

## برآورد رابطه همبستگی $V_p - V_s$ و تعیین مدول‌های کشسان در سازندهای کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی

ملیحه سادات کاظمی<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۱۱)

### چکیده

سرعت‌های امواج تراکمی و بُرشی در تعیین جنس سنگ، تخلخل، درجه سنگ‌شدگی و تشخیص نوع شاره سنگ به کار می‌روند. زمان سیر امواج بُرشی و تراکمی در تعیین خواص مکانیکی و رفتاری سنگ‌ها نیز کاربرد دارد. در صورتی که داده‌های سرعت موج بُرشی موجود نباشند، می‌توان نسبت  $V_p/V_s$  را از روابط تجربی (بین سرعت‌های امواج تراکمی و بُرشی) محاسبه کرد. با توجه به شرایط خاص هر منطقه بهتر است، روابط پیش‌گفته را برای نواحی گوناگون به‌طور اختصاصی محاسبه کرد.

در این مقاله، با استفاده از نگاره صوتی بُرشی دوقطبی (DSI)، در مجاورت دو چاه اکتشافی در میدان پارس جنوبی برای سازندهای کنگان و دالان چهار رابطه همبستگی بین  $V_p$  و  $V_s$  به‌دست آمده است. در چاه اول میزان همبستگی داده‌ها در لایه K1 بیشتر از لایه K2 است. همچنین همبستگی بین  $V_p$  و  $V_s$  در لایه K4 در مقایسه با لایه K3 بیشتر است. در چاه دوم میزان همبستگی داده‌ها در لایه K1 و K2 تقریباً برابر است. همچنین میزان همبستگی بین سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  برای سنگ‌های مخزن دیواره چاه دوم در لایه K3 کمتر از لایه K4 محاسبه شده است. بدین ترتیب با استفاده از روابط داده شده برای کل منطقه می‌توان سرعت موج بُرشی را با ضریب همبستگی بزرگی برآورد کرد. همچنین در مجاورت یک چاه اکتشافی در میدان پارس جنوبی برای لایه‌های K1 و K2 در سازند کنگان و لایه‌های K3 و K4 در سازند دالان مدول‌های کشسان مورد بررسی قرار گرفت. مدول یانگ با استفاده از داده‌های چاه و روابط همبستگی تعیین شده مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر مدول یانگ محاسبه شده با استفاده از داده‌های چاه و رابطه همبستگی در نواحی فاقد شیل شباهت زیادی را آشکار می‌سازند.

**واژه‌های کلیدی:** رابطه همبستگی، سرعت موج تراکمی، سرعت موج بُرشی، نگاره DSI، مدول‌های کشسان، سازندهای کنگان و دالان، میدان گازی پارس جنوبی

## Estimation of $V_p - V_s$ correlation and determination of elastic modulus for Kangan and Dalan Formations in South Pars field

Malihe Sadat Kazemi<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup>Technical and Professional University, Tehran, Iran

(Received: 11 February 2013, accepted: 2 November 2013)

### Summary

Geophysicists and engineers require both accurate and high-resolution seismic surveys. A detailed analysis of the interrelationships between seismic velocity, seismic attenuation, porosity, and permeability makes reliable predictions about the petrophysical properties

\*Corresponding author:

mkskazemi18@gmail.com

\*نگارنده رابط:

of hydrocarbon reservoirs. Surface reflections, VSP and cross-hole seismic methods have been used to determine velocities and lithological discontinuities within a reservoir. Seismic velocities of the sedimentary rocks have been used as indicators of their petrophysical properties.  $V_p/V_s$  ratio is as a lithology indicator (Domenico, 1984).  $V_p/V_s$  can be used to discriminate between limestones and dolomites. Also,  $V_p/V_s$  has been used successfully for direct hydrocarbon detection, especially with AVO techniques.

In general, the velocity ratio depends on the matrix of material, state of saturation, degree of consolidation, differential pressure, porosity and pore geometry. The effect of a fluid on  $V_p/V_s$  is significant, but not as much as that of lithology. Tight gas sandstones typically have a  $V_p/V_s$  value lower than 1.7, while shales usually have a  $V_p/V_s$  value higher than 1.7. The presence of gas-saturation in sandstones will even lower the  $V_p/V_s$  further (when the  $V_p/V_s$  ratio is close to 1.6) and overpressure can make  $V_p/V_s$  ratio even less ( $<1.5$ ). These results can be used to interpret the seismic data in tight gas sandstones. Pickett (1963) demonstrated  $V_p/V_s$  as a lithology indicator. Castagna et al. (1985) introduced some empirical relations that relate  $V_p$  to  $V_s$ .  $V_p/V_s$  is sensitive to gas in most clastic reservoirs and  $V_p/V_s$  often shows a reduction due to the presence of gas (Kithas, 1976; McCormack et al., 1985). Castagna et al. (1993) published other empirical relations that relate  $V_p$  to  $V_s$ .

Elastic properties of rocks are also most important in determination of rock types. The elastic properties of rocks can be determined from the velocities of the longitudinal, transverse waves, and density. The Lamé parameter ( $\lambda$ ) is a measure of a rock brittleness, which is a function of Young's modulus. This parameter plays an important role in the discrimination of gas sands from carbonates or shale in sedimentary rocks. Therefore, well logs are used to determine the elastic properties of rocks. A classical sonic log employs the acquisition and analysis of the data with a simple monopole source. In general, the compressional wave velocity is easily determinable in all rock types with a full-waveform sonic tool. A logging device which has been used to analyze the formations around the borehole is called Dipole Shear Sonic Imager (DSI). A dipole source generates the flexural modes, which determine the shear velocity. Since compressional waves travel faster than any other waves, travel times are easily determined from the first arrival for each receiver. For hard formations, where the shear wave velocity is greater than the fluid velocity of the P-wave, shear waves are present in the recorded wave trains. When the shear velocity is less than fluid velocity of P-wave, the shear mode does not exist for the monopole. The shear velocity can be determined either by inverting a Stoneley wave velocity, or by conducting a flexural mode survey. Inverting the Stoneley wave velocity for detection of shear velocity is a good technique in soft rocks.

In this investigation logs from two wells in the South Pars Gas Field are analyzed. From the analysis of DSI,  $V_p$ - $V_s$  relations are developed. However, the relations between elastic properties of rocks and petrophysical properties are found for calculation of elastic properties. For Kangan (K1 and K2) and Dalan (K3 and K4) formations, the relationships between  $V_p$  and  $V_s$  in two boreholes are determined. P-wave versus S-wave velocity crossplots for all layers show a good relationship. An estimation of S-wave velocity based on  $V_p$  was used for regions for which we did not have cores and log data. Relations between  $V_p$  and  $V_s$  for other parts of this field were found based on S-wave velocity as well. Finally, the bulk modulus, Young's modulus, shear modulus and  $\lambda$  are calculated based on the well log data.

**Keywords:** Correlation relation, P-wave velocity, S-wave velocity, dipole shear sonic imager, elastic modulus, Kangan and Dalan Formations, South Pars gas field

## ۱ مقدمه

با تصویرهای لرزه‌ای بسیار بیشتر است. از نمودار صوتی، نمودار چگالی یا نمودار نوترون می‌توان تخلخل‌های سنگ را به دست آورد. نمودار صوتی زمان عبور موج بر حسب عمق را ثبت می‌کند. زمان عبور میان لایه‌ای برای یک سازند به سنگ‌شناسی و تخلخل بستگی دارد. اندازه‌گیری‌های امواج لرزه‌ای شامل لرزه‌ای اکتشافی، لرزه‌ای درون‌چاهی، تصویربرداری فراصوتی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. یکی از پارامترهای عمده در روش‌های لرزه‌سنجی میزان بسامد است (شکل ۱).

شلمبرژه (۱۹۳۵) نشان داد که چگونه در یک بازه کوچک با استفاده از دو گیرنده و یک فرستنده سرعت موج صوتی در سنگ اندازه‌گیری می‌شود. در دهه ۱۹۵۰ نمودارگیری با نمودارهای صوتی آغاز شد. در ابتدا گیرنده‌ها و فرستنده‌ها فقط به صورت تک‌قطبی عمل می‌کردند. این ابزارها در ابتدا فقط اولین رسیده‌های امواج تراکمی را برای تعیین سرعت‌های این امواج در سازند دریافت می‌کردند. با توسعه این ابزار امواج بُرشی نیز با آنها دریافت شدند. در نتیجه با ثبت دو نوع موج تراکمی و بُرشی با این ابزار تعیین بعضی از خواص سازند، نوع سنگ، محتوای شاره و کندی امکان‌پذیر است. در سازندهای سخت می‌توان از مُد تک‌قطبی ابزار استفاده کرد. اما در مورد سنگ‌های سست (در سازندهایی که کاملاً سنگ نشده‌اند) اندازه‌گیری سرعت امواج بُرشی به‌طور مستقیم امکان‌پذیر نیست. در این حالت از مُد دوقطبی استفاده می‌شود. با استفاده از اندازه‌گیری‌های صوتی می‌توان تخلخل اولیه، تخلخل ثانویه، نوع سنگ، نفوذپذیری، نوع شاره، شکستگی‌ها و جهت آنها را تعیین کرد (آرویو فرانکو و همکاران، ۲۰۰۶).

تغییر در ساختار یا ترکیب سنگ‌ها تغییراتی در مشخصه‌های انتشار امواج لرزه‌ای دارد. در پتروفیزیک و لرزه‌نگاری، موج بُرشی کاربرد فراوانی دارد. در واقع Vp/Vs شاخصی برای تعیین سنگ‌شناسی است (پیکت، ۱۹۶۳؛ کیتاس، ۱۹۷۶؛ تاتهام، ۱۹۸۲). در کرنات‌ها این نسبت می‌تواند برای تشخیص هیدروکربورها در دولومیت یا سنگ آهک به کار رود (انسلی، ۱۹۸۵؛ تاتهام و استوفا، ۱۹۷۶). با افزایش درصد اشباع سنگ با هیدروکربورهای گازی، Vp کاهش می‌یابد. اگرچه Vp و Vs به نوع شاره حساس هستند، اما نسبت Vp/Vs در مقایسه با Vp یا Vs به‌طور منفرد به طبیعت شاره حساس‌تر است (هامادا، ۲۰۰۴).

اگرچه امروزه نگاره صوتی‌برشی دوقطبی کاربرد فراوانی در چاه‌ها دارد، اما هنوز چاه‌ها و میدان‌های بسیاری وجود دارند که فقط دارای نگاره‌های تک‌قطبی هستند و به همین علت نیاز به برآورد سرعت موج بُرشی از سرعت موج تراکمی با استفاده از روابط تجربی وجود دارد. از بررسی‌های نظری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و همچنین روابط تجربی و آماری برای تعیین رابطه بین سرعت موج تراکمی و بُرشی استفاده شده است که روابط تجربی و آماری برآوردهای بهتری از سرعت موج بُرشی را به دست داده‌اند (ونگ، ۲۰۰۰). از طرفی تحقیقات بیشتر مربوط به سنگ‌های سیلیکاته بوده و به سنگ‌های کرناته توجه کمتری شده است (ورور و همکاران، ۲۰۰۸). روابط تجربی مانند روابط هان و همکاران (۱۹۸۶) و کاستاگنا و همکاران (۱۹۹۳) برای برآورد سرعت موج بُرشی از سرعت موج تراکمی وجود دارد، اما این گونه روابط نیز بیشتر در سازندها و میادین مشابه به کار رفته‌اند.

نگاره‌های چاه ابزارهایی مفید برای تعیین خصوصیات فیزیکی سازندها و لایه‌های زمین بر حسب عمق محسوب می‌شوند. دقت و قدرت تفکیک نگاره‌های چاه در مقایسه

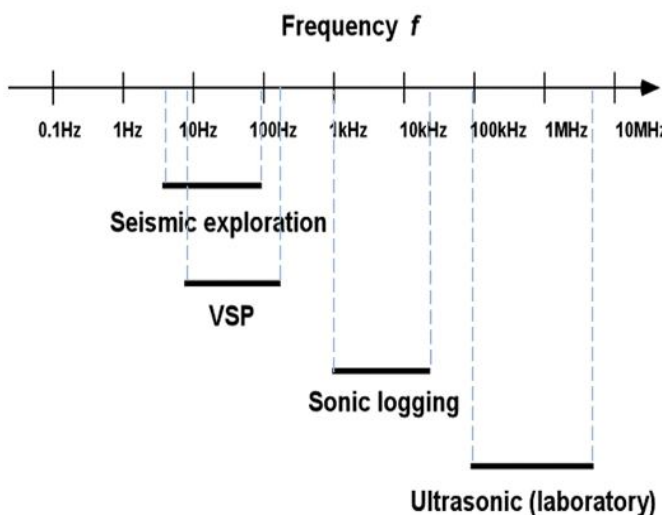
## ۲ نگاره صوتی برشی دوقطبی

نگاره صوتی برشی دوقطبی در ۱۹۹۱ از سوی شرکت شلمبرژه عرضه شد. ابزار صوتی برشی دوقطبی یکی از ابزارهای نمودارگیری درون چاهی با قدرت تفکیک بالا است. ابزار DSI تا دمای  $175^{\circ}\text{C}$  و فشار ۲۰۰۰۰ psi کاربرد دارد. بیشترین سرعت نمونه برداری در مُد هشت جبهه موج ۳۶۰۰ ft/hr و در مُد شش جبهه موج هم‌زمان ۹۰۰ ft/hr است. این ابزار دارای دو مُد تک‌قطبی و دوقطبی و دارای این قابلیت است که امواج بُرشی را در دو راستای عمود بر یکدیگر دریافت کند. در این ابزار دو فرستنده دوقطبی متعامد و همچنین دو مجموعه گیرنده که آنها نیز در دو راستای عمود در ابزار تعبیه شده‌اند وجود دارد (شلمبرژه، ۲۰۰۵). در حین نمودارگیری امواج با فرستنده‌های دوقطبی در دو جهت عمود بر هم القا می‌شوند، که یکی در جهت محور x ابزار و دیگری در جهت محور y ابزار است. کندی‌های امواج تراکمی، بُرشی و استونلی در هنگام نمودارگیری اندازه‌گیری می‌شوند. از این نمودارها می‌توان وجود گاز در لایه‌ها را مورد بررسی قرار داد. نتایج به‌دست آمده از این نمودارها

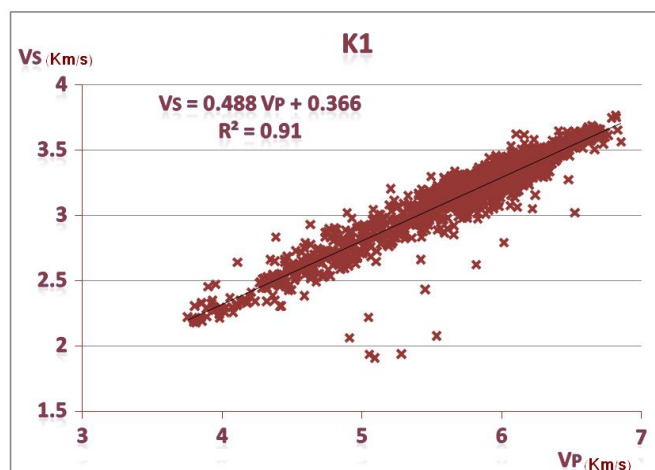
در تفسیر لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی، VSP و AVO کاربرد دارند.

## ۳ رابطه همبستگی بین Vs و Vp

نسبت  $Vp/Vs$  در حکم شاخصی برای شناسایی نوع سنگ، تعیین درجه سنگ‌شدگی و تشخیص شماره درون‌منفذی به کار می‌رود. نسبت  $Vp/Vs$  برای سنگ خشک یا سنگ اشباع از گاز بدون تخلخل و اختلاف فشار تقریباً ثابت است، در صورتی که در سنگ مرطوب بستگی به تخلخل و اختلاف فشار دارد. سرعت موج تراکمی به تنهایی شاخص خوبی در تشخیص بعضی از خواص سنگ نیست. اطلاعات کامل‌تر با در نظر گرفتن سرعت موج بُرشی به‌دست می‌آید. پیکت (۱۹۶۳) با استفاده از داده‌های مغزه نسبت  $Vp/Vs$  برای سنگ آهک را  $1/9$  و برای دولومیت  $1/8$  به‌دست آورد. گلدبرگ و گانت (۱۹۸۸) داده‌های نمودار صوتی با جبهه موج کامل را در توالی سنگ آهک- شیل بررسی و نسبت  $Vp/Vs$  را برای مرزهای سنگ آهک- شیل تعیین کردند. نسبت  $Vp/Vs$  به وجود گاز حساس است و اغلب با وجود گاز



شکل ۱. محدوده بسامدی اندازه‌گیری‌های صوتی در مقایسه با DSI (بریه، ۲۰۰۱).



شکل ۲. همبستگی بین Vs و Vp با مقدار بالای  $R^2 = 0.91$  برای لایه K1 با استفاده از داده‌های نگاره صوتی بُرش‌ی دوقطبی چاه‌های I و II پارس جنوبی در ناحیه مخزنی.

پیکت (۱۹۶۳) روابطی را مطرح کرد که برای سنگ آهک (رابطه ۱)، دولومیت (رابطه ۲)، ماسه‌سنگ بدون شیل (رابطه ۳) و ماسه‌سنگ همراه سنگ آهک (رابطه ۴) صادق است.

$$V_s = V_p/1.9 \quad (۱)$$

$$V_s = V_p/1.8 \quad (۲)$$

$$V_s = V_p/1.6 \quad (۳)$$

$$V_s = V_p/1.7 \quad (۴)$$

نمونه‌هایی از روابط بین Vs و Vp را کاستاگنا و همکاران (۱۹۹۳ و ۱۹۸۵) عرضه کرده‌اند. برای تعیین Vs از Vp روابطی وجود دارند که با شرایط مخزن ضرایب آنها تغییر می‌کنند. تعدادی از این گونه روابط به شرح زیر هستند:

$$V_s = 0.8619 V_p - 1.172, \quad (۵)$$

رابطه (۵) فقط برای گِل سنگ (mudstone) (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۸۵) صادق است.

$$V_s = -0.05509 V_p^2 + 1.0168 V_p - 1.0305, \quad (۶)$$

و رابطه (۶) فقط برای سنگ آهک (Limestone) صادق است (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۹۳).

$$V_s = 0.5832 V_p - 0.0777, \quad (۷)$$

کاهش می‌یابد (کیتاز ۱۹۷۶؛ مک کورمک و همکاران، ۱۹۸۵). پاسخ نسبت Vs/Vp سنگ‌های کربناته به وجود گاز متفاوت است. این نسبت در کربنات‌ها با حفره‌های کوچک (آنو، ۱۹۸۵) و در غیاب کربنات‌ها با وجود حفره‌های گردتر کاهش می‌یابد. زو و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که حضور شکستگی‌ها سبب تغییر در Vs/Vp می‌شود. روجاز (۲۰۰۸) روشن ساخت که تاثیر جنس سنگ در مقایسه با تاثیر شاره روی Vs/Vp بیشتر است.

در محیط ناهمسانگرد نسبت Vs/Vp می‌تواند کمتر از  $\sqrt{2}$  باشد و برای سنگ‌های اشباع شده با گاز این میزان تا  $1/3$  کاهش می‌یابد (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۸۵). هورنبی و مورفی (۱۹۸۷) و مورفی و همکاران (۱۹۹۲) نشان دادند که نسبت Vs/Vp با افزایش رُس افزایش می‌یابد. کاستاگنا و همکاران (۱۹۸۵) و هان و همکاران (۱۹۸۶) روابط تجربی بین نسبت سرعت، تخلخل و محتوی رُس را مطرح کردند. معادله کاستاگنا و همکاران (۱۹۸۵) نشان داد که افزایش در نسبت سرعت‌ها گاهی به علت افزایش تخلخل است. با مدل‌سازی سرعت‌ها برای رسوبات نرم و رسوبات سخت، لی (۲۰۰۳) روشن ساخت که نسبت سرعت‌ها به تخلخل بستگی دارد.

جهت‌ها است. مدول حجمی نشان‌دهنده تغییر در حجم در اثر فشار وارده است در صورتی که مدول یانگ تغییر در طول به واسطه اعمال فشار است.

سرعت امواج تراکمی و بُرشی با مدول‌های کشسان رابطه دارد.  $Vp$  به  $\lambda$  و  $\mu$ ، و  $Vs$  به  $\mu$  بستگی دارد. کمیت‌هایی مانند مدول یانگ، مدول بُرشی و چگالی عبور امواج از محیط را توصیف می‌کنند (شون، ۲۰۱۱).

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad (11)$$

مدول بالک  $K$  شاخصی برای تراکم‌پذیری شاره و سنگ است.

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $E$  مدول یانگ است.

#### ۴ تعیین روابط همبستگی بین $Vp$ و $Vs$ و مدول‌های

کشسان در ناحیه مورد بررسی

به‌طور کلی در صورتی که داده‌های سرعت موج بُرشی برای چاهی موجود نباشد، مقدار سرعت موج بُرشی را می‌توان

همچنین، رابطه (۷) فقط برای دولومیت‌ها صادق است (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۹۳).

$$V_s = 0.8042 V_p - 0.8559, \quad (8)$$

رابطه (۸) برای شیل‌ها دلالت دارد.

$$V_s = 0.7700 V_p - 0.8674, \quad (9)$$

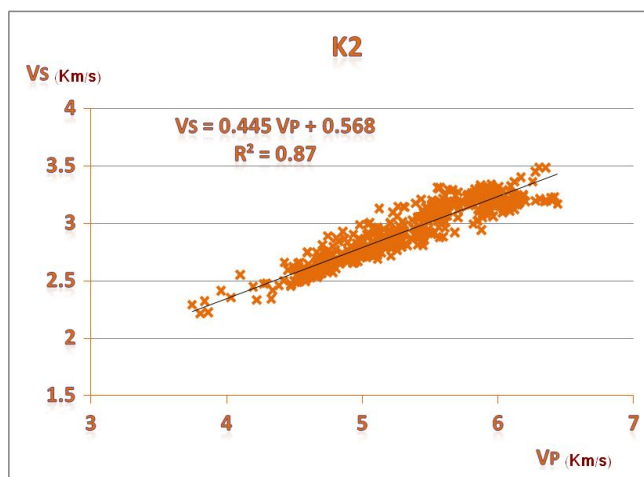
رابطه (۹) برای ماسه سنگ صادق است.

بروچر (۲۰۰۵) رابطه‌ای بین  $Vp$  و  $Vs$  عرضه کرد

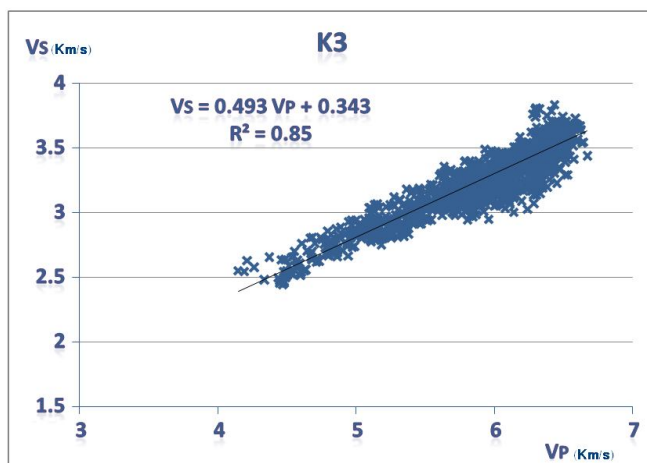
(رابطه ۱۰). در این رابطه  $1/5 < Vp < 8$  (km/s) است.

$$V_s \text{ (km/s)} = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4, \quad (10)$$

اغلب سنگ‌ها وقتی تحت تاثیر فشار روباره قرار می‌گیرند، حجمشان به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. مدول‌های کشسان نشان‌دهنده تمایل ذاتی پس از اعمال نیرو در تغییر شکل کشسانی آنها هستند. مدول‌های کشسان با توجه به چگونگی تنش و کرنش تعیین می‌شوند. خواص کشسانی سنگ‌ها نقش مهمی در رفتار فیزیکی و پتروفیزیکی آنها ایفا می‌کند. مدول یانگ توصیف‌کننده تمایل به تغییر شکل در راستای اعمال نیرو است. مدول بُرشی تمایل به بُرش در برابر نیروی وارده است. مدول حجمی عکس تراکم‌پذیری است و در آن، تمایل به دگرشکلی در همه



شکل ۳. همبستگی بین  $Vp$  و  $Vs$  با مقدار  $R^2 = 0.87$  برای لایه K2 با استفاده از داده‌های نگاره صوتی بُرشی دوقطبی چاه‌های I و II پارس جنوبی در ناحیه مخزنی.



شکل ۴. همبستگی بین Vs و Vp با مقدار  $R^2 = 0.85$  برای لایه K3 با استفاده از داده‌های نگاره صوتی بُرشی دوقطبی چاه‌های I و II پارس جنوبی در ناحیه مخزنی.

همچنین روابط همبستگی بین سرعت‌های Vs و Vp در چاه II برای سازند کنگان در لایه‌های K1 (رابطه ۱۷) و K2 (رابطه ۱۸) و سازند دالان در لایه‌های K3 (رابطه ۱۹) و K4 (رابطه ۲۰) محاسبه شد.

$$V_S = 0.470 V_{P+} + 0.470, \quad (17)$$

$$V_S = 0.426 V_{P+} + 0.674, \quad (18)$$

$$V_S = 0.461 V_{P+} + 0.589, \quad (19)$$

$$V_S = 0.518 V_{P+} + 0.247, \quad (20)$$

در ناحیه مخزنی با استفاده از داده‌های نگاره صوتی بُرشی دوقطبی در چاه I میزان همبستگی بین Vs و Vp برای سازند کنگان زیاد است. میزان پراکندگی داده‌ها در لایه K2 در مقایسه با لایه K1 به علت فشار منفذی، بیشتر و میزان پراکندگی داده‌ها در لایه K3 در مقایسه با لایه K4 بیشتر است. در چاه I مقدار  $R^2$  برای سازند کنگان و در لایه K1 برابر با ۰/۹۷ و در لایه K2 برابر با ۰/۸۸ محاسبه شده است. همچنین  $R^2$  برای سازند دالان در لایه K3 برابر با ۰/۸۵ است، درحالی‌که در لایه K4 برابر با ۰/۹۸ محاسبه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در همه موارد همبستگی زیادی بین

از روابط تجربی بین سرعت‌های امواج تراکمی و بُرشی برآورد کرد. اما با توجه به شرایط خاص هر منطقه، بهتر است روابط پیش‌گفته برای هر ناحیه به‌طور اختصاصی محاسبه شوند.

در این مقاله با استفاده از نگاره DSI رابطه همبستگی بین سرعت‌های Vs و Vp برای سازندهای کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی به‌دست آمد. میدان گازی پارس جنوبی روی خط مرزی مشترک ایران و قطر در خلیج فارس قرار دارد. این میدان یکی از اصلی‌ترین منابع انرژی ایران است و از بزرگ‌ترین منابع گازی جهان به‌شمار می‌رود.

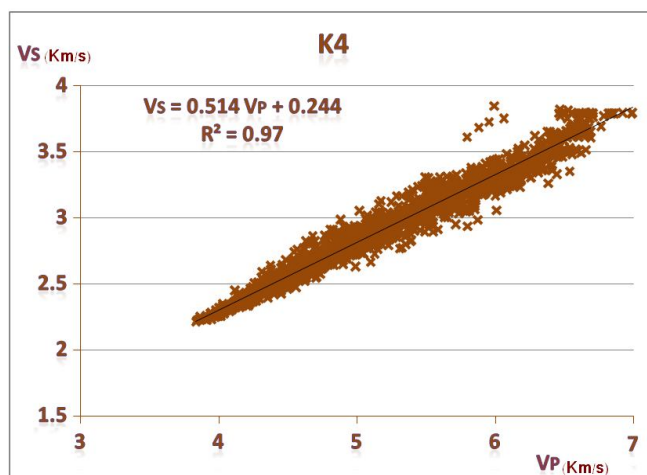
روابط همبستگی از نگاره DSI چاه I بین سرعت‌های Vs و Vp برای سازند کنگان در افق‌های K1 (رابطه ۱۳) و K2 (رابطه ۱۴) و سازند دالان در لایه‌های K3 (رابطه ۱۵) و K4 (رابطه ۱۶) محاسبه شد.

$$V_S = 0.502 V_{P+} + 0.266, \quad (13)$$

$$V_S = 0.475 V_{P+} + 0.391, \quad (14)$$

$$V_S = 0.439 V_{P+} + 0.604, \quad (15)$$

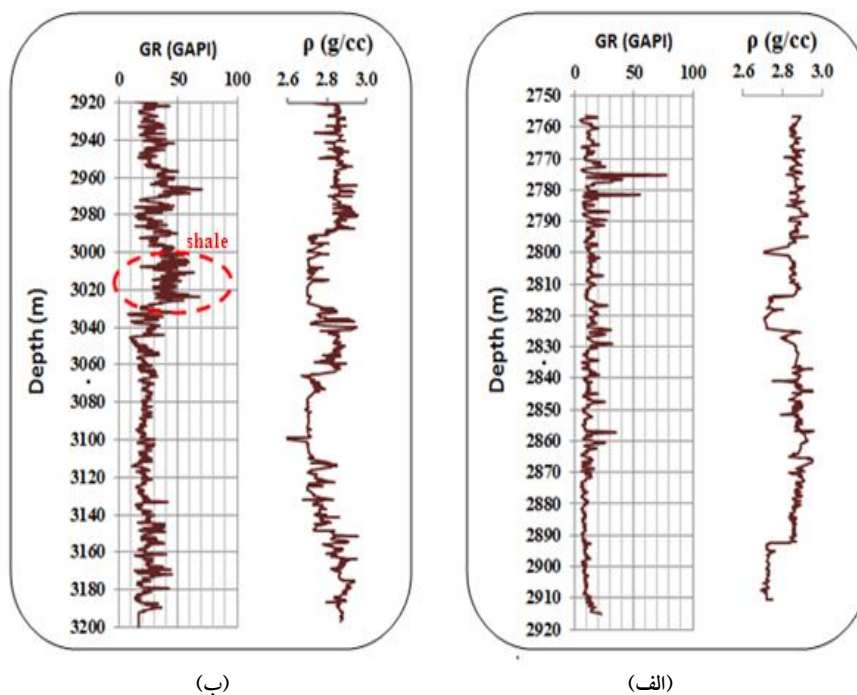
$$V_S = 0.499 V_{P+} + 0.295, \quad (16)$$



شکل ۵. همبستگی بین  $V_p$  و  $V_s$  با مقدار بالای  $R^2 = 0.97$  برای لایه K4 با استفاده از داده‌های نگاره صوتی‌پُرشنی دوقطبی چاه‌های I و II پارس جنوبی در ناحیه مخزنی.

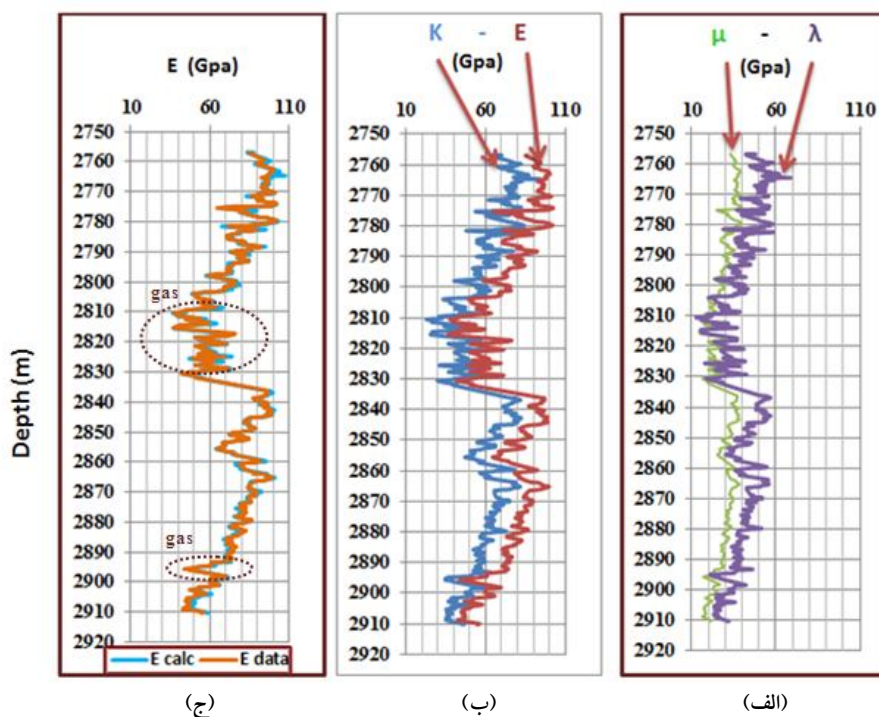
محاسبه شده است. همچنین  $R^2$  برای سازند دالان در لایه K3 برابر با ۰/۸۷ به دست آمده در حالی که در لایه K4 برابر با ۰/۹۷ محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در اینجا نیز در همه موارد همبستگی نسبتاً زیادی بین  $V_p$  و  $V_s$  در روابط محاسبه شده وجود دارد.

$V_p$  و  $V_s$  در روابط محاسبه شده وجود دارد. در چاه II نیز روابط همبستگی بین سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  برای سنگ‌های مخزن دیواره چاه در لایه‌های K1، K2، K3 و K4 محاسبه شد. مقدار  $R^2$  برای سازند کنگان در لایه K1 برابر با ۰/۸۴ و در لایه K2 برابر با ۰/۸۶



شکل ۶. نمودارهای چگالی و گاما برحسب عمق (الف) در سازند کنگان و (ب) در سازند دالان: در لایه K3 میزان شیل در محدوده مشخص شده به نسبت زیاد است.

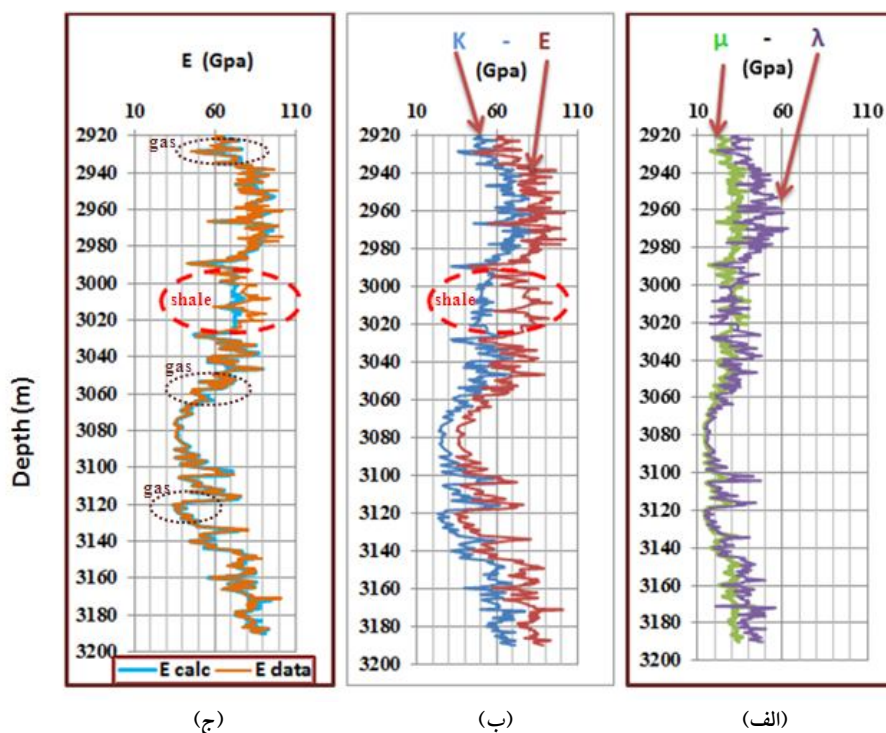




شکل ۷. نمودارهای چاه در سازند کنگان (الف) ثابت‌های لامه، (ب) مقایسه مدول یانگ با مدول کپهای و (ج) مقایسه مدول یانگ محاسبه شده از داده‌ها و مدول یانگ به‌دست آمده از رابطه همبستگی، برحسب عمق.

۶ نمودارهای چگالی و گاما برحسب عمق در چاه I داده شده‌است. با توجه به نمودارها در بخشی از لایه K1 و در لایه K3 و در محدوده عمق ۳۰۰۰ تا ۳۰۳۰ میزان شیل نسبتاً زیاد است. در این محدوده نمودارهای مدول یانگ محاسبه شده از داده‌ها و مدول یانگ به‌دست آمده از رابطه همبستگی در مقایسه با عمق‌های دیگر مشابهت کمتری را آشکار می‌سازند. در شکل ۷ الف ثابت‌های لامه، در شکل ۷ ب، مقایسه مدول یانگ با مدول کپهای و ۷ ج مقایسه مدول یانگ محاسبه شده از داده‌ها و مدول یانگ به‌دست آمده از رابطه همبستگی، برحسب عمق در سازند کنگان نشان داده شده است. همچنین برای سازند دالان در شکل ۸ الف، ثابت‌های لامه، در شکل ۸ ب، مقایسه مدول یانگ با مدول کپهای و ۸ ج، مقایسه مدول یانگ محاسبه شده از داده‌ها و مدول یانگ به‌دست آمده از رابطه همبستگی، برحسب عمق در سازند دالان نشان

همچنین روابط همبستگی بین سرعت‌های Vs و Vp با استفاده از داده‌های دو چاه محاسبه شد. برای سازند کنگان همبستگی بین Vs و Vp در لایه K1 (شکل ۲) و لایه K2 (شکل ۳) آورده شده است. همچنین همبستگی بین Vs و Vp برای سازند دالان در لایه K3 (شکل ۴) و لایه K4 (شکل ۵) داده شده است. در اینجا نیز میزان همبستگی داده‌ها در لایه K4 در مقایسه با سه لایه دیگر بیشتر است. مقدار  $R^2$  برای سازند کنگان در لایه K1 برابر با ۰/۹۱ و در لایه K2 برابر با ۰/۸۷ محاسبه شده است. همچنین  $R^2$  برای سازند دالان در لایه K3 برابر با ۰/۸۵ است، در حالی که در لایه K4 برابر با ۰/۹۷ محاسبه شده است. در این تحقیق ثابت‌های لامه و مدول کپهای با استفاده از داده‌های موجود برای یک چاه تعیین شد. همچنین مدول یانگ با استفاده از داده‌های چاه و روابط همبستگی بین سرعت‌های Vs و Vp محاسبه و مقایسه شد. در شکل



شکل ۸ نمودارهای چاه در سازند دالان (الف) ثابت‌های لامه، (ب) مقایسه مدول یانگ با مدول کپه‌ای و (ج) مقایسه مدول یانگ محاسبه شده از داده‌ها و مدول یانگ به‌دست آمده از رابطه همبستگی، برحسب عمق.

داده شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ در محدوده‌هایی که مقادیر ثابت‌های لامه نزدیک به یکدیگر هستند موید وجود گاز است.

## ۵ بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از تلفیق داده‌های صوتی بُرشی دو قطبی در چاه‌های I و II و همبستگی بین  $V_p$  و  $V_s$  در ناحیه مخزنی (جدول ۱)، نتایج زیر به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روابط تجربی و محاسبه شده می‌توان نتایج را به‌طور خلاصه بررسی کرد:

۱- در صورتی که سرعت امواج بُرشی در چاه موجود نباشد، سرعت موج بُرشی را می‌توان از روابط همبستگی بین سرعت‌های امواج تراکمی و بُرشی برآورد کرد.

۲- روابط همبستگی بین سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  برای یک ناحیه خاص، با توجه به شرایط ناحیه موردنظر باید به‌دست آید. در بیشتر موارد روابط محاسبه شده دقت خوبی در مقایسه با روابط تجربی دارند.

۳- برای تعیین روابط همبستگی با دقت زیاد (در کل مخزن) نیاز به سرعت‌های  $V_p$  و  $V_s$  از داده‌های DSI بود.

جدول ۱. روابط همبستگی محاسبه شده بین  $V_p$  و  $V_s$  با استفاده از داده‌های DSI برای سازندهای کنگان و دالان در دو چاه از میدان پارس جنوبی.

افق‌های مخزنی	روابط همبستگی بین $V_p$ و $V_s$
K1	$V_s = 0.488 V_p + 0.366$
K2	$V_s = 0.425 V_p + 0.568$
K3	$V_s = 0.493 V_p + 0.343$
K4	$V_s = 0.514 V_p + 0.244$

- velocities in sandstones: *Geophysics*, **51**, 2093-2107.
- Hornby, B., and Murphy, W. F., III, 1987, Vp/Vs in unconsolidated oil sands: Shear from stonely: *Geophysics*, **52**, 502-513.
- Kithas, B. A., 1976, Lithology, gas detection, and rock properties from acoustic logging systems: Soc. Prof. Well Log Analysts 17th Annual Symp., R1-R10.
- Lee, M. W., 2003, Velocity ratio and its application to predicting velocities: U. S. Geological Survey Bulletin 2197.
- McCormack, M. D., Justice, M. G., and Sharp, W. W., 1985, A stratigraphic interpretation of shear and compressional wave seismic data for the Pennsylvanian Morrow formation of southeastern New Mexico: AAPG Memoir, **39**, 225-239.
- Murphy, W., Reicher, A., and Hsu, K., 1992, Modulus decomposition of compressional and shear velocities in sand bodies: *Geophysics*, **58**, 227-239.
- Pickett, G. R., 1963, Acoustic character logs and their applications in formation evaluation: *Journal of Petroleum Technology*, **15**, 650-667.
- Rojas, E., 2008, Vp-Vs ratio sensitivity to pressure, fluid, and lithology changes in tight gas sandstones: *First Break*, **26**, 83-86.
- Schlumberger, 2005, Cased hole DSI sonic processing report.
- Schon, J. H., 2011, *Physical Properties of Rocks*, Elsevier.
- Tatham, R. H., and Stoffa, P. L., 1976, Vp/Vs, A potential hydrocarbon indicator: *Geophysics*, **41**, 837-849.
- Tatham, R. H., 1982, Vp/Vs and Lithology: *Geophysics*, **47**, 336-344.
- Verwer, K., Kenter, J. A. M., Braaksma, H., and Van Lanen, X. M. T., 2008, Acoustic properties of carbonates: Effects of rock texture and implications for fluid substitution. *Geophysics*, **73**, B51-B65.
- Wang, Z., 2000, Velocity relationships in granular rocks, seismic and acoustic velocities in reservoir rocks: Recent development, published by Society of Exploration Geophysicists, **3**.
- Xu, X., Hofmann, R., Batzle, M., and Tshering, T., 2006, Influence of pore pressure on velocity in low-porosity sandstone: implications for time-lapse feasibility and pore pressure study, *Geophysical Prospecting*, **54**(5), 565-57
- با افزایش تعداد چاه‌های مورد بررسی، روابط تجربی به‌دست آمده صادق‌تر خواهد شد.
- ۴- مدول‌های کشسان با استفاده از داده‌های DSI در ناحیه مخزنی محاسبه و با نتایج روابط تجربی مقایسه شدند.
- ۵- مدول یانگ با استفاده از داده‌های چاه و روابط همبستگی محاسبه شد و در محدوده‌ای که میزان شیل نسبتاً زیاد است، تشابه بین نمودارها کمتر بود.
- ۶- در محدوده‌هایی که مقادیر  $\lambda$  و  $\mu$  به یکدیگر نزدیک‌اند وجود گاز محتمل‌تر است.

## منابع

- Anno, P. D., 1985, Exploration of the Hunton Group, Anadarko Basin, using shear waves: Presented at the 53rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.
- Arroyo Franco, J. L., Mercado Ortiz, M. A., De, G. S., Renlie, L., and Williams, S., 2006, Sonic investigations in and around the borehole: *Oilfield Review*, **18**, 14-33.
- Brie, A., 2001, Sonic measurements, Sonic measurements overview: Schlumberger report.
- Brocher, T. M., 2005, Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 2081-2092.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Eastwood, R. L., 1985, Relationships between compressional wave and shear wave velocities in clastic 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 Castagna, J. P., and Backus, M. M., Eds., *Offset dependent reflectivity-Theory and practice of AVO analysis: Society of Exploration Geophysicists*.
- Ensley, R. A., 1985, Evaluation of direct hydrocarbon indicators through comparison of compressional and shear wave data: *Geophysics*, **50**, 37-48.
- Goldberg, D., and Gant, W. T., 1988, Shear-wave processing of sonic log waveforms in a limestone reservoir: *Geophysics*, **53**, 668-676.
- Han, D. H., Nur, A., and Morgan, D., 1986, Effects of porosity and clay content on wave