

## تخمین تخلخل سنگ‌ها مخازن گازی با استفاده از داده‌های مقاطع لرزه‌ای قائم (VSP) - مطالعه موردی در خلیج فارس

علی میناچی<sup>۱\*</sup>، لیلا انواری<sup>۲</sup> و محمدرضا آصف<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه زمین شناسی کاربردی دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی کاربردی دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، گروه زمین شناسی کاربردی دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷)

### چکیده

تعیین خواص پتروفیزیکی یک مخزن اهمیت بسیار زیادی دارد. تخلخل و تراوایی بخش‌های مخزنی، از مهم‌ترین این خواص هستند. خواص پتروفیزیکی یک مخزن معمولاً با روش‌هایی مانند تحلیل مغزه و آزمایش چاه نیز به دست می‌آیند که مستلزم صرف زمان و هزینه بسیار زیادی است. به دلیل نبود مغزه‌های کافی، تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، نتایج تعیین این پارامترها با روش‌های ذکر شده، پوشش مناسب و دقت لازم را برای تعمیم به کل ستون چاه یا لایه مخزنی و میدان هیدروکربوری ندارد. برای رفع این محدودیت از روش‌های جایگزین همانند ارزیابی و تفسیر نمودارهای پتروفیزیکی در محیط نرم‌افزارهای پیشرفته یا روش‌های مبتنی بر سرعت امواج لرزه‌ای استفاده می‌شود. در روش مبتنی بر نمودارهای پتروفیزیکی، معمولاً تخلخل براساس یکی از نگاره‌های نوترون، چگالی یا صوتی یا تلفیقی از دو یا چند نگاره و با استفاده از روابط معرفی شده به صورت برجای تخمین زده می‌شود. برای تخمین تخلخل با استفاده از سرعت امواج لرزه‌ای، هم از داده‌های لرزه‌ای سطحی و هم از داده‌های لرزه‌ای درون‌چاهی (مقاطع لرزه‌ای قائم) می‌توان بهره جست. با به کارگیری روابط موجود بین سرعت امواج لرزه‌ای و تخلخل سنگ‌ها، برآورد مناسبی از تخلخل لایه‌ها محاسبه می‌شود. در این پژوهش با استفاده از داده‌های مقاطع لرزه‌ای قائم در یکی از میدان‌های گازی خلیج فارس، تخلخل لایه‌های مخزنی تخمین زده می‌شود و نتایج آن با تخلخل تخمین زده شده از نگاره‌های مختلف چاهی و داده‌های مغزه‌ها مقایسه می‌شود. نتایج حاکی از همخوانی مناسب نتایج داده‌های VSP و سایر نگاره‌های چاهی و همچنین داده‌های مغزه است، به‌ویژه اینکه در نقاط ریزشی و شسته‌شده چاه و نواحی با لایه‌های شیلی که روش‌های پتروفیزیکی اغلب خطا دارند، روش مقطع لرزه‌ای قائم می‌تواند نتایج مطمئن‌تری ارائه کند.

**واژه‌های کلیدی:** پروفیل‌زنی لرزه‌ای قائم (VSP)، تخلخل، سرعت امواج، مخزن گازی

## ۱ مقدمه

سازند، برای گروه‌های مختلف علمی از جمله متخصصان مهندسی مخزن و نفت و پژوهشگران مکانیک سنگ اهمیت حیاتی دارد و تحقیقات در این زمینه از دیرباز تاکنون وجود داشته و فعال است.

جرم مخصوص، ویژگی عمومی مواد و سنگ‌هاست که بر سرعت حرکت موج تأثیر می‌گذارد. جرم مخصوص سنگ‌ها با توجه به شرایط آنها به عوامل متعددی بستگی دارد که از جمله می‌توان به ویژگی‌های کانی‌های تشکیل‌دهنده، درز و شکستگی‌ها، نوع سیال پرکننده فضای خالی سنگ (محتوی سیال‌ها)، درجه سیمان‌شدگی، سن، عمق، ساخت و بافت و میزان فشار روباره اشاره کرد (شریف و جلدارت، ۱۹۹۵).

همگنی و ناهمگنی کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، نحوه جورشدگی کانی‌ها و تخلخل بر جرم مخصوص و سرعت در سنگ‌ها تأثیرگذار هستند. میزان تراکم و عمق نیز از دیگر عوامل مؤثر بر جرم مخصوص و سرعت سنگ هستند. میزان تخلخل در سنگ‌های رسوبی بیشتر از سنگ‌های آذرین و دگرگونی است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد و رسوبات سفت و محکم تشکیل می‌شود. سرعت موج در سنگ‌های بدون تخلخل و تراکم‌ناپذیر مانند نمک با افزایش عمق ثابت می‌ماند.

طبق مطالعات پژوهشگران مختلف از جمله یوهانستون و کریستنسن (۲۰۰۵)، تغییرات زمان سیر امواج لرزه‌ای در سیالات گوناگون به اثبات رسیده است. سرعت امواج تراکمی و برشی تحت تأثیر شرایط مخزن قرار می‌گیرد؛ بنابراین می‌توان با تحلیل دقیق سرعت امواج P و S، برخی از ویژگی‌های مخزنی و پتروفیزیکی مخزن از قبیل لیتولوژی، تخلخل و سیالات مخزنی را از لحاظ کمی و کیفی تعیین کرد.

مرور تاریخچه استفاده از داده‌های لرزه‌ای و به‌طور خاص، سرعت امواج لرزه‌ای برای تخمین تخلخل سنگ‌ها

تخلخل یکی از پارامترهای ضروری سنگ مخزن در تعیین نواحی مستعد مخزنی و محاسبه حجم ذخیره نفت و گاز (پرلس و همکاران، ۲۰۲۱) است و به همین دلیل از اهمیت زیادی برخوردار است. تخلخل می‌تواند از ۸۰ درصد برای رسوبات نرم کف اقیانوس تا کمتر از ۱ درصد در برخی از سنگ آهک‌ها متغیر باشد، ولی در مخازن هیدروکربنی کشور، به‌طور متوسط بین ۱۰ تا ۳۰ درصد متغیر است.

تاکنون روابط تجربی مختلفی برای ارزیابی خواص پتروفیزیکی (تخلخل) در سنگ با استفاده از سرعت موج طولی و عرضی ارائه شده است، ولی این شیوه ساده نیست و چالش‌های اساسی در این باره مطرح است. متأسفانه گاهی هنگام تدوین و استفاده از این روابط تجربی، به این چالش‌ها چندان توجه نمی‌شود. نتیجه این روند سبب می‌شود پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه‌شده دقت و کارایی مدنظر را نداشته و مدل‌سازی‌های صورت گرفته بر اساس این پارامترها با مقادیر واقعی تطابق چندانی نداشته باشند. تأثیر تخلخل بر سرعت موج و نیز موضوعات دیگری از قبیل تأثیر عمق و فشارهای همه‌جانبه بر سرعت موج در سنگ، تفاوت سرعت موج به‌دست آمده از داده‌های چاه‌پیمایی با داده‌های آزمایشگاهی، نبود برخی داده‌های اساسی مانند سرعت موج برشی، از جمله چالش‌های جدی در این زمینه هستند (آصف، ۱۳۹۴).

بدیهی است برآورد به‌نسبت دقیق تخلخل سازندها در یک میدان نفتی برای تخمین میزان ذخیره هیدروکربن بسیار مورد توجه است. از طرفی، وجود تخلخل در بافت سنگ، مقاومت تراکمی سنگ را نیز کاهش و تغییر شکل‌پذیری آن را افزایش می‌دهد به طوری که گاه مقدار کمی تخلخل، می‌تواند اثر چشمگیری بر سرعت موج و نیز رفتار مکانیکی سنگ داشته باشد؛ بنابراین انتخاب روش‌های مناسب برای برآورد هرچه دقیق‌تر و کاربردی‌تر تخلخل موجود در

مورد استفاده در این پژوهش از سازندهای سطحی خارج تا سازندهای آجاجاری، میشان، آسماری، جهرم، پابده، گورپی، لافان، سروک، کزدمی، داریان، گدوان، فهلیان، هیث، سورمه، نیریز، دشتک، کنگان و دالان را پوشش می‌دهد.

## ۲ محاسبه تخلخل با استفاده از داده‌های مقاطع لرزه‌ای قائم (VSP)

در این تحقیق ابتدا داده‌های سه مؤلفه ثبت شده VSP (مؤلفه قائم Z موج طولی و دو مؤلفه افقی H موج برشی) پردازش شد و با جدایش امواج بالارونده و پایین رونده، اعمال چرخش روی مؤلفه‌ها با استفاده از روش هودوگرام و اعمال تصحیحات لازم روی زوایای Phi و Theta، سرعت امواج تراکمی و برشی محاسبه شد.

برای به دست آوردن مقطع سرعت لرزه‌ای از مؤلفه Z بعد از آماده‌سازی و تصحیح داده‌ها، اولین رسیدهای مؤلفه Z در هر عمق برگزیده و مقطع سرعت در کنار رسیدهای اول ترسیم می‌شود. زمان‌های رسید اول بر حسب عمق در سمت راست شکل ۳ رسم شده است. رسیدهای اول موج P برای محاسبه سرعت بازه‌ای (interval velocity) و سرعت مؤثر (سرعت ریشه میانگین مربعات) استفاده می‌شود. سرعت بازه‌ای یا فاصله‌ای، سرعت میانگین برای بازه عمقی مشخص است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (شریف، ۱۹۹۵):

$$V_{\text{ave int}}(\tau_0, \tau_2) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_0} \sum_{k=1}^n V_k \Delta \tau_k \quad (1)$$

$\tau_2 - \tau_0$  زمان کل عبور در سراسر فاصله طی شده است:

$$\tau_2 - \tau_0 = \sum_{k=1}^n \Delta \tau_k \quad (2)$$

$V_k$  سرعت میانگین در طول فاصله k و  $\Delta \tau_k$  زمان عبور در طول فاصله است. سرعت مؤثر  $V_{\text{rms}}$  برابر است با (شریف، ۱۹۹۵):

نشان می‌دهد بیش از شش دهه است که از این روش‌ها استفاده می‌شود (انواری، ۱۳۹۹)، لیکن بسیار کم به استفاده از داده‌های لرزه‌ای مقاطع قائم (VSP) برای تخمین تخلخل پرداخته شده است. پس از مقاله استون (۱۹۸۳) و چند پژوهش پراکنده مانند زوبایف و گس (۲۰۱۱) تحقیقات چندانی برای استفاده از داده‌های VSP برای تخمین تخلخل صورت نگرفته است که شاید دلیل آن، سهولت و در دسترس بودن نگاره‌های پتروفیزیکی در بیشتر جاه‌ها و پیچیدگی فنی پردازش و تحلیل داده‌های VSP در مقایسه با نگاره‌های پتروفیزیکی بوده است. این مهم ضمن تأکید بر نوآورانه بودن پژوهش حاضر، نیاز به تحقیق بیشتر برای بهره‌گیری از داده‌های لرزه‌ای مقاطع قائم را برای تخمین خواص مخزنی به ذهن متبادر می‌کند.

در این پژوهش از داده‌های مقاطع قائم با دورافت صفر (ZVSP) متعلق به یکی از میدان‌های گازی واقع در خلیج فارس استفاده شده است تا در یک روش تکمیلی، با تخمین سرعت موج طولی (P) و برشی (S) بتوان تخمین مناسبی را از تخلخل ارائه کرد. به دلیل بهره‌گیری این روش از گیرنده‌های سه مؤلفه‌ای، امکان ثبت هر دو موج میسر است.

منطقه مورد مطالعه، میدانی گازی در خلیج فارس است که ساختار تاق‌دیزی آن با عملیات لرزه‌نگاری در دریا در سال ۱۹۵۹ میلادی محرز شده است. حفاری چاه اکتشافی با هدف ارزیابی توان هیدروکربوری گروه دهرم، در سال ۱۳۸۱ شمسی تا عمق ۳۷۲۲ متری (شروع سازند دالان در ۳۵۰۶ متری) صورت گرفت و از مجموع سازند کنگان و سازند دالان، ۱۵/۸ میلیون فوت مکعب در روز همراه با ۵۳۲ بشکه میعانات گازی تولید شد. در این ساختار، سطح آب و گاز در بالای بخش تبخیری نار یعنی در سازند دالان فوقانی و در ۳۷۳۳ متری است. بر اساس نقشه هم‌تراز زیرزمینی افق کنگان، ابعاد این میدان در حدود ۸ در ۳۳ کیلومتر و ستون گاز آن ۴۲۰ متر است. داده‌های VSP

استفاده از زمان رسید امواج برشی و روابط مشابه روابط فوق، سرعت امواج برشی محاسبه می‌شود. برای توضیحات کامل‌تر در خصوص روش‌های اشاره شده به انواری (۱۳۹۹) مراجعه شود.

در شکل ۱ نمایش هم‌زمان سه مؤلفه ثبت شده دیده می‌شود. در شکل ۲ داده‌های مؤلفه قائم ثبت شده و محل اولین رسیدها با رنگ سبز نشان داده شده است. در شکل ۳ نمودار اولین زمان رسیدهای موج P از مؤلفه Z با دورافت صفر استخراج و به صورت مدل سرعتی موج تراکمی در سمت چپ برحسب عمق رسم شده است. سرعت‌های بازه‌ای و سرعت مؤثر (RMS) نیز به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی در سمت راست رسم شده‌اند.

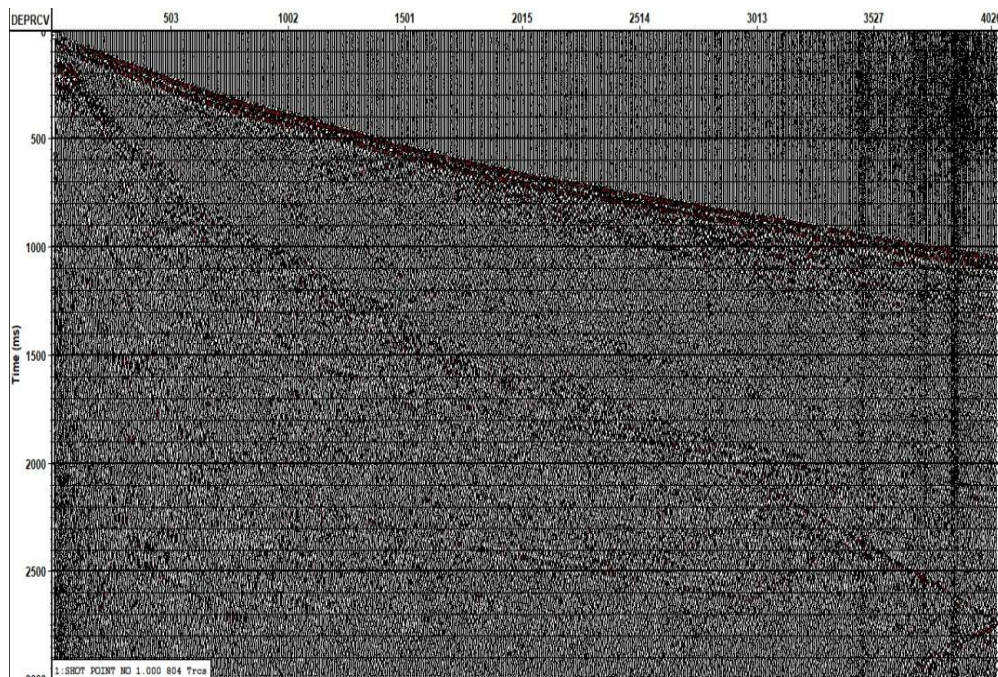
$$V_{rms}^2 = \frac{\sum_i V_i^2 t_i}{\sum_i t_i} \quad (3)$$

که  $V_i$  و  $t_i$  سرعت و زمان در یک بازه هستند. پیش فرض  $V_{rms}$  افقی بودن لایه‌ها است. رابطه سرعت بازه‌ای و مؤثر ( $V_n$ ) به صورت زیر تقریب زده میشود (دیکس، ۱۹۵۵):

$$V_n^2 = (V_{AN}^2 \sum_1^n \Delta T_i - V_{AN-1}^2 \sum_1^{n-1} \Delta T_i) / \Delta T_n \quad (4)$$

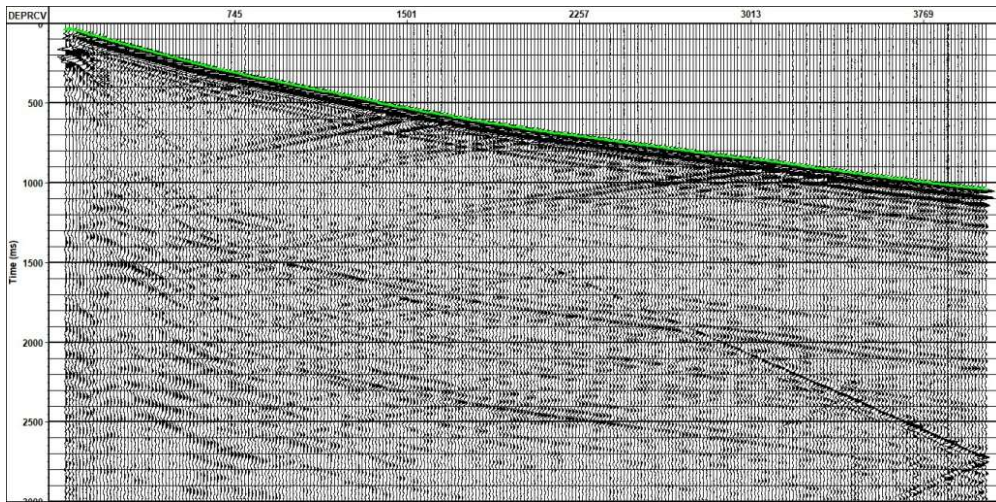
$V_n$  سرعت  $V_{rms}$  و  $T_n$  زمان رسید دورافت صفر به بازتابنده است (شریف، ۱۹۹۵).  $V_{AN}$  میانگین سرعت بازه‌ای از لایه‌ها است.

برای تعیین سرعت موج برشی نیز پس از اعمال تصحیحات و چرخش‌های لازم بر مؤلفه‌های افقی، با



شکل ۱. نمایش هم‌زمان سه مؤلفه ثبت شده در برداشت.

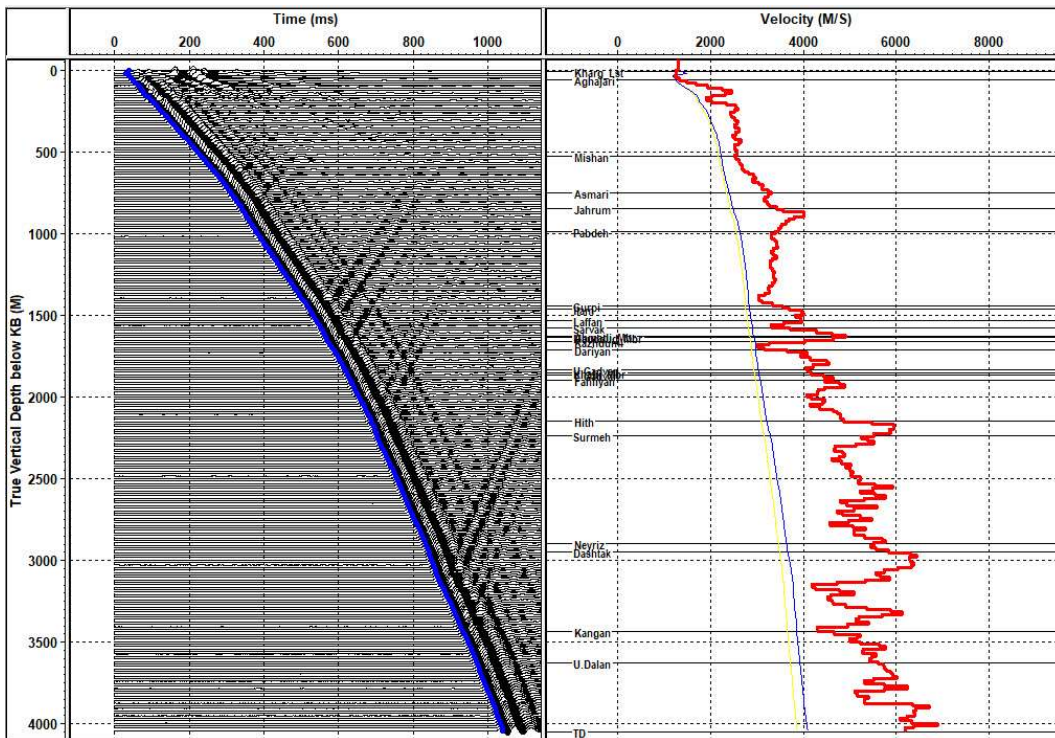




شکل ۲. مؤلفه Z مقطع لرزه‌ای قائم با دورافت صفر. اولین رسیدهای موج P با رنگ سبز مشخص شده است.

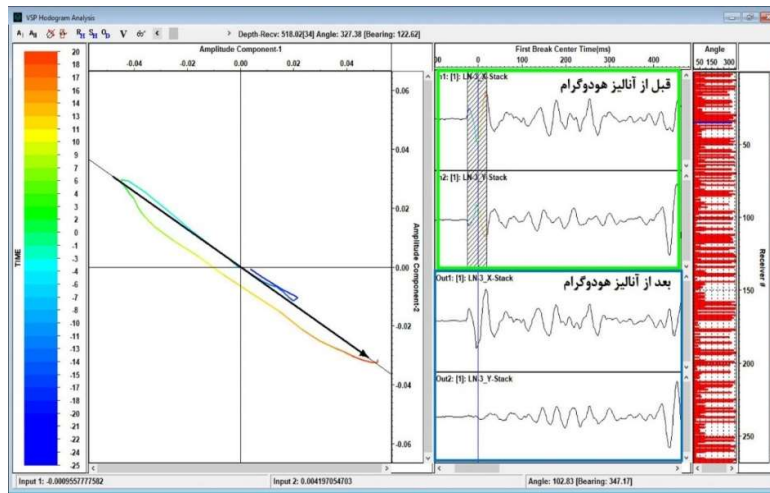
شکل‌های ۵ تا ۱۴ مراحل مختلف اعمال تصحیحات چرخش مؤلفه‌ها و حذف نوفه‌ها جهت رسیدن به داده لرزه‌ای مناسب برای تحلیل سرعت آمده است.

در شکل ۴ پنجره مربوط به تحلیل هودوگرام داده‌های VSP قبل و بعد از تحلیل هودوگرام و چرخش مؤلفه‌های X و Y به میزان زاویه Theta نشان داده شده است.

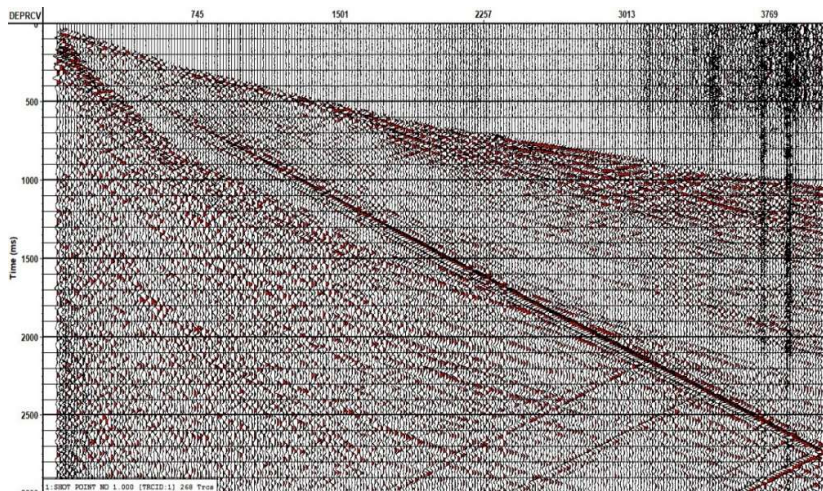


شکل ۳. مدل سرعتی موج تراکمی محاسبه‌شده از اولین رسیدها با دورافت صفر. (راست) سرعت‌های بازه‌ای (رنگ قرمز) و سرعت ریشه حداقل مربعات (RMS) (رنگ آبی) (چپ) زمان اولین رسیدها برحسب عمق در مؤلفه Z.

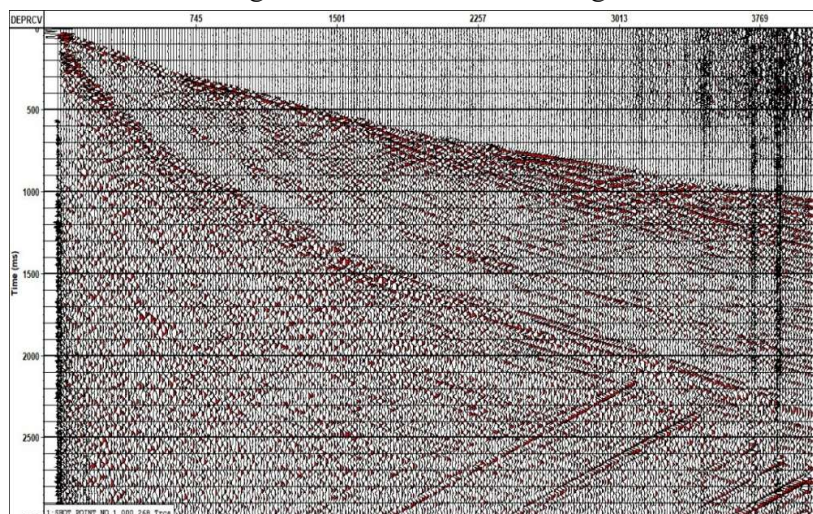




شکل ۴. پنجره مربوط به تحلیل هودوگرام داده‌های VSP قبل و بعد از تحلیل هودوگرام و چرخش مؤلفه‌های X و Y به میزان زاویه Theta.

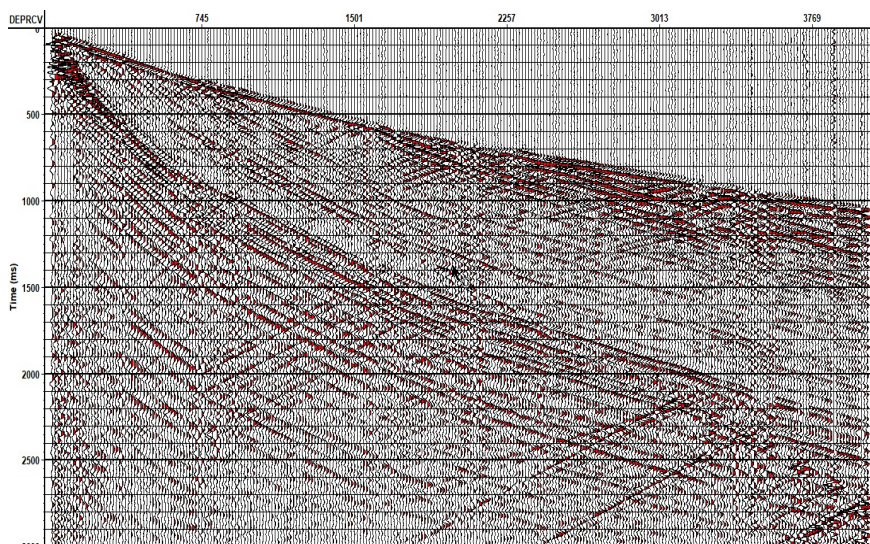


شکل ۵. مؤلفه X امواج برشی قبل از چرخش و پیش از حذف نوفه امواج لوله‌ای (Tube waves).

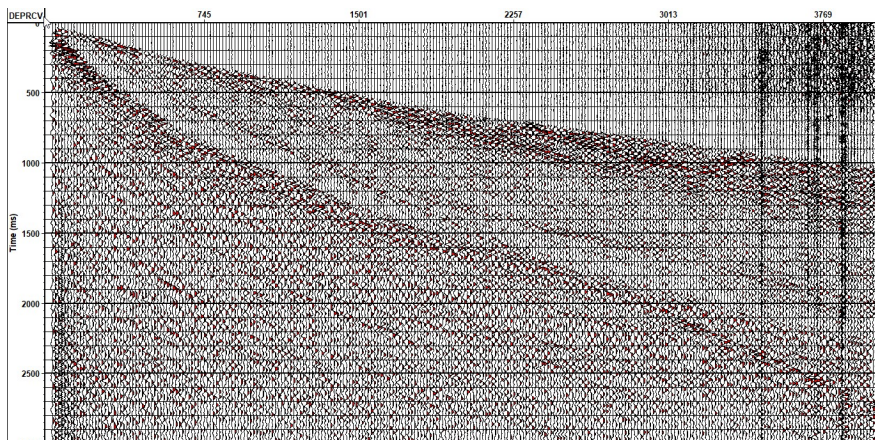


شکل ۶. مؤلفه X امواج برشی قبل از چرخش و پس از حذف نوفه امواج لوله‌ای.

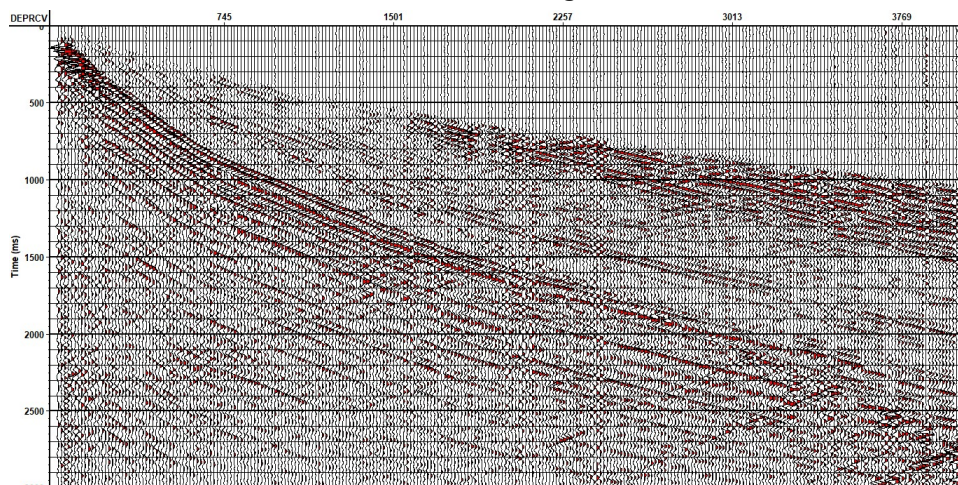




شکل ۷. مؤلفه  $H_{Max}$  امواج برشی بعد از چرخش به اندازه زاویه  $\theta$  و پس از حذف نوفه امواج لوله‌ای.

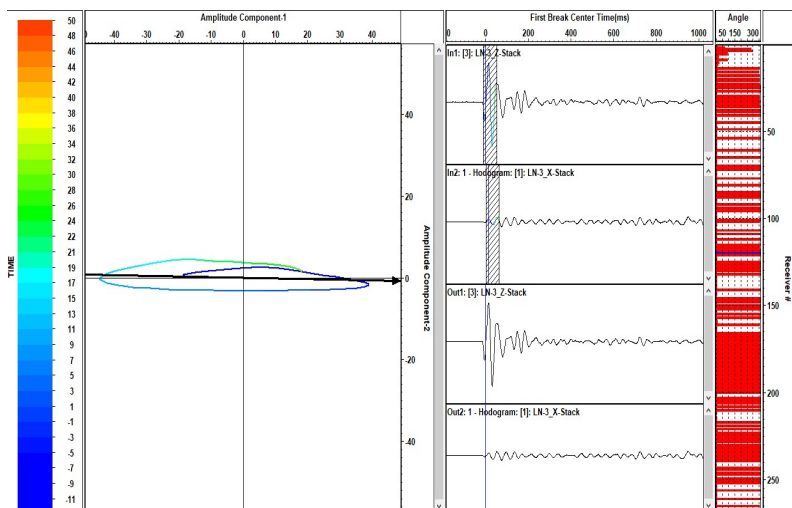


شکل ۸. مؤلفه  $Y$  امواج برشی قبل از چرخش به اندازه زاویه  $\theta$ .

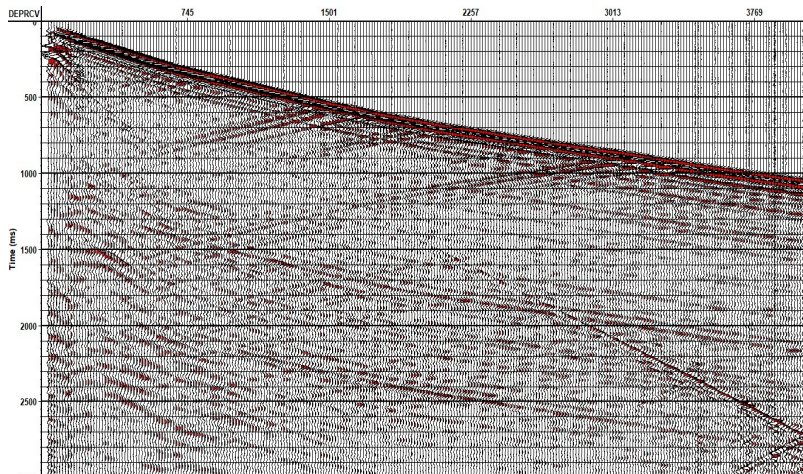


شکل ۹. مؤلفه  $H_{Min}$  امواج برشی بعد از چرخش به اندازه زاویه  $\theta$  و پس از حذف نوفه امواج لوله‌ای.

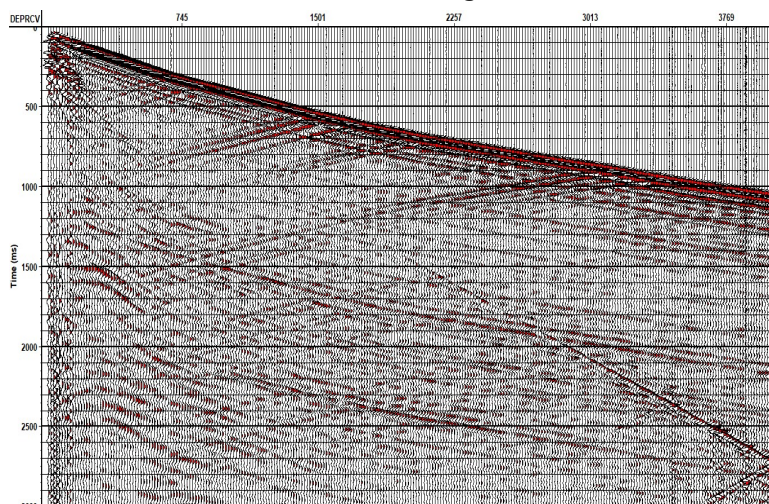




شکل ۱۰. پنجره مربوط به تحلیل هودوگرام داده‌های VSP قبل و بعد از تحلیل هودوگرام و چرخش مؤلفه‌های Z و  $H_{Max}$  به میزان زاویه Phi.

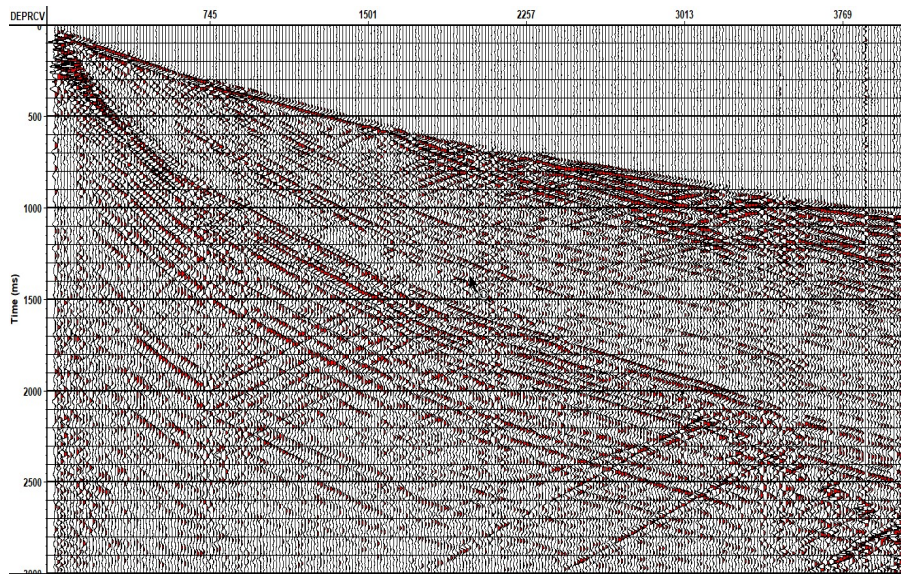


شکل ۱۱. مؤلفه Z امواج تراکمی پیش از چرخش به اندازه زاویه Phi

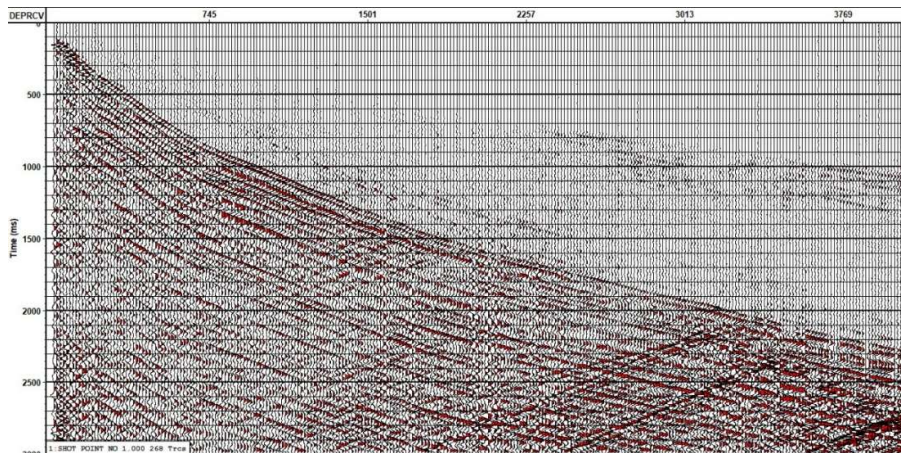


شکل ۱۲. مؤلفه Z امواج تراکمی پس از چرخش به اندازه زاویه Phi.





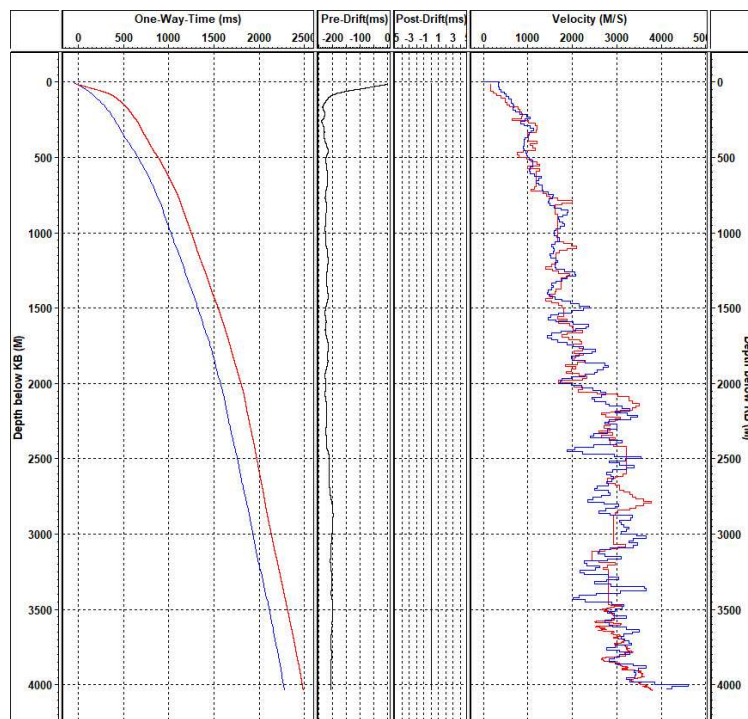
شکل ۱۳. مؤلفه  $H_{Max}$  امواج برشی پیش از چرخش به اندازه زاویه  $\Phi$ .



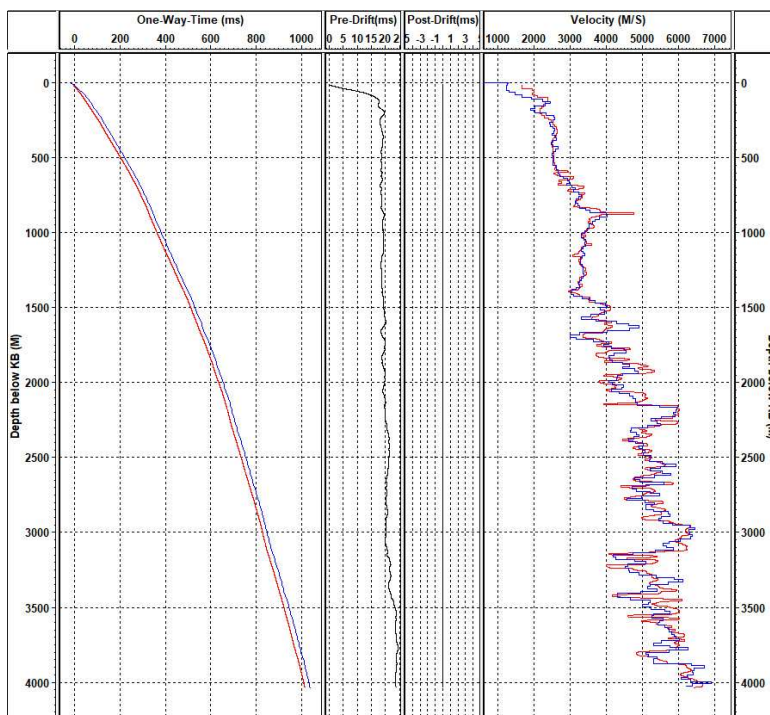
شکل ۱۴. مؤلفه  $H_{Max}$  امواج برشی پس از چرخش به اندازه زاویه  $\Phi$ .

زمان سیرهای به‌دست‌آمده از نگاره‌های صوتی و برداشت‌های VSP، کالیبراسیون داده‌ها ضروری است. در هر عمقی که داده‌های VSP موجود است، اختلاف آن با زمان سیر نگاره صوتی محاسبه می‌شود که نمایانگر اختلاف موجود بین زمان سیرهای این دو سری داده در عمق‌های مورد نظر است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان می‌دهند بعد از کالیبراسیون، اختلاف زمانی بین زمان رسید یک‌طرفه موج P با نگاره صوتی تصحیح شده است.

جهت بهره‌گیری از داده‌های VSP باید فرایند کالیبراسیون برای نزدیک کردن زمان رسیده‌های نگاره چاه با داده‌های مقطع لرزه‌ای قائم صورت گیرد. هدف از این فرایند، تعدیل زمان سیر یکپارچه با داده‌های درون‌چاهی است. اهمیت اعمال تصحیحات بر داده‌های چاه این است که در فرایند تخمین موجک برای لرزه‌نگاشت مصنوعی و همچنین محاسبه ضرایب بازتاب داده‌های نگاره، خطاهای مربوط به تبدیل از حوضه عمق به زمان بر نتایج تأثیر می‌گذارند. به علت اختلافات موجود بین



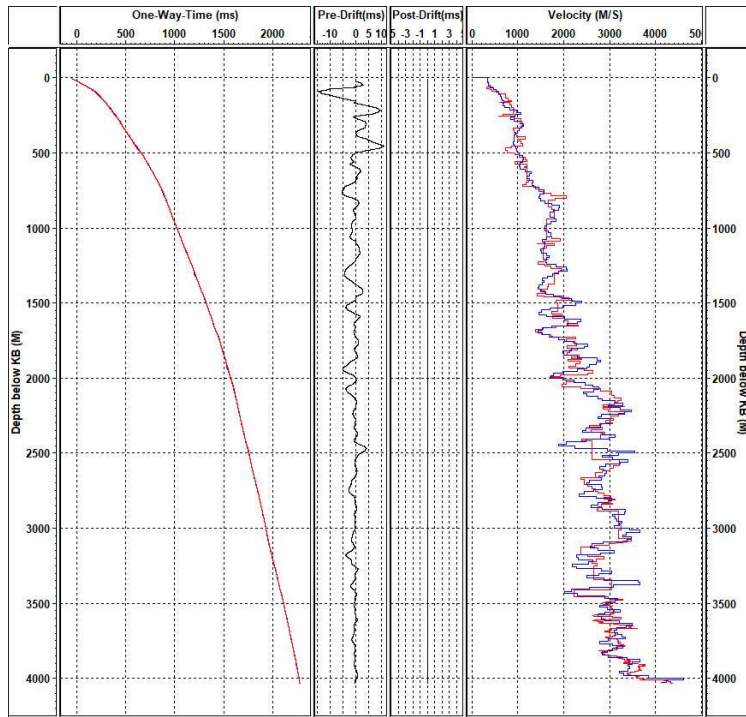
(الف)



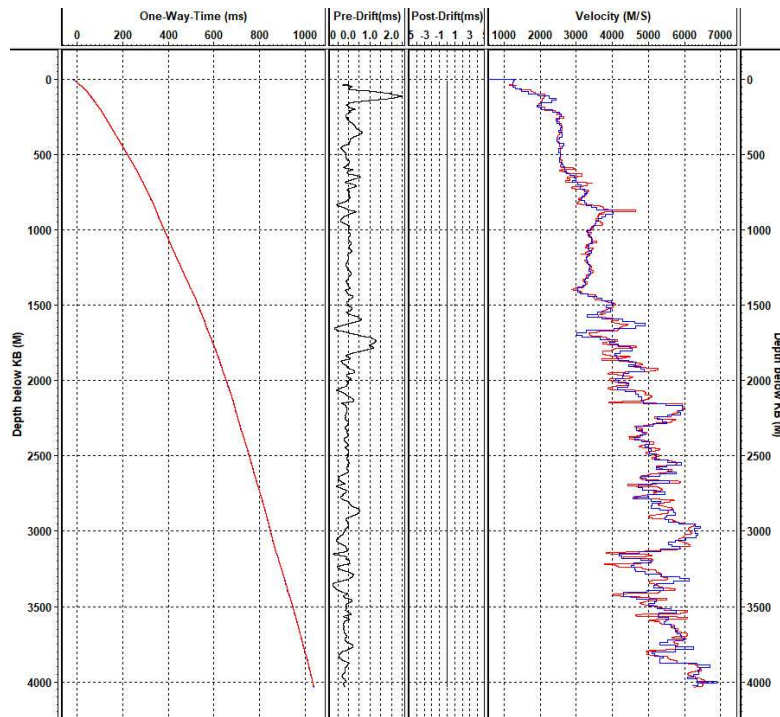
(ب)

شکل ۱۵. (الف) موج برشی قبل از کالیبراسیون (ب) موج تراکمی قبل از کالیبراسیون.





(الف)



(ب)

شکل ۱۶. (الف) موج برشی بعد از کالیبراسیون (ب) موج تراکمی بعد از کالیبراسیون.

آصف و همکاران (۱۳۹۷) رابطه (۵) را به صورت رابطه (۶) و (۷) ارائه کردند که در آن ابتدا تغییرات تخلخل  $(\Delta\phi)$  در هر نقطه نسبت به نقطه قبلی بر اساس تغییرات چگالی  $(\Delta\rho)$  و تغییرات نسبت سرعت امواج  $\Delta(V_p/V_s)$  محاسبه می‌شود. سپس تخلخل  $(\phi)$  در هر نقطه با محاسبه تخلخل اولین قرائت بر اساس نگاره نوترون  $(\phi_{Ni})$  به علاوه تغییرات ناشی از تغییر چگالی و نسبت سرعت امواج یعنی  $\Delta(V_p/V_s)$  محاسبه می‌شود:

$$\Delta\phi = 51.6\Delta\rho - 26.1\Delta(V_p/V_s) \quad (6)$$

$$\phi = \phi_{Ni} + 51.6\Delta\rho - 26.1\Delta(V_p/V_s) \quad (7)$$

با استفاده از روابط فوق، تخلخل سنگ‌های منطقه مورد مطالعه محاسبه و با نتایج سایر روش‌های پتروفیزیکی مقایسه شد. نتایج استفاده از رابطه (۷) در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، ریزش دیواره چاه به‌ویژه در انتهای چاه در قرائت برخی نگاره‌ها خطا ایجاد کرده است که در تخلخل محاسبه شده با نگاره‌های پتروفیزیکی نیز تأثیر داشته است. این در حالیست که ریزش چاه در قرائت داده‌های VSP اثر چندانی ندارد که باعث می‌شود مقادیر تخلخل تخمینی بر اساس  $V_p/V_s$  از دقت بیشتری در این مناطق برخوردار باشد.

همان‌طور که در مقایسه میزان تخلخل حاصل از نگاره صوتی و تخلخل حاصل از داده‌های VSP مشخص است، مقادیر تخلخل داده‌های VSP به مقادیر مرجع (تخلخل حاصل از تحلیل مغزه‌ها) نزدیک‌تر است و از روند آن در بسیاری از اعماق تبعیت می‌کند. از دیگر محاسن تخمین تخلخل به کمک داده‌های VSP می‌توان به اثرپذیری حداقلی این روش از لایه‌های شیلی اشاره کرد که این مطلب مطابق شکل ۱۷ در زون K\_1c از زیرلایه‌های سازند کنگان مشخص است. در این بخش تخلخل محاسبه شده با استفاده از داده‌های VSP به تخلخل حاصل از تحلیل مغزه‌ها نزدیک‌تر است، ولی با روش‌های دیگر، تخلخل

پس از محاسبه سرعت امواج برشی و تراکمی و اعمال تصحیحات و کالیبراسیون می‌توان از روابط حاکم بر ارتباط سرعت امواج و تخلخل سنگ‌ها برای تخمین تخلخل استفاده کرد. شایان ذکر است از آنجا که سرعت‌های به‌دست آمده از اطلاعات لرزه‌ای و به‌ویژه مقاطع لرزه‌ای قائم که به روش‌های دینامیک مشهور هستند، تحت تأثیر ریزش‌های (washout) دیواره چاه قرار نمی‌گیرند، سرعت امواج به‌دست آمده از اطلاعات لرزه‌نگاری درون‌چاهی، دقت بیشتری نسبت به نمودارهای پتروفیزیکی در این گونه چاه‌ها دارد.

طبق روش‌های مرسوم، تخمین میزان تخلخل با روش‌های دینامیکی اغلب با سرعت امواج طولی  $V_p$  صورت می‌گیرد. در این پژوهش سعی شده است جهت افزایش دقت تخمین‌ها، به جای استفاده صرف از سرعت امواج طولی، از سرعت موج برشی (در قالب نسبت سرعت امواج طولی به امواج برشی) و چگالی استفاده شود؛ چون امواج طولی از تمام اجزاء محیط متخلخل عبور می‌کنند و سرعت این موج در مواجهه با بخش سیال کاهش می‌یابد، ولی موج برشی قادر به عبور از بخش سیال نیست و سرعت آن فقط منحصر به عبور از بخش جامد سنگ است. با توجه به این مطلب که حساسیت سرعت موج برشی به میزان سیال در سنگ بسیار بیشتر از سرعت موج طولی است، می‌توان از نسبت این دو سرعت  $(V_p/V_s)$  برای محاسبه تخلخل استفاده کرد. با افزایش نسبت سرعت موج طولی به برشی، تخلخل کاهش می‌یابد. برای این منظور بازیار (۱۳۹۷) با مطالعه ۲۶۰۰ نمونه سنگی در آزمایشگاه، رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$\phi = \frac{0.03039 - 0.516\rho + 0.0261\left(\frac{V_p}{V_s}\right)}{0.001} + 13.753 \quad (8)$$

که  $\phi$  درصد تخلخل،  $\rho$  چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ ) و  $(V_p/V_s)$  نسبت سرعت موج تراکمی به برشی است. در ادامه،



سازندگی است. در سازندهایی که به‌طور کلی فشرده نشده‌اند، فرمول وایلی تخلخلی بیش از مقدار واقعی را نمایش می‌دهد؛ بنابراین به‌طور مستقیم نمی‌توان از این رابطه در سازندهای غیرفشرده استفاده کرد و باید ضریبی در معادله وارد کرد تا نقش فشار و دما و به بیان دیگر، سرعت نهایی را تصحیح کند. در نهایت، فرمول وایلی به‌صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\phi(DT) = \frac{DT - DT_{Matrix}}{DT_{Fluid} - DT_{Matrix}} \times \frac{100}{DT_{Shale}} \quad (11)$$

که  $DT_{Shale}$  سرعت صوت در شیل است که مقدار آن از رسم سرتاسری DT-CGR-CALIPER محاسبه شده است. این پارامتر برای حذف اثر شیل بر تخلخل در رابطه لحاظ شده است.

برای محاسبه تخلخل از روی نگاره چگالی نیز از روابط زیر استفاده شد (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\phi(RHO) = \frac{\rho_{Matrix} - \rho_b}{\rho_{Matrix} - \rho_{Fluid}} \quad (12)$$

که  $\phi$  تخلخل،  $\rho_b$  چگالی قرائت‌شده نگاره چگالی،  $\rho_{Matrix}$  چگالی ماتریکس سازند و  $\rho_{Fluid}$  چگالی سیال سازند است.

در سازندهای حاوی شیل نیز برای محاسبه میزان تخلخل از رابطه زیر استفاده می‌شود (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\phi(RHO) = \frac{\rho_{Matrix} - \rho_{b\ sh}}{\rho_{Matrix} - \rho_{Fluid}} - V_{Shale} \times (1 - V_{Shale})$$

با استفاده از نگاره نوترون، نگاره چگالی و روابط زیر می‌توان مقدار تخلخل تصحیح‌شده را به‌دست آورد (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\phi(NPHI) = \frac{\phi_{Log} - \phi_{N\ Matrix}}{\phi_{N\ Fluid} - \phi_{N\ Matrix}} \quad (14)$$

که  $\phi$  تخلخل،  $\phi_{Log}$  تخلخل نگاره نوترون قرائت‌شده،  $\phi_{N\ Matrix}$  تخلخل ماتریکس سازند و  $\phi_{N\ Fluid}$  تخلخل سیال سازند است. در سازندهای شیلی مقدار تخلخل

مؤثر، مقادیر نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. این روش همخوانی مناسبی را با سایر روش‌های تخمین تخلخل در لایه‌های آهکی نشان می‌دهد، ولی در لایه‌های دولومیتی این همخوانی کمی کمتر است (شکل ۱۷). در لایه انیدریتی - دولومیتی  $K_{2b}$  تغییر روند تخلخل در همه روش‌ها مشابه و کاهش است.

### ۳ محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی

برای مقایسه نتایج در این پژوهش، از چهار روش جهت تخمین تخلخل از نگاره‌های پتروفیزیکی استفاده شده است که عبارت‌اند از: محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره صوتی؛ محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره چگالی؛ محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره‌های چگالی و نوترون؛ محاسبه تخلخل با استفاده از نگاره‌های نوترون و صوتی. در دو روش اول، از یک نگاره و در دو روش بعدی از دو نگاره برای محاسبه تخلخل استفاده می‌شود. نکته درخور توجه برای محاسبه تخلخل مؤثر در سازندهای نفتی با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی این است که تخلخل شیل غیرمؤثر است و تراوایی آن بسیار کم است؛ بنابراین در محاسبه تخلخل سازندهای مخزنی باید تخلخل لایه‌های شیلی محاسبه و از مقدار تخلخل کل به‌دست‌آمده برای سازند کاسته شود تا تخلخل مؤثر و مفید مخزن تعیین شود:

$$(8) \quad \text{تخلخل مؤثر} = \text{تخلخل کل} \times \text{حجم شیل} - \text{تخلخل مؤثر}$$

$$PHI_{Effective} = PHI_{Total} - (V_{Shale} \times PHI_{Shale}) \quad (9)$$

در این مطالعه برای محاسبه تخلخل از نگاره صوتی، از فرمول وایلی (۱۹۵۶) استفاده شد:

$$\phi(DT) = \frac{DT_{Log} - DT_{Matrix}}{DT_{Fluid} - DT_{Matrix}} \quad (10)$$

که  $DT$  زمان عبور صوت از سازندهای موجود بر اساس نگاره صوتی ثبت‌شده،  $DT_{Matrix}$  زمان عبور صوت از ماتریکس سنگ و  $DT_{Fluid}$  زمان عبور صوت از سیال

اندازه‌گیری شده از روش‌های مختلف با یکدیگر تطابق خوبی را نشان می‌دهند. فقط تخلخل اندازه‌گیری شده از نگاره صوتی، مقداری کمتر از بقیه نگاره‌ها و تخلخل حاصل از تحلیل مغزه است. در خصوص تخلخل تخمین زده شده از نگاره چگالی نیز به دلیل تأثیرپذیری این نگاره از ریزش دیواره چاه، در عمق‌هایی که دیواره ریزش دارد، مقادیر تخلخل دچار خطا شده است و مقادیر زیاد را نمایش می‌دهد. همچنین تخلخل حاصل از تحلیل‌های آزمایشگاهی مغزه‌های این چاه نیز روند کلی مشابه روند تخلخل حاصل از نگاره‌های پتروفیزیکی دارد. فقط به دلیل فواصل کم نمونه‌گیری نگاره‌های پتروفیزیکی، تخلخل حاصل از این نگاره‌ها را می‌توان با جزئیات بیشتر مشاهده و بررسی کرد. شایان ذکر است محاسبه تخلخل به کمک تحلیل‌های آزمایشگاهی مغزه‌ها از روش‌های معتبر و مستند است، ولی به دلیل فواصل زیاد بین نمونه‌ها و محدودیت در فواصل مغزه‌گیری، مقایسه نتایج آن با نتایج سایر روش‌ها نیازمند دقت و در نظر گرفتن ملاحظات یاد شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، مقادیر تخلخل حاصل از داده‌های VSP در مقایسه با نگاره صوتی به نتایج تحلیل مغزه‌ها نزدیک‌تر است. از محاسن تخمین تخلخل به کمک داده‌های VSP، اثرپذیری حداقلی این روش از لایه‌های شیلی است. ریزش دیواره به‌ویژه در انتهای چاه باعث ایجاد خطا در قرائت برخی نگاره‌ها و در نهایت، خطا در محاسبه تخلخل می‌شود. این در حالی است که ریزش چاه در قرائت داده‌های VSP اثر چندانی ندارد و این باعث می‌شود تخلخل تخمینی بر اساس نسبت سرعت‌ها ( $v_p/v_s$ ) از دقت بیشتری در این مناطق برخوردار باشد.

نکته درخور توجه این است که تخلخل به‌دست‌آمده از روش دینامیکی فقط مقدار تخلخل اولیه سنگ را نشان می‌دهد و قادر به محاسبه تخلخل کل نیست. همچنین

نوترون هم متأثر از تخلخل ماتریکس است و هم متأثر از میزان شیل. برای تصحیح اثر شیل بر نگاره نوترون از رابطه زیر استفاده می‌شود (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\varphi = \varphi(NPHI) - (\varphi_{N\text{Shale}} \times V_{\text{Shale}}) \quad (15)$$

که  $\varphi_{N\text{Shale}}$  تخلخل شیل و  $V_{\text{Shale}}$  حجم شیل است. برای محاسبه تخلخل با استفاده از دو نگاره چگالی و نوترون می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\varphi_{ND} = \frac{\sqrt{\varphi_{N\text{Log}}^2 + \varphi_{D\text{Log}}^2}}{2} \quad (16)$$

$\varphi_{ND}$  تخلخل نوترون-چگالی،  $\varphi_{N\text{Log}}$  تخلخل نگاره نوترون و  $\varphi_{D\text{Log}}$  تخلخل نگاره چگالی است.

با استفاده از دو نگاره صوتی و نوترون نیز می‌توان تخلخل را تخمین زد که رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود (هیرست و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\varphi_{NS} = \frac{\sqrt{\varphi_{N\text{Log}}^2 + \varphi_{S\text{Log}}^2}}{2} \quad (17)$$

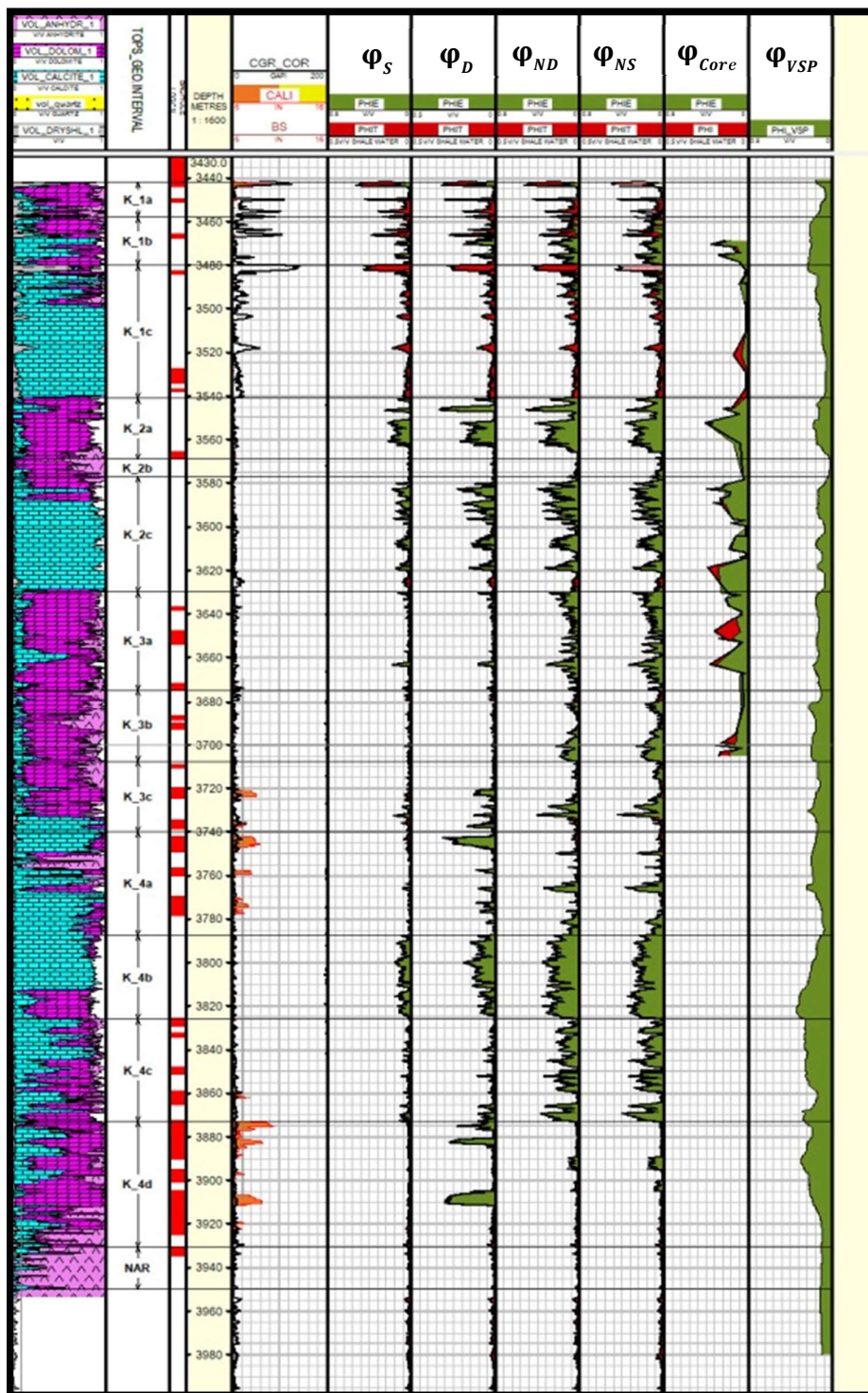
$\varphi_{NS}$  تخلخل نوترون-چگالی،  $\varphi_{N\text{Log}}$  تخلخل نگاره نوترون و  $\varphi_{S\text{Log}}$  تخلخل نگاره صوتی است. در شکل ۱۷ نتایج تخمین تخلخل با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی شامل نگاره‌های صوتی (DT)، چگالی (RHOB) و نوترون (NPHI) و نتیجه تحلیل مغزه‌ها در چاه مورد مطالعه مقایسه شده است.

#### ۴ مقایسه و تحلیل نتایج

در این تحقیق ابتدا سرعت موج طولی و عرضی از روش مقطع قائم محاسبه و تخلخل با استفاده از نسبت سرعت موج طولی به عرضی و روابط موجود محاسبه شد. سپس تخلخل سازندهای چاه با استفاده از نگاره‌های مختلف چاه‌پیمایی (نگاره صوتی، نگاره چگالی و تلفیق نگاره‌ها) محاسبه و نتایج این دو شیوه با نتایج مغزه‌ها مقایسه شد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ دیده می‌شود، مقادیر تخلخل





شکل ۱۷. مقایسه تخلخل به‌دست‌آمده از داده‌های VSP و تخلخل به‌دست‌آمده از داده‌های پتروفیزیکی و تحلیل مغزه.

آصف، م. ر.، بازیار، م. ج.، میثاقی، ع.، ۱۳۹۷، بهینه‌سازی ورودی‌های مطالعات ژئومکانیک - مقایسه تحلیلی تخلخل سنگ با تلفیق لاگ‌های پتروفیزیکی: سومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران.

انواری، ل.، ۱۳۹۹، تخمین تخلخل سنگ‌های مخازن گازی با استفاده از داده‌های روش پروفیل زنی لرزه‌ای قائم (VSP): پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی.

بازیار، م. ج.، ۱۳۹۷، تعیین میزان تخلخل در سنگ با استفاده از سرعت امواج و مقایسه آن با تخلخل لاگ نوترون: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی. پرویزی‌قلعه، س.، رحیمی‌فر، ع.، کردوانی، ع.، ۱۳۹۶، مطالعه و بررسی توالی‌های ماسه شیلی لایه‌ای در میدان‌های نفتی با استفاده از مدل توماس اشتیبر و نمودارهای رایج ارزیابی مخزن: مجله پژوهش نفت، ۹۴، ۱۶۵-۱۷۶.

سیدالحسینی، ع. ا.، کاظم‌زاده، ع.، چیتگرچاری، ا.، ۱۳۹۱، ارتباط سرعت امواج برشی و امواج طولی در سنگ‌های کربناته با استفاده از واحدهای جریان هیدرولیکی: فصلنامه زمین، ۷(۲۴)، ۱۲۵-۱۳۱

عطامسیحی، م.، هاشمی‌عبدالنبی، م.، ۱۳۹۲، ارزیابی خواص مخزنی سازند سروک بالایی با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی در یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران: فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، ۲(۹)، ۱۴۹-۱۶۱.

Dix, C., 1955, Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20(1), 68-86.

Hearst, J. R., Nelsom, P. H. and Paillet, F. L., 2000, *Well Logging for Physical Properties: A Handbook for Geophysicists, Geologists and Engineers*, New York, John Wiley and Sons, 483p.

Hilchie, D. W., 1978, *Applied openhole log interpretation (for geologists and engineers)*: Golden, Colorado, D. W. Hilchie, Inc., 161p.

Johnston, J. E. and Christensen, N. I., 1993, *Compressional to shear velocity ratios in*

بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش گویای این موضوع است که تخلخل حاصل از روش صوتی، روش مطمئن نیست و اعتبار لازم را ندارد؛ زیرا تطابق خوبی با روش نگاره نوترون و نگاره چگالی ندارد. به همین دلیل در این پژوهش روشی ارائه شد که میزان تخلخل با تلفیق نسبت سرعت امواج طولی به برشی ( $v_p/v_s$ ) و چگالی سنگ تعیین شود.

مقایسه نتایج این پژوهش با سایر روش‌های موجود، همخوانی خوبی را نشان می‌دهد و گویای این است که استفاده از این رابطه محاسبه واقع‌بینانه‌تری از مقدار تخلخل سنگ ارائه می‌کند. از دیگر مزایای این روش آن است که در این روش برخلاف سایر روش‌ها که فقط از یک عامل برای اندازه‌گیری تخلخل استفاده می‌شود (برای مثال میزان هیدروژن در روش نگاره نوترون یا سرعت موج طولی در روش نگاره صوتی)، از سه پارامتر شامل چگالی، سرعت موج طولی و سرعت موج برشی استفاده می‌شود که میزان خطا را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. این مهم گویای این است که ثبت داده‌های لرزه‌ای درون‌چاهی در کل ستون چاه و استخراج سرعت امواج تراکمی و برشی در تمام مسیر حفاری می‌تواند امکان تخمین تخلخل در تمام سازندهای موجود را فراهم آورد.

## منابع

احمدی، ر.، امیری‌بختیار، م. ص.، ۱۳۹۵، ارزیابی خواص پتروفیزیکی سازند آسماری میدان نفتی بزرگ مارون واقع در جنوب غرب کشور با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی: مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۹، ۱۰-۲۲.

آصف، م. ر.، ۱۳۹۴، سرعت موج در سنگ پارامتر کلیدی برای حل مسائل ژئومکانیک نفت: اولین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، ایران.

- sedimentary rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 30, Issue 7, 751-754.
- Porlles, J., Panja, P., Sorkhabi, R., and McLennan, J., 2021, Integrated porosity methods for estimation of gas-in-place in the Muerto formation of Northwestern Peru: Journal of Petroleum Science and Engineering, 108558.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995, Exploration seismology. Cambridge university press.
- Soleimani, B., Rangzan, K., Larki, E., Shirali, K., and Soleimani, M., 2018, Gaseous reservoir horizons determination via Vp/Vs and Q-factor data, Kangan-Dalan formations, in one of SW Iranian hydrocarbon fields: Geopersia, **8**(1), 61-76.
- Stone, D., 1983, Predicting pore pressure and porosity from VSP data: SEG Technical Program, expanded abstracts.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: Geophysics, **21**(1), 41-70.
- Zhubayev, A., and Ghose, R., 2010, In-situ porosity and permeability estimation from the VSP data using integrated poroelastic model: 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC.



## Porosity estimation of gas reservoir rocks using vertical seismic profiling data- a case study in the Persian Gulf

Ali Misaghi<sup>1\*</sup>, Leila Anvari<sup>2</sup> and Mohammad Reza Asef<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Master of Science Graduate, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

(Received: 05 May 2021, Accepted: 18 July 2021)

### Summary

Determining the petrophysical properties of a reservoir is of great importance. The most important of these properties are the porosity and permeability of the reservoir sections. The petrophysical properties of a reservoir are usually obtained by methods including core analysis and well testing techniques which require spending a very high time and cost. Furthermore, the results of determining these parameters by the mentioned methods are not of good quality due to the lack of sufficient cores, lithological changes and heterogeneity of reservoir rock. Therefore, the optimal method is to use advanced evaluations of petrophysical diagrams in advanced software environments such as Geolog. The results of petrophysical assessments can be compared and calibrated with the results obtained from the core.

Usually, porosity is estimated based on the one of the neutron logs, density logs, sound logs or combination of two logs in-site. Moreover, it can be calculated by laboratory methods which give different evaluations of porosity, of course. Experience has also shown that estimation of porosity using one type of log is not accurate due to the response of each log to certain parameters of a formation.

Another method to estimate the porosity is to use longitudinal and transverse wave velocities and the ratio of these velocities. This method uses surface wave data and Vertical Seismic Profiling (VSP) surveys. Using the empirical relations between the porosity and seismic velocities, a proper estimation of porosity could be provided. In this research, porosity has been estimated using the VSP data and also some other petrophysical logs in a well in the Persian Gulf and the results have been compared with other methods.

The results show that the porosity values obtained from VSP data are closer to the core analysis than acoustic log results. One of the advantages of porosity estimation using VSP data is the insignificant effectiveness of shale contents on this method.

The well wall caving, especially at the bottom of the well, causes error in the reading of some logs and affects the amount of porosity calculated by petrophysical logs. However, well caving has little effect on VSP data readings and results in the estimated porosity values to be more accurate than the  $V_p/V_s$  velocity ratios in these areas.

The porosity obtained from the dynamic method shows only the initial porosity of the rock and is not able to calculate the total porosity. Furthermore, the studies conducted in this research showed that the porosity achieved by acoustic method does not conform well to the helium gas in neutron log and density log methods (as a reliable method), and also does not have the necessary validity. For these reasons, in this study, a method was proposed to determine the porosity by combining the ratio of the longitudinal wave velocity to shear wave velocity ( $V_p/V_s$ ) and rock density. Comparison of the results presented in this study with other available methods showed a good consistency and suggests that the proposed empirical equation provides a more realistic calculation for rock porosity.

As a recommendation, we suggest that VSP data be acquired for the whole well column because extracting the compressional and shear wave velocities in all surveyed depths and calculating the ratio of them, will make it possible to estimate the amount of different porosities in all existing formations.

**Keywords:** Vertical Seismic Profiling (VSP), porosity, wave velocity, gas reservoir

\*Corresponding author:

ali.misaghi@gmail.com