



تأثیر مقاومت ویژه الکتریکی سازند بر بهبود تخمین سرعت انتشار امواج صوتی برشی

مریم صدیق^۱، بهزاد تخم چی^۲، وامق رسولی^۳، ملک محمد گیتی^۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

ravak.m65@gmail.com

چکیده

نمودارهای صوتی (برشی و تراکمی) کاربردهای متفاوتی در صنعت نفت دارند که می‌توان به تعیین لیتولوژی، تعیین لایه‌های با فشار فوق نرمال، ارزیابی سنگ منشاء و تعیین تخلخل، نوع هیدروکربن و سیال منفذی و تعیین مشخصات مخزنی اشاره نمود. از نمودارهای سرعت برشی و تراکمی و چگالی سازند جهت تعیین پارامترهای مکانیکی و الاستیک سازند جهت مدلسازی ژئومکانیکی دیواره چاه و بررسی علل ناپایداری چاه که یکی از چالش‌های مهم عملیات حفاری و تولید شن در فرایند بهره‌برداری از میادین هیدروکربنی می‌باشد، استفاده می‌شود. تاکنون روش‌ها و روابط تجربی متعددی برای تعیین سرعت برشی در سازندها و کانی‌های مختلف در شرایط فیزیکی خاص بر اساس مطالعات بر روی داده‌های لرزه‌ای، آزمایشگاهی و یا نمودارهای پتروفیزیکی در لیتولوژی و نواحی خاص توسعه داده شده‌اند. اما در صورت عدم دسترسی به برخی اطلاعات آزمایشگاهی در خصوص نمونه سیال منفذی، نمونه ماتریکس و کانی‌های سازند می‌توان با در نظر گرفتن مقاومت ویژه الکتریکی سازند در روابط تجربی موجود بین سرعت‌های امواج صوتی تراکمی و برشی، عواملی هم‌چون سیمان‌شدگی، انحلال و نحوه ارتباط میان منافذ و نوع سیال منفذی را در تخمین سرعت تأثیر داد. در این مطالعه با استفاده از روابط تجربی معتبر در سازندهای ماسه سنگی، ماسه سنگ شیلی، شیلی و مقایسه سرعت موج صوتی برشی تخمینی و واقعی موجود، مشاهده می‌شود که این روابط تجربی با دقت یکسانی به تخمین سرعت انتشار امواج برشی می‌پردازند و دارای ضریب تعیین همبستگی یکسان در حدود ۰/۸۹۶ می‌باشند. با استفاده از پارامتر حجم شیل در محاسبات، میزان ضریب تعیین همبستگی افزایش یافته است. همچنین با استفاده از رگرسیون غیر خطی چند متغیره و افزایش متغیرها ضریب تعیین همبستگی رابطه تخمین زده شده به ۰/۹۲ افزایش می‌یابد. اما با نرمالیزه نمودن سرعت‌های امواج صوتی به فاکتور مقاومت ویژه الکتریکی سازند ضریب تعیین همبستگی رابطه از ۰/۴۴ تا ۰/۹۵۸ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سرعت امواج صوتی برشی، سرعت امواج صوتی تراکمی، مقاومت ویژه الکتریکی سازند، ضریب تعیین همبستگی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت- حفاری و بهره‌برداری دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار دانشکده ژئوفیزیک، نفت و معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳- دانشیار دانشگاه کرتین استرالیا، ۴- کارشناس ارشد بخش پتروفیزیک اداره مهندسی نفت شرکت نفت خزر.



۱- مقدمه

تاکنون کاربردهای متفاوتی از امواج صوتی تراکمی و برشی در صنعت نفت و اکتشافات ژئوفیزیکی شناخته شده است. در برخی موارد در صورت دسترسی به داده‌های سرعت موج صوتی تراکمی یا زمان گذردهی این موج می‌توان به ارزیابی برخی از پارامترهای سازند پرداخت.

نمودارهای صوتی (برشی و تراکمی) کاربردهای متفاوتی در صنعت نفت دارند که می‌توان به تعیین لیتولوژی، تعیین لایه‌های با فشار فوق نرمال، ارزیابی سنگ منشاء و تعیین تخلخل، نوع هیدروکربن و سیال منفذی و تعیین مشخصات مخزنی اشاره نمود [۳] و [۱۱].

اما به منظور کاربردهای مهندسی از جمله مدلسازی لرزه‌ای، آنالیز تغییرات دامنه با آفست (AVO) و تعیین مدول‌های الاستیک سازند علاوه بر امواج صوتی تراکمی به امواج صوتی برشی نیز نیاز خواهد بود. از داده‌های نمودارهای سرعت برشی و تراکمی چگالی سازند جهت تعیین پارامترهای مکانیکی و الاستیک سازند نظیر مدول بالک، مدول برشی، مدول یانگ، نسبت پواسون و ثابت لیم (lame) و ... استفاده می‌شود [۲] و [۱۵]. پارامترهای مکانیکی سازند نیز جهت مدلسازی ژئومکانیکی دیواره چاه و بررسی علل ناپایداری چاه که یکی از چالش‌های مهم عملیات حفاری و تولید شن در فرایند بهره برداری از میادین هیدروکربنی می‌باشد، به کار می‌روند.

هورسراد در سال ۲۰۰۱ (Horsrud, 2001) در مطالعات خود به این نکته اشاره داشته است که با استفاده از سرعت برشی و تراکمی در شیل‌ها می‌توان خواص مکانیک سنگی شیل را تخمین زد و امکان فروریختگی دهانه چاه را بررسی کرد [۵]. علاوه بر کاربردهای مهندسی فوق با استفاده از نسبت سرعت موج صوتی تراکمی به برشی می‌توان فشار فوق نرمال را در سازندهای شیلی، ماسه سنگی و نمکی پیش بینی نمود [۹]. هم‌چنین با بررسی حساسیت فشار منفذی به سرعت امواج صوتی تراکمی و برشی می‌توان روند فشردگی رسوبات منطقه را تحلیل نمود [۸].

سرعت امواج صوتی برشی یکی از فاکتورهای مهم در ارزیابی‌های پتروفیزیکی در بخش فوقانی چاه در حین عملیات حفاری و بخش مخزن در مرحله تولید می‌باشد. اما به دلایلی نظیر عدم امکان دسترسی به ابزار نمودارگیری صوتی نظیر (DSI-Dipole Shear Sonic Imager)، مشکلات راندن ابزار و قدیمی بودن چاه مورد بررسی، بعضاً امکان دسترسی مستقیم به داده‌های نمودار زمان گذردهی موج صوتی برشی (DTS) نمی‌باشد. هم‌چنین عواملی همچون تفکیک‌پذیری (Resolution) کم داده‌های لرزه‌ای و ضعیف بودن کیفیت داده‌های برشی برداشت شده از ابزار نمودارگیری صوتی و حتی تاثیر نفوذ گل در سازند بر داده‌های امواج برشی برداشت شده، ضروری است که نمودار سرعت امواج برشی سازند با استفاده از سایر پارامترهای پتروفیزیکی آن تخمین زده شود.

تاکنون روش‌ها و روابط تجربی متعددی برای تعیین سرعت برشی در سازندها و کانی‌های مختلف در شرایط فیزیکی خاص، بر اساس مطالعات بر روی داده‌های لرزه‌ای، آزمایشگاهی و یا نمودارهای پتروفیزیکی در نواحی مشخص، توسعه داده شده است [۳] و [۱۲].

پیکت در سال ۱۹۶۳ (Pickett, 1963) نسبت سرعت‌های امواج صوتی تراکمی به برشی را برای لیتولوژی‌های مختلف از جمله برای ماسه سنگ تمیز مقادیر بین ۱/۶ تا ۱/۷۵، دولومیت ۱/۸ و آهک ۱/۹ ارائه نموده است. کاستاگنا و استوود در سال ۱۹۸۳ (Castagna-Eastwood, 1983) رابطه خطی میان سرعت موج صوتی برشی و تراکمی در نمونه‌های مختلف کوارتز و کربنات در نسبت‌های مختلف گزارش دادند. کاستاگنا و همکاران، ۱۹۹۳-۱۹۸۵ (Castagna et al., 1985., 1993) معادلات خطی را جهت تخمین سرعت برشی در لیتولوژی‌های مختلف، نمونه سنگ‌های آهکی و کربناته، دولومیتی، شیل آهکی و شیل اشباع شده با آب ارائه داده‌اند و موکوو و همکاران، ۱۹۹۸ (Mavko et al., 1998) نیز، در ماسه سنگ تحکیم نیافته با تخلخل بالا رابطه



خطی تک متغیره را بین سرعت موج تراکمی و برشی ارائه داده‌اند که تنها متغیر آن سرعت موج صوتی تراکمی می‌باشد. ویلیامز و همکاران، ۱۹۹۰ (Williams et al., 1990) نیز با استفاده از داده‌ها و نمودارهای پتروفیزیکی رابطه‌ای برای سرعت موج برشی برحسب لیتولوژی در ماسه سنگ اشباع شده با آب و شیل منتشر نموده‌اند [۱۲].

گرین برگ-کاستاگنا، ۱۹۹۲ (Greenberg and Castagna, 1992) در سازندهای شیلی و ماسه سنگی وزوو- وایت، ۱۹۹۵ (Xu and White 1995) برای رسوبات شیلی نیز روابط تجربی خطی را برای تخمین سرعت موج صوتی برشی بر مبنای سرعت موج صوتی تراکمی منتشر نموده‌اند [۱۲]، [۱۳] و [۱۴].

هن در سال های ۱۹۸۶ و ۲۰۰۴ (Han 1986, 2004) آزمایش‌هایی روی ماسه سنگ در فرکانس‌های فراصوتی انجام و روابطی را برای تخمین سرعت موج برشی بر حسب سرعت موج تراکمی استخراج نموده است.

روابط تجربی دیگری نیز با استفاده از پارامترهای دیگر سازند نظیر حجم شیل (VCL) و تخلخل (PHI)، سرعت موج برشی را تخمین زده‌اند که از آن جمله می‌توان به رابطه کاستاگنا، ۱۹۸۵ (Castagna et al., 1985)، هن، ۱۹۸۶ (Han 1986)، توسایا و نور، ۱۹۸۲ (Tosaya, Nur 1982)، برای ماسه سنگ‌های شیلی اشباع شده با آب بر اساس تفکیک حجم شیل و تخلخل اشاره نمود [۱].

روابط تجربی فوق در سازندهایی توسعه داده شده‌اند که سنگ توسط آب یا آب نمک اشباع شده می‌باشد. بنابراین به منظور بهبود سرعت موج صوتی برشی از روابط فوق استفاده می‌شود و سپس با استفاده از رابطه گاسمن، ۱۹۵۱ (Gassmann, 1951) شرایط واقعی اشباع شدگی سیال اعمال می‌گردد. معادله گاسمن، رابطه‌ای میان مدول-های بالک در حالات نمونه سنگ خشک و اشباع شده، تخلخل کل، مدول بالک ماتریکس (کانی‌های موجود در ماتریکس سنگ) و مدول بالک سیال منفذی می‌باشد و فرضیاتی شامل همگن بودن محیط سنگ شامل ماتریکس و سیال منفذی، ارتباط منافذ با یکدیگر و قراردادن نمونه در تعادل فشاری، عدم واکنش سیال منفذی با ماتریکس سنگ بر آن حاکم است. استفاده از معادله گاسمن منوط به دسترسی به اطلاعاتی در خصوص مدول بالک ماتریکس، سیال منفذی و مدول بالک در شرایط خشک در دو حالت اولیه و ثانویه می‌باشد [۴].

در مطالعه حاضر، با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی موجود در یک بازه عمقی در بخش مخزنی متشکل از سازندهای ماسه‌ای، سیلتی و مادستونی یک چاه با استفاده از تاثیر مقاومت ویژه سازند به بررسی تاثیر بهبود رابطه تجربی میان سرعت-های امواج صوتی برشی و تراکمی پرداخته شده است.

۲- بهبود روابط تجربی بر مبنای نمودار مقاومت ویژه الکتریکی سازند

با عبور امواج صوتی از سازند، موج صوتی از مجموعه فاز سیال و ماتریکس عبور می‌کند. اما رفتار امواج صوتی تراکمی در عبور از فاز سیال با امواج صوتی برشی متفاوت است.

به طور کلی سرعت موج صوتی برشی در دو فاز جامد و مایع به عوامل زیر بستگی دارد.

- سیمان شدگی، فشردگی و تحکیم یافتگی سازند

- لیتولوژی و نوع کانی‌های تشکیل دهنده سازند

- حجم شیل

- تخلخل، شکل، اندازه منافذ و ارتباط آن‌ها

- نوع سیال منفذی

از جمله مهم‌ترین عوامل موثر و تعیین کننده میزان سرعت انتشار امواج صوتی برشی، تخلخل، حجم شیل و نوع هیدروکربن منفذی می‌باشد [۷]، [۱۳] و [۱۴]. از مقایسه سرعت امواج صوتی برشی و تراکمی جهت تعیین سیال منفذی به خصوص گاز، استفاده می‌شود [۷]. افزایش تخلخل و حجم شیل منجر به کاهش سرعت امواج صوتی (تراکمی و برشی) می‌شود [۷]. همچنین سرعت موج تراکمی در صورت عبور از سازند حاوی گاز کاهش می‌یابد اما سرعت موج برشی افزایش می‌یابد.



ارتباط میان فاز جامد (سرعت) و فاز سیال (مقاومت ویژه الکتریکی) نیز بیش از هر فاکتور دیگری در میزان تخلخل سازند موثر است [۶]. به منظور محاسبه تخلخل لازم است اطلاعاتی در خصوص نوع ماتریکس و کانی‌های موجود در دانه‌بندی سنگ، نوع سیال اشباع کننده سازند و تا حدودی شکل و توزیع منافذ را در اختیار داشت. مشهورترین روابط در تعیین تخلخل با استفاده از سرعت امواج صوتی تراکمی در سازندهای تحکیم‌یافته (Consolidated) و تمیز با منافذ کوچک و یکنواخت روابط وایلی، ۱۹۵۶ (Wyllie 1956) و ریمر هانت، ۱۹۸۰ (Raymer Hunt 1980) می‌باشد که می‌توان از سرعت امواج صوتی برشی نیز جهت محاسبه تخلخل به جای سرعت امواج تراکمی در این روابط استفاده نمود [۱]. حجم شیل نیز با استفاده از نمودار اشعه گاما (GR) قابل محاسبه است [۱].

مقاومت ویژه الکتریکی سازند به فاکتورهای متعددی بستگی دارد. از آن جمله می‌توان به لیتولوژی، تخلخل، اشباع شدگی آب و سایر سیال‌های منفذی، نوع سیال منفذی، هدایت الکتریکی سیال منفذی و شوری آب منفذی، حجم شیل، هدایت الکتریکی شیل و نوع کانی‌های رسی در سازند و فاکتور سیمان‌شدگی سنگ اشاره نمود. از نمودار مقاومت ویژه سازند نیز برای تصحیح اثر نفوذ گل به خصوص گل‌های پایه نفتی بر روی نمودار صوتی استفاده می‌شود. از این نمودار هم‌چنین برای تعیین زون‌های رخنه (Invaded Zones)، تخمین اشباع هیدروکربن و آب منفذی استفاده می‌شود.

مطالعات محدودتری در زمینه ارتباط مقاومت ویژه الکتریکی و سرعت انتشار امواج صوتی در سنگ انجام شده‌است که نتایج آن‌ها منجر به ارائه روابط تجربی مختلفی بین پارامترهای سرعت موج صوتی و فاکتور مقاومت سازند (Formation Factor) و خواص الکتریکی سازند در سنگ‌های رسوبی شده‌است. از آن جمله می‌توان به روابط فاست، ۱۹۵۱-۱۹۵۳ (Faust 1951-1953) در ماسه سنگ‌های تحکیم یافته و با تخلخل بین ۲۰-۵٪، هسیکویلوو همکاران، ۲۰۰۶ (Hacikoylu et al., 2006) بدون در نظر گرفتن خواص الکتریکی رس، هوبرت، ۲۰۰۸ (Hubert, 2008) با در نظر گرفتن خاصیت ظرفیت تعادل کاتیونی رس، رودمن و همکاران، ۱۹۷۵ (Rudman et al., 1975) و بریتودوس سانتوس، ۱۹۸۸ (Britodos santos 1988) برای سنگ های رسوبی اشباع با آب اشاره نمود [۵].

فاکتور مقاومت ویژه الکتریکی سازند از نسبت مقاومت ویژه الکتریکی سازند به مقاومت ویژه الکتریکی سیال منفذی حاصل می‌گردد که بر اساس رابطه آرچی، ۱۹۴۲ (Archie, 1942) در ماسه سنگ‌های اشباع با آب نمک و رابطه تجربی هامبل (Humble Formula) وین سائر، ۱۹۵۲ (Win sauer et al, 1952)، با تخلخل و ویژگی‌های سیمان‌شدگی سنگ‌های رسوبی و از طریق عامل پیچاپیچی (Tortusity factor) به شکل و ارتباط دانه‌های رسوبات و از طریق آب اشباع شدگی با سیال منفذی ارتباط دارد.

رابطه تجربی پوپن و لویوکس، ۱۹۷۱ (Poupon and Leveaux 1971) نیز برای شیل‌های کاملاً اشباع شده با آب نمک رابطه حجم شیل و هدایت الکتریکی (عکس مقاومت ویژه الکتریکی) را منتشر کرده است معادله (۱). [۱]

$$\sqrt{\frac{1}{R}} = \sqrt{\frac{1}{F} \times \frac{1}{Rw} + Vsh^\alpha} \sqrt{\frac{1}{Rsh}}, \quad \alpha = 1 - \frac{Vsh}{2} \quad (1)$$

که در آن Rsh مقاومت الکتریکی ویژه شیل (اهم متر)، F، فاکتور مقاومت الکتریکی سازند (بدون بعد)، Rw مقاومت ویژه الکتریکی آب سازندی (اهم متر)، Vsh، حجم شیل (کسر کوچکتر از واحد) می‌باشد.

بنابراین به نظر می‌رسد در صورت عدم دسترسی به برخی اطلاعات آزمایشگاهی در خصوص نمونه سیال منفذی، نمونه ماتریکس سنگ و کانی‌های سازند می‌توان با تاثیر دادن مقاومت ویژه الکتریکی سازند در محاسبه سرعت‌های امواج صوتی تراکمی و برشی، عواملی هم‌چون سیمان‌شدگی، انحلال و نحوه ارتباط میان منافذ و نوع سیال را در بهبود تخمین سرعت تاثیر داد.

نرمالیزه نمودن سرعت به فاکتور مقاومت ویژه الکتریکی سازند می‌تواند در بهبود رابطه به دلیل تاثیر بیشتر ارتباط منافذ سازند و شکل منافذ نسبت به استفاده از تخلخل و حجم شیل، رابطه میان سرعت برشی و تراکمی را بهبود بخشد [۶].



۳- نتایج

با استفاده از روابط تجربی معتبر در سازندهای ماسه سنگی، ماسه سنگ شیلی، شیلی و محاسبه سرعت موج صوتی برشی بر اساس آن‌ها و مقایسه با سرعت موج صوتی برشی واقعی در بازه عمقی موجود، مشاهده می‌شود که این روابط تجربی با دقت یکسانی به تخمین سرعت انتشار امواج برشی می‌پردازند. با استفاده از پارامتر حجم شیل در محاسبات، همانگونه که در روابط ویلیامز (۱۹۹۰) و هن و همکاران (۱۹۸۶) قابل مشاهده است، میزان ضریب تعیین همبستگی افزایش یافته است. جدول (۱) این روابط و ضرایب تعیین همبستگی هر یک از روابط تجربی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ضرایب تعیین همبستگی حاصل از برازش نمودارهای سرعت موج صوتی برشی با استفاده از روابط تجربی موجود و مقایسه با سرعت موج برشی واقعی

کرایف (۱۹۹۰)	کاستاگنا (۱۹۸۵)	کاستاگنا-گرین برگ (۱۹۹۲)	هن و همکاران (۱۹۸۶)	ماوکوو (۱۹۹۸)	هن و همکاران (۱۹۸۶) حد برش حجم شیل ٪۲۵	ویلیامز (۱۹۹۰) حد برش حجم شیل ٪۲۷	روش تخمین سرعت برشی (رابطه تجربی)
۰/۸۹۰۵۱۶	۰/۸۹۵۵۵۸	۰/۸۹۵۵۵۸	۰/۸۹۵۵۵۸	۰/۸۹۵۵۵۸	۰/۸۹۸۶۳۱	۰/۹۱۱۲۴	ضریب همبستگی

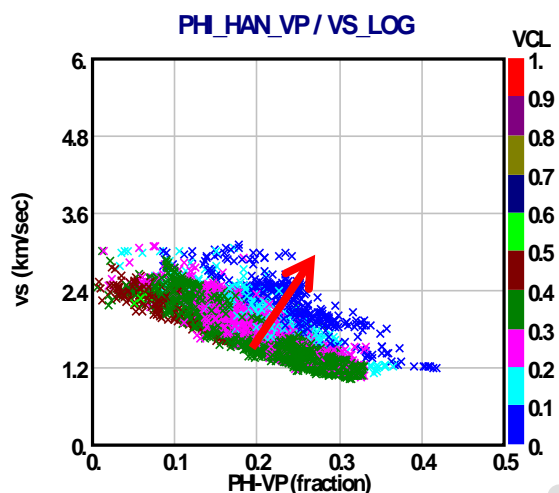
به منظور بررسی رابطه تخلخل با داده‌های سرعت برشی موجود، با استفاده از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶) که سرعت امواج صوتی برشی و تراکمی را به صورت رابطه دومتغیره از تخلخل و حجم رس / شیل ارائه داده است، تخلخل بر اساس سرعت امواج صوتی تراکمی محاسبه شده است.

$$PHI - V_p = (5.59 - (2.18VCL) - V_p) / 6.093 \quad (2)$$

$$PHI - V_s = (3.52 - (1.89VCL) - V_s) / 4.41 \quad (3)$$

که در این معادلات، $PHI - V_s$ ، $PHI - V_p$ تخلخل حاصل از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶) بر حسب سرعت‌های امواج تراکمی و برشی (عدد کسری)، V_p سرعت امواج صوتی تراکمی (کیلومتر بر ثانیه)، V_s سرعت امواج صوتی برشی (کیلومتر بر ثانیه) و VCL حجم شیل یا رس (کسر کوچکتر از واحد) می‌باشد.

نمودار رابطه همبستگی میان سرعت امواج صوتی برشی و تخلخل $PHI - V_p$ در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار همبستگی تخلخل (PHI-Vp) و سرعت موج صوتی برشی در بازه مورد مطالعه

همانطور که از شکل (۱) قابل مشاهده است، با افزایش تخلخل سرعت امواج صوتی برشی کاهش می یابد. همچنین با کاهش حجم شیل یا رس در سازند، سرعت انتشار امواج صوتی افزایش می یابد. به منظور بررسی دقیق تر اثر شیل بر سرعت موج صوتی برشی، رابطه سرعت موج صوتی برشی و تخلخل حاصل از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶) در جدول (۲) ارائه شده است. بیشترین ضریب تعیین همبستگی بر اساس تخلخل حاصل از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶) در بازه حجم رس (۰/۳۵-۰/۴۰) می باشد. کاهش ضریب تعیین همبستگی برای حجم رس بیش از ۰/۴ به دلیل تعداد کم داده های موجود در این بازه جهت برازش می باشد.

جدول (۲): تاثیر تغییرات حجم شیل بر رابطه سرعت انتشار امواج صوتی برشی و تخلخل حاصل از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶)

Vs (km/sec)	حجم شیل یا رس (VCL)	ضریب تعیین همبستگی (R2)
$V_S = 3/5.33 - 5/6 PHI$	$VCL < 0/1$	۰/۶۶
$V_S = 3/15.36 - 5/46.74 PHI$	۰/۱ - ۰/۲	۰/۷۴۴۶
$V_S = 2/9.624 - 5/74.22 PHI$	۰/۲ - ۰/۳	۰/۸۴۶۵
$V_S = 3/8.248 - 5/7.28 PHI$	۰/۳ - ۰/۳۵	۰/۸۸۰۹
$V_S = 2/7.893 - 5/72.81 PHI$	۰/۳۵ - ۰/۴	۰/۸۹۸۵
$V_S = 2/6.299 - 5/56.38 PHI$	$VCL > 0/4$	۰/۸۴۷۸

به منظور تعیین رابطه تجربی جدید بر اساس پارامترهای فیزیکی سازند و با توجه به نمودارهای پتروفیزیکی موجود، همبستگی پارامترها (X) با سرعت موج صوتی برشی در یک بازه عمقی با لیتولوژی ماسه سنگ، سیلت و مادستون، مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۳) ضرایب تعیین همبستگی پارامترهای موجود را با سرعت انتشار موج برشی نشان می دهد. با استفاده از این ضرایب پارامترهای مناسب جهت تعیین رابطه تجربی چند متغیره تعیین گردیده است. همچنین شکل های (۲) و (۳) نمودار همبستگی سرعت امواج صوتی برشی را با پارامترهای سرعت امواج صوتی تراکمی، لگاریتم مقاومت الکتریکی ویژه سازند نشان می دهند.

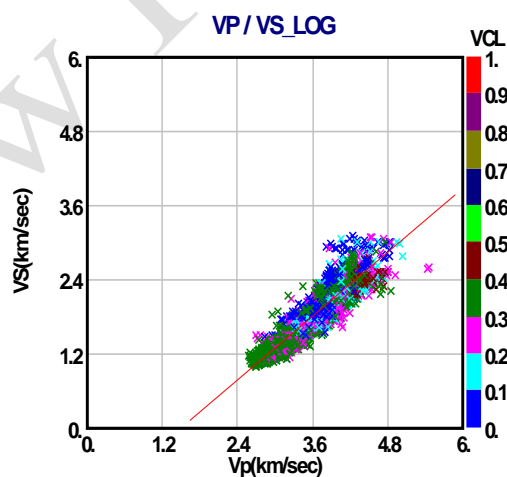
جدول (۳): ضریب تعیین همبستگی روابط حاصل از برازش های خطی و غیر خطی پارامترهای موثر در تخمین سرعت امواج صوتی

برشی (Vs)

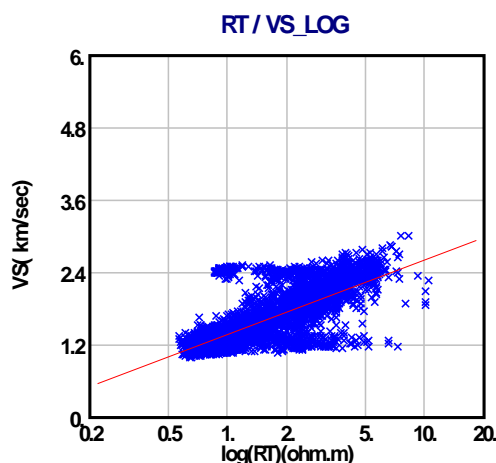


پارامتر/متغیر (X)	واحد	ضریب همبستگی	نوع رابطه (Vs)
VCL (حجم رس / شیل)	کسر کوچکتر از واحد	۰/۱۳۹۰	AX+B
		۰/۲۲۳۷	AX ² +BX+C
Vp (سرعت موج تراکمی)	کیلومتر بر ثانیه	۰/۸۹۵۵۵۸	AX+B
		۰/۹۱۰۶۲۵	AX ^B
		۰/۸۹۵۵۷	AX ² +BX+C
RHOB (چگالی سازند)	گرم بر سانتی متر مکعب	۰/۳۴۱۷	AX+B
TNPH (تخلخل نوترون)	[-۰/۱۵_۰/۴۵]	۰/۳۸۳۷۳۵	AX+B
Log(RT)	لگاریتم اهم متر	۰/۵۵۸۶۷۷	AX+B
GR	GAPI	۰/۱۳۸۹۹۶	AX+B

با توجه به جدول (۳) می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود که سرعت موج صوتی برشی با چگالی سازند (RHOB) همبستگی بسیار ضعیفی دارد و با حجم شیل (VCL)، نمودار اشعه گاما (GR)، مقاومت الکتریکی ویژه سازند (RT)، تخلخل نوترون (TNPH) و سرعت تراکمی سازند (Vp) همبستگی بیشتری دارد، که بیشترین ضریب تعیین همبستگی سرعت برشی (Vs) با سرعت موج صوتی تراکمی سازند (Vp) می‌باشد.



شکل (۲): نمودار همبستگی سرعت امواج صوتی تراکمی و برشی در بازه مورد مطالعه (R²=۰/۸۹۵۵۵۸)

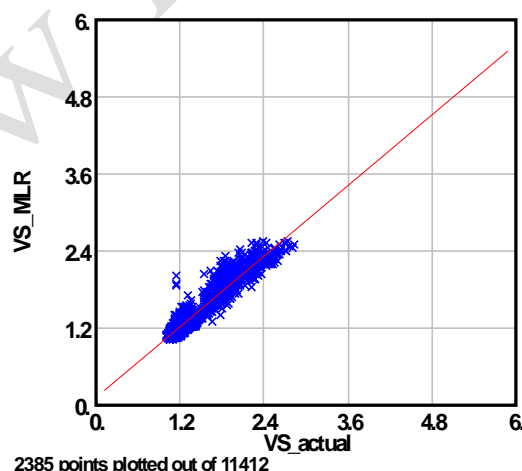


شکل (۳): نمودار همبستگی مقاومت ویژه الکتریکی سازند و سرعت امواج صوتی برشی در بازه مورد مطالعه ($R2=0.558677$)

رابطه خطی میان سرعت امواج صوتی تراکمی و برشی ضریب تعیین همبستگی در حدود ۰/۸۹۶ دارد که به دلیل وجود لایه‌های سیلتی و مادستونی در بین لایه‌های ماسه سنگی می‌باشد.

با بهره‌گیری از رگرسیون غیر خطی چندمتغیره و بهره‌گیری از پارامترهای سرعت تراکمی، چگالی سازند، تخلخل نوترون حجم شیل و مقاومت ویژه الکتریکی سازند رابطه معادله (۴) با ضریب تعیین همبستگی ۰/۹۲ قابل ارائه است. هر چند استفاده از رگرسیون چندمتغیره رابطه را وابسته به متغیرهای محلی خاص محدوده مورد مطالعه می‌نماید. اما می‌توان از این رابطه برای چاه‌های دیگر در منطقه مورد مطالعه، استفاده نمود.

$V_s = 1.001693 - 0.4146V_p + 0.170615V_p^2 - 0.681247VCL + 0.01RHOB + 0.457864TNPH + 0.2535226 \log(RT)$. (۴)
 که در آن V_p و V_s بر حسب کیلومتر بر ثانیه، VCL کسر کوچکتر از واحد، $RHOB$ چگالی سازند بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، $TNPH$ تخلخل نوترون و عددی کسری بین (۰/۱۵_۰/۴۵) و RT بر حسب اهم متر می‌باشد. شکل (۴) رابطه همبستگی میان سرعت امواج صوتی برشی تخمینی و واقعی را نشان می‌دهد.



2385 points plotted out of 11412

شکل (۴): مقایسه سرعت موج صوتی برشی واقعی و تخمینی با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره ($R2=0.92$)

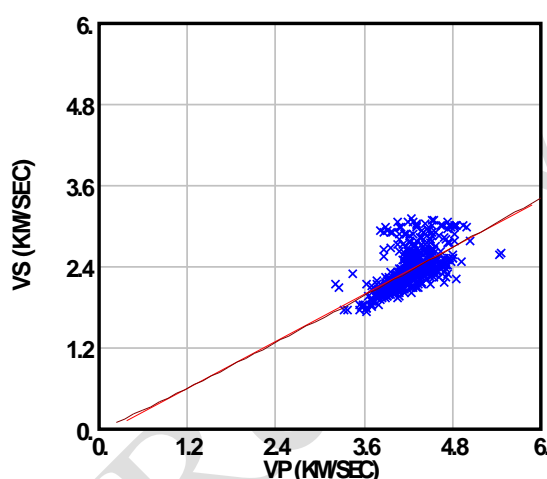


به منظور تحلیل تاثیر مقاومت ویژه الکتریکی سازند در روابط تجربی میان سرعت‌های امواج صوتی برشی و تراکمی رابطه میان این دو پارامتر و نرمالیزه شده سرعت‌ها به عدد بدون بعد (نسبت مقاومت ویژه الکتریکی سازند به مقاومت آب سازندی (F_w)) مقایسه شده است.

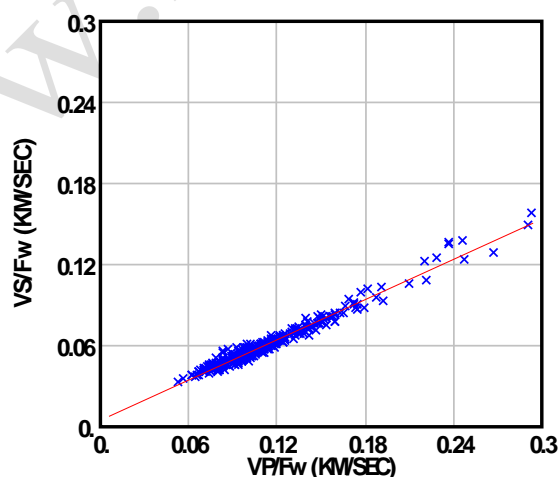
$$F_w = RT/R_w \quad (5)$$

که در آن F_w فاکتور مقاومت سازند (بدون بعد)، RT مقاومت ویژه الکتریکی سازند (اهم متر) و R_w مقاومت ویژه الکتریکی آب سازند مخزنی می‌باشد.

شکل‌های (۵) و (۶) رابطه سرعت‌های امواج صوتی تراکمی و برشی و رابطه بهبود یافته آن‌ها را با نرمالیزه شدن به فاکتور مقاومت الکتریکی سازند در بازه‌ای که اطلاعات مورد نیاز وجود داشته است، نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌ها قابل برداشت است، ضریب تعیین همبستگی میان سرعت‌ها با نرمالیزه نمودن به نسبت فاکتور مقاومت الکتریکی سازند از ۰/۴۴ به ۰/۹۵۸ افزایش یافته است.



شکل (۵): رابطه همبستگی میان سرعت‌های امواج صوتی تراکمی و برشی ($R^2=0.448878$)



شکل (۶): بهبود رابطه همبستگی میان سرعت‌های امواج صوتی تراکمی و برشی با نرمالیزه شدن به فاکتور مقاومت الکتریکی سازند ($R^2=0.958278$)



۴- نتیجه گیری

در این مطالعه در ابتدا با استفاده از روابط تجربی معتبر در سازندهای ماسه سنگی، ماسه سنگ شیلی، شیلی و محاسبه سرعت موج صوتی برشی بر اساس آن‌ها و مقایسه با سرعت موج صوتی برشی واقعی در بازه عمقی موجود، مشاهده می شود که این روابط تجربی با دقت تقریباً یکسانی به تخمین سرعت انتشار امواج برشی می پردازند.

با استفاده از پارامتر حجم شیل در محاسبات، همانگونه که در روابط ویلیامز (۱۹۹۰) و هن و همکاران (۱۹۸۶) قابل مشاهده است، میزان ضریب تعیین همبستگی سرعت امواج برشی تخمینی و واقعی افزایش یافته است. به طوریکه رابطه تجربی ویلیامز با در نظر گرفتن حد برش حجم شیل به میزان ۲۷٪ (میانگین حجم شیل در عمق بررسی) همبستگی بهتری را با داده های سرعت برشی واقعی سازند نشان می دهد.

همچنین بیشترین ضریب تعیین همبستگی با تداخل حاصل از رابطه هن و همکاران (۱۹۸۶) در حجم رس بالا (بین ۳۵٪-۴۰٪) می باشد. در واقع هر چه میزان حجم شیل سازند بیشتر باشد روابط تجربی بر حسب تداخل جهت تخمین سرعت موج صوتی برشی تخمین بهتری خواهد بود.

سرعت موج صوتی برشی با چگالی سازند (RHOB)، حجم شیل (VCL)، نمودار اشعه گاما (GR)، مقاومت ویژه سازند (RT)، تداخل نوترون (TNPH) و سرعت تراکمی سازند (Vp) همبستگی نسبتاً خوبی دارد، که بیشترین ضریب تعیین همبستگی سرعت برشی (Vs) با سرعت موج صوتی تراکمی سازند می باشد.

رابطه خطی تک متغیره میان سرعت موج صوتی تراکمی و برشی از ضریب تعیین همبستگی در حدود ۰/۸۹۶ برخوردار است که به دلیل وجود لایه های سیلتی و مادستونی در بین لایه های ماسه سنگی می باشد.

با بهره گیری از رگرسیون غیر خطی چندمتغیره و پارامترهای سرعت تراکمی، مقاومت ویژه الکتریکی سازند، چگالی سازند، تداخل نوترون و حجم شیل سازند ضریب تعیین همبستگی رابطه به ۰/۹۲ ارتقا یافته است.

تحلیل تاثیر مقاومت ویژه الکتریکی سازند در روابط تجربی میان سرعت های موج صوتی برشی و تراکمی نشان می دهد که نرمالیزه شدن سرعت ها به فاکتور مقاومت ویژه سازند (F_w) ضریب تعیین همبستگی میان سرعت ها رابه ۰/۹۵ افزایش می دهد.

تشکر و قدردانی

اینجانب از شرکت نفت خزر به دلیل مساعدت و حمایت از مقاله حاضر کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

علائم و متغیرها

DTS: زمان گذردهی موج صوتی برشی (میکرو ثانیه بر متر)

Rsh: مقاومت الکتریکی ویژه شیل (اهم متر)

F: فاکتور مقاومت الکتریکی سازند (بدون بعد)

F_w : فاکتور مقاومت الکتریکی سازند (بدون بعد)

Vsh: حجم رس / شیل (کسر کوچکتر از واحد)

VCL: حجم رس / شیل (کسر کوچکتر از واحد)

Rw: مقاومت ویژه آب سازندی (اهم متر)

RHOB: چگالی سازند (گرم بر سانتی متر مکعب)

GR: نمودار اشعه گاما (GAPI)

RT: مقاومت ویژه الکتریکی سازند (اهم متر)

TNPH: تداخل نوترون (کسری بین ۰/۴۵_۰/۱۵)



Rw: مقاومت ویژه آب سازند مخزنی (اهم متر)

PHI-Vs, PHI-Vp: تخلخل حاصل از رابطه تجربی هن و همکاران با تاثیر حجم شیل و سرعت های انتشار موج صوتی تراکمی

و برشی (عدد کسری (0/5_))

PHI: تخلخل (عدد کسری (0/5_))

VS: سرعتانتشار موج صوتی برشی (کیلومتر بر ثانیه)

VP: سرعت انتشار موج صوتی تراکمی (کیلومتر بر ثانیه)

VS/Fw: سرعت انتشار موج صوتی برشی نرمالیزه شده به فاکتور مقاومت الکتریکی سازند (کیلومتر بر ثانیه)

VP/Fw: سرعت انتشار موج صوتی تراکمی نرمالیزه شده به فاکتور مقاومت الکتریکی سازند (کیلومتر بر ثانیه)

مراجع

- 1- Analysis of effect of using estimated shear wave data as compared to measured compressional and shear wave sonic log, Felix ,Onovughe Oghenekohwo, A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Geological Sciences University of CapeTown, May, 2010.
- 2- The Rock Physics of AVO, Stanford Rock Physics Laboratory - Gary Mavko
- 3- Sandstone and Limestone Porosity Determination from Shear and Compressional Wave Velocity, S. N. Domunico, Amoco Production Co., 1983.
- 4- THE INFLUENCE OF BOREHOLE BREAKOUT IN SHEAR WAVE VELOCITY PREDICTION: A CASE STUDY OF "PLEADES" WELL, SOUTH SUMATERA – INDONESIA, (1)Septian Prahastudhi, (1)Intan Adriani Putri, (1)Ayi Syaeful Bahri, (2)Yuda Faisal Yushendri, 2012
- 5- Travel Time Modelling using Gamma Ray and Resistivity Log in Sand Shale Sequence of Gandhar Field D.N.Tiwary, Birbal Singh, R.T.Arasu, M.Rhaman, P.Saha & Mahesh Chandra, GEOPIC, ONGC, Dehradun, 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad-2004, India PP 146-151
- 6- RESISTIVITY/POROSITY/VELOCITY RELATIONSHIPS FROM DOWNHOLE LOGS: AN AID FOR EVALUATING PORE MORPHOLOGY, Peter D. Jackson, 2 Richard D. Jarrard, 3 Christopher J. Pigram, 4 and Jonathan M. Pearce, McKenzie, J.A., Davies, P.J., Palmer-Julson, A., et al., 1993 Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 133
- 7- Shear velocity prediction from wireline logs, an example from Carnarvon Basin, NW Shelf, Australia, Mohammad R. Rezaee and James K. Applegate, National Centre for Petroleum Geology and Geophysics, The University of Adelaide 5005 Australia.
- 8- Can P-wave velocities be made more sensitive to pore pressure?, Dan Ebrum and Martin Albertin, BP Americas, Houston, Texas, and Phil Heppard, formerly BP, now ConocoPhillips, Houston, Texas, 2007 SEG Annual Meeting, September 23 - 28, 2007, San Antonio, Texas, Society of Exploration Geophysicists.
- 9- Predicting Subsalt Pore Pressure with Vp/Vs, Saad Saleh, Drill-Sense, Ken Williams, Halliburton, AiJaz Rizvi, Hess Corp, Offshore Technology Conference, 2013, OTC 24157.
- 10- Prediction of shear and Compressional Wave Velocities from petrophysical data utilizing genetic algorithms technique: A case study in Hendijan and Abuzar fields located in Persian Gulf, Moatazadian I.1*, Rahimpour-Bonab H.1, Kadkhodaie-Ilkhchi A.1, Rajoli M.R.2, JGeope 1 (1), 2011, p. 1-17.
- 11- Case study: Comparison on shear wave velocity estimation in Dickman field, Ness County, Kansas, Qiong Wu*, and Christopher Liner Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston, Houston, Texas, SEG San Antonio 2011 Annual Meeting.
- 12- Castagna, J. P., M. L. Batzle, and R. L. Eastwood, 1985, Relationship between compressional-wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks: Geophysics, 50, 571–581, doi:10.1190/1.1441933.
- 13- Greenberg, M. L., and Castagna J. P., 1992, Shear-wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and application: Geophysical Prospecting, 40, 195–209, DOI: 10.1111/j.1365-2478.1992.tb00371.x.
- 14- Han D. H., and Batzle M. L., 2004, Estimate shear velocity based on dry P-wave and shear modulus relationship: SEG, Expanded Abstracts, 23, 1658–1661.
- 15- Empirical relationship between strength and geophysical properties for weakly cemented formations, M.S. Ravi Sharma, Matt O'Regan, C.D.P. Baxter, Kate Moran, Hans Vaziri, Raja Narayanasamy, Journal of Petroleum Science and Engineering 72 (2010) 134–142.



Effect of Formation Resistivity on Modifying Shear Wave Velocity Estimation

Sedigh.M¹, Tokhmchi.B², Rasuli.V³, Gity.M.M⁴
Shahrood University of Technology
ravak.m65@gmail.com

¹ MS.c Student of Drilling and Production Engineering, Shahrood university of Technology, Iran.

² Associate Professor of Department of Geophysics, Petroleum and Mining Eng, Shahrood university of Technology, Iran.

³ Senior Lecturer of Department of Petroleum Eng, Curtin university, Australia.

⁴ Senior Petrophysic Specialist of KEPCO, NIOC, Iran.



Abstract

S-wave and P-wave velocities have had many application in Petroleum Industry, Specially in geophysical exploration analysis, lithology identification, Formation overpressure detection, Source Rock evaluation, Formation Porosity determination and Hydrocarbon type identification and etc. Also by using these type of Petrophysical data, engineers can estimate some of Rock mechanical properties of formation, provide a better drilling challenges that related to wellbore instability problems or well production challenges like sand production. Many empirical equation and models have been developing for estimating and optimizing shear wave velocity from some formation physical parameters based on seismic data interpretation, Experimental studies or petrophysical data. Some of these equations are applicable just for a special lithology and/or special region. In this study, at first porosity and shale volume relation with shear wave velocity estimation in a reservoir interval of one well with mix formation lithology composed of sand, silt and mudstone was investigated. The multivariable regression with correlation coefficient of 0.92 presented and then the effect of resistivity on shear wave velocity estimation analysed. We found that by involving resistivity in term of dimensionless parameter (formation factor) and normalizing the linear relation between S-wave and P-wave velocities by Formation factor the correlation coefficient would be increased from 0.44 to 0.958.

Key Words: Correlation Coefficient, Formation Resistivity, Shear Wave Velocity, Compressional Wave Velocity