

حذف اثر فشار همه جانبه بر سرعت امواج الاستیک سنگ مطالعه موردی: سازند سروک

علیرضا نجیبی

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمد غفوری

استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا لشکری پور

استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۲۱

najibi.alireza@gmail.com

چکیده

پارامترهای استاتیک مکانیک سنگ نظیر مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مدول یانگ (E_s) کاربرد فراوانی در مطالعات ژئومکانیک مخازن نفتی دارند. این پارامترها، توسط روابط تجربی، از داده‌های دینامیکی نظیر سرعت امواج تراکمی و برشی (V_p و V_s) برای طول چاه قابل تخمین هستند. حذف اثر فشار همه جانبه مخزن بر V_p و V_s به منظور مطالعات ژئومکانیک مخازن ضروری می‌باشد. بنابراین، با انجام آزمایش بر روی تعدادی نمونه از سازند آهکی سروک، سرعت امواج در فشارهای اتمسفر و همه جانبه مختلف اندازه‌گیری شد. سپس، سرعت امواج در فشار اتمسفر پیش‌بینی، و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید که همبستگی بالایی بین آن‌ها مشاهده شد. به منظور افزایش اطمینان از مدل ارائه شده، نتایج آزمون‌های مشابه انجام گرفته بر روی تعدادی نمونه بازالت اقیانوسی نیز مورد استفاده قرار گرفت که صحت مدل پیشنهادی شده را تایید می‌کند. این مدل کاربرد فراوانی در مطالعات ژئومکانیک مخازن نفت ایفا می‌کند.

کلمات کلیدی: سرعت امواج تراکمی و برشی، فشار همه جانبه، آنالیز رگرسیون کمترین مربعات، سنگ آهک، سازند سروک.

مقدمه

به منظور تخمین تنش‌های برج، تحلیل پایداری دیواره چاه و طراحی فشار بهینه گل حفاری در مطالعات ژئومکانیک چاه‌های نفتی، از مقاومت فشاری تک محوره و ضرایب الاستیک استفاده می‌شود (Fjaer et al., 2008). مقاومت فشاری تک محوره به روش استاتیک و ضرایب الاستیک به دو روش دینامیکی و استاتیکی قابل اندازه‌گیری هستند. در روش استاتیک، با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و اعمال تنش به نمونه، مقاومت فشاری تک محوره و ضرایب الاستیک اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین، با اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی سنگ (V_p و V_s) در آزمایشگاه و یا در شرایط برج و توسط نگارهای سرعت امواج الاستیک، ضرایب الاستیک سنگ بصورت دینامیکی تعیین می‌شوند (Mavko et al., 2009). پارامترهای دینامیکی و استاتیکی با یکدیگر برابر نبوده و معمولاً پارامترهای دینامیک از پارامترهای استاتیکی متناظر خود بزرگتر می‌باشند (Lama and Vutukuri, 1978; Asef and Najibi, 2013). بخش عمده‌ای از این اختلاف بدلیل تاثیرپذیری بیشتر اندازه‌گیری‌های استاتیکی از حفرات و ترک‌های موجود در سنگ است (Pervukhina et al., 2010).

عواملی دیگر نظیر تاثیر سیال و فشار منفذی، نوع سیمان و نوع تنش و دامنه کرنش نیز در ایجاد اختلاف بین پارامترهای دینامیکی تاثیر می‌گذارند (Fjaer et al., 2008). از آنجا که پارامترهای استاتیکی در شرایط تنش و کرنش بالاتری نسبت به پارامترهای دینامیکی اندازه‌گیری می‌شوند، به شرایط طبیعی زمین نزدیک‌تر می‌باشند. از این رو، پارامترهای استاتیکی نتایج واقع‌بینانه‌تری نسبت به پارامترهای دینامیکی دارند و معمولاً در مدل‌سازی

مورد استفاده قرار می‌گیرند (Lacy, 1997). اما پارامترهای استاتیکی بر خلاف پارامترهای دینامیکی در طول چاه پیوسته نبوده و به نقاط دارای مغزه محدود می‌شوند. به همین دلیل روابط انطباقی زیادی بمنظور تخمین پارامترهای استاتیک از داده‌های دینامیکی توسط پژوهشگران ارائه شده است (Ohen, 2003; Ameen et al., 2009). رابطه (۱) ارتباط مقاومت فشاری تک محوره و مدول یانگ دینامیکی را برای سنگ آهک سروک نشان می‌دهد (نجیبی و همکاران، ۱۳۹۲).

$$\sigma_c = 15.32 (E_d / 10)^{1.255} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه σ_c بر حسب مگاپاسکال و E_d بر حسب گیگاپاسکال است که توسط رابطه زیر از V_p و V_s بدست می‌آیند.

$$E_d = \rho \cdot V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) \quad \text{رابطه (۲)}$$

از آنجا که پارامترهای استاتیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مدول یانگ (E_s) در فشار اتمسفر بدست می‌آیند، در استفاده از داده‌های دینامیک (که در فشار همه جانبه مخزن اندازه‌گیری شده‌اند) برای تخمین این پارامترها باید با احتیاط عمل نمود. در صورتی که سرعت امواج الاستیک تابعی از فشار همه جانبه باشند، استفاده از مقادیر V_p و V_s تحت فشار باعث تخمین غیر واقعی UCS و E_s می‌گردد. بنابراین تخمین مقادیر V_p و V_s در فشار اتمسفر بر اساس مقادیر متناظر آن‌ها در فشارهای همه جانبه مختلف به منظور پیش‌بینی UCS و E_s ضروری به نظر می‌رسد که در این تحقیق مورد توجه قرار می‌گیرد.

مروری بر پژوهش‌های گذشته

تجربیات بدست آمده از اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک بر روی مغزه‌های سنگ در فشارهای همه‌جانبه مختلف، افزایش غیرخطی و سریع سرعت در فشارهای پائین را نشان می‌دهد (Asef and Najibi, 2013). این روند، به دلیل بسته شدن ترک‌ها و منافذ موجود در سنگ است (Fjaer et al., 2008). در فشارهای بالاتر، بدلیل بسته‌شدن تعداد کمتری از ترک‌های باقیمانده و بروز تغییر شکل الاستیک حجمی در نمونه، منحنی تغییرات سرعت با فشار خطی می‌شود (Wang et al., 2005a;b). (Wepfer and Christensen 1991) با اعمال حداکثر ۸۰۰ مگاپاسکال فشار همه‌جانبه روی تعدادی نمونه گنیس، سرعت امواج الاستیک را در فشارهای مختلف اندازه‌گیری و رابطه سرعت با فشار را به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$V = A (P / 100)^a + B (1 - \exp^{-bP}) \quad (3)$$

که در این رابطه V سرعت امواج الاستیک (P یا S) بر حسب کیلومتر بر ثانیه، P فشار همه‌جانبه بر حسب مگاپاسکال و A ، a ، B و b ثابت‌های معادله هستند. آنان همچنین بیان کردند که در فشارهای ۶۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال، رفتار غیرخطی سرعت سنگ به رفتار خطی تبدیل می‌شود و این منطقه را ناحیه خمش (Knee) معرفی کردند. (Anselmetti and Eberli 1993) با اعمال حدود ۱۰۰ مگاپاسکال فشار همه‌جانبه بر روی ۲۱۰ نمونه کربنات، سرعت امواج الاستیک را در فشارهای مختلف اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیقات آنان، بیانگر بسته‌شدن ترک‌ها در فشار بحرانی ۱۵ مگاپاسکال و خرد شدن نمونه‌ها در فشارهای بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسکال است. (Wang et al. 2005) با انجام آزمایش التراسونیک تحت فشار بر روی تعدادی نمونه اکلوژیت و اعمال حداکثر ۸۰۰ مگاپاسکال فشار همه‌جانبه، به بررسی تاثیر فشار همه‌جانبه بر سرعت امواج الاستیک پرداختند. آنان منحنی سرعت با فشار را به قسمت‌های مختلف تقسیم کردند (شکل ۱). همان‌گونه که در شکل فوق نشان داده شده است، در بالای فشار بحرانی (P_c)، سنگ به حداکثر تراکم خود رسیده و با افزایش فشار، سرعت امواج در سنگ بصورت خطی افزایش یافته و تغییر شکل الاستیک حجمی در سنگ رخ داده است. (Wang et al. 2005) رابطه کلی سرعت موج با فشار را در این شرایط به‌صورت زیر پیشنهاد نمودند:

$$V = V_0 + DP, P > P_c \quad (4)$$

در این رابطه V سرعت امواج (P و S) بر حسب کیلومتر بر ثانیه، P فشار همه‌جانبه بر حسب مگاپاسکال، D شیب خط سرعت - فشار و V_0 سرعت موج در نمونه سنگ بکر (سنگ دارای تخلخل صفر و فاقد هرگونه درز و ترک) در فشار اتمسفر است که با برون‌یابی بدست می‌آید. همان‌گونه که در (شکل ۱) ملاحظه می‌شود، P_0 فشاری است که در آن $V = V_0$ می‌شود. V_C و V_B به ترتیب سرعت موج در سنگ در فشار اتمسفر و فشار بحرانی است. (Wang et al. 2005) تغییرات V_C تا V_0 را به تراکم تاخیری نسبت دادند و برای ناحیه غیرخطی، رابطه (۵) را پیشنهاد کردند:

$$V = a (\ln(P))^2 + b \ln(P) + C \quad (5)$$

که در این رابطه، C سرعت موج در سنگ در فشار ۱ مگاپاسکال و a و b ثوابت تجربی هستند. (Ji et al. 2007) رابطه (۵) را مورد بررسی مجدد قرار داده و رابطه (۶) پیشنهاد کردند:

$$B = B_0 \exp(-kP) \quad (6)$$

در این رابطه، B اختلاف سرعت موج در یک سنگ متخلخل با نمونه متناظر غیرمتخلخل در فشار یکسان است که به آن سرعت افت می‌گویند. در شرایط عدم اعمال فشار همه‌جانبه، سرعت افت به حداکثر مقدار خود رسیده و آن را با B_0

نشان می‌دهند (شکل ۲). در رابطه (۶)، k ثابت افت نام دارد و توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$dB/dP = -kB \quad (7)$$

(Ji et al. 2007) با ترکیب روابط (۴) و (۶)، رابطه کلی سرعت با فشار را بصورت رابطه (۸) ارائه نمودند که در (شکل ۲) نشان داده شده است.

$$V = V_0 + DP - B_0 \exp(-kP) \quad (8)$$

مفهوم فیزیکی $V_0 - B_0$ در (شکل ۲)، سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر است که به روش برون‌یابی قابل پیش‌بینی است. نظیر این پارامتر، با انجام آزمایش التراسونیک معمولی در فشار اتمسفر نیز قابل اندازه‌گیری است.

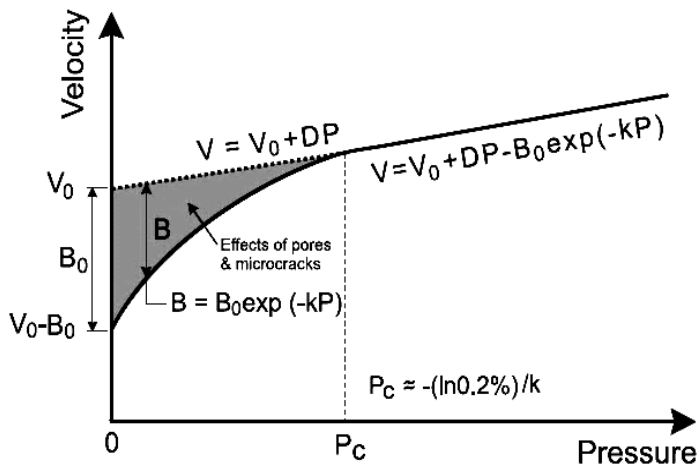
در این تحقیق، با انجام آزمایش التراسونیک تحت فشار، بر روی سه نمونه سنگ آهک سروک، سرعت امواج تراکمی و برشی در محدوده فشارهای همه‌جانبه ۵ تا ۵۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری، و ضرایب رابطه (۸) برای نمونه‌های مورد مطالعه به روش رگرسیون کمترین مربعات تعیین گردید. سپس با استفاده از این ضرایب، سرعت امواج تراکمی و برشی در فشار اتمسفر ($V_B = V_0 - B_0$) پیش‌بینی، و با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر (از انجام آزمایش التراسونیک معمولی) مقایسه گردید. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر روش معرفی شده، از نتایج آزمون‌های مشابه انجام گرفته بر روی ۱۰ نمونه بازالت توسط Brereton et al. (1992) استفاده شده است.

نمونه‌های مورد آزمایش و روش کار آزمایشگاهی

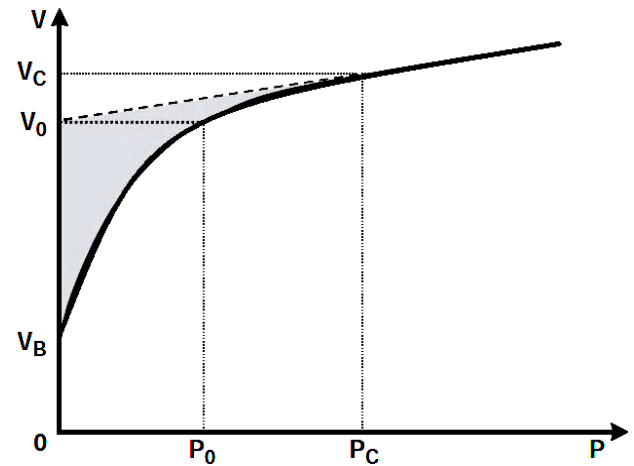
نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق، شامل سه نمونه سنگ آهک سروک می‌باشد که مشخصات آن‌ها در (جدول ۱) بیان شده است. سنگ آهک سروک، شامل آهک‌های توده‌ای کرم تا قهوه‌ای رنگ به سن سنوماین-تورونین است که از یکی از چاه‌های نفتی اهواز و از اعماق حدود ۴۶۰۰ تا ۴۷۰۰ متری تهیه شده‌اند. مواد هیدروکربنی نمونه‌ها توسط حلال تولوئن و دستگاه سوکسله (Soxhlet) خارج و پس از تعیین وزن و ابعاد، تخلخل آن‌ها توسط تخلخل‌سنج (به روش گاز هلیوم) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). به منظور تعیین سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر، با قرار دادن نمونه در دستگاه آزمایش التراسونیک معمولی و ارسال امواج تراکمی و برشی، زمان حرکت موج و سرعت آن در شرایط خشک اندازه‌گیری گردید. به منظور اندازه‌گیری سرعت امواج الاستیک در فشارهای همه‌جانبه مختلف، از دستگاه آزمایش التراسونیک تحت فشار استفاده شد (شکل ۳). این دستگاه سرعت امواج تراکمی و برشی را به روش عبوری (Pulse transmission technique) در فشارهای مختلف اندازه‌گیری می‌کند (Birch, 1960; Christensen, 1974). مجموعه دستگاه از قسمت‌هایی از قبیل محفظه نگهدارنده نمونه (سلول)، ابزار فرستنده و گیرنده امواج، سیستم اعمال فشار همه‌جانبه توسط پمپ‌های دستی، سیستم ارسال و دریافت امواج تراکمی و برشی (ATI و TI) و اسیلوسکوپ تشکیل شده است. پس از کالیبراسیون دستگاه، نمونه داخل سلول گذاشته شده و پس از نصب فرستنده و گیرنده، اعمال بار انجام می‌شود. پس از اعمال فشار همه‌جانبه مورد نظر، امواج الاستیک توسط سیستم ارسال و دریافت امواج، به درون نمونه ارسال و بوسیله اسیلوسکوپ، شکل آن ثبت می‌شود. با انتقال موج به رایانه، شکل و زمان حرکت آن در نمونه توسط نرم‌افزار قرائت و با استفاده از رابطه (۹) سرعت موج تعیین می‌شود.

$$V = L / t \times 1000 \quad (9)$$

که در این رابطه V سرعت موج بر حسب متر بر ثانیه، L ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر و t زمان سیر موج در نمونه در واحد میکروثانیه می‌باشد. پس از اندازه‌گیری سرعت امواج در فشارهای همه‌جانبه مختلف، پس از گذشت چند روز، مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D2938 اندازه‌گیری شد (فهمی‌فر و سروش، ۱۳۸۹).



شکل ۲. منحنی تغییرات سرعت امواج الاستیک نسبت به فشار همه‌جانبه (Ji et al., 2007)



شکل ۱. قسمت‌های مختلف منحنی سرعت-فشار (Wang et al., 2005)

جدول ۱. مشخصات هندسی، وزن، چگالی و تخلخل نمونه‌های مورد مطالعه

	طول (mm)	قطر (mm)	وزن (gr)	دانسیته حجمی (gr/cm ³)	تخلخل (%)
KL-۹	۷۵.۵۴	۵۰.۵۱	۴۰۸.۷۲	۲.۷۰	۰.۲۱
KL-۱۰	۷۲.۷۹	۵۰.۷۹	۳۹۳.۹۰	۲.۶۷	۰.۴۸
KL-۱۳	۱۰۳.۴	۵۰.۵۸	۵۵۴.۰۰	۲.۶۶	۰.۳۱



شکل ۳. دستگاه آزمایش تراسونیک تحت فشار

بحث و بررسی نتایج آزمایشگاهی

زیرا درز و ترک‌های موجود در سنگ تاثیر بیشتری در اندازه‌گیری‌های استاتیکی دارند. ولی مقادیر اندازه‌گیری شده در فشار ۵۰ مگاپاسکال که تا حدودی معرف عمق ۵ کیلومتری است (با فرض نرخ تنش موثر $MPa / 10 \text{ km}$) بطور غیرواقع‌بینانه‌ای مقاومت سازند را بیشتر تخمین می‌زند. بنابراین تخمین مقاومت فشاری تک محوره و مدول یانگ استاتیکی سازند در چاه‌های عمیق بر اساس نگرش‌های سرعت امواج الاستیک باعث تخمین بیش از حد این پارامتر می‌شود.

تخمین سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر با استفاده از داده‌های در فشارهای همه‌جانبه مخزن کاربرد بسیار موثری در پیش‌بینی مقدار UCS و E_S از سرعت امواج الاستیک در چاه‌های نفتی دارد. این پارامترها نشان دهنده مقاومت سنگ در شرایطی است که فشار همه‌جانبه وجود ندارد؛ در حالی که به منظور پیش‌بینی آن‌ها در چاه‌های نفتی، از سرعت امواج الاستیک حاصل از نگرش‌های صوتی استفاده می‌شود که در شرایط فشار همه‌جانبه مخزن اندازه‌گیری شده‌اند. از آن جا که با افزایش فشار همه‌جانبه، سرعت امواج الاستیک افزایش می‌یابد، در صورت عدم توجه به نکته مطرح شده، مقادیر UCS و E_S پیش‌بینی شده بیش از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود.

بر اساس همین کاربرد و نیاز اساسی، در این تحقیق سعی شده است برای نمونه‌های سازند کربناته سروک، با یک گام به جلو امکان پیش‌بینی سرعت امواج تراکمی و برشی در فشار اتمسفر با استفاده از داده‌های مربوط به سرعت امواج در فشارهای بالاتر نیز فراهم شود. بنابراین با برون‌یابی سرعت امواج تراکمی و برشی در فشار اتمسفر، امکان تخمین بهتر و منطقی‌تر UCS و E_S در مطالعات ژئومکانیک مخازن فراهم می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در صنعت نفت، به منظور تعیین UCS و E_S سازندهای دیواره چاه، با ایجاد روابط تجربی، این پارامترها را بر اساس V_p و V_s حاصل از نگرش سونیک سازند پیش‌بینی می‌کنند. از آنجا که فشار همه‌جانبه تاثیر محسوسی در افزایش V_p و V_s دارد، پیش‌بینی UCS و E_S بر اساس آنها ممکن است با مقداری خطا توأم گردد. بنابراین حذف اثر فشار همه‌جانبه بر سرعت امواج ضروری بنظر می‌رسد. به این منظور، آزمایش التراسونیک بر روی سه نمونه سنگ آهک سروک انجام گرفت و مقادیر V_p و V_s آنها در فشار اتمسفر اندازه‌گیری گردید. همچنین با انجام آزمایش التراسونیک تحت فشار مقادیر V_p و V_s در فشارهای مختلف و حداکثر ۵۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. با معرفی رابطه کلی سرعت-فشار، ضرایب این رابطه برای نمونه‌های سنگ آهک سروک تعیین و مقادیر V_p و V_s در فشار اتمسفر بر اساس مقادیر متناظر آن در فشارهای همه‌جانبه مختلف پیش‌بینی گردید. سپس مقادیر V_p و V_s پیش‌بینی شده با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده مقایسه و همبستگی خوبی بین آنها مشاهده گردید.

به منظور افزایش اطمینان از نتیجه بدست آمده، سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر از سرعت امواج در فشارهای همه‌جانبه مختلف در ۱۰ نمونه بازالت اقیانوسی پیش‌بینی و همبستگی خوبی بین سرعت‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در این نمونه‌ها ملاحظه شد. بر اساس نتایج این تحقیق، امکان تخمین منطقی مقادیر UCS و E_S سازندهای دیواره چاه فراهم می‌آید که کاربرد زیادی در مطالعات ژئومکانیک چاه‌های نفتی از قبیل تخمین تنش‌های برجا و تحلیل پایداری دیواره چاه دارد.

منحنی تغییرات سرعت امواج تراکمی و برشی با فشار همه‌جانبه برای سه نمونه سنگ آهک سروک ترسیم شد که در (شکل‌های ۴ و ۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، در فشارهای پائین، به دلیل بسته شدن منافذ و ریزترک‌های موجود در نمونه، رابطه فشار-سرعت غیرخطی بوده و سنگ قابلیت تراکم‌پذیری بالایی دارد. در این نمونه‌ها، فشار بحرانی همه‌جانبه، بین ۱۵ تا ۲۰ مگاپاسکال تشخیص داده شد که منطبق بر نتایج (Anselmetti and Eberli (1993) در مورد کربنات‌هاست. در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی، تغییرات سرعت نسبت به فشار خطی شده است که بیانگر متراکم شدن و تراکم‌پذیری پائین سنگ در این محدوده از فشارها می‌باشد.

شکل کلی نمودارهای سرعت-فشار در این تحقیق (شکل‌های ۴ و ۵) مشابه (شکل ۲) بوده و رابطه (۸) در معادله منحنی آن صدق می‌کند. بنابراین ضرایب رابطه (۸) برای نمونه‌های سنگ آهک مورد مطالعه به روش رگرسیون کمترین مربعات و با دقت بسیار خوب ($R^2 > 0.95$) بدست آمد که در (جدول ۲) نشان داده شده است.

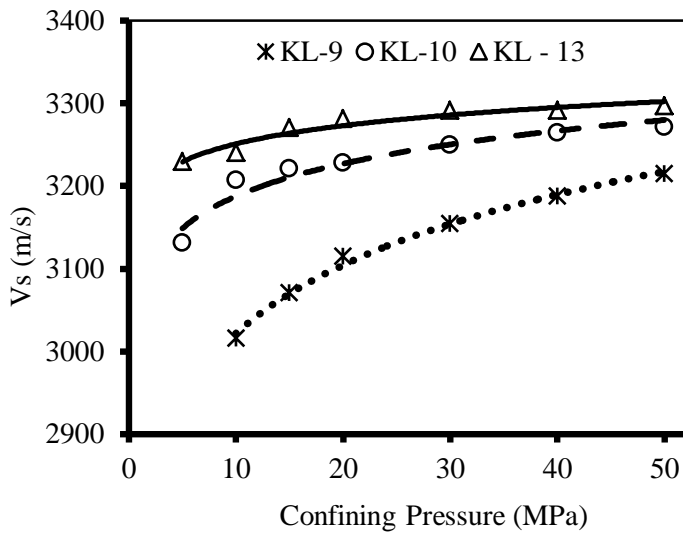
پس از تعیین ضرایب رابطه (۸)، مقادیر سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر ($V_0 - B_0$) برای هر نمونه بر اساس ضرایب مندرج در (جدول ۲) پیش‌بینی گردید. این پارامتر، با انجام آزمایش التراسونیک معمولی در فشار اتمسفر نیز اندازه‌گیری و نتایج آن با مقادیر پیش‌بینی شده مقایسه گردید که نتایج بدست آمده در (جدول ۳) ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، سرعت امواج تراکمی و برشی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و ضریب همبستگی حدود ۰.۹۸ بین آن‌ها برقرار می‌باشد. به منظور افزایش اطمینان از نتیجه بدست آمده، از نتایج آزمون‌های مشابه انجام گرفته بر روی ۱۰ نمونه بازالت‌های اقیانوسی توسط (Breteron et al. (1992) استفاده گردید.

ضرایب رابطه (۸) برای این نمونه‌ها به روش رگرسیون کمترین مربعات تعیین شد که نتایج در (جدول ۴) نشان داده شده است. سپس، سرعت امواج تراکمی و برشی در فشار اتمسفر پیش‌بینی و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. (شکل‌های ۶ و ۷) سرعت امواج تراکمی و برشی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر را برای ۱۰ نمونه بازالت اقیانوسی و ۳ نمونه سنگ آهک سروک نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل‌ها استنباط می‌شود، سرعت امواج تراکمی و برشی در فشار اتمسفر با دقت بالایی بر اساس سرعت امواج در فشارهای همه‌جانبه مختلف قابل پیش‌بینی هستند.

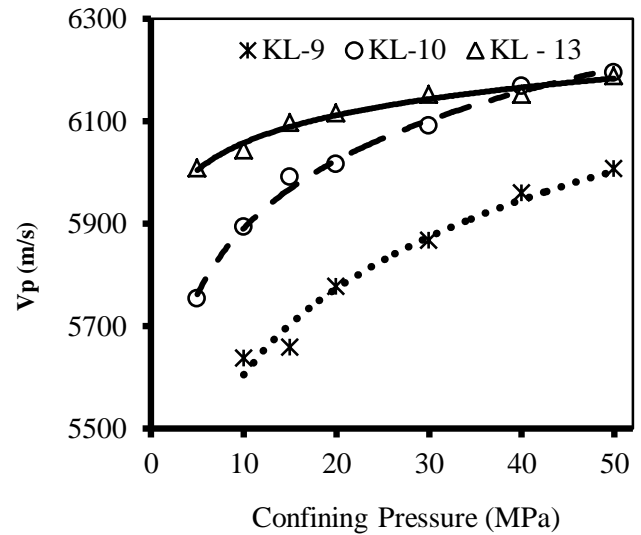
شایان ذکر است که در پژوهش‌های قبلی از جمله (Wang et al. (2005) و (Ji et al. (2007) بدلیل عدم انجام آزمایش اولتراسونیک در فشار اتمسفر چنین مقایسه‌ای انجام نشده است.

پس از تخمین سرعت امواج الاستیک در فشار اتمسفر بر اساس سرعت امواج در فشارهای همه‌جانبه مختلف، مقاومت فشاری تک محوره سنگ آهک سروک توسط رابطه (۱) بر اساس این سرعت امواج تخمین زده شد که مقاومت فشاری تک محوره اصلاح شده نامیده می‌شود. همچنین این پارامتر توسط رابطه (۱) بر اساس سرعت امواج الاستیک اندازه‌گیری شده در شرایط فشار همه‌جانبه ۵۰ مگاپاسکال نیز تخمین و با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (روش استاتیکی) مقایسه گردید (جدول ۵).

همان‌گونه که در (جدول ۵) نشان داده شده است، مقادیر مقاومت فشاری تک محوره اصلاح شده بزرگتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به روش استاتیکی است



شکل ۵. منحنی سرعت موج برشی - فشار در سنگ آهک سروک



شکل ۴. منحنی سرعت موج تراکمی - فشار در سنگ آهک سروک

جدول ۲. ضرایب رابطه (۶) برای سنگ آهک سروک

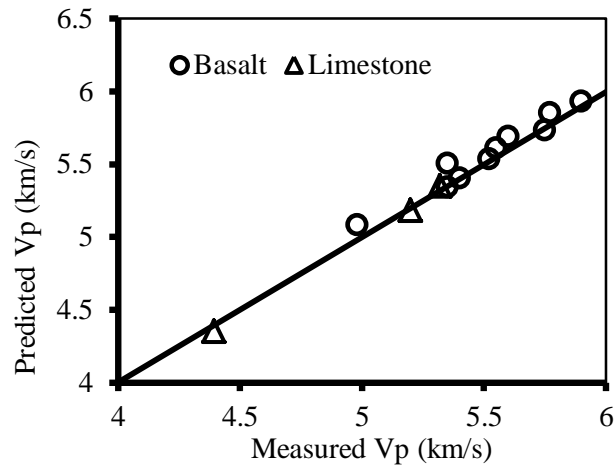
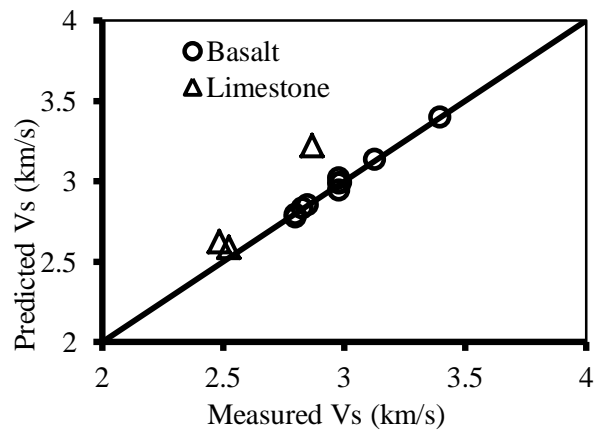
	V_p					V_s				
	V_0 km/s	D 10^{-4} km/s/MPa	B_0 km/s	K 10^{-2} MPa $^{-1}$	R^2	V_0 km/s	D 10^{-4} km/s/MPa	B_0 km/s	K 10^{-2} MPa $^{-1}$	R^2
KL-۹	۵.۵۸	۰.۰۰۹	۱.۲	۰.۳۴	۰.۹۷	۳.۰۶	۰.۰۰۳	۰.۵۹	۰.۲۰	۰.۹۹
KL-۱۰	۵.۹۰	۰.۰۰۶	۰.۷۲	۰.۲۷	۰.۹۹	۳.۲۰	۰.۰۰۲	۰.۷۰	۰.۴۴	۰.۹۹
KL-۱۳	۶.۰۴	۰.۰۰۳	۰.۷۰	۰.۵۲	۰.۹۴	۳.۲۵	۰.۰۰۱	۰.۴۰	۰.۵۳	۰.۸۷

جدول ۳. سرعت امواج الاستیک پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر برای سنگ آهک سروک

	V_{BP} (km/sec) Measured	V_{BP} (km/sec) Predicted	V_{BS} (km/sec) Measured	V_{BS} (km/sec) Predicted
KL-۹	۴.۳۹۲	۴.۳۵۰	۲.۴۸۵	۲.۴۷۳
KL-۱۰	۵.۱۹۹	۵.۱۸۰	۲.۵۲۷	۲.۵۰۰
KL-۱۳	۵.۳۲۰	۵.۳۴۰	۲.۸۷۰	۲.۸۵۰

جدول ۴. ضرایب رابطه (۶) برای بازالت اقیانوسی

	V_p					V_s				
	V_0 km/s	$D10^{-4}$ km/s/MPa	B_0 km/s	$K 10^{-2}$ MPa $^{-1}$	R^2	V_0 km/s	$D 10^{-4}$ km/s/MPa	B_0 km/s	$K10^{-2}$ MPa $^{-1}$	R^2
BAS01-1	۶.۰۴۸	۰.۰۰۰۰۱	۰.۳۶	۰.۰۰۵	۰.۹۹	۳.۳۴۲	۰.۰۰۰۰۱	۰.۲۱	۰.۰۰۴۲	۰.۹۹
BAS01-4	۵.۵۵۳	۰.۰۰۰۴۸	۰.۱۵	۰.۰۹۶	۰.۹۹	۳.۳۰۹	۰.۰۰۰۰۳	۰.۳۲	۰.۰۰۳۴	۰.۹۹
BAS01-5	۵.۶۱۴	۰.۰۰۰۳۳	۰.۰۸	۰.۰۵۴	۰.۹۷	۲.۹۲۹	۰.۰۰۴۷	۰.۰۹۶	۰.۰۰۱۴	۰.۹۷
BAS04-1	۵.۹۳۹	۰.۰۰۰۵۹	۰.۰۱	۰.۰۶۲	۰.۹۸	۳.۰۵۴	۰.۰۰۰۶۹	۰.۰۶۵	۰.۰۰۰۵	۰.۹۹
BAS04-3	۵.۵۸۶	۰.۰۰۰۷۳	۰.۲۵	۰.۰۵۲	۰.۹۹	۳.۱۳۸	۰.۰۰۰۰۹	۰.۳۶	۰.۰۰۱۶	۰.۹۸
BAS08-3	۵.۷۰۶	۰.۰۰۰۶۴	۰.۱۰	۰.۰۳۵	۰.۹۹	۳.۴۱۱	۰.۰۰۰۰۵	۰.۴۷	۰.۰۰۳۳	۰.۹۸
BAS08-4	۵.۸۴۰	۰.۰۰۰۷۶	۰.۱۱	۰.۰۴۶	۰.۹۹	۳.۰۳۴	۰.۰۰۰۰۴	۰.۱۸	۰.۰۰۴۶	۰.۹۶
BAS11-1	۵.۳۰۶	۰.۰۰۰۴۷	۰.۲۳	۰.۰۳۶	۰.۹۹	۳.۰۲۸	۰.۰۰۰۰۴	۰.۲۴	۰.۰۰۶۵	۰.۹۸
BAS12-4	۵.۶۵۱	۰.۰۰۰۶۰	۰.۱۵	۰.۰۶۴	۰.۹۹	۳.۰۳۰	۰.۰۰۰۰۳	۰.۰۱	۰.۰۰۰۴	۰.۹۸
BAS15-1	۶.۱۰۸	۰.۰۰۰۴۰	۰.۲۶	۰.۰۶۷	۰.۹۹	۳.۴۶۴	۰.۰۰۰۰۵	۰.۰۶۸	۰.۰۰۲۰	۰.۹۷


 شکل ۶. V_p پیش‌بینی شده در برابر V_p اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر برای بازالت اقیانوسی و سنگ آهک سروک

 شکل ۷. V_s پیش‌بینی شده در برابر V_s اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر برای بازالت اقیانوسی و سنگ آهک سروک

جدول ۵. مقایسه مقاومت فشاری تک محوره اندازه‌گیری شده در فشار اتمسفر، پیش‌بینی شده در فشار اتمسفر و اندازه‌گیری شده به روش دینامیکی در فشار همه‌جانبه ۵۰ مگاپاسکال

اندازه‌گیری شده به روش دینامیکی در فشار ۵۰ مگاپاسکال	اصلاح شده دینامیکی در فشار اتمسفر	اندازه‌گیری در فشار اتمسفر به روش استاتیکی	
۱۸۴	۱۰۱	۹۳	KL - ۹
۱۹۱	۱۰۵	۹۷	KL - ۱۰
۲۱۳	۱۴۱	۱۳۰	KL - ۱۳

منابع

- فهیمی‌فر. ا.، سروش. ح.، ۱۳۸۹، آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها (آزمون‌های آزمایشگاهی)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- نجیبی. ع.، آصف. م.، اجل لوفیان. ر.، صفیان. غ.، ۱۳۹۰، تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌آهک با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، ص ۱۱۵۹ - ۱۱۷۸.
- Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. M. C., Hammilton, S., Naji, N. A., 2009, Prediction rock mechanical properties of carbonated from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghavar field, Saudi Arabia): *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 26, p: 430-444.
- Anselmetti, F. S., Eberli, G. P., 1993, Controls on sonic velocity in Carbonates: *PAGEOPH*, 141, 2/3/4, p: 287-323.
- Asef, M. R., Najibi, A. R., 2013, The effect of confining pressure on elastic wave velocities and dynamic to static Young's modulus ratio: *Geophysics*, 78, (3), p: D135-D142.
- Birch, F., 1960, The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobar: Part 1: *Journal of Geophysical Research*, 65, p: 1083-1102.
- Brereton, N. R., Chroston, P. N., Evans, C. J., Hudson, J. A., Whitmarsh, R. B., 1992, Anelastic strain recovery and elastic properties of oceanic Basaltic rocks: in *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (123)*.
- Christensen, N. I., 1974, Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars: *Journal of Geophysical Research*, 79, p: 407-412.
- Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., Risnes, R., 2008, *Petroleum related rock mechanics*, Amsterdam, Elsevier
- Ji, S., Wang, Q., Marcotte, D., Salisbury, M. H., Xu, Z., 2007, P wave velocities, anisotropy and hysteresis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks as a function of confining pressure: *Journal of Geophysical Research*, 112, B09204.
- Lacy, L. L., 1997, Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs: *SPE paper 38716*.
- Lama, R. D., Vutukuri, V. S., 1978, *Handbook on mechanical properties of rocks*: Clausthal Germany, Trans Tech Publications.
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2009, *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media*: Cambridge University Press.
- Ohen, H. A., 2003, Calibrated wireline mechanical rock properties method for predicting and preventing wellbore collapse and sanding: *SPE paper 82236*.
- Pervukhina, M., Gurevich, B., Dewhurst, D. N., Siggins, A. F., 2010, Applicability of velocity-stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks: *Geophysical Journal International*, 181, p: 1473-1479.
- Wang, Q., Ji, S., Salisbury, M. H., Xia, B., Pan, M., Xu, Z., 2005a, Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections: *Tectonophysics*, p: 398, p: 76-99.
- Wang, Q., Ji, S., Salisbury, M. H., Xia, B., Pan, M., Xu, Z., 2005b, Shear wave properties and Poisson's ratios of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt, China: Implications for crustal composition: *Journal of Geophysical Research*, 110, B08208.
- Wepfer, W. W., Christensen, N. I., 1991, A seismic velocity - confining pressure relation, with application: *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28, p: 451-456.
- Zimmerman, R. W., 1991, *Compressibility of Sandstones*: Amsterdam, Elsevier.