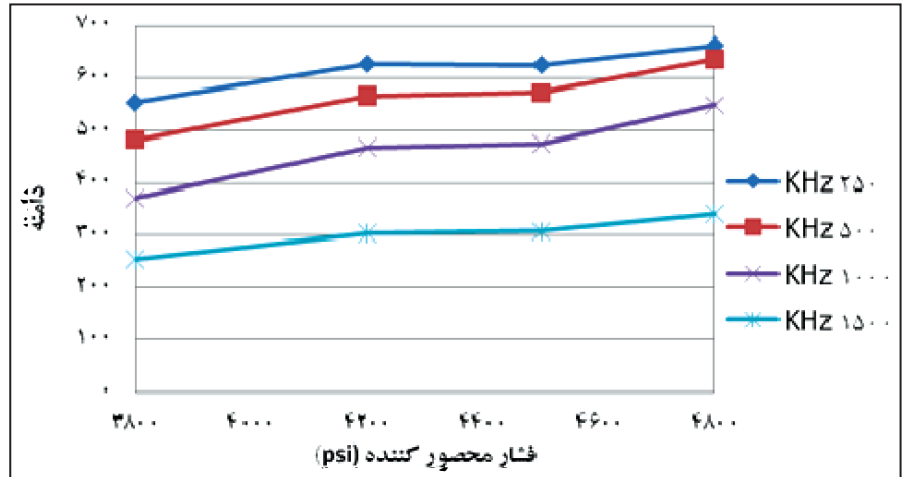


شکل ۶- تغییرات دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی، در فشارهای محصور کننده ثابت و برابر با ۴۵۰۰ psi.

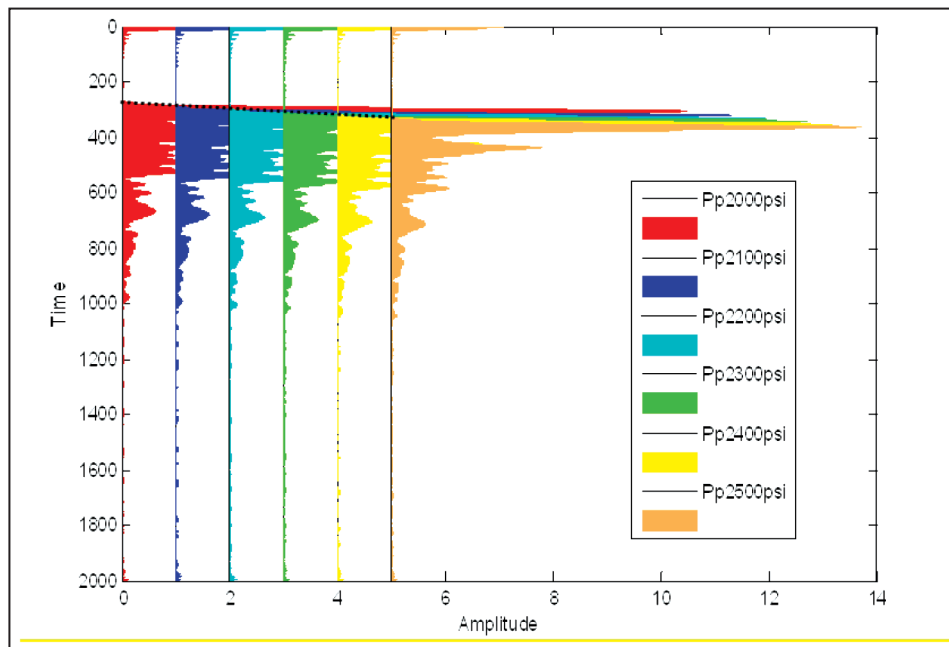


شکل ۷- تغییرات سرعت موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصور کننده، در فشارهای منفذی ثابت و برابر با ۲۰۰۰ psi.

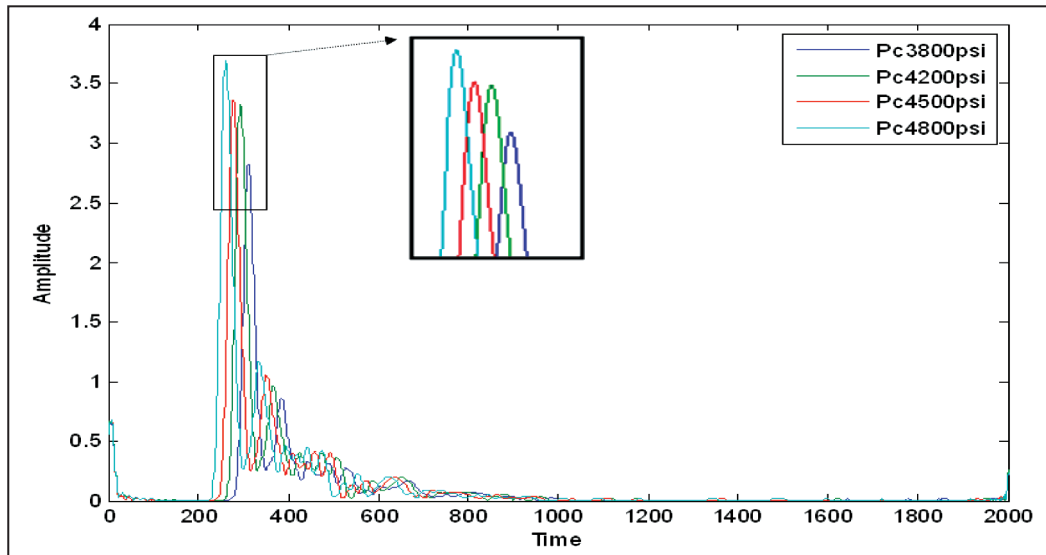
شکل ۸- تغییرات دامنه موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصور کننده، در فشارهای منفذی ثابت و برابر با 2000 psi .



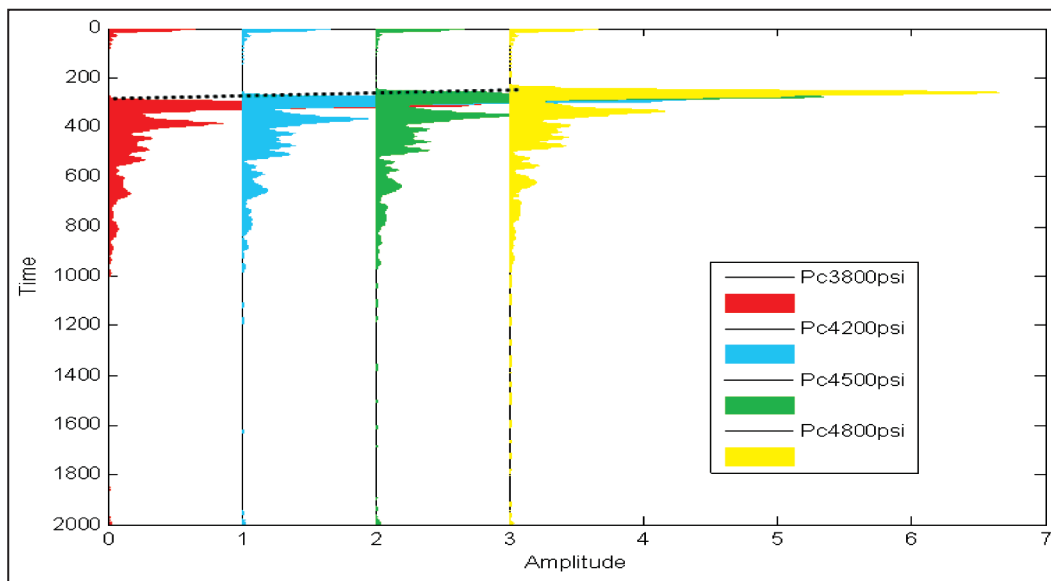
شکل ۹- پوش دامنه سیگنال‌های موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی در فشارهای محصور کننده ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی 500 KHz .



شکل ۱۰- پوش‌های دامنه به صورت جداگانه سیگنال‌های موج فشاری به ازای تغییر فشار منفذی در فشارهای محصور کننده ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی 500 KHz .



شکل ۱۱- پوش دامنه سیگنال های موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصورکننده در فشار منفذی ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی ۵۰۰ KHz.



شکل ۱۲- پوش های دامنه به صورت جداگانه سیگنال های موج فشاری به ازای تغییر فشارهای محصورکننده در فشار منفذی ثابت و همچنین در حالت ویژه بسامدی ۵۰۰ KHz.

جدول ۱- ترکیبات مختلف فشاری برداشت داده های آزمایشگاهی

ردیف	فشار شعاعی	فشار محوری	فشار منفذی
۱	۳۸۰۰	۳۸۰۰	۲۰۰۰
۲	۴۲۰۰	۴۲۰۰	۲۰۰۰
۳	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۰۰۰
۴	۴۸۰۰	۴۸۰۰	۲۰۰۰
۵	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۱۰۰
۶	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۲۰۰
۷	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۳۰۰
۸	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۴۰۰
۹	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۲۵۰۰

جدول ۲- ترکیبات مختلف ترنسدیوسر فشاری برداشت داده‌های آزمایشگاهی

<i>S</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	نوع چشمه
<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	نوع گیرنده
۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	بسامد (KHz)

کتابنگاری

قاسمی، م.، نبی‌بیدهندی، م. و خزانه‌داری، ج.، ۱۳۸۴- سرعت انتشار امواج در نمونه‌های سنگ کربنات یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران، فصلنامه علوم زمین، شماره ۵۶، صفحه ۱۴۵-۱۳۴. ولی، ج.، ۱۳۸۸- تأثیر شکل هندسی منافذ بر سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۵، شماره ۳، صفحه ۳۵-۴۹.

References

- Anselmetti, F. S. & Eberli, G. P., 1993- Controls on sonic velocity in carbonate rocks, *Pure Appl. Geophysics.*, 141, pp. 287-321.
- Evans, B., Keshavarz, N. & Nakatsuka, Y., 2008- Effect of pore geometry and dissolved CO₂ on ultrasonic transmission during pore pressure changes, *Geophysics*, Vol. 73, No. 6, pp. 181-185.
- Gist, G., 1994- Interpreting laboratory velocity measurements in partially gas saturated rocks, *Geophysics*, Vol.59, No7, pp.1100-1109.
- Johnson, D., 2001- Theory of frequency dependent acoustics in patchy-saturated porous media, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.110, No.2, pp.682-694.
- Knight, R., Dvorkin, J. & Nur, A., 1998- Acoustic signatures of partial saturation, *Geophysics*, Vol. 63, No.1, pp.132-138.
- Krzikalla, F. & Müller, T. M., 2007- High-contrast finite-differences modelling in heterogeneous poroelastic media, 77th SEG Annual Meeting, pp. 2030-2034.
- Lebedev, M. & Stewart, T., 2009- Direct laboratory observation of patchy saturation and its effects on ultrasonic velocities, the leading edge, pp. 24-27.
- Mavko, G. & Nolen-Hoeksema, R., 1994- Estimating seismic velocities at ultrasonic frequencies in partially saturated rocks, *Geophysics*, Vol.59, No.2, pp. 252-258.
- Mavko, G. & Mukerji, T., 1998- Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks, *Geophysics*, Vol. 63, No. 3, pp. 918-924.
- Müller, T. M., Toms - Stewarte, J. & Wenzalu, F., 2008- Velocity-saturation relation for partially saturated rocks with fractal pore fluid distribution, *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L09306.
- Prasad, M. & Meissner, R., 1992- Attenuation mechanisms in sands: laboratory versus theoretical (Biot) data, *Geophysics*, Vol. 57, No. 5, pp. 710-719.
- Pride, S. R., Berryman, J. G. & Harris, J. M., 2004- Seismic attenuation due to wave-induced flow, *Journal of Geophysical Research*, DOI: 10.1029, 15 pages.
- Toksoz, M. & Kuster, G. T., 1974- velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, *Geophysics*, number 5, Vol. 39, pp. 587- 603.
- Yam, H. & Schmitt, D. R., 2011- CO₂ rock physics: a laboratory study, CSPG CSEG CWLS Convention, Recovery energy environment economy, 7 pages.

Laboratory Study of Ultrasonic Wave Treatments in Porous Media Under Reservoir Pressure Conditions in Sand Stone Samples from a Reservoir in South-West of Australia

H. Azizi ^{1*}, H. R. Siahkoochi ², B. Evans ³, N. Keshavarz Farajkhah ⁴ & E. Kazemzadeh ⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Geophysics, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

² Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Department of Petroleum Engineering, Curtin University, Perth, Australia

⁴ Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

Received: 2012 January 18

Accepted: 2012 May 09

Abstract

Rock physics is the major tool to describe physical property of reservoir rocks; such as porosity, permeability, degree of saturation, property fluid that saturated, shape of pores, compressibility and etc via studying ultrasonic wave transmitting through a rock sample. Between these parameters, porosity and degree of saturation are more effective on elastic wave velocities which have been studied extensively in recently years. Amplitude of acoustic waves is a function of acoustic impedances (velocity and density) could be used to study lithology, pore fluids and saturation. In this paper we studied how main characters wave (velocity, amplitude, frequency) changes related to two main reservoir characteristics (pore pressure and confining pressure). In our study, we transmitted ultrasonic waves in different frequencies through a sandstone core in reservoir pressure condition. Analysis confirmed that similar to previous studies, amplitude of transmitted signal is a more sensitive attribute to pressure changes rather than velocity of the waves.

Keywords: Rock physics, Pressure reservoir condition, Amplitude spectrum, Frequency variant, Velocity variant

For Persian Version see pages 239 to 246

*Corresponding author: H. Azizi; E-mail: azizihaleh@yahoo.com