

## کاربرد نسبت $V_p/V_s$ در سرشت نمایی مخزن با استفاده از تخمین سرعت موج برشی و آنالیز چندنشانه‌گری

مسعود سراج‌امانی<sup>1</sup>، رامین نیکروز<sup>2</sup>، علی کدخدائی<sup>3</sup>

<sup>1</sup>دانشجوی ارشد ژئوفیزیک، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، [masoud\\_serajamani@yahoo.com](mailto:masoud_serajamani@yahoo.com)

<sup>2</sup>دانشیار دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، [r.nikrouz@urmia.ac.ir](mailto:r.nikrouz@urmia.ac.ir)

<sup>3</sup>دانشیار دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، [kadkhodaie\\_ali@tabrizu.ac.ir](mailto:kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir)

### چکیده

سرعت امواج تراکمی و برشی در مطالعات ژئومکانیکی و پتروفیزیکی دارای اهمیت فراوانی است. اغلب به دلیل هزینه بالا و محدودیت‌های عملیاتی، سرعت موج برشی در همه چاه‌ها به ویژه چاه‌های قدیمی‌تر موجود نمی‌باشد. لذا با توجه به کاربرد و اهمیت موج برشی در مطالعات مخازن هیدروکربنی، محققان تلاش نمودند تا روابطی را مبنی بر تخمین سرعت موج برشی به کمک سرعت موج تراکمی تعیین کنند. در این مطالعه ابتدا سرعت موج تراکمی را از طریق لاگ صوتی دو چاه میدان ویچرنج استرالیای غربی بدست می‌آوریم. سپس سرعت موج برشی را با استفاده از روابط تجربی تخمین می‌زنیم. نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی را جهت شناسایی لیتولوژی و مایعات مخزن محاسبه می‌کنیم. با استفاده از نتایج حاصله از روابط تجربی، دو چاه از میدان و یک مقطع لرزه‌ای، وارون‌سازی لرزه‌ای انجام می‌دهیم که نتایج حاکی از وجود مخزن هیدروکربنی گازی در سازند سو (Sue) است.

واژه‌های کلیدی: موج تراکمی، موج برشی، تخمین سرعت، نشانه‌های لرزه‌ای، وارون‌سازی.

## Application of $V_p/V_s$ Ratio to Reservoir Characterization Using Shear Wave Velocity Estimation and Multi-Attribute Analysis

Masoud Serajamani<sup>1</sup>, Ramin Nikrouz<sup>2</sup>, Ali Kadkhodaie<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MSc Geophysics, Urmia University, [masoud\\_serajamani@yahoo.com](mailto:masoud_serajamani@yahoo.com)

<sup>2</sup>Associate Professor, Urmia University, [r.nikrouz@urmia.ac.ir](mailto:r.nikrouz@urmia.ac.ir)

<sup>3</sup>Associate Professor, Tabriz University, [kadkhodaie\\_ali@tabrizu.ac.ir](mailto:kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir)

### Abstract

The velocity of compressional and shear waves is of great importance in geomechanical and petrophysical studies. Often due to the high cost and operational constraints, shear wave velocity is not available in all wells, especially older wells. Therefore, considering the applications and importance of shear wave in studies of hydrocarbon reservoirs, the researchers attempted to establish relationships to estimate shear wave velocity using compressional wave velocity. In this study, we first obtain the compressional wave velocity through the sonic log of two wells in Whicher-Range field, Western Australia. Afterwards, we estimate the shear wave velocity using empirical equations from the compressional wave velocity.  $V_p/V_s$  ratio was calculated to recognize lithology and reservoir fluids. Using the results obtained from the experimental relationships together with two wells from the studied field and one seismic section, seismic inversion is performed. The results indicate the presence of a gas bearing hydrocarbon reservoir in the Sue Formation.

**Keywords:** Compression waves, Shear waves, Velocity estimation, Seismic attributes, Inversion.

## 1 مقدمه

به طور کلی، امواج تراکمی و برشی تحت عنوان امواج پیکره‌ای شناخته می‌شوند. داده‌های مدت زمان گذر موج تراکمی در شناسایی لیتولوژی، تخلخل و سیال‌های منفذ بسیار مفید هستند. از طرفی داده‌های زمان گذر موج برشی نیز برای شناسایی کانی‌ها و تعیین تخلخل کارایی دارند. از طرفی شواهدی مبنی بر امکان شناسایی سیالات با استفاده از مدت زمان گذر موج برشی موجود است. بنابراین ترکیب داده‌های موج برشی و موج تراکمی به شناسایی نوع مایع به ویژه مخازن گاز کمک خواهد کرد. با استفاده از نگار سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و چگالی پارامترهای مهمی همچون پارامترهای ژئومکانیکی، نسبت پواسون و  $V_p/V_s$  بدست آورد. استفاده از نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی، ابزار مناسبی در شناسایی نوع سیال است. این واقعیت که با افزایش اشباع هیدروکربن سرعت موج تراکمی کاهش و سرعت موج برشی افزایش می‌یابد، باعث می‌شود نسبت  $V_p/V_s$  حساسیت بیشتری به تغییر نوع سیال نسبت به استفاده از سرعت موج تراکمی یا برشی به طور جداگانه داشته باشد (هامادا، 2004). در این مطالعه از داده‌های مربوط به دو چاه و یک مقطع لرزه‌ای دو بعدی پس از برانبارش میدان گازی ویچرنج، به منظور شناسایی مخزن هیدروکربنی به کمک نسبت  $V_p/V_s$  استفاده شده است.

## 2 روش تحقیق

ابتدا سرعت موج تراکمی را با استفاده از مدت زمان گذر موج تراکمی بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از روابط تجربی، سرعت موج برشی را از روی سرعت موج تراکمی تخمین می‌زنیم. با در دست داشتن سرعت امواج، نسبت  $V_p/V_s$  را بدست می‌آوریم. در مرحله آخر با استفاده از مدل اولیه وارون سازی لرزه‌ای و آنالیز چندنشانی، مقطع لرزه‌ای دو بعدی نسبت  $V_p/V_s$  حاصل می‌شود.

### 1-2 تعیین سرعت موج با استفاده از مدت زمان گذر موج

در عملیات چاه پیمایی مدت زمان گذر موج تراکمی و موج برشی که به ترتیب با نماد  $DT_c$  و  $DT_s$  نشان داده می‌شوند، بر حسب  $\mu s/ft$  اندازه‌گیری می‌شوند. لذا برای بدست آوردن سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه به وسیله مدت زمان گذر موج از رابطه زیر استفاده می‌کنیم (ماکو، 1998):

$$V_{(Km/s)} = \frac{304.8}{DT_{(\mu s/ft)}} \quad (1)$$

### 2-2 تخمین سرعت موج برشی

روابط متعددی جهت برآورد سرعت موج برشی توسط محققان مختلف ارائه شده که در ادامه به توضیح آنها می‌پردازیم. پیکت روابطی را برای تخمین سرعت موج برشی با استفاده از سرعت موج تراکمی ارائه داد که در آن نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برای سنگ آهک برابر 1.9، برای دولومیت برابر 1.8، برای ماسه سنگ همراه سنگ آهک برابر 1.7 و برای ماسه سنگ بدون شیل 1.6 خواهد بود (پیکت، 1963).

کاستاگنا روابطی را بین سرعت موج تراکمی و برشی با توجه به ساختار و شرایط مخزن با ضرایب مختلف بیان نمود که رابطه 2 برای سنگ آهک، رابطه 3 برای دولومیت، رابطه 4 برای ماسه سنگ، رابطه 5 برای شیل و رابطه 6 برای گل سنگ صادق هستند (کاستاگنا و همکاران، 1993):

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

$$V_s = 0.5832V_p - 0.07776 \quad (3)$$

$$V_s = 0.8042V_p - 0.8559 \quad (4)$$

$$V_s = 0.7700V_p - 0.8674 \quad (5)$$

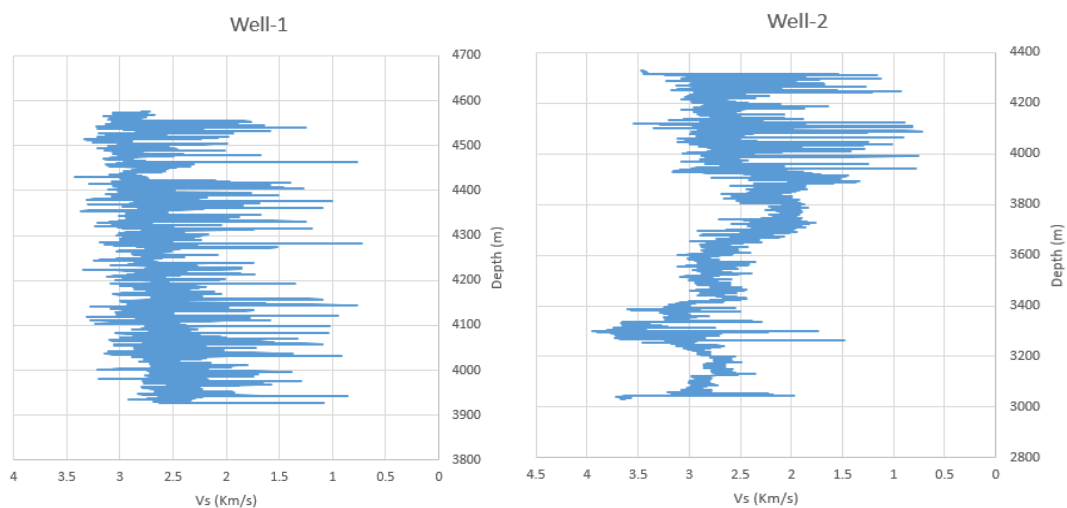
$$V_s = 0.8624V_p - 1.1724 \quad (6)$$

بروچر رابطه‌ای بین سرعت موج تراکمی و برشی را برای تمام لیتولوژی‌ها که در آن سرعت موج تراکمی مابین 1.5 تا 8 کیلومتر بر ثانیه هست، ارائه داد (بروچر، 2005):

$$V_s = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4 \quad (7)$$

### 3-2 نمودار سرعت موج برشی حاصل از رابطه بروچر

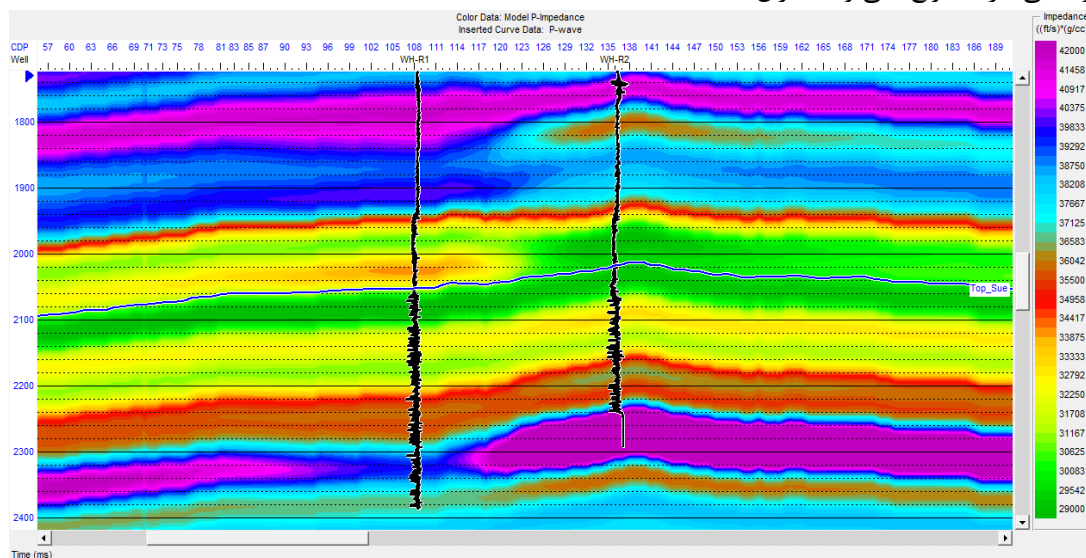
بعد از محاسبه سرعت موج برشی در چاه‌ها با استفاده از رابطه بروچر، نتایج حاصل از چاه‌های Well-1 و Well-2 به صورت نموداری در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 1. نمودار حاصل از تخمین سرعت موج برشی در چاه‌های شماره 1 و 2

## 4-2 وارون سازی لرزه‌ای

در این مرحله ابتدا بین داده‌های لرزه‌ای و نمودارهای چاه تطابق ایجاد می‌کنیم. تبدیل عمق به زمان فرآیندی است که به ما اجازه می‌دهد تا نمودارهای چاه به همراه سرسازندهای معین را با داده‌های لرزه‌ای در زمان مقایسه کنیم (کدخدائی، 1388). در داده‌های لرزه‌ای میدان ویچرنج از الگوریتم وارون سازی مبتنی بر مدل به دلیل میزان خطای کمتر در میان سایر الگوریتم‌های موجود جهت وارون سازی لرزه‌ای استفاده شده است. در مرحله آخر با استفاده از استخراج موجک و ساخت مدل زمین شناسی و انتخاب الگوریتم مبتنی بر مدل از میان الگوریتم‌های مختلف وارون سازی، مدلسازی اولیه صورت می‌گیرد (سراج‌امانی و همکاران، 1398).

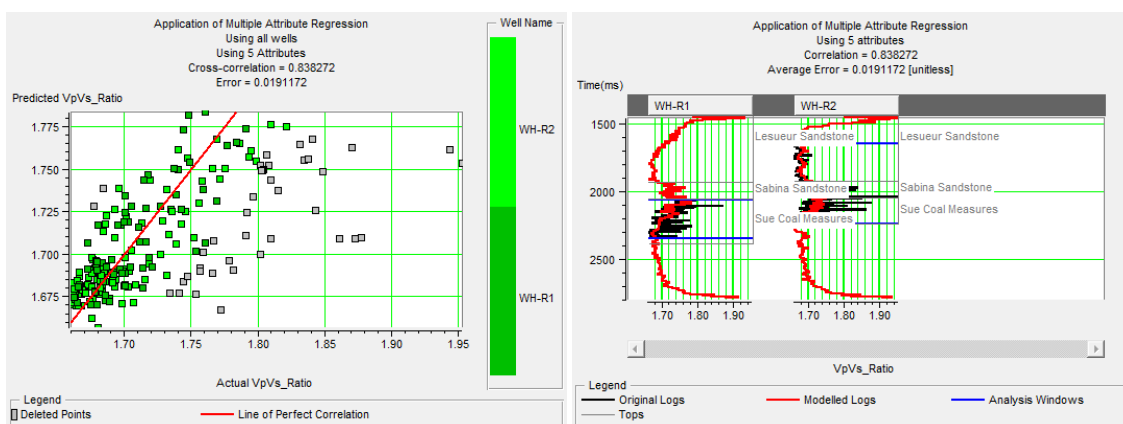


شکل 2. مدل اولیه تولید شده در فرآیند وارون سازی بر پایه مدل برای یکی از مقاطع لرزه‌ای میدان ویچرنج

## 5-2 آنالیز چند نشانگری

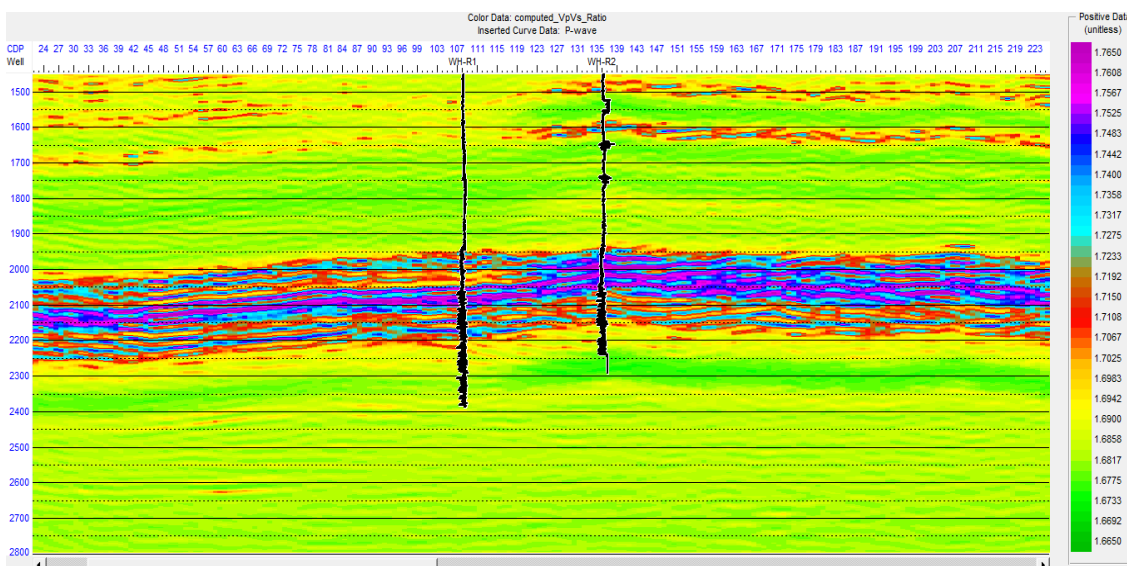
برای بالا بردن قدرت تخمین، نیاز به استفاده ترکیبی از نشانگرها به صورت همزمان نیاز داریم. در آنالیز چند نشانگری، خصوصیتی مکمل از چند نشانگر جهت تفکیک خصوصیات جزئی روی پارامترهای هدف، ترکیب می‌شوند و مهمترین قسمت آن، انتخاب نشانگرها در جهت ساخت ترکیبی بهینه و ارزیابی اهمیت آنها می‌باشد (سراج‌امانی و همکاران، 1398). در این مرحله امیدانس صوتی حاصل از فرآیند وارون سازی در کنار دیگر نشانگرها در راستای ساخت ترکیب بهینه از نشانگرها جهت تخمین نسبت  $V_p/V_s$  مورد استفاده واقع می‌شود. نتایج بر پایه مرحله آموزش، با افزایش تعداد

نشانگرها و کاهش میزان خطای تخمین حاصل می‌شود.



شکل 3. اعمال تبدیل چندنشانگری با استفاده از 5 نشانگر: نسبت  $Vp/Vs$  به رنگ سیاه و نگار تخمینی به رنگ قرمز نشان داده شده است (تصویر سمت راست) - نمودار متقاطع نسبت  $Vp/Vs$  تخمینی در مقابل نسبت  $Vp/Vs$  واقعی: همبستگی واقعی و خطای RMS تخمین که نتیجه استفاده از تبدیل 5 نشانگری می‌باشد در بالای نمودار نشان داده شده است (تصویر سمت چپ)

مقطع دوبعدی نسبت  $Vp/Vs$  برآورد شده از آنالیز چندنشانگری در نرم‌افزار همپسون-راسل با استفاده از برنامه ایمرج (Emerge)، برای مقطع لرزه‌ای مورد نظر در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 4. مقطع نسبت  $Vp/Vs$  برآورد شده از آنالیز چندنشانگری

### 3 نتیجه‌گیری

ابتدا سرعت موج برشی با استفاده از رابطه بروچر و نسبت  $Vp/Vs$ ، در نرم افزار اکسل محاسبه شد و سپس با استفاده از نرم افزار همپسون-راسل وارون سازی برای مقطع لرزه‌ای انجام گرفت. جهت مدل سازی اولیه از الگوریتم مبتنی بر مدل که کمترین میزان خطا در میان سایر الگوریتم‌ها را داراست، استفاده شد. در مرحله آخر به کمک آنالیز چندنشانگری، مقطع لرزه‌ای از این نسبت ساخته شد. با توجه به مقطع لرزه‌ای، نسبت  $Vp/Vs$  در بازه زمانی 1950 تا 2200 (در ناحیه مخزن ماسه سنگی سو) با افزایش چشمگیری روبروست. نسبت  $Vp/Vs$  از بازه 1.665 تا 1.695 در پوش سنگ، به بازه 1.705 تا 1.765 در مخزن افزایش یافته است که بیانگر وجود گاز در مخزن هیدروکربنی است.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات هم راستا از روش الگوریتم شبکه عصبی نیز استفاده شود و نتایج حاصله از شبکه عصبی با نتایج آنالیز چندنشانگری مقایسه شود. از طرفی می‌توان برای تخمین سرعت موج برشی از روابط دیگری مانند پیکت و کاستاگنا استفاده کرد و نتایج آن را با نتایج حاصل از رابطه بروچر مقایسه کرد. پیشنهاد دیگر استفاده از اطلاعات چاه‌های بیش‌تر برای ساخت مدل زمین‌شناسی از طریق وارون سازی است، چون در این صورت موجک لرزه‌ای مصنوعی به موجک لرزه‌ای حقیقی شباهت بیشتری داشته و مدل بدست آمده از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود.

## منابع

- سراج‌امانی، م.، نیکروز، ر.، کدخدائی، ع.، 1398، تخمین پارامترهای مکانیک سنگ با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای و شبکه عصبی در سازند سوء حوضه پرت واقع در استرالیا غربی، اولین همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.
- کدخدائی ایلخچی، ع.، 1388، تخمین پارامترهای ژئوشیمیایی و پتروفیزیکی از نمودارهای چاه پیمایی و نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از سیستم‌های هوشمند در میادین هیدروکربنی جنوب ایران، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران.
- Brocher, T.M., 2005. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust. *Bulletin of the seismological Society of America*, 95(6), pp.2081-2092.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., Kan, T.K. and Backus, M.M., 1993. Rock physics—The link between rock properties and AVO response. *Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis: SEG*, 8, pp.135-171.
- Hamada, G.M., 2004. Reservoir fluids identification using Vp/Vs ratio? *Oil & Gas Science and Technology*, 59(6), pp.649-654.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 1998. *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis in porous media*: University of Cambridge.
- Pickett, G.R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum technology*, 15(06), pp.659-667.