

تخمین سرعت امواج برشی با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی و تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی، در یکی از مخازن کربناته ایران

محمد محمدنیا^۱، محمدرضا رضایی^۲

۱. پژوهشگاه صنعت نفت - مرکز مطالعات اکتشاف و تولید

۲. دانشگاه تهران، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

(دریافت: ۸۱/۸/۲؛ پذیرش: ۸۲/۱/۱۹)

چکیده

آگاهی از سرعت امواج برشی در مطالعات لرزه‌ای میادین هیدروکربوری از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی، سرعت امواج برشی (V_s) در یکی از مخازن هیدروکربنی کربناته در یکی از میادین نفتی واقع در جنوب غربی ایران به عنوان تابعی از سرعت امواج تراکمی، تخلخل، لیتولوژی و حجم شیل محاسبه شده است. بدین منظور سرعت امواج تراکمی (V_p) مستقیماً از روی نمودار صوتی و با داشتن زمان سیر موج (DT) در مخزن مورد مطالعه بدست آمد و تخلخل با استفاده از نمودارهای نوترون و چگالی و حجم شیل با استفاده از نمودار پرتو گامای تصحیح شده (CGR) محاسبه گردید. سپس با استفاده از نتایج مطالعات پتروگرافی و به کمک روابط تجربی متداول سرعت امواج برشی تخمین زده شد. سرعت امواج برشی محاسبه شده توسط روابط مختلف با سرعت امواج برشی اندازه‌گیری شده در شرایط اشباع از آب و فشار مخزن بر روی ۳۳ نمونه پلاگ مقایسه شد و مشخص شد که استفاده از مدل‌های Greenberg & Castagna و Castagna نتایج بهتری برای تخمین سرعت امواج برشی در سنگ‌های کربناته به دست می‌دهند.

همچنین سرعت امواج تراکمی بدست آمده از روی داده‌های نمودار پتروفیزیکی در مقابل سرعت امواج برشی اندازه‌گیری شده در شرایط مخزن در آزمایشگاه ترسیم شد و روابط بین سرعت امواج برشی و سرعت امواج تراکمی به صورت زیر بدست آمد:

$$V_s = 0.5243 V_p + 0.0451 \quad (R^2 = 0.84) \quad \text{مدل خطی}$$

$$V_s = -0.1068 V_p^2 + 1.5106 V_p - 2.2008 \quad (R^2 = 0.85) \quad \text{مدل درجه دوم}$$

سپس باتوجه به اختلاف مقادیر تخمین زده شده با مقادیری که اندازه‌گیری گردید، عوامل مختلف موثر در سرعت امواج نظیر رخساره‌های سنگی، انواع و مقدار تخلخل، حجم شیل و محیط رسوبی مورد بررسی قرار گرفته و برحسب نوع محیط و مقدار تخلخل روابط بهتری ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: سرعت امواج برشی، پتروفیزیک، مخازن کربناته

۱- مقدمه

شناخت کامل سرعت انتشار امواج تراکمی و برشی سنگها در شناسایی ساختمان زمین و سنگهای تشکیل دهنده آن و توصیف مخازن هیدروکربنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سرعت امواج لرزه‌ای بوسیله عوامل متعدد زمین‌شناسی از قبیل کانی‌شناسی، تخلخل، شکل هندسی فضاها، سیال داخلی و سیال داخل آن، چگالی کل و تنش‌های موثر و عمق دفن، نوع و درجه سیمان‌شدگی، درجه و جهت شکستگی‌ها کنترل می‌شود. نسبت سرعت امواج تراکمی به سرعت امواج برشی می‌تواند به عنوان کلیدی برای تعیین لیتولوژی، تخلخل و شناسایی خواص سیال داخل فضاها، بالخصوص تشخیص وجود گاز در سازند، باشد. با استفاده از نسبت پواسون که تابع از سرعت‌های امواج برشی و تراکمی است، می‌توان لیتولوژیهای مختلف را شناسائی کرد. سرعت امواج لرزه‌ای از طریق نمودارگیری صوتی در داخل چاهها قابل محاسبه است. از نمودارهای صوتی قدیمی فقط می‌توان سرعت انتشار امواج تراکمی را استخراج کرد. اگر چه با رشد تکنولوژی امروزه امکانات برداشت نمودارهای صوتی بنحوی است که می‌توان از آنها سرعت امواج لرزه‌ای برشی و تراکمی در لایه‌های زمین را استخراج کرد، ولی نمودارهای برداشت شده بوسیله ابزارهای جدید نمودارگیری به علت گران بودن این ابزارها بسیار کم بوده و هنوز بطور معمول استفاده نمی‌شوند.

سرعت امواج تراکمی به تنهایی تشخیص دهنده خوبی برای خواص سازند از جمله لیتولوژی آن نیست، زیرا سرعت امواج تراکمی در سنگهای مختلف دارای هم پوشانی زیادی می‌باشد و اطلاعات اضافی فراهم شده بوسیله سرعت امواج برشی می‌تواند ابهامات مربوطه را کاهش دهد. سرعت امواج برشی همچنین کاربردهای مختلفی در تفسیر دامنه در مقابل فاصله (AVO)، لرزه نگاری چندجزئی، پروفیل لرزه‌ای عمودی (VSP)، تعیین ضرایب کشسان و شناسائی خواص مخازن نفت و گاز دارد. با توجه به اهمیت و حساسیت سرعت امواج برشی، هنگامی که اندازه‌گیری مستقیم آن امکانپذیر نباشد تخمین آن از دیگر نمودارها ضروری است.

سرعت امواج برشی را می‌توان با داشتن لیتولوژی و سرعت امواج تراکمی و یا تخلخل و حجم شیل (محتوای رس) پیش‌بینی کرد. در این مقاله از روابط مختلفی که محققین ارائه داده اند برای بدست آوردن سرعت امواج برشی استفاده شد. مقایسه مقادیر تخمین زده شده توسط این روابط با نتایج آزمایشگاهی که با اعمال شرایط مخزن بدست آمده اند، نشان می‌دهد که تخمین سرعت امواج برشی با استفاده از سرعت امواج تراکمی از اعتبار بیشتری برخوردار است، زیرا هر دو پارامتر V_p و V_s بصورت مشابه بوسیله تخلخل و محتوای رس و لیتولوژی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بنابراین در این مقاله روابط جدیدی برای تخمین سرعت امواج برشی در مخازن

کربناته ایران با استفاده از سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی ارائه گردیده است.

۲- مراحل انجام مطالعه

۲-۱- مطالعات زمین‌شناسی

باتوجه به اینکه برای تعیین سرعت موج برشی از داده‌های نمودارهای پتروفیزیکی نیاز به تعیین لیتولوژی و همچنین بعضاً نیاز به شناسایی ترکیب درصد کانیهای تشکیل دهنده سنگ، محیط رسوبی، نوع تخلخل، نوع رخساره و مقدار تخلخل می‌باشد، مطالعات پتروگرافی و کانی‌شناسی شامل مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، اسکن میکروسکپ الکترونیکی (SEM) و پراش پرتوی ایکس (XRD) بر روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفت. براساس این مطالعات نمونه‌ها عمدتاً آهکی هستند و غیر از سه نمونه که در آنها مقدار کلسیت ۷۲، ۷۲ و ۴۷ درصد می‌باشد، در بقیه نمونه‌ها مقدار آن بیش از ۸۸ درصد است. در سه نمونه ذکر شده مقدار دولومیت ۲۱، ۲۳ و ۴۹ درصد بوده و در بقیه نمونه‌ها ۰/۸- است. دیگر اجزاء تشکیل دهنده نمونه‌ها کوارتز و رس می‌باشند که مقدار آنها به ترتیب ۰/۶- و ۰/۹- است.

مطالعه مغزه‌ها و مقاطع نازک میکروسکوپی، رخساره‌ها و بافت‌های متعدد رسوبی را برای مخزن مورد مطالعه مشخص کرده که شامل انواع گرینستون، پکستون و وکستون است که در بخش‌هایی تا حدی دولومیتی شده‌اند. این رخساره‌ها در یک رمپ کربناته ته‌نشست کرده‌اند که متشکل از بخش‌های مختلف نظیر دریای آزاد، پهنه‌الیتی، پهنه جزر و مدی، لاگون و سیخاست.

۲-۲- تعیین سرعت امواج تراکمی و برشی در آزمایشگاه

در آزمایشگاه بر روی ۳۳ پلاگ عمودی گرفته شده از مخزن مورد مطالعه علاوه بر اندازه گیری تخلخل، چگالی کل، چگالی دانه‌ها و نفوذپذیری افقی، سرعت امواج لرزه‌ای تراکمی و برشی، در دو حالت خشک و اشباع از آب و تحت دما و فشار موثر مشابه وضعیت مخزن اندازه گیری شدند، دو عدد از نمونه‌ها نیز به علت سست بودن و شکستن در حین آزمایش حذف شدند.

برای اندازه گیری سرعت عبور امواج لرزه‌ای از داخل نمونه‌ها، پلاگهای استوانه‌ای شکل به قطر ۱/۵ و ارتفاع ۲ اینچ از نمونه‌ها تهیه شده و پس از قرار دادن در غشای لاستیکی، در داخل سل دستگاه اندازه‌گیری سرعت گذاشته شدند. قبل از اندازه‌گیری، سیستم و نمونه در شرایط

پایدار فشار و دمای مخزن قرار گرفتند. برای رسیدن به این شرایط زمان نسبتاً طولانی صرف می شود. با توجه به عمق نمونه ها، در حالت اشباع فشار همه جانبه 5400 psi و فشار منفذی 1000 psi و در نتیجه فشار موثر 4400 psi به آنها اعمال شد و در حالت خشک نیز با توجه به عدم وجود فشار منفذی، فشار همه جانبه 4400 psi اعمال شد. دمای داخل نمونه ها نیز به 95 درجه سانتیگراد رسید. سپس امواج لرزه ای تراکمی و برشی از آنها عبور داده شده و توسط گیرنده هایی که در بالای سل نصب شده اند دریافت شدند. گیرنده ها به کامپیوتر و اسیلوسکپ متصل هستند. بنابراین امواج دریافت شده روی فلاپی دیسکت ذخیره می شوند و زمان ورود اولین امواج رسیده به گیرنده ها نیز روی صفحه اسیلوسکپ قرائت شده و از طریق آن سرعت انتشار امواج بدست می آید. دستگاه اندازه گیری سرعت امواج لرزه ای توانائی اعمال فشار همه جانبه حداکثر 20000 psi ، فشار منفذی حداکثر 10000 psi و دمای حداکثر 200 درجه سانتیگراد را دارد. با تغییر فشار موثر از مقدار حداکثر به سمت فشار حداقل و همچنین با تغییر میزان اشباع شدگی و نوع سیال داخل نمونه (آب، آب نمک، نفت یا گاز)، می توان شرایط متفاوتی را در محیط نمونه ها ایجاد و زمان عبور امواج لرزه ای از میان آنها را اندازه گیری کرد.

۲-۳- تعیین پارامترهای پتروفیزیکی مورد نیاز برای تخمین سرعت امواج برشی

برای تخمین سرعت امواج برشی از نمودارهای پتروفیزیکی پس از مرتب کردن نمودارها و حذف اطلاعات فواصل ریخته شده، عمق نمونه های آزمایشگاهی بر روی نمودارهای پتروفیزیکی مشخص شد. سپس پارامترهای پتروفیزیکی مورد نیاز طی مراحل زیر تعیین شدند:

الف- تعیین حجم شیل با استفاده از نمودار CGR

ب- محاسبه تخلخل شیل با استفاده از تخلخلهای بدست آمده از نمودار های نوترون (NPHI) و

چگالی کلی (RHOB) در لایه شیلی و با گرفتن جذر از میانگین مربعات آنها

ج- محاسبه تخلخل کل با گرفتن جذر از میانگین مربعات تخلخلهای بدست آمده از نمودار

های NPHI و RHOB

د- تصحیح تخلخل شیل بر روی تخلخل کل و بدست آوردن تخلخل مؤثر

هـ- بدست آوردن سرعت امواج تراکمی با استفاده از نمودار صوتی (DT)

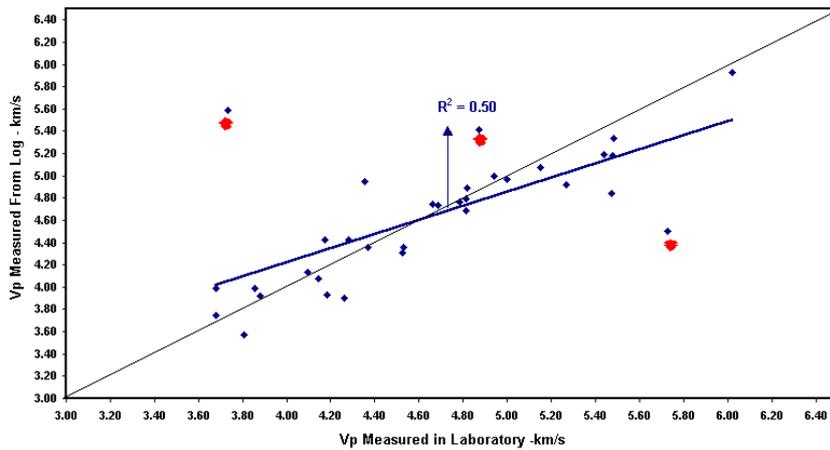
و - تعیین مقادیر اجزاء تشکیل دهنده نمونه ها با استفاده از نتایج XRD و نمودار CGR (حجم

شیل)

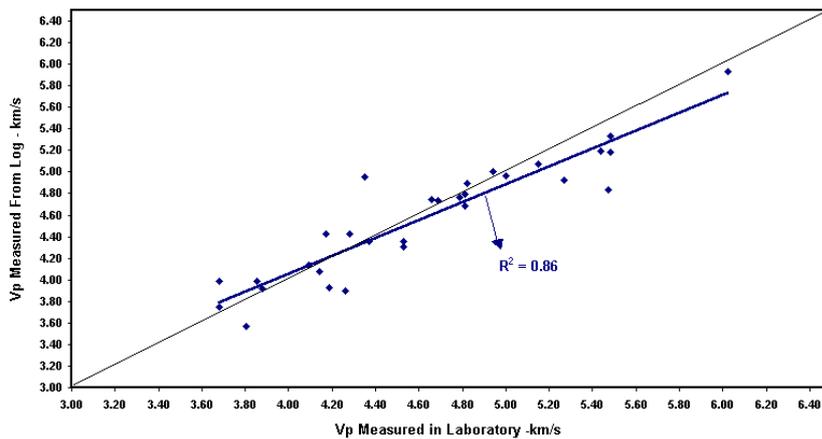
ح- تخمین مقدار فشار مؤثر نمونه ها با فرض گرادیان فشار پوششی برابر یک psi/ft و گرادیان فشار سیال منفذی برابر ۰/۴۶۵ psi/ft

۲-۴- محاسبه سرعت امواج برشی (V_s) با استفاده از مدلها و روابط مختلف

بیشتر مطالعاتی که قبلاً برای تخمین سرعت امواج برشی از سرعت امواج تراکمی و یا تخلخل و حجم شیل انجام شده است مربوط به ماسه‌سنگها می‌باشد (برای مثال Castagna et al., (1985) و Xu & White(1996). در مورد تخمین سرعت امواج برشی در کربناتها تحقیق کمتری صورت گرفته است. در این مطالعه نتایج استخراج شده از نمودارها (تخلخل، حجم شیل و سرعت امواج تراکمی) و نتایج مطالعات زمین‌شناسی که مربوط به ۳۳ نمونه ارسالی به آزمایشگاه می‌باشد، در مدلها و روابط مختلف ارائه شده توسط محققین مختلف برای محاسبه سرعت امواج برشی بکاربرده شدند و نتایج حاصل با نتایج بدست آمده برای V_s در آزمایشگاه، در شرایط اشباع از آب و تحت فشار مؤثر مشابه وضعیت مخزن، مقایسه شد. از آنجائیکه در سه نمونه سرعت امواج برشی اندازه گیری شده با سرعت های امواج برشی تخمین زده شده توسط مدلهای مختلف اختلاف زیادی داشته و نیز سرعت امواج تراکمی اندازه گیری شده در آنها با نتایج بدست آمده از نمودار صوتی (DT) اختلاف قابل ملاحظه ای نشان داده است، این نمونه ها در مدل‌های مختلف حذف شدند. زیرا ممکن است این تفاوت ها مربوط به شرایط آزمایشگاه یا شرایط نمودارگیری و یا اینکه عدم تطابق دقیق عمق نمونه‌ها بر روی نمودارها باشد. در نتیجه ضریب همبستگی بین داده های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده به مقدار قابل توجهی افزایش یافت. در شکل ۱ سرعت امواج تراکمی اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی ترسیم شده‌اند. مربع ضریب همبستگی بین آنها ۰/۵۰ می باشد. شکل ۲ نشان می دهد که با حذف سه نمونه مشخص شده در شکل ۱ مربع ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و بدست آمده از نمودار صوتی به ۰/۸۶ رسیده است. در ادامه این بخش روابط و مدل‌های استفاده شده و مقدار ضریب همبستگی بین نتایج حاصل از آنها و نتایج اندازه گیری شده مورد بحث قرار گرفته اند.



شکل ۱- نمودار سرعت امواج تراکمی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها در مقابل سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی DT، در سه نمونه مشخص شده مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر بدست آمده از نمودار صوتی اختلاف زیادی دارند.



شکل ۲- نمودار سرعت امواج تراکمی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها در مقابل سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی DT با حذف سه نمونه مشخص شده در شکل ۱.

Gassmann معادله -

Gassmann (1951) با انجام این فرض که حرکت نسبی بین سیال و خمیره سنگ در مقایسه با حرکت توده سنگ اشباع شده بویژه در فرکانسهای پائین قابل اغماض می باشد و پیکره سنگ همانند یک جسم جامد، کشسان، همگن و همسانگرد است، رابطه زیر را برای بدست آوردن مدول کل (بالک) سنگ اشباع معرفی کرد:

$$K_{sat} = K_d + \frac{(1 - \frac{K_d}{K_{mat}})^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_{mat}} - \frac{K_d}{K_{mat}^2}} \quad (1)$$

که در رابطه فوق K_{sat} , K_d , K_{mat} و K_f به ترتیب مدول کل سنگ اشباع، سنگ خشک، قسمت خمیره سنگ و سیال فضاهای خالی سنگ است و ϕ تخلخل کل سنگ بصورت اعشاری می باشد. برای بکار بردن این رابطه ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سرعتهای امواج برشی و تراکمی در حالت خشک، مدول برشی و مدول کل نمونه ها در حالت خشک طبق روابط زیر بدست آمد:

$$\mu_d = V_s^2 (dry) \times \rho_d \quad (2)$$

$$K_d = V_p^2 (dry) \times \rho_d - \frac{4}{3} \mu_d \quad (3)$$

در روابط فوق ρ_d چگالی سنگ خشک می باشد که با اغماض از چگالی هوای داخل خلل و فرج آن بصورت زیر بدست می آید:

$$\rho_d = \rho_b - \phi \times \rho_f \quad (4)$$

در رابطه فوق ρ_b چگالی کل سنگ است که از نمودار RHOB بدست می آید، ϕ تخلخل کل بصورت اعشاری و ρ_f چگالی سیال داخل فضاهای خالی سنگ است که یک گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شد.

برای بدست آوردن K_{mat} از مقادیر ارائه شده توسط Wang (2000) برای مدول کل کانیهای تشکیل دهنده خمیره جامد نمونه ها (جدول ۱) میانگین وزنی به روش Voigt گرفته شد. سپس باتوجه به تساوی مدول برشی سنگها در حالت اشباع و خشک ($\mu_{sat} = \mu_d$)، از روابط زیر برای بدست آوردن سرعت امواج لرزه‌ای در حالت اشباع از آب استفاده شد:

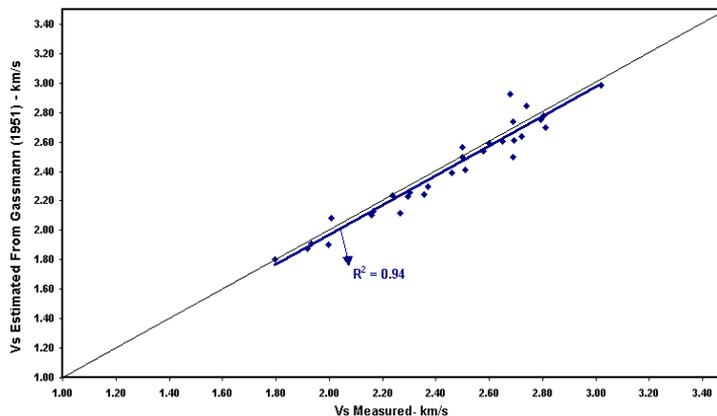
$$V_p = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_b}} \quad (5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_b}} \quad (6)$$

در شکل ۳ نتایج بدست آمده از این مدل برای محاسبه V_s در مقابل نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است، که همبستگی بسیار خوبی ($R^2 = 0.94$) بین آنها وجود دارد. ضعف این مدل تکیه بر نتایج آزمایشگاهی برای بدست آوردن مدول برشی و مدول کل نمونه‌ها در حالت خشک با استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای در حالت خشک است که ممکن است همیشه در دسترس نباشد.

جدول ۱- سرعت امواج برشی و تراکمی و مدولهای برشی و بالک (کل) کانیهای موجود در نمونه‌ها (Wang, 2000)

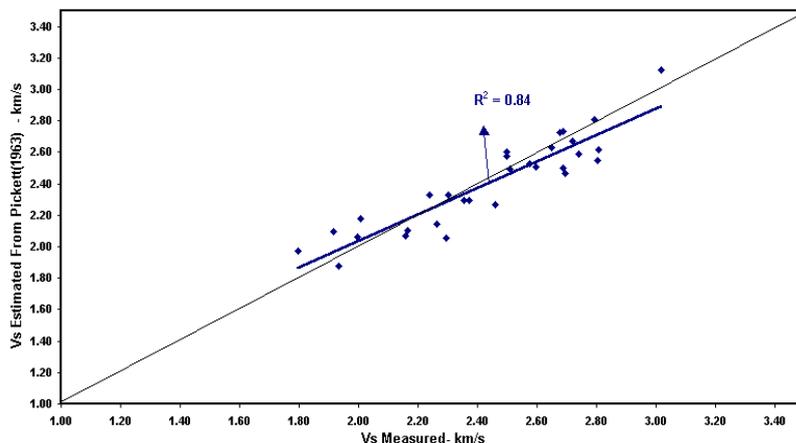
نام کانی	چگالی (gr/cm^3)	سرعت موج تراکمی (km/s)	سرعت موج برشی (km/s)	مدول برشی (Gpa)	مدول بالک (Gpa)
کلسیت	۲/۷۱	۶/۶۵	۳/۴۵	۳۲/۳	۷۶/۷
دولومیت	۲/۸۷	۷/۳۷	۳/۹۹	۴۵/۷	۹۴/۸
کوارتز	۲/۶۵	۶/۰۶	۴/۰۹	۴۴/۴	۳۸
رس (ایلیت)	۲/۷	۵/۹۷	۳/۰۸	۲۵/۷	۶۲/۲
آب	۱	۱/۵	-	-	۲/۲۵



شکل ۳- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از معادله Gassmann.

روابط Pickett

Pickett (1963) مطالعات آزمایشگاهی متعددی بر روی سنگهای مختلف انجام داده و نتیجه گرفته است که سرعت امواج برشی در سنگهای مختلف ضریب ثابتی از سرعت امواج تراکمی در آنها است. وی نسبت V_p/V_s را برای سنگ آهک، دولومیت، ماسه سنگ رسی و ماسه سنگ تمیز به ترتیب ۱٫۹، ۱٫۸، ۱٫۷ و ۱٫۶ بدست آورد. روابط Pickett زمانی اعتبار دارند که V_p بزرگتر از ۳km/s باشد. در این مطالعه برای بدست آوردن سرعت امواج برشی در کربناتها، سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی بر ۱٫۹ تقسیم شد. در شکل ۴ نتایج بدست آمده از رابطه Pickett در مورد سنگهای آهکی در مقابل نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است، همانطور که دیده میشود همخوانی خوبی ($R^2 = 0.84$) بین آنها وجود دارد.



شکل ۴- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از رابطه Pickett.

معادله Domenico

Domenico (1984) مطالعاتی بر روی داده‌های Pickett (1963) انجام داد و معادله زیر را برای برآورد سرعت امواج برشی و تراکمی با استفاده از تخلخل در فشارهای موثر مختلف ارائه داد:

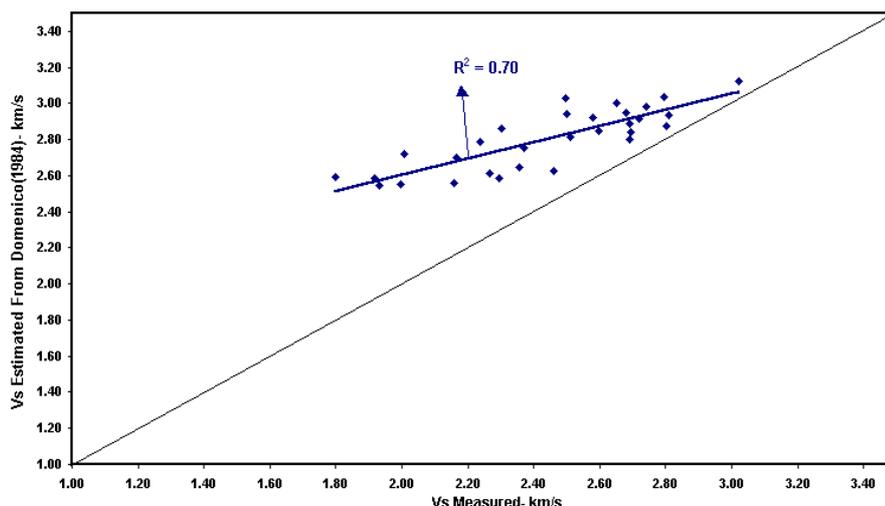
$$\frac{1}{V} = A + B\phi \quad (7)$$

در رابطه فوق ϕ تخلخل کل بصورت اعشاری و V سرعت برحسب متر بر میکروثانیه است و مقادیر A و B بر طبق جدول ۲ برای چهار حالت سرعت امواج برشی و تراکمی در سنگ آهک و ماسه سنگ در فشارهای موثر مختلف ارائه شده است. مقدار ضریب A به سرعت امواج در خمیره سنگ بستگی دارد و ضریب B به دیگر خواص سنگ از قبیل تحکیم یافتگی، شکل هندسی فضاهای خالی و فشار موثر وابسته است.

جدول ۲- مقادیر A و B در معادله Domenico بر حسب فشار موثر سازند(اقتباس از Domenico، ۱۹۸۴).

فشار موثر (Psi)	ماسه سنگ				سنگ آهک			
	موج برشی		موج تراکمی		موج برشی		موج تراکمی	
	A	B	A	B	A	B	A	B
۵۰۰	۲۳۴/۹	۱۳۳۷/۸	۱۶۳/۱	۵۷۳/۸	۳۳۳/۴	۶۴۹	۱۷۱/۳	۳۷۰/۸
۱۰۰۰	۲۳۹/۸	۱۱۵۶/۷	۱۶۴/۷	۴۹۹/۱	۳۲۳/۳	۴۵۱/۸	۱۶۸/۷	۲۸۳/۱
۲۰۰۰	۲۳۷/۲	۹۹۲/۴	۱۶۵/۲	۴۲۷/۱	۳۱۸/۵	۳۷۴/۸	۱۶۷/۳	۲۴۱/۳
۳۰۰۰	۲۳۰/۱	۹۳۰/۳	۱۶۴/۹	۳۹۰/۴	۳۱۴/۱	۳۳۵/۵	۱۶۶/۱	۲۱۵/۴
۴۰۰۰	۲۲۶/۶	۹۱۵/۳	۱۶۳/۷	۳۷۶/۹	۳۱۱/۵	۳۰۴/۷	۱۶۵/۱	۱۹۷/۹
۵۰۰۰	۲۲۴/۷	۸۹۳/۹	۱۶۲/۸	۳۷۰/۵	۳۰۹/۱	۲۸۶/۹	۱۶۴/۲	۱۸۶/۹
۶۰۰۰	۲۲۳/۴	۸۸۹	۱۶۲/۷	۳۶۴/۲	۳۰۷/۳	۲۷۳/۳	۱۶۳/۵	۱۷۸/۸

در شکل ۵ سرعت امواج برشی محاسبه شده از این رابطه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در شکل دیده می شود، علیرغم همبستگی نسبی مقادیر محاسبه شده با داده‌های آزمایشگاهی ($R^2 = 0.70$)، مقادیر تخمین زده شده توسط این مدل بزرگتر از مقادیر اندازه گیری شده هستند. این اختلاف ممکن است به دلیل این باشد که مقادیر پیشنهاد شده برای ضرایب A و B برای داده‌های مخزن مورد مطالعه مناسب نیستند.



شکل ۵- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از رابطه Domenico.

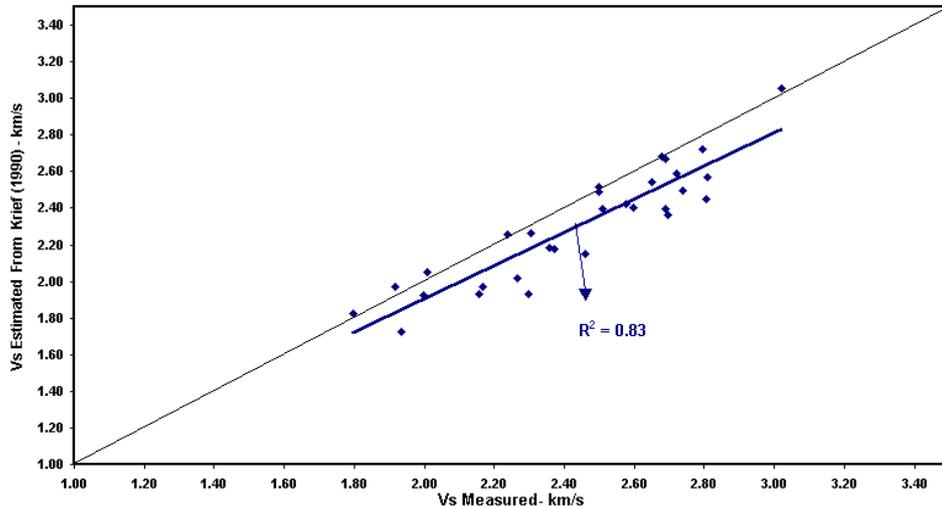
معادله Krief -

کرایف و همکاران (Krief *et al.*, 1990) برای سنگهای اشباع از سیال از معادله Gassmann (1951) استفاده کرده و با فرض مساوی بودن نسبت V_p/V_s در سنگ خشک با نسبت V_p/V_s در قسمت جامد سنگ (Matrix)، یک رابطه خطی مستقیم شامل توانهای دوم سرعتهای امواج برشی و تراکمی در سنگ اشباع از سیال را بصورت زیر بدست آورده اند:

$$\frac{V_{P\ sat}^2 - V_f^2}{V_{S\ sat}^2} = \frac{V_{P\ mat}^2 - V_f^2}{V_{S\ mat}^2} \quad (8)$$

که در رابطه فوق $V_{P\ sat}$ و $V_{S\ sat}$ به ترتیب سرعتهای امواج تراکمی و برشی در سنگ اشباع و $V_{P\ mat}$ و $V_{S\ mat}$ نیز به ترتیب سرعتهای امواج تراکمی و برشی در قسمت جامد سنگ و V_f سرعت امواج تراکمی در سیال داخل منافذ سنگ می باشد. این رابطه برای کلیه لیتولوژی ها با شرط صد درصد اشباع شدگی از آب قابل استفاده است. برای بدست آوردن $V_{P\ mat}$ و $V_{S\ mat}$ از مقادیر سرعتهای تراکمی و برشی کانیهای تشکیل دهنده قسمت جامد نمونه ها که توسط Wang (2000) ارائه شده است (جدول ۱)، میانگین وزنی به روش Voigt گرفته شد. در شکل ۶

مقادیر $V_{S \text{ sat}}$ محاسبه شده توسط این معادله در مقابل مقادیر بدست آمده از آزمایشگاه ترسیم شده است که نشان می دهد با وجود ضریب همبستگی خوب ($R^2 = 0.83$) بین آنها، مقادیر تخمین زده شده توسط این رابطه عموماً کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است.



شکل ۶- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از معادله Krief.

مدل Greenberg & Castagna

Greenberg & Castagna (1992) یک مدل نیمه فیزیکی برای تخمین سرعت موج برشی در سنگهای متخلخل ارائه دادند که ترکیبی از معادله گاسمن (Gassmann) و میانگین سرعت امواج در اجزاء تشکیل دهنده نمونه ها به روش Voigt-Reuss-Hill می باشد. در این روش سرعت موج برشی از طریق معادله گاسمن به لیتولوژی و سیال منفذی مرتبط می شود. این مدل در حالتی که نمونه ها کاملاً اشباع باشند به صورت زیر است:

(۹)

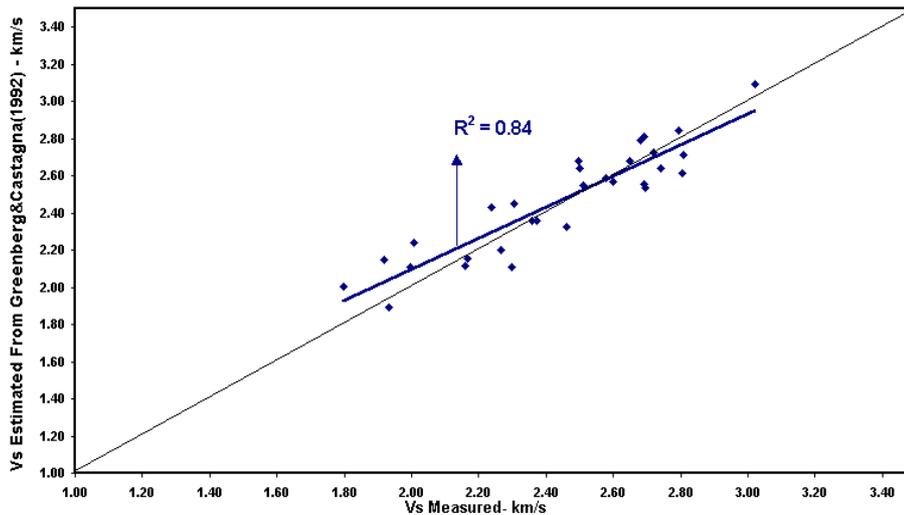
$$V_s = \frac{1}{2} \left\{ \left[\sum_{i=1}^4 X_i \sum_{j=0}^2 a_{ij} V_P^j \right] + \left[\sum_{i=1}^4 X_i \left(\sum_{j=0}^2 a_{ij} V_P^j \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}$$

که در رابطه فوق X_i مقدار هر جز لیتولوژی بصورت اعشاری می‌باشد، V_p سرعت امواج تراکمی است که از نمودار صوتی بدست می‌آید و Z توان آن است که اگر صفر باشد، V_p^j تبدیل به ۱ می‌شود. طبق جدول ۳، V_p در رابطه فوق برای جزء آهکی نمونه‌ها با توان ۱ و ۲ و برای بقیه اجزاء با توان ۱ تاثیر دارد. ضرایب a_{ij} نیز برای چهار جزء لیتولوژی شامل ماسه سنگ، سنگ آهک، دولومیت و شیل (رس) مطابق جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب a_{ij} برای چهار جزء ماسه سنگ، سنگ آهک، دولومیت و شیل (اقتباس از (Greenberg & Castagna, 1992))

X_i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}
ماسه سنگ	-۰/۸۵۵۸۸	۰/۸۰۴۱۶	۰
سنگ آهک	-۱/۰۳۰۴۹	۱/۰۱۶۷۷	-۰/۰۵۵۰۸۸
دولومیت	-۰/۰۷۷۷۵	۰/۵۸۳۲۱	۰
شیل	-۰/۸۶۷۳۵	۰/۷۶۹۶۹	۰

این مدل نیاز به داشتن سرعت امواج تراکمی و ترکیب دقیق اجزاء تشکیل دهنده لیتولوژی دارد. این مدل توانایی برآورد سرعت در نمونه‌هایی که ترکیبی از چند جزء می‌باشند را دارا است. در شکل ۷ نتایج بدست آمده از این مدل در مقابل نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است که نشان می‌دهد همخوانی خوبی ($R^2 = ۰/۸۴$) بین آنها وجود دارد.



شکل ۷- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از معادله Greenberg & Castagna.

روابط Castagna -

کاستاگنا و همکاران (Castagna et al., 1993) برای پیش‌بینی سرعت امواج برشی با استفاده از پارامترهای دیگر مطالعات متعددی انجام دادند. آنها همچنین از داده‌های محققین دیگر برای بدست آوردن رابطه مناسب برای محاسبه سرعت امواج برشی در لیتولوژیهای مختلف استفاده کردند و روابط زیر را ارائه دادند:

(۱۰) برای سنگ آهک

$$V_S = -0.05509V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$$

(۱۱) برای ماسه سنگ

$$V_S = 0.8042V_p - 0.8559$$

(۱۲) برای دولومیت

$$V_S = 0.583V_p - 0.07776$$

(۱۳) برای شیل

$$V_s = 0.7700 V_p - 0.8674$$

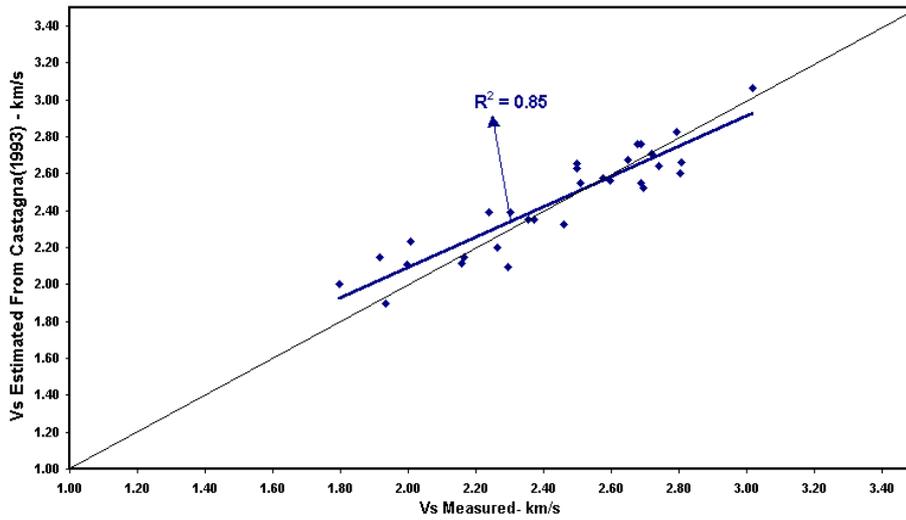
(۱۴) برای لیتولوژی‌های مختلط

$$V = \sum X_i V_i = \sum X_i (A_i \phi + B_i \log p + C_i), \sum X_i = 1$$

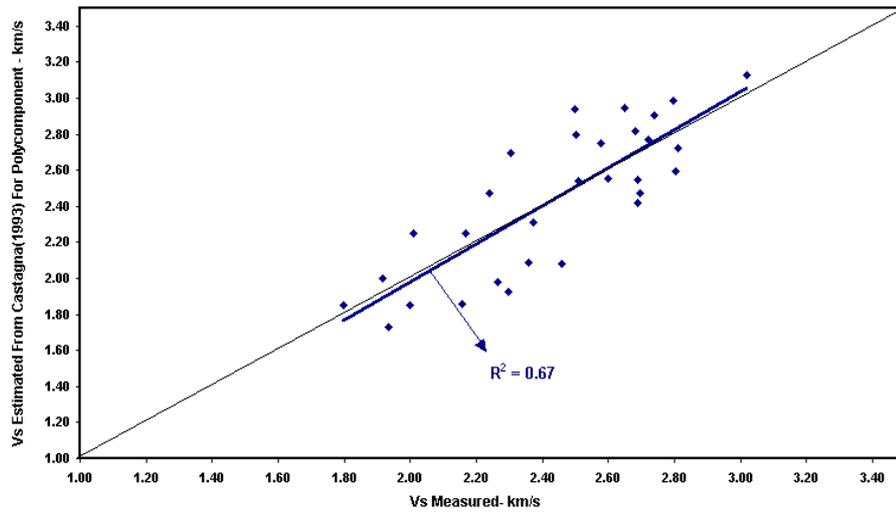
در روابط فوق سرعت امواج برحسب کیلومتر بر ثانیه می باشد. در رابطه (۱۴)، X_i مقدار هر جزء لیتولوژی شامل کلسیت، دولومیت، کوارتز و رس به صورت اعشاری می‌باشد و ϕ مقدار تخلخل کل بصورت اعشاری است که میانگین تخلخلهای بدست آمده از نمودارهای نوترون و چگالی است و P فشار موثر سازند برحسب بار می‌باشد. آنها مقادیر A_i , B_i , C_i را برای چهار جزء کلسیت، دولومیت، کوارتز و رس برای دو حالت موج برشی و تراکمی ارائه داده‌اند که در جدول ۴ آمده است. برای نمونه‌های مورد مطالعه از رابطه (۱۰) برای تخمین سرعت موج برشی در کربنات‌ها استفاده شد و در شکل ۸ نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند که نشان می‌دهد همخوانی خوبی ($R^2 = 0.85$) بین آنها وجود دارد. از رابطه (۱۴) نیز برای تخمین سرعت امواج برشی استفاده شد و در شکل ۹ نتایج بدست آمده از این رابطه در مقابل نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده‌اند که نشان می‌دهد نتایج حاصل از این رابطه رضایت بخش نیست و ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از این رابطه نسبتاً پائین است. ($R^2 = 0.67$)

جدول ۴- مقادیر ضرایب A_i و B_i و C_i موجود در رابطه Castagna برای لیتولوژی های مختلف (اقتباس از Castagna et al, ۱۹۹۳)

نام جزء	موج تراکمی			موج برشی		
	A	B	C	A	B	C
کلسیت	-1.0136 ± 0.278	-0.192 ± 0.061	5.818 ± 0.39	-5.429 ± 0.236	-0.68 ± 0.236	3.156 ± 0.35
کوارتز	-7.636 ± 0.125	-0.192 ± 0.06	5.289 ± 0.466	-4.691 ± 0.141	-0.166 ± 0.13	3.156 ± 0.35
دولومیت	-4.765 ± 0.444	-0.192 ± 0.061	5.524 ± 0.62	-4.692 ± 0.141	-0.137 ± 0.10	3.156 ± 0.35
رس	-7.636 ± 0.125	-0.192 ± 0.06	27.08 ± 0.559	-12.955 ± 1.049	-0.166 ± 0.13	1.842 ± 0.35



شکل ۸- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از رابطه Castagna برای سنگ آهک.



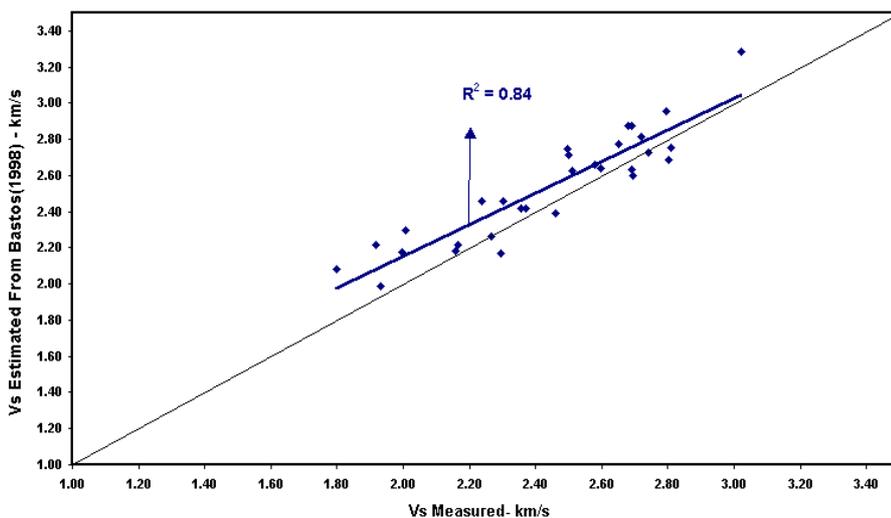
شکل ۹- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از معادله Castagna برای سنگهای متشکل از چند جزء.

– رابطه Bastos

Bastos و همکاران (1998) سرعت امواج تراکمی و برشی را در ۱۲۰ نمونه سنگ آهک از سه چاه در سواحل برزیل اندازه گیری کرده و نتایج حاصل را در یک نمودار مقابل هم رسم نموده و بهترین خط را بر آنها برازش کردند و رابطه زیر را با ضریب همبستگی ۰/۹۶ ارائه دادند:

$$V_s (m / s) = 0.55V_p (m / s) + 41.60 \quad (۱۵)$$

آنها نتیجه گرفتند که این رابطه نسبت به رابطه کاستاگنا و همکاران (Castagna *et al.*, 1993) نتایج بهتری برای تخمین سرعت امواج برشی در سنگ آهک حتی برای سرعت امواج برشی کمتر از ۱۵۰۰ m/s ارائه می دهد. در شکل ۱۰ نتایج بدست آمده با استفاده از این رابطه برای محاسبه سرعت امواج برشی در نمونه های مورد مطالعه در مقابل نتایج آزمایشگاهی ترسیم شده است. همانطوری که دیده می شود همبستگی خوبی ($R^2 = ۰/۸۴$) بین آنها وجود دارد، ولی با این وجود مقادیر بدست آمده از این رابطه عمدتاً بزرگتر از مقادیر اندازه گیری شده هستند و این همبستگی کمتر از همبستگی ناشی از معادله Castagna (1993) است.



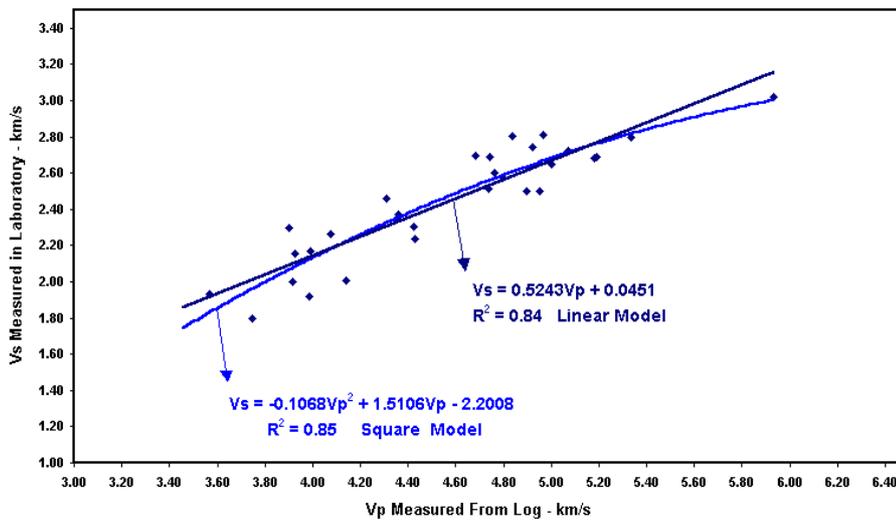
شکل ۱۰- نمودار سرعت امواج برشی اندازه گیری شده در نمونه ها در مقابل سرعت امواج برشی تخمین زده شده از رابطه Bastos.

۳- ارائه مدل برای محاسبه سرعت موج برشی

نتایج بدست آمده برای سرعت موج تراکمی (V_p) از نمودار پتروفیزیکی و سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه پس از حذف داده‌های مربوط به سه نمونه دارای خطا در شکل ۱۱ در یک محور مختصات ترسیم شدند و بهترین خط و منحنی بر آنها برازش شد. روابط زیر برای محاسبه سرعت موج برشی با استفاده از سرعت موج تراکمی نمودار پتروفیزیکی بدست آمد:

$$V_s = 0.5243 V_p + 0.0451 \quad R^2 = 0.84 \quad \text{مدل خطی} \quad (16)$$

$$V_s = -0.1068 V_p^2 + 1.5106 V_p - 2.2008 \quad R^2 = 0.85 \quad \text{مدل درجه دوم} \quad (17)$$



شکل ۱۱- نمودار سرعت امواج برشی اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها در مقابل سرعت امواج تراکمی بدست آمده از نمودار صوتی DT و ارائه روابطی برای تخمین سرعت امواج برشی در مخزن مورد مطالعه.

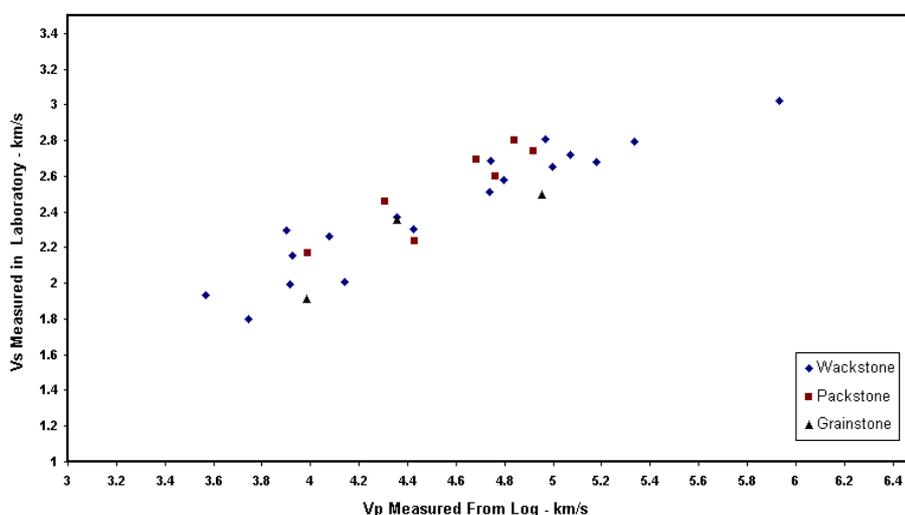
۴- بررسی اثر عوامل مختلف بر روی سرعت امواج لرزه‌ای

همانطوری که در بخش ۲-۴ در بررسی استفاده از روابط مختلف برای تخمین سرعت امواج برشی بیان شد و شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد، نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه تطابق کاملی با نتایج بدست آمده از این روابط ندارد. به منظور بهبود همبستگی بین آنها و بدست

آوردن روابط دقیقتر برای تخمین سرعت امواج برشی، اثر عوامل مختلف زیرکه تغییرات آنها می‌تواند بر روابط بین سرعت امواج برشی و تراکمی موثر باشد، بر روی نمودار حاصل از ترسیم سرعت برشی اندازه‌گیری شده در مقابل سرعت تراکمی بدست آمده از نمودار پتروفیزیکی بررسی شد:

– رخساره سنگی (Lithofacies)

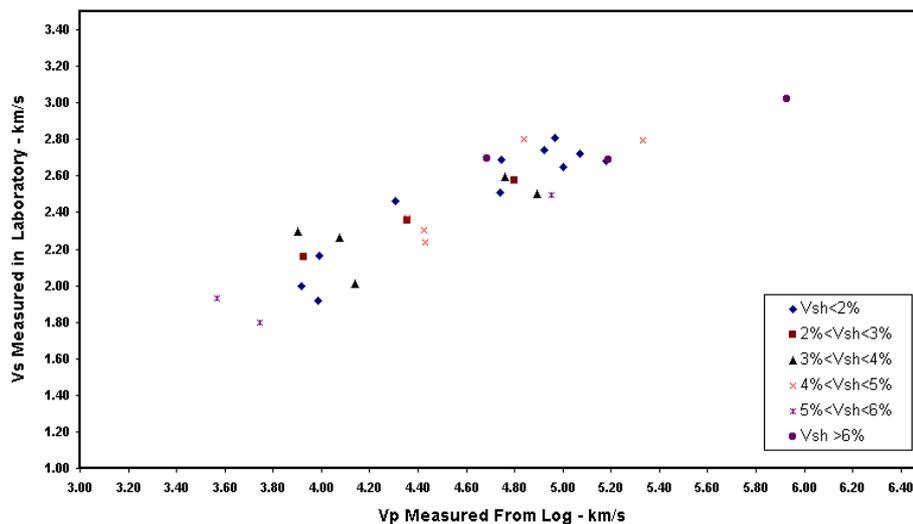
نوع رخساره در مقاطع نازک تعیین گردید. از تعداد ۳۰ نمونه استفاده شده در تخمین سرعت امواج برشی، ۱۸ نمونه وکستون، ۷ نمونه پکستون، ۳ نمونه گرینستون و ۲ نمونه نیز متفرقه می‌باشد. در شکل ۱۲ تغییر نوع رخساره بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs آورده شده است که نشان می‌دهد تغییر رخساره سنگ تأثیر قابل توجهی بر روابط بین سرعت‌های امواج برشی و تراکمی ندارد.



شکل ۱۲- اثر تغییر رخساره سنگی نمونه‌ها بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs.

– حجم شیل (Vsh)

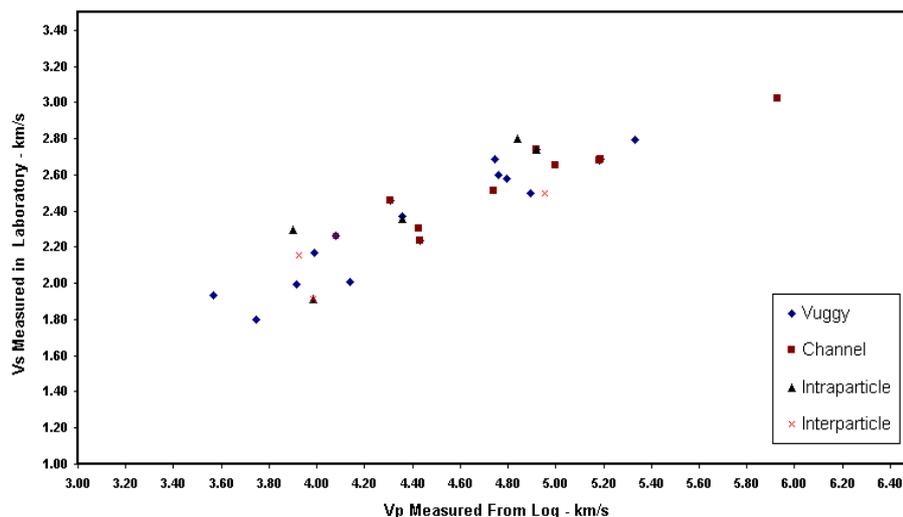
حجم شیل در نمونه‌ها از نمودار CGR تخمین زده شده است که عموماً بین صفر تا ۹٪ است. در شکل ۱۳ تغییرات میزان حجم شیل بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs نشان داده شده است. همانطوری که دیده می‌شود این پارامتر تأثیری چندانی بر تغییرات سرعت امواج ندارد. این امر به احتمال قوی به دلیل کم بودن حجم شیل در کل نمونه‌ها است و لذا تغییرات آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روابط بین سرعت‌های امواج برشی و تراکمی ندارد.



شکل ۱۳- اثر تغییر میزان حجم شیل نمونه ها بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs.

نوع تخلخل -

نوع تخلخل در مطالعه مقاطع نازک تعیین و انواع تخلخلهای حفره‌ای، بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای و شکستگی تشخیص داده شدند. در شکل ۱۴ اثر تغییر نوع تخلخل نمونه ها بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs آورده شده است. همانطوری که دیده می‌شود نحوه تأثیر تغییر نوع تخلخل بر روی روابط بین سرعت‌های امواج برشی و تراکمی قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۴- اثر تغییر نوع تخلخل نمونه‌ها بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs.

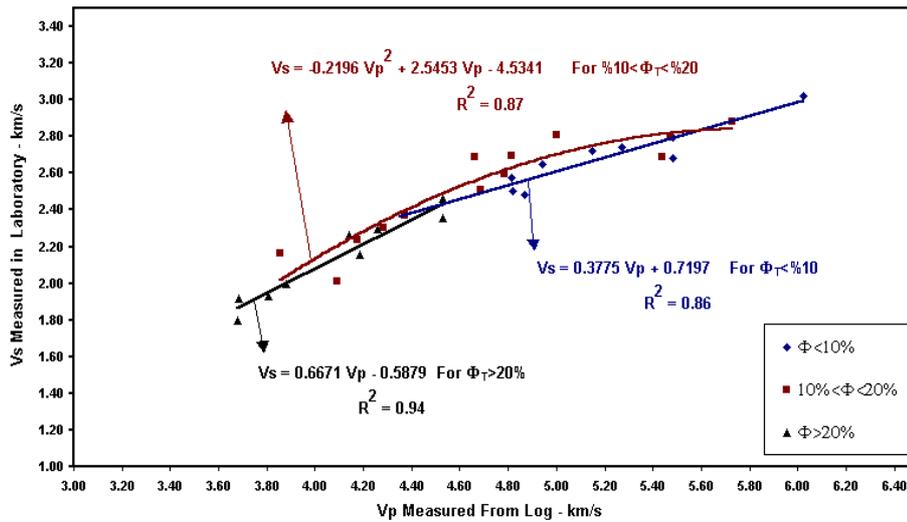
- میزان تخلخل

میزان تخلخل کل با جذر گرفتن از میانگین مربعات تخلخلهای بدست آمده از نمودارهای نوترون و چگالی تعیین شد. نمونه‌ها بر حسب تخلخل به سه دسته دارای تخلخل کمتر از ۱۰ درصد، دارای تخلخل بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و دارای تخلخل بیش از ۲۰ درصد تقسیم شدند. در شکل ۱۵ اثر تغییرات میزان تخلخل بر روی نمودار سرعت امواج Vp-Vs مشخص شده است و روابط زیر بر حسب میزان تخلخل برای تخمین سرعت امواج برشی در سنگهای کریستاله بدست آمد:

$$V_s = 0.3775 V_p + 0.7197 \quad (R^2=0.87) \quad \text{تخلخل کمتر از ده درصد} \quad (18)$$

$$V_s = -0.2196 V_p^2 + 2.5453 V_p - 4.5341 \quad (R^2=0.87) \quad \text{تخلخل بین ۱۰ تا ۲۰ درصد} \quad (19)$$

$$V_s = 0.6671 V_p - 0.5879 \quad (R^2=0.94) \quad \text{تخلخل بیش از ۲۰ درصد} \quad (20)$$



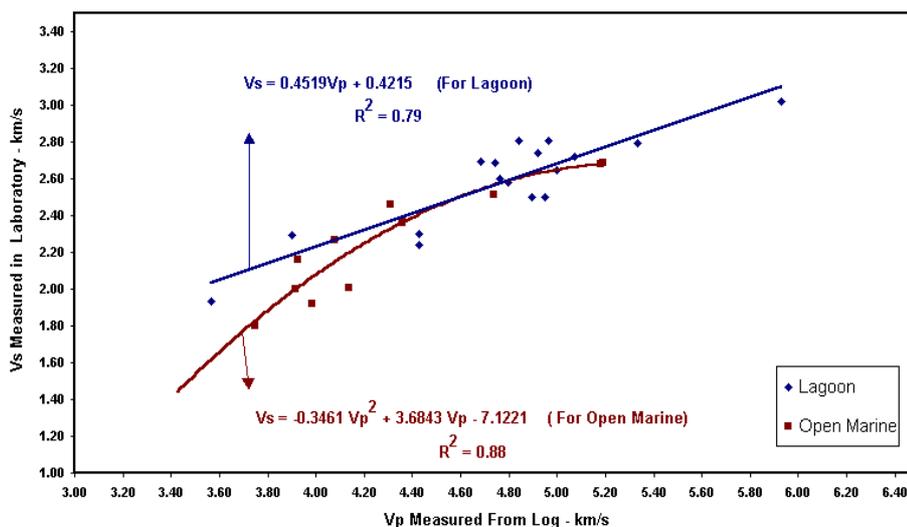
شکل ۱۵- اثر تغییر میزان تخلخل کل نمونه ها بر روی نمودار سرعت امواج V_p - V_s و ارائه روابط دقیقتر برای تخمین سرعت امواج برشی بر حسب میزان تخلخل.

- نوع محیط رسوبی

نوع محیط رسوبی در مطالعه مقاطع نازک تفسیر شد و محیط رسوبی عمدتاً لاگون و دریای آزاد تشخیص داده شد. شکل ۱۶ اثر تغییر نوع محیط رسوبی بر روی نمودار سرعت امواج الاستیک را نشان می دهد. روابط زیر بر حسب نوع محیط رسوبی برای تخمین سرعت امواج برشی بدست آمده است :

$$V_s = 0.4519 V_p + 0.4215 \quad R^2 = 0.79 \quad \text{لاگون} \quad (21)$$

$$V_s = -0.03461 V_p^2 + 3.6843 V_p - 7.1221 \quad R^2 = 0.88 \quad \text{دریای آزاد} \quad (22)$$



شکل ۱۶- اثر تغییر محیط رسوبی نمونه‌ها بر روی نمودار سرعت امواج V_p - V_s و ارائه روابط دقیقتر برای تخمین سرعت امواج برشی بر حسب نوع محیط رسوبی.

۵- نتیجه گیری

در پایان موارد زیر را می‌توان به عنوان نتیجه‌گیری بیان نمود:

۱- در نمونه‌های کربناته مورد مطالعه برآورد سرعت موج برشی با استفاده از سرعت موج تراکمی نتایج دقیقتری نسبت به برآورد سرعت موج برشی با استفاده از تخلخل و محتوی رس ارائه می‌دهد. زیرا هر دو نوع موج الاستیک بطور یکسان تحت تاثیر عوامل دیگر از قبیل لیتولوژی، تخلخل و محتوی رس قرار می‌گیرند. ولی تاثیر تخلخل بر روی سرعت امواج و همچنین نسبت V_p/V_s بستگی به نوع تخلخل و شکل هندسی فضاهای خالی و سیال داخل آنها دارد و تاثیر محتوی رس نیز بستگی به نوع رس دارد.

۲- استفاده از روابط و مدل‌هایی که برای برآورد سرعت موج برشی فقط نیاز به داشتن سرعت موج تراکمی در یک لیتولوژی شناخته شده را دارند، علاوه بر اینکه جواب دقیقتری ارائه می‌دهند، براحتی نیز قابل استفاده می‌باشند. زیرا نیاز به داده‌های اولیه کمتری دارند و V_p به راحتی از روی نمودار صوتی (DT) قابل دستیابی است ولی بدست آوردن تخلخل، ترکیب شیمیایی، فشار موثر، محتوی رس علاوه بر اینکه با خطاهایی همراه هستند، معمولاً هزینه بر بوده و همیشه در دسترس نیستند.

۳- استفاده از روابط Castagna (1993) و Greenberg & Castagna (1992) برای برآورد سرعت امواج برشی در کربنات‌ها نتایج نسبتاً بهتری نسبت به دیگر روابط ارائه می‌دهند.

۴- با ترسیم نتایج بدست آمده برای سرعت موج تراکمی (V_p) از روی نمودار پتروفیزیکی و سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در یک نمودار و برازش بهترین خط و منحنی بر آنها روابط زیر برای محاسبه سرعت موج برشی در کربنات‌ها بدست آمد:

$$V_s = 0.5243 V_p + 0.0451 \quad R^2 = 0.8364 \quad \text{مدل خطی}$$

$$V_s = -0.1068 V_p^2 + 1.5106 V_p - 2.2008 \quad R^2 = 0.8524 \quad \text{مدل درجه دوم}$$

۵- به علت اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست آمده از روی نمودار پتروفیزیکی و روابط و مدل‌های مختلف، عوامل مختلف مؤثر بر سرعت امواج در نمونه‌های کربنات‌ه بررسی شد و مشخص شد که اثرات مربوط به نوع رخساره سنگ، میزان حجم شیل و نوع تخلخل قابل تفکیک نیستند، ولی بر اساس تغییرات میزان تخلخل و نوع محیط رسوبی نمونه‌ها از هم تفکیک شدند و روابط بهتری بدست آمد.

References

- Bastos, A.C., Dillon, L.D., Vasquez, G.F. and Soares, J.A., (1998) *Core derived acoustic, porosity&permeability correlations for Computation pseudo- Logs*, Core log integration, Geological Society London, Special Publications, **136**, p. 141-146.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood. R.L., (1985) *Relationships between compressional wave and shear wave velocities in silicate rocks*, Geophysics, Vol. **50**, p. 571-581.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Kan, T.K., (1993) *Rock Physics-The link between Rock properties and AVO Response*, SEG, p. 124-157.
- Domenico, S.N., (1984) *Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity*, Geophysics, **49**, p.1188-1195.
- Gassmann, F., (1951) *Ueber die Elastizität poröser medien: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Ges., Zurich*, **96**, p. 1-23.
- Greenberg, M.L., and Castagna, J.P., (1992) *Shear wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary*

- verification and applications*, Geophysical Prospecting, Vol. **40**, p.195-209.
- Krief, M., Garat, J., Stellingwerf, J., and Venter, J., (1990) *A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-wave form sonic)*, The Log Analyst, Vol. **31**, p.335-369.
- Pickett, G.R., (1963) *Acoustic character logs and their applications in formation evaluation*. Journal of Petroleum Technology, **15**, p. 650-667.
- Wang, Z., (2000) *The gassmann equation revisited: Comparing laboratory data with gassmann's prediction*, Geophysical prospecting, *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks*, Vol. **3**, Recent Developments, p 8-23.
- Xu, S., and White, R.E., (1996) *A physical model for shear wave velocity prediction*, Geophysical Prospecting, Vol. **44**, p. 687-717.