



توسعه روابط آزمایشگاهی- فیزیک سنگ، جهت تخمین سرعت - دامنه موج، در شرایط مخزنی

هاله عزیزی^{۱*}، حمیدرضا سیاه کوهی^۲، بریان ایونز^۳، ناصر کشاورز فرج خواه^۴ و عزت الله کاظم زاده^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات واحد تهران

۲- استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۳- استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی کورتین استرالیا

۴- استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: azizihaleh@yahoo.com

چکیده

در حال حاضر عمده روش‌های ازدیاد برداشت به کار برده شده در مخازن نفتی کشور، تزریق آب و گاز است. تزریق گاز (به عنوان مثال CO_2)، یکی از کاربردی‌ترین روش‌های افزایش ضریب بازیافت میادین نفتی است. در راستای مطالعه نشانگرهای لرزه‌ای، میزان سازگاری تئوری گاسمن و روابط گرینبرگ- کاستاگنا با شرایط اشباع محیط توسط دی‌اکسید کربن، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی گردید. اگرچه این روابط سال‌هاست مورد استفاده‌اند و نتایج نسبتاً معتبر و قابل قبولی ارائه داده‌اند، اما معمولاً بر اساس فرضیاتی هستند که گاهی به نتایجی دور از واقعیت می‌رسند. در این تحقیق، گاز CO_2 به صورت فاز محلول در مقیاس آزمایشگاهی به نمونه‌هایی ماسه‌سنگی تحت فشار مخزن تزریق شده و روند تزریق توسط انتقال و ثبت امواج الاستیک مطالعه شده است. با تغییر پارامترهای مؤثری همچون فشار محصور (در حد فشار مخزن)، فشار منفذی (در حد فشار مخزن)، فرکانس موج عبوری، غلظت CO_2 ، در هر مرحله از آزمایش‌ها، تأثیر آن‌ها بر سرعت و دامنه موج لرزه‌ای بررسی شده است. در نهایت بر اساس نتایج طیف متنوعی از آزمایش‌ها، روابطی توسعه داده شده که سرعت و دامنه موج لرزه‌ای را بر اساس فشار مؤثر، فرکانس و غلظت تخمین می‌زند. اعتبارسنجی نشان می‌دهد که سازگاری روابط ارائه شده با مشاهدات آزمایشگاهی بیش از ۹۰ درصد بوده و مطلوب‌تر از دیگر روابط مورد استفاده است.

واژگان کلیدی

فیزیک سنگ
سرعت امواج الاستیک
دامنه امواج الاستیک
شرایط مخزن
تئوری گاسمن
روابط گرینبرگ- کاستاگنا
تزریق دی‌اکسید کربن
ماسه سنگ

۱- مقدمه

از لرزه‌شناسی به دو شیوه می‌توان برای یافتن خصوصیات و ویژگی‌های فیزیکی زمین استفاده کرد؛ که شامل تغییر در سرعت موج و تغییر در دامنه موج یا به عبارتی تغییر در میزان تضعیف موج به سبب گذر از محیط است. داده‌های تضعیف موج محدودیت‌های زیادی دارند. چرا که تفسیر عوامل مؤثر بر آن‌ها و برقراری ارتباط بین این عوامل و خواص سنگ، بسیار مشکل است؛ بنابراین در این مقوله مطالعات انجام نشده فراوانی باقی‌مانده است. محققین، طی سه دهه گذشته، همواره سعی کرده‌اند روابط بین خواص فیزیکی سنگ مخزن و مشاهدات ژئوفیزیکی را کشف کنند؛ لازم به ذکر است که به این روابط علم فیزیک سنگ^۱ اطلاق می‌گردد.

فیزیک سنگ نقش بسزایی در یافتن پارامترهای پتروفیزیکی و مخزنی از قبیل تخلخل، تراوایی، سنگ‌شناسی، اشباع، فشار منفذی و فراوانی درز و شکافها با پارامترهای لرزه‌ای داشته است. به بیان دیگر از نشانگرهای مختلف لرزه‌ای از قبیل سرعت، فرکانس، فاز، دامنه و تضعیف موج لرزه‌ای و ترکیبی از آن‌ها، جهت تخمین پارامترهای مختلف مخزنی استفاده شده است (Dodds et al., 2007, Adam 2006, Ruiping et al 2006, Avseth 2005, Gray et al. 2002).

در سال ۱۹۶۸ پنبک روشی را ارائه نمود که با استفاده از داده‌های چاه‌نگاره اکوستیک، بتوان فشار منفذی را تخمین زد (pennebake, 1968). چهار سال بعد ایتون (Eaton, 1972) رابطه‌ای ریاضی برای روش پنبک ارائه کرد. البته دو سال پیش از وی مطالعات رینولدز (Reynolds, 1970) نشان داده بود؛ که می‌توان از سرعت لرزه‌ای به منظور تعیین ویژگی‌های مخزنی، همچون تعیین فشار منفذی استفاده کرد. چند سال بعد دومنیکو (Domenico, 1977) نشان داد که در تعیین فشار مؤثر در ماسه‌سنگ‌ها می‌توان از سرعت موج تراکمی بهره برد. کاستاگنا و همکارانش (Castagna et al., 1985) رابطه‌ای تجربی بین سرعت موج تراکمی و موج برشی بر اساس لیتولوژی ارائه دادند و بعد از آن‌ها گرینبرگ و کاستاگنا (Greenberg and Castagna, 1992) نحوه تخمین سرعت موج برشی بر اساس تئوری‌های اولیه در سنگ‌های متخلخل را تکمیل کردند. در همان ایام کاستاگنا و همکارانش (Castagna et al., 1993) روابط تجربی‌ای مبتنی بر داده‌های واقعی ارائه کردند که به دلیل قابلیت تعمیم مطلوبشان، همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند. سال‌ها بعد مشاهدات آزمایشگاهی‌ای ارائه شد که ارتباط کیفی بین محیط و سرعت موج صوتی را ارائه می‌کردند (Monsen and Johnstad, 2005). این روابط که با تغییرات کوچک محیط از قبیل میزان اشباع، نوع سیال، شکل اشباع و شکل و اندازه دانه‌بندی، تغییر بزرگی می‌کنند؛ رفته رفته مورد بررسی بیشتری قرار گرفتند (Krzikalla and Muller, 2007; Toms et al., 2007).

پیشرفت علم، لبدو و همکارانش (Lebedev et al., 2009) با استفاده از دستگاه سیتی‌اسکن، رفتار سرعت موج P را در اشباع‌های مختلف اندازه‌گیری و مدل‌سازی نمودند. مدل‌سازی‌های زیادی با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای که سرآمدشان سرعت است؛ انجام گرفته است. (Han et al., 2010; Han et al., 2014; Liu L. et al., 2011; Eftekharifar and Han, 2010).

دامنه داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی عمده‌ای برای مدل‌سازی زمین‌شناسی زون‌های مختلف مخازن استفاده می‌شوند. از آنالیز دامنه داده‌های لرزه‌ای می‌توان جهت تشخیص تغییرات جانبی و قائم ویژگی‌های پتروفیزیکی نظیر نوع سنگ، تخلخل، اشباع سیال و فشار منفذی استفاده کرد. به طور معمول نگاره‌های چاه و اندازه‌گیری‌هایی که بر روی مغزه انجام می‌شوند جهت تخمین ابتدایی ویژگی‌های پتروفیزیکی چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مقادیر برای تخمین زمین‌آماری^۲ و عملیات افزایش مقیاس^۳ ویژگی‌های پتروفیزیکی در مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما به‌جای این کار می‌توان از دامنه‌های time-lapse لرزه‌ای و روش معکوس زمین‌آماری به نتایج مطلوب‌تری رسید (Torres-Verdin et al., 1999; Al-najjar et al., 1999; Cooper et al., 1999; Behrens et al., 2001; Merkel et al., 2001; Cominelli et al., 2002; Mac Beth et al., 2005; Varela et al., 2006).

محققان فیزیک سنگ همواره سعی در به دست آوردن مدلی از تضعیف امواج لرزه‌ای در محیط‌های متخلخل با فرض اشباع تکه‌ای^۴ داشته‌اند. به عنوان مثال وایت و همکاران مدل منظمی برای توزیع تکه‌های اشباع از سیال با هندسه ساده (کروی یا باریکه) در نظر گرفته و نسبت به چگونگی تضعیف امواج لرزه‌ای در این محیط تحقیق کرده‌اند (White et al., 1975). بدیهی است مدل‌هایی که ایشان ارائه کرده‌اند به دلیل ساده‌سازی‌های بسیار، قابلیت تعمیم چندانی نداشته‌اند. سال‌ها بعد محققانی مطالعات وایت را تکرار کردند، با این تفاوت که ایشان هندسه تکه‌های سیال را متنوع‌تر در نظر گرفتند (Pride et al., 2004; Johnson, 2001). البته ایشان هم همچون وایت، توزیع تکه‌های سیال در محیط مخزن را یکنواخت فرض کرده بودند. اگرچه مدل‌های تئوری تا حدی چگونگی تضعیف امواج لرزه‌ای را معرفی کرده‌اند؛ اما فاکتورهای کنترل‌کننده شکل تکه‌های اشباع از سیال به طور کامل شناخته نشده‌اند. این فاکتورها را از طریق تزریق سیال در آزمایشگاه می‌توان مطالعه نمود. البته مطالعات قبلی حاکی از آن است که ارتباط قوی بین نحوه توزیع تکه‌های اشباع‌شده از سیال و سرعت اکوستیکی وجود ندارد (Monsen and Johnstad, 2005).

عده‌ای از محققان توزیع تکه‌های سیال در محیط را نیز

²- Geostatistical Techniques

³- Upscaling Procedures

⁴- Patchy Saturation

¹- Rock Physics

۲- ابزار برداشت و نحوه برداشت داده

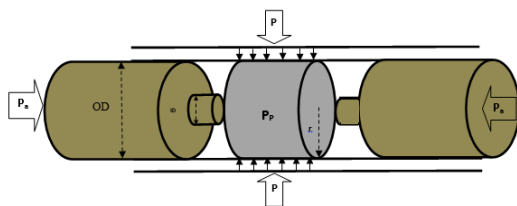
آزمایش‌های موضوع این تحقیق در آزمایشگاه سیلاب‌زنی مغزه دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی کریتین استرالیا انجام شده است. در شکل ۱، دستگاه سیلاب‌زنی مغزه مورد استفاده نمایش داده شده است. این دستگاه مجهز به سنسورهای فشار و دما و نیز ارسال کننده و گیرنده‌های امواج فراصوتی (P و S) و تجهیزات مونیتورینگ الکتریکی است. همچنین نرم‌افزار برداشت داده مختص این دستگاه طراحی و آماده شده است.



شکل ۱: دستگاه سیلاب‌زنی مغزه.

۲-۱- نگهدارنده مغزه^۷

محفظه نگهدارنده مغزه، مختص این تحقیق و به نحوی طراحی شده که فشارهای محصورکننده^۸ همچون شعاعی^۹ و محوری^{۱۰} و همچنین فشار منفذی^{۱۱} قابل اندازه‌گیری و کنترل باشند. فشارهای محصوروری توسط شیرهای تعبیه شده، توسط سیالی همچون روغن بر نمونه اعمال می‌شوند. این کار به وسیله یک تلمبه مکانیکی انجام می‌شود. لازم به ذکر است که بخش‌های مختلف محفظه نگهدارنده که در تماس مستقیم با سیالند؛ نسبت به واکنش شیمیایی خنثی هستند. در دو سر این محفظه دو کلاهک^{۱۲} قرار دارد؛ که در انتهای آن‌ها فرستنده و گیرنده امواج^{۱۳} (ترنسدیوسر) نصب شده‌اند (شکل ۲). این دو ترنسدیوسر در ارتباط مستقیم با مغزه هستند.



شکل ۲: نحوه قرارگیری نمونه داخل نگهدارنده مغزه، نمایش داده شده است.

غیریکنواخت و به صورت تصادفی در نظر گرفتند (Muller and Gurevich, 2004; Toms et al., 2006 and 2007 and Muller et al., 2008). ایشان مدل‌های متنوع ریاضی برای تضعیف امواج لرزه‌ای ارائه کرده‌اند؛ که اتفاقاً از قابلیت تعمیم نسبتاً مناسبی نیز برخوردار بودند؛ اما به عقیده برخی از محققین با اینکه پارامترهایی چون پاشش و مکانیسم مد نشت^۵ هر دو عامل افت انرژی سیگنال و در نتیجه تضعیف امواج لرزه‌ای هستند؛ اما در مقیاس‌های بزرگ میدانی که هتروژنی و ناهمگونی و غیر کشسانی بودن زمین به خاطر مسائلی همچون اشباع از سیالات مختلف و شکل و چگونگی اشباع نیز بسیار بزرگ است، تأثیر مکانیسم نشت بر میزان افت انرژی سیگنال بسیار مؤثرتر از پاشش نمود می‌کند (Huang et al., 2009; Gegenhuber et al., 2015) بنابراین هر یک از فاکتورها را باید با ضریب خاص خود لحاظ کرد.

تحقیقات بسیاری در موضوع استفاده از نشانگر دامنه-فرکانس لرزه‌ای جهت شناسایی خصوصیات فیزیک سنگ مخزن صورت گرفته؛ که در اینجا به تعدادی از آن‌ها به اختصار اشاره می‌شود. در سال ۱۹۹۸ تعدادی از محققان به صورت تئوری و عددی وابستگی فرکانس- دامنه لرزه‌ای با توزیع غیر یکنواخت درزه و تخلخل، در محیطی چند لایه؛ که لایه‌ها تمایز اندکی باهم دارند؛ را تحلیل کردند (Gurevich & Lopatnikov, 1998). در ادامه محققان متعددی بر روی این موضوع کار کرده و تغییرات فرکانس- دامنه موج لرزه‌ای برای نمونه کاملاً اشباع از سیال با منافذی کاملاً هتروژن و البته شامل درز و شکاف را بررسی کردند (pride et al., 2004). برجانوسکی و همکاران (Brajanovski et al., 2006) این مطالعات را به حالت تزریق سیال در محیط متخلخل شکاف‌دار (هتروژن) توسعه دادند. لامبرت و همکاران (Lambert et al., 2005) نیز این موضوع را برای محیط چند لایه الاستیک و با در نظر گرفتن امواج بازتابی تحلیل عددی نمودند؛ اما بررسی‌ها نشان داد که حضور نفت سنگین نیز می‌تواند محیط را وابسته به فرکانس نماید. نفت سنگین خاصیت ویسکو الاستیک^۶ داشته و در فرکانس‌های پایین همچون یک سیال رفتار می‌کند؛ اما در فرکانس‌های بالا رفتاری همچون جامدات از خود نشان می‌دهد (Ke and Dong, 2010). در این مورد نیز با مدل‌سازی فیزیک سنگ، پراش ناشی از این پدیده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. کواین‌تال و همکاران (Quintal et al., 2011) رفتار تضعیف موج لرزه‌ای را به واسطه مکانیسم جریان سیال به صورت عددی مدل‌سازی کردند. ایشان در تحقیقاتشان وابستگی بالای فرکانس به تضعیف را متأثر از حضور انواع سیالات منفذی و در نتیجه تغییر در مدول بالک دانسته‌اند.

در این مقاله و بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی در شرایط فشار مخزن، روابطی توسعه داده شده و ارائه شده‌اند که تغییرات سرعت و دامنه موج لرزه‌ای نسبت به تغییرات فشار مؤثر، فرکانس و

7- Core- Holder
 8- Confining Pressures
 9- Radial Pressure
 10- Axial Pressure
 11- Pore Pressure
 12- Cap
 13- Transducer

5- Leaky Mode Mechanisms
 6- Viscoelastic

۲-۲- اطلاعات کلی مغزه‌ها

آب (بدون خارج شدن از مدار بسته)، به اشباع دی‌اکسید کربن رسید. لازم به ذکر است که در تمام موارد نگهدارنده مغزه باید به صورت قائم قرار گیرد.

در ادامه این آزمایش در چند مرحله انجام می‌شود. در هر مرحله ابتدا فشار منفذی یک پله بالا برده می‌شود؛ سپس ثابت می‌ماند و در این حین فشار محصوره قدم به قدم بالا می‌رود و در هر حالت سیگنال گذر کرده و ثبت می‌شود (جدول ۳، ۴ و ۵).

برداشت داده در شرایط غلظت ۵۲ گرم دی‌اکسید کربن در ۶۵۰ میلی‌لیتر آب از به صورت جدول ۳ انجام شد.

برداشت داده در شرایط غلظت ۲۸ گرم دی‌اکسید کربن در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب از به صورت جدول ۴ انجام شد.

برداشت داده در شرایط غلظت ۱۸ گرم دی‌اکسید کربن در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب از به صورت جدول ۵ انجام شد.

در جداول ۳، ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود که فرکانس موج عبوری از نمونه عبارت است از: ۲۵۰، ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوهرتز؛ همچنین در مراحل متعدد با ثابت نگاه داشتن فشار منفذی و تغییر دادن فشار محصوره (و بالعکس) و تغییر نوع موج عبوری و ثبتی، سری‌های متعددی از داده آزمایشگاهی تولید شده است.

۳- تجزیه و تحلیل و پردازش داده‌ها

مطالعات نشان می‌دهد، تحقیقات و آزمایش‌های فیزیک سنگ در راستای مطالعه تغییرات سرعت و دامنه امواج الاستیک نسبت به تغییرات فشار (محصوره یا منفذی) معادل با فشار مخزن، هم‌زمان با تغییر فرکانس موج، در یک محیط اشباع از سیال نسبتاً کم صورت یافته است.

از آنجا که بررسی صحت نتایج ضروری است، در این قسمت نخست سعی شد تا سرعت‌ها با استفاده از مدلی معتبر تخمین زده شوند؛ سپس تخمین‌ها با مقادیر سرعت به دست آمده در آزمایشگاه سنجدیده شده و میزان اختلاف آن‌ها، تحت عنوان خطا معرفی گردد. بنابراین با توجه به موجود بودن تخلخل و چگالی نمونه و مشخص بودن نوع کانه، ضمن استفاده از جدول ۶، ابتدا از نمودار سرعت - فشار مؤثر نمونه اشباع از آب خالص، سرعت امواج تراکمی و برشی در فشاری (مثلاً ۸۰۰ psi) قرائت شد. سپس از رابطه موج برشی با مدول برشی و چگالی، مدول برشی محاسبه گردید. با موجود بودن مدول برشی، چگالی و سرعت موج تراکمی، مدول بالک نمونه اشباع از آب خالص محاسبه شد. مدول بالک نمونه اشباع از آب به عنوان K_{sat} در رابطه گاسمن (رابطه ۱)، قرار داده شد تا مدول برشی اسکلت سنگ خشک حاصل شود (Mavko, 2005).

$$k_{dry} = k_g \left(\frac{1 - \frac{(1-\phi)K_{sat}}{K_g} - \phi \frac{K_{sat}}{K_f}}{1 + \phi - \frac{\phi K_g}{K_f} - \frac{K_{sat}}{K_g}} \right) \quad (1)$$

پلاگ‌های مورد استفاده در این مقاله از نمونه‌های ماسه‌سنگی بریا^{۱۴} متعلق به منطقه‌ای از استرالیا جنوب غربی با دانه‌بندی‌های مختلف است. مغزه‌های استفاده شده به شکل استوانه بودند که مشخصات فیزیکی و پتروفیزیکی آن‌ها در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌ها.

ویژگی	نمونه شماره یک	نمونه شماره دو
جرم (gr)	۱۹۲/۳	۲۰۶/۹
قطر (cm)	۳/۷۸	۳/۷۹
طول (cm)	۸/۰۸	۷/۹۸

جدول ۲: مشخصات پتروفیزیکی نمونه‌ها.

نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	
۱۶	۲۰/۸	تخلخل (%) در فشار ۲۰۰۰ psi
۲۴۵	۴۲۱/۵	نفوذپذیری (MD) در ۲۰۰۰ psi
۲/۱	۲/۳	چگالی (gr/cm ³)

۳-۲- تهیه CO₂ محلول در آب

برای تهیه CO₂ محلول از مکانیسم ساده اضافه کردن یخ خشک به آب مقطر تحت فشار استفاده شده است. دی‌اکسید محلول در سه غلظت متفاوت تهیه شد؛ تا اثر غلظت در نتایج مشاهده شود. این سه غلظت عبارت‌اند از:

- ۵۲ گرم یخ خشک در داخل ۶۵۰ میلی‌لیتر آب یونیزه
- ۲۸ گرم یخ خشک در داخل ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب یونیزه
- ۱۸ گرم یخ خشک در داخل ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب یونیزه

۴-۲- تزریق CO₂ محلول (Dissolved CO₂)

در این مرحله باید نسبت به تزریق دی‌اکسید کربن محلول در آب مقطر در غلظت‌های مختلف به مغزه اشباع از آب مقطر اقدام و سپس با تغییر در فشار و فرکانس، تغییرات نسبی پارامترهای موج فراصوتی عبوری را مشاهده کرد. برای این منظور مراحل کار به شرح زیر بودند:

الف. انجام مراحل مقدماتی آزمایش (کالیبراسیون دستگاه و آماده کردن پلاگ‌ها)

ب. تزریق آب مقطر به نمونه در مدار باز و با فشار تا ۳۰۰ psi به مدت یک ساعت تا هوای احتمالاً باقی‌مانده در ریز حفرات سنگ، تحت فشار و شستشوی نمونه، از حفرات آن خارج شود.

ج. بستن شیر خروجی متعلق به فشار منفذی نگهدارنده مغزه. زمانی که آب در مدار بسته تحت فشار به نمونه وارد شده و آن را شستشو می‌دهد، می‌توان در همان زمان با افزودن یخ خشک به

^{۱۴} - Berea Sandstone

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۲، شماره ۱، ۱۳۹۵.

جدول ۳: جزئیات برداشت داده در آزمایش تزریق دی‌اکسید محلول با غلظت ۵۲ گرم در ۶۵۰ میلی لیتر آب.

فشار منفذی (psi)	فشار محصور (psi)	تعداد تریس انبارش شده	فرکانس موج فرستاده شده (KHz)	فرکانس مرکزی مبدل (KHz)	موج دریافت شده	موج فرستاده شده
۲۰۰۰	۴۸۰۰-۴۵۰۰-۴۲۰۰-۳۸۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۰۰۰	۴۸۰۰-۴۵۰۰-۴۲۰۰-۳۸۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	S
۲۰۰۰	۴۸۰۰-۴۵۰۰-۴۲۰۰-۳۸۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	P
۲۰۰۰	۴۸۰۰-۴۵۰۰-۴۲۰۰-۳۸۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۱۰۰-۲۲۰۰-۲۲۸۰-۲۴۰۰-۲۵۰۰	۴۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۱۰۰-۲۲۰۰-۲۲۸۰-۲۴۰۰-۲۵۰۰	۴۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	S
۲۱۰۰-۲۲۰۰-۲۲۸۰-۲۴۰۰-۲۵۰۰	۴۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	P
۲۱۰۰-۲۲۰۰-۲۲۸۰-۲۴۰۰-۲۵۰۰	۴۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۱۰۰-۲۲۰۰-۲۲۸۰-۲۴۰۰-۲۵۰۰	۴۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰-۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S

جدول ۴: جزئیات برداشت داده در آزمایش تزریق دی‌اکسید محلول با غلظت ۲۸ گرم در ۱۰۰۰ میلی لیتر آب.

فشار منفذی (psi)	فشار محصور (psi)	تعداد تریس انبارش شده	فرکانس موج فرستاده شده (KHz)	فرکانس مرکزی مبدل (KHz)	موج دریافت شده	موج فرستاده شده
۲۰۰	۲۴۰۰-۲۲۰۰-۲۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۱۳۰۰	۲۶۰۰-۲۴۰۰-۲۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۱۵۰۰	۲۸۰۰-۲۶۰۰-۲۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۱۸۰۰	۳۰۰۰-۲۸۰۰-۲۶۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۰۰۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰-۲۸۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۲۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰-۳۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۴۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۵۰۰	۳۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۰۰	۲۴۰۰-۲۲۰۰-۲۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۱۳۰۰	۲۶۰۰-۲۴۰۰-۲۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۱۵۰۰	۲۸۰۰-۲۶۰۰-۲۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۱۸۰۰	۳۰۰۰-۲۸۰۰-۲۶۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۰۰۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰-۲۸۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۲۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰-۳۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۴۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S

جدول ۵: جزئیات برداشت داده در آزمایش تزریق دی‌اکسید محلول با غلظت ۱۸ گرم در ۱۰۰۰ میلی لیتر آب.

فشار منفذی (psi)	فشار محصور (psi)	تعداد تریس انبارش شده	فرکانس موج فرستاده شده (KHz)	فرکانس مرکزی مبدل (KHz)	موج دریافت شده	موج فرستاده شده
۲۰۰	۲۴۰۰-۲۲۰۰-۲۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۱۵۰۰	۲۸۰۰-۲۶۰۰-۲۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۰۰۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰-۲۸۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۴۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	P	P
۲۰۰	۲۴۰۰-۲۲۰۰-۲۰۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۱۵۰۰	۲۸۰۰-۲۶۰۰-۲۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۰۰۰	۳۲۰۰-۳۰۰۰-۲۸۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S
۲۴۰۰	۳۴۰۰-۳۲۰۰	۳۰	۱۰۰۰-۸۰۰-۵۰۰-۲۵۰	۱۰۰۰	S	S

جدول ۶: مقادیر جرم حجمی و مدول بالک محلول دی‌اکسید کربن.

غلظت CO ₂ محلول (mol)	جرم حجمی (gm/cm ³)	مدول بالک (gm/cm ³)
۰/۳	۱/۰۱۱۴	۱/۹۴۰۲۵
۰/۲	۱/۰۰۷	۱/۹۳۸۵۱
۰/۱	۱/۰۰۲۶	۱/۹۳۶۷۷
صفر	۰/۹۹۸۲	۱/۹۳۵۰۲

عزیزی و همکاران، توسعه روابط آزمایشگاهی- فیزیک سنگ، جهت تخمین سرعت - دامنه موج، در شرایط مخزنی، صفحات ۲۱-۱۱.

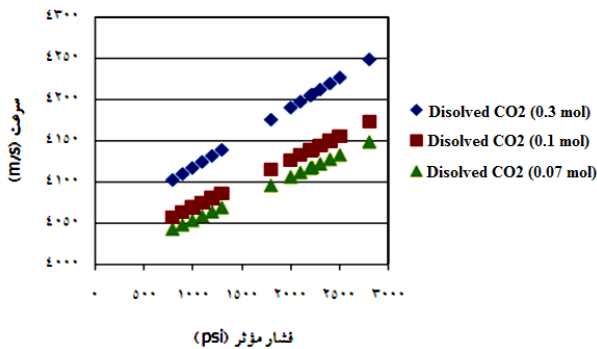
ذکر شد، در رابطه گاسمن مدول برشی، قبل و بعد از اشباع ثابت در نظر گرفته می‌شود. لذا این بار با معلوم بودن مدول بالک سنگ اشباع از دی‌اکسید کربن محلول، مدول‌های برشی و چگالی و سرعت موج تراکمی در این شرایط محاسبه گردید. نتایج برای غلظت‌های مختلف در جدول ۷ آمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، تفاوت نتایج آزمایشگاهی با روابط گاسمن، بین ۵ الی ۱۲/۵ درصد بوده است.

که در رابطه (۱)، K_{dry} عبارت است از مدول حجمی اسکلت سنگ خشک، ϕ تخلخل، K_{sat} مدول حجمی سنگ اشباع از سیال، K_g مدول حجمی دانه‌های کانه و K_f مدول حجمی سیال اشباع کننده است.

پس از محاسبه مدول بالک اسکلت سنگ، با فرض این که سیال ثانوی، دی‌اکسید کربن محلول با غلظت‌های ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۰۷ است و ضمن استفاده از مقادیر جدول ۶، به ترتیب مدول بالک نمونه اشباع از دی‌اکسید کربن محلول محاسبه شد. همان‌گونه که پیش‌تر نیز

جدول ۷: نتایج حاصل از بررسی میزان تفاوت نتایج آزمایشگاهی با روابط گاسمن.

غلظت CO ₂ محلول (mol)	سرعت موج تراکمی تخمین زده شده (m/s)	سرعت موج تراکمی حاصله از نتایج آزمایشگاه (m/s)	درصد تفاوت نتایج آزمایشگاهی با روابط گاسمن (%)
۰/۳	۳۵۶۰	۳۴۰۴	۵
۰/۱	۳۵۷۵	۴۰۴۸	۱۲/۵
۰/۰۷	۳۵۷۷	۴۰۲۵	۱۲



شکل ۴: تخمین تغییرات سرعت موج تراکمی نسبت به تغییرات فشار مؤثر در غلظت‌های متفاوت.

۴-۲- مدل دامنه بر اساس فشار مؤثر و فرکانس

در شکل ۵ تغییرات دامنه موج تراکمی را نسبت به تغییرات فشار مؤثر، نسبت به فرکانس‌های متفاوت نمایش داده شده است. رابطه‌ی ۳ منطبق بر رفتار این سه مؤلفه است؛ که تخمین معکوس داده‌ها از آن در شکل ۶ به خوبی دلالت بر روند مشابه دارد.

$$A = P_e \left[\frac{0.0126 + 6 \cdot 10^{-9} (1000 - f)^2}{2 \cdot 10^{-5} (1000 - f)} \right] + [29.2 - 0.0222(1000 - f)] \quad (3)$$

۴- روابط تجربی توسعه داده شده در این مطالعه

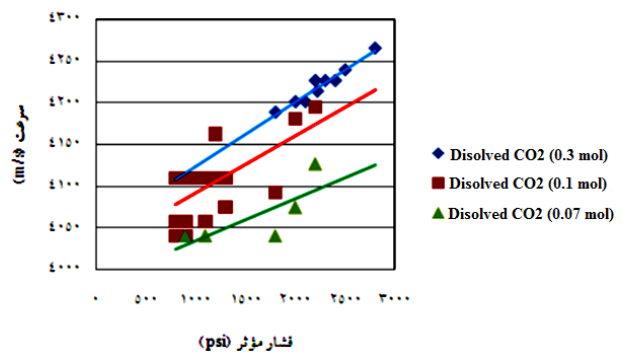
در ادامه روابط تجربی توسعه داده شده در این مقاله ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که در این روابط، مؤلفه‌های استفاده شده عبارت از سرعت موج تراکمی (V_p)، دامنه موج تراکمی (A)، فشار مؤثر (P_e)، غلظت برحسب کسر مولی (S_{mf}) و فرکانس (f) هستند.

۴-۱- مدل سرعت بر اساس فشار مؤثر و غلظت

در شکل ۳ تغییرات سرعت موج تراکمی نسبت به تغییرات فشار مؤثر در غلظت‌های متفاوت نشان داده شده است.

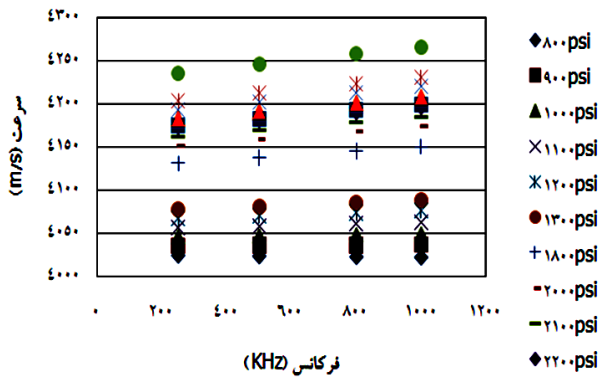
بهترین رابطه سرعت (فشار مؤثر- غلظت) رابطه ۲ است که داده‌های حاصل از آن را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. چنانچه ملاحظه می‌شود تطابق مدل ارائه شده با داده‌های آزمایشگاهی بسیار بالا است.

$$V_p = P_e (\ln(S_{mf}) + 0.09) + 29.8 \ln(S_{mf}) + 4080 \quad (2)$$



شکل ۳: تغییرات سرعت موج تراکمی نسبت به تغییرات فشار مؤثر در غلظت‌های متفاوت.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۲، شماره ۱، ۱۳۹۵.



شکل ۸: تخمین تغییرات سرعت موج تراکمی نسبت به فرکانس در فشارهای مؤثر متفاوت.

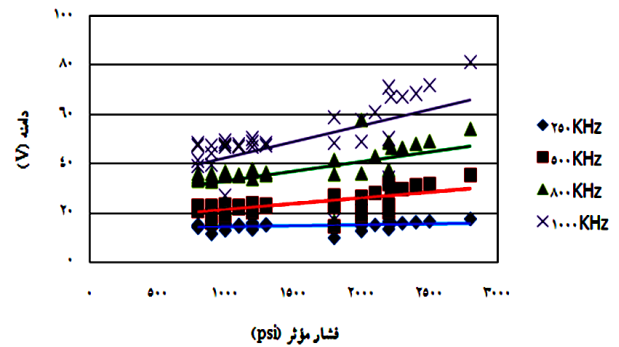
۵- بحث و نتیجه‌گیری

اگرچه روابط گاسمن- گرینبرگ- کاستانگا، روابطی هستند که سال‌ها در فیزیک سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما به علت فرضیاتی غیر واقعی، همچون فرض جایگزینی یک سیال به جای چند سیال بدون در نظر گرفتن چگونگی توزیع این سیالات (توزیع غیریکنواخت یا تکه‌ای) در داخل محیط، یا در نظر نگرفتن شرایط واقعی (شکل منافذ، شکل و اندازه و چگالی شکستگی‌ها، ناهمسانگردی، بافت و علی‌الخصوص فشار مؤثر وارد بر محیط، در نظر گرفته نشدن نوع سیال، میزان سیال، نحوه گسترش سیال، ویسکوزیته و ضریب تراکم‌ناپذیری سیال و ...) دارای نواقصی بوده و گاه نتایج دور از واقعیت ارائه می‌دهند؛ بنابراین به نظر می‌رسد در این روابط، علی‌الخصوص زمانی که نوع سنگ و شرایط محیط تغییر می‌کند، باید تجدیدنظر کرد.

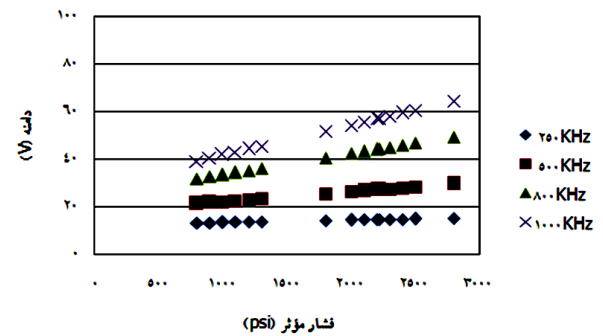
در این تحقیق سعی شد روابطی بر پایه فیزیک سنگ ارائه شود که در مقیاس آزمایشگاهی با خطای اندکی قابل‌تعمیم باشند. این روابط که همگی بر پایه فشار مؤثر ارائه شده‌اند، رویکرد جدیدی را در تخمین و توسعه پارامترهای مهمی همچون دامنه و سرعت موج ارائه می‌کنند.

در مدل سرعت بر اساس فشار مؤثر و غلظت، مشاهده شد که سرعت ضمن افزایش فشار مؤثر افزایش می‌یابد. این روند از غلظتی به غلظت بالاتر در سطح بالاتری دیده می‌شود. این پدیده صحه‌ای است بر افزایش تراکم و نزدیک شدن دانه‌ها به علت فشار و پر شدن تخلخل محیط با ماده‌ای با دانسیته بالاتر است؛ اما در مدل سرعت بر اساس فرکانس و فشار مؤثر، اگرچه افزایش سرعت با افزایش فشار کاملاً مشهود است؛ اما روند سرعت نسبت به تغییرات فرکانس تقریباً ثابت است که این امر تأییدی بر مقوله عدم پاشش موج با توجه به محدوده فرکانسی است.

در مدل دامنه بر اساس فشار مؤثر و غلظت نیز افزایش دامنه همسو با افزایش فشار مؤثر دیده می‌شود. میزان این تغییر از غلظت‌های پایین‌تر به بالاتر، کاملاً رو به رشد است.



شکل ۵: تغییرات دامنه موج تراکمی نسبت به تغییرات فشار مؤثر در فرکانس‌های مختلف.

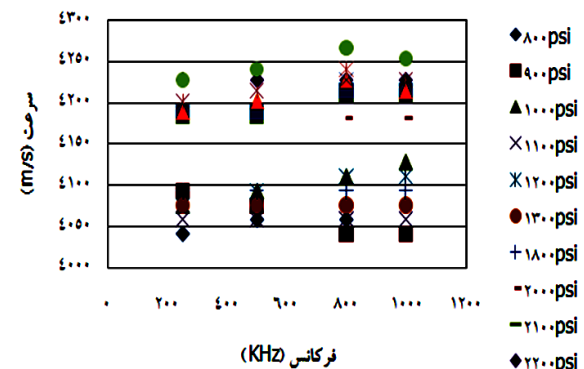


شکل ۶: تخمین تغییرات دامنه موج تراکمی نسبت به تغییرات فشار مؤثر در فرکانس‌های مختلف.

۴-۳- مدل سرعت بر اساس فرکانس و فشار مؤثر

رابطه‌ی ۴ مدل دیگری از ارتباط بین سرعت با فرکانس و فشار مؤثر است که از شکل ۷ نشئت گرفته است. در شکل ۸ نیز داده‌های حاصل از این رابطه نمایش داده شده که بسیار شبیه روند تغییرات در شکل ۷ است.

$$V_p = (0.034 \ln(P_e) - 0.23)f + (0.1P_e + 3945) \quad (4)$$



شکل ۷: تغییرات سرعت موج تراکمی نسبت به فرکانس در فشارهای مؤثر متفاوت.

active reservoir management: the time-lapse signal, SEG 69th Annual Meeting and Exhibition.

Dodds, K.J., Dewhurst, D.N., Siggins, A.F., Ciz, R., Urosevic, M., Gurevich, B. and Sherlock, D.H., 2007, Experimental and theoretical rock physics research with application to reservoirs, seals and fluid processes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 57, 16-36.

Domenico, S.N., 1977, Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs, *Geophysics*, 42, 1339-1368.

Eaton, D.W., Ross, G.M. and Clowes, R.M., 1972, Seismic-reflection and potential-field studies of the Vulcan structure, western Canada' A Paleoproterozoic Pyrenees, *Journal of Geophysical Research*, 104 (B10, P23), 255-269.

Eftekharifar, M. and Han, D.H., 2011, 3D Petrophysical modeling using complex seismic attributes and limited well log data, *Rock Physics Lab, University of Houston, SEG, San Antonio, Annual Meeting*.

Gegenhuber, N. and Pupos, J., 2015, Rock physics template from laboratory data for carbonates. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 12-18.

Gray, D., Graham, R. and Head, K., 2002, Recent advances in determination of fracture strike and crack density from P-wave seismic Data, *SEG*, 21 (3), 280-285.

Greenberg, M.L. and Castagna, J.P., 1992, Shear wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications, *Geophysical Prospecting*, 40, 195-209.

Gurevich, B. and Lopatnikov, S.L., 1998, Scattering of a compressional wave in a poroelastic medium by an ellipsoidal inclusion, *Geophysical Journal International*, 133 (1), 91-103.

Han, D.H., Liu, J. and Sun, M., 2010, Improvement of Density Model for Oils, *SEG, Annual Meeting, Denver*, 2459-2463.

Han, D.H., Liu, J. and Sun, M., 2014, Velocity model development for heavy oils: 84th Annual Meeting, *SEG, Expanded Abstracts*, 2788-2792.

Han, D.H., Sun, M. and Batzle, M., 2010, CO₂ velocity measurement and models for temperatures up to 200°C and pressures up to 100 MPa, *Geophysics*, 75 (3), E123-E129.

Huang, J.W., Bellefleur, G. and Milkereit, B., 2009, Seismic Wave Attenuation due to Scattering and Leaky Mode Mechanisms in Heterogeneous Reservoirs, *CSPG CSEG CWLS Convention, Calgary, Alberta, Canada*, 336-340.

چنانچه ملاحظه می شود دامنه و سرعت موج لرزه ای در این مدل ها نسبت به غلظت دی اکسید کربن حساس هستند. این نکته می تواند در پیمایش روند تزریق گاز در بازیافت های ثانویه و پس از آن در مخازن نفتی بسیار قابل توجه باشد.

۶- سپاس گذاری

لازم است از همکاران محترم دانشکده نفت دانشگاه کربن، بالأخص آقایان دکتر وامق رسولی، دکتر محمد سرمدی، دکتر امین نبی پور و مهندس محسن قاسمی که در انجام آزمایش ها کمک شایانی نمودند، تشکر نمائیم.

۷- منابع

Adam, L., Batzle, M. and Brevik, I., 2006, Gassmann fluid substitution and shear modulus variability in carbonates at laboratory seismic and ultrasonic frequencies, *Geophysics*, 71 (6), 1-13.

Al-Najjar, N.F., Brevik, I., Psaila, D.E. and Doyen, P.M., 1999, 4D seismic modelling of the Statfjord field, initial results Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 56730).

Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., 2005, Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk, *Cambridge University Press*, 10 P.

Behrens, R., Condon, P., Haworth, W., Bergeron, M., Wang, Z. and Ecker, C., 2001, 4D seismic monitoring of water flux at Bay Marchand the practical use of 4D in an imperfect world, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition (SPE 71329).

Brajanovski, M., M'uller, T.M. and Gurevich, B., 2006, Characteristic frequencies of seismic attenuation due to wave-induced fluid flow in fractured porous media, *Geophysical Journal International*, 574-578.

Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., 1985, Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571-581.

Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Kan, T.K., 1993, Rock physics-the link between rock properties and AVO response. In *Offset-Dependent Reflectivity-Theory and Practice of AVO Analysis*, Soc. Exploration Geophysics, 24-157.

Cominelli, A., Seymour, R., Stradiotti, A. and Waggoner, J., 2002, Integrating time-lapse data in the history match of a gas-condensate reservoir, *EAGE 64th Conference and Exhibition*.

Cooper, M., Thorogood, E., O'Donovan, A., Kristiansen, P. and Christie, P., 1999, Foinaven

- Muller, T., Beyer, V., Eichhorn Borany, J.V. and Mucklich, A., 2008, Ion beam synthesis and charge storage behaviour of Au nanocrystals in SiO₂ layers, *Journal of Applied Physics*, 104, 024512-0245127.
- Müller, T.M., Toms-Stewart, J. and Wenzalu, F., 2008, Velocity-saturation relation for partially saturated rocks with fractal pore fluid distribution, *Geophysical Research Letters*, 35, L09306.
- Pride, S.R., Berryman, J.G. and Harris, J.M., 2004, Seismic attenuation due to wave-induced flow, *Journal Of Geophysical Research*, 109, B01201, 19 P.
- Quintal, B., Frehner, M., Madaonna, C., Ticola, T., Kuteynikova, M. and Senger, E., 2011, integrated numerical and laboratory rock physics applied to seismic characterization of reservoir rocks, *The leading edge*, *Physics of Rocks*, 1360-1367.
- Reynolds, J.H., Hohenberg, C.M., Lewis, P.K. and Kaiser, W.A., 1970, Isotopic Analysis of Rare Gases from Stepwise Heating of Lunar Fines and Rocks, 167 (3918), 545-548.
- Ruiping, L.I., Kevin-Dodds, A.F. and Siggins-Milovan, U., 2006, A rock physics simulator and its application for CO₂ sequestration process, *Exploration Geophysics*, 37, 67-72.
- Toms, J., Müller, T.M. and Gurevich, B., 2007, Seismic attenuation in porous rocks with random patchy saturation, *Geophysical Prospecting*, 671-678.
- Toms, J., Müller, T.M. and Gurevich, B., 2007, Seismic attenuation in porous rocks with random patchy saturation, *Geophysical Prospecting*, 671-678.
- Torres-Verd'in, C., Victoria, M., Merletti, G. and Pendrel, J.V., 1999, Trace-based and geostatistical inversion of 3D seismic data for thin-sand delineation an application to San Jorge Basin, Argentina, *The Leading Edge*, 18 (9), 1070-1077.
- Varela, O.J., Carlos Torres-Verd'in, C., Sen, M.K. and Roy, I.G., 2006, Using time-lapse seismic amplitude data to detect variations of pore pressure and fluid saturation due to oil displacement by water: a numerical study based on one-dimensional prestack inversion, *Journal of geophysics and engineering*, 177-193.
- White, J.E., 1975, Computed seismic speed and attenuation in rocks with partial gas saturation: *Geophysics*, 40, 224-232.
- Johnson, P.J. and Ostrovsky, L.A., 2001, Dynamic nonlinear elasticity in geometricals, *Rivista del nuovo cimento*, 24 (7), 46 P.
- Ke, G. and Dong, H., 2010, Rock physics modelling of the frequency dispersion in bitumen saturated sands, *SEG Expanded Abstracts*, 29, 25-52.
- Krzikalla, A. and Muller, C., 2007, High-contrast finite-differences modelling in heterogeneous poroelastic Media, *SEG, Expanded Abstracts*.
- Lebedev, M., Stewart, J.T., Clennell, B., Pervukhina, M., Shulakova, V.S., Paterson, L., Muller, M., Gurvich, B. and Wenzlau, F., 2009, Direct laboratory observation of patchy saturation and its effects on ultrasonic velocities, *GSW*, 28 (1), 24-27.
- Liu, L., Cao, S., Han, D. and Wang, L., 2010, Frequency-dependent AVA variations in thinly layered porous media, *SEG, Denver, annual Meeting*, 409- 414.
- MacBeth, C., Stephen, K.D. and McNally, A., 2005, The 4D seismic signature of oil-water contact movement due to natural production in a stacked turbidite reservoir *Geophysics Prospect*, 53, 183-203.
- Mavko, G. and Dvorkin, J., 2005, P-Wave Attenuation in Reservoir and Non Reservoir Rocks, 67th Annual meeting and Exhibition of the European Association of Geoscientists and Engineers. Z-99.
- Mavko, G., Dvorkin, J. and Walls, J., 2005, A Theoretical Estimate of S-Wave Attenuation in Sediment, *SEG Intl. Exposition and 75th Annual Meeting*. Houston, Texas.
- Merkel, R.H., Barree, R.D. and Towle, G., 2001, Seismic response of Gulf of Mexico reservoir rocks with variations in pressure and water saturation, *The Leading Edge*, 20, 290-299.
- Monsen, K. and Johnstad, S.E., 2005, Improved understanding of velocity-saturation relationships using 4D computer-tomography acoustic measurements, *Geophysical Prospecting*, 53 (2), 173-181.
- Muller, T. and Gurevich, B., 2004, Attenuation and dispersion of seismic waves in 3-D randomly inhomogeneous, porous rocks: 66th Annual Conference, *EAGE, Extended Abstracts*, H033.



Development of laboratory-rock physics relations to estimate velocity-amplitude of seismic waves in reservoir conditions

Haleh Azizi^{1*}, Hamid Reza Siahkoochi², Brian Evans³, Nasser Keshavarz Faraj Khah⁴ and Ezzatollah Kazemzadeh⁵

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

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

3- Department of Petroleum Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia

4- Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran

Received: 4 June 2016; Accepted: 31 July 2016

Corresponding author: azizihaleh@yahoo.com

Keywords

Rock Physics

Velocity of Elastic Waves

Amplitude of Elastic Waves

Reservoir Conditions

Gassman Theory

Greenberg-Castagna Equations

CO₂ Injection

Sandstone

Extended Abstract

Summary

Water and Gas injection are two major enhanced oil recovery methods in Iran. Gas (e.g. CO₂) injection, is one of the most applicable methods of enhancing oil recovery in oil fields. In order to study the behaviour of seismic attributes, the compatibility of the prediction made by Gassman theory and Greenberg-Castagna equations in the situation of CO₂ saturated environment is investigated using lab data. It should be noted that the mentioned equations are based on some assumptions that are not always represent the real situation, thus, some incompatibility is anticipated. Therefore, their predictions are liable to be incompatible with real world wave behaviour. In this research, CO₂ in

dissolved phase is injected into pressurized sandstone samples in laboratory scale, and elastic waves are utilized in order to investigate the injection process. The variation of the propagation velocity of seismic waves and their amplitudes are studied versus variation of effective parameters e.g. confining pressure (close to reservoir pressure), pore pressure (close to reservoir pressure), transmission wave frequency, and CO₂ density and phase. We have also used the collected laboratory data for wave propagation at supercritical saturation state to investigate the compatibility of the prediction made by Gassman theory and Greenberg-Castagna equations. Based on the results of various laboratory experiments, we can conclude that some of the developed equations are useful for estimation of velocity and amplitude of seismic waves. Verifications confirm that compatibility of the developed equations with laboratory results are more than 90 percent, and thus, the developed equations can be preferred to other related popular equations.

Introduction

Rock physics has an effective role in the estimation of petrophysical and reservoir parameters e.g. porosity, permeability, rock type, saturation, pore pressure, and fracture density using seismic attributes. As a result, various seismic attributes such as velocity, frequency and phase are used in order to estimate the above-mentioned petrophysical and reservoir parameters (Dodds et al. 2007, Adam 2006, Ruiping et al. 2006, Avseth 2005, Gray et al. 2002). In recent decades, various empirical relations are also developed for this purpose (pennebake 1968, Eaton 1972, Reynolds 1970, Domenico 1977, Castagna et al. 1985, Greenberg and Castagna 1992, Castagna et al. 1993, Krzikalla and Muller 2007, Toms et al. 2007, Lebedev et al. 2009, Han et al. 2010, Han et al. 2014, Liu et al. 2010, Eftekharihar and Han 2011). Gassman theory and Greenberg-Castagna equations are widely utilized as basic rock physics equations in world oil fields. However, these equations are based on some unreal hypotheses which cause their results to be not fully compatible with real situations, for example these hypotheses do not consider the distribution of fluids, and also, do not pay attention to the real situation of the rock and fluids; e.g. pore size, pore shape, fracture density, fracture aperture, heterogeneity, the fabric of matrix, pore pressure, confining pressure, fluid type, saturation, fluid distribution, viscosity, compressibility index, etc. Therefore, these equations need reform, especially when rock type, fluid type and reservoir situation varies. In this paper, based on laboratory experiments, some empirical rock physics equations are developed that are more compatible with reservoir conditions, and present a new approach for estimation of velocity and amplitude of seismic waves.

Methodology and Approaches

In this research, a core holder has been designed in which measuring and controlling the confining, radial, axial and pore pressures have been feasible. Two transducers are put around the caps of core holder, in order to send and receive seismic waves. Transducers are in contact with plugs. The studied plugs having various grain sizes are taken from Berea sandstone formation in southwest of Australia. Three different CO₂ densities or concentrations are injected and dissolved into plugs saturated with distilled water. In the next stage, elastic waves having different frequencies are passed plugs under various pressure/density situations, and consequently, velocities of the waves are recorded. Based on these laboratory experiments, some equations are developed using multi-regression method that are more compatible with reservoir conditions

Results and Conclusions

In this paper, some novel equations, based on laboratory experiments, have been developed that not only are accurate but also are generalized. These equations or relations present a new approach in estimation of the velocity and amplitude of seismic waves. Based on the results, the authors of this paper prefer to give some practical recommendations as follow:

- All laboratory tests have been carried out in room temperature, and thus, the authors suggest that a similar research to be repeated in the reservoir temperature, and new equations to be developed.
 - In the current research, just two seismic attributes (velocity and amplitude) are studied. The authors suggest that other seismic attributes are also investigated in future studies.
 - The majority of Iranian oil fields are carbonate reservoirs while this research has been carried out on sandstone. Thus, the authors suggest that similar studies have been carried out on carbonate plugs.
 - Repeating laboratory tests with reflected waves will help to approach more real results.
 - In all laboratory tests, the authors have investigated the effect of pressure growth on the tests. It will be useful that other researchers investigate the effect of pressure drop on the results.
-