

## ارائه نشانگرهای جدید برای تخمین لیتولوژی و بررسی روند تغییرات تخلخل با استفاده از ترکیب سرعت‌های امواج برشی و تراکمی

بهزاد نصرنیا<sup>۱</sup> و رضا فلاح<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>دکترای مهندسی نفت - اکتشاف، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳)

### چکیده

در دهه‌های اخیر نشانگرهای سنگ‌شناسی و تخلخل با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری و چاه‌پیمایی به شکل محدودی به عنوان معیاری که نشان‌دهنده نوع لیتولوژی، تغییرات تخلخل و اشباع‌شدگی در مخازن هیدروکربنی باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. اغلب نشانگرهای سنگ‌شناسی بر پایه تجزیه و تحلیل‌های تغییرات دامنه با فاصله از منبع و تعیین نسبت سرعت‌های امواج تراکمی و برشی معرفی گردیده‌اند. به عنوان مثال، تخمین و محاسبه تغییرات اشباع‌شدگی و فشار منفذی حاصل از عملیات تولید و تزریق در مخازن هیدروکربنی با ساخت نشانگرهای مربوطه از طریق پارامترهای الاستیک، یکی از کاربردهای لرزه‌نگاری نیز محسوب می‌گردد. استفاده از الگوهای استاندارد فیزیک سنگ، در بسیاری از مخازن هیدروکربنی منجر به تفکیک مخازن گازدار از نوع آبدار آن شده است. در این تحقیق با استفاده از الگوهای استاندارد فیزیک سنگ و ترکیب پارامترهای الاستیک دخیل در آنها (مانند نسبت سرعت موج تراکمی به برشی، لاند، رو و الاستیک امپدانس) توسط عملیات روتین ریاضی، روند تغییرات تخلخل و لیتولوژی، با هدف افزایش قدرت تفکیک، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در واقع در پژوهش حاضر، پارامترهای الاستیک استفاده شده در ساخت الگوهای استاندارد فیزیک سنگ مورد استفاده قرار گرفته و تفاوت اصلی در نحوه بکارگیری و ترکیب پارامترها می‌باشد. این سناریو با بررسی همه جانبه در خصوص جمع و تفریق کمیت‌های الاستیک و ترسیم کراس - پلات‌های مربوطه و همچنین تعریف رابطه جدید محاسبه میزان تفکیک، صورت پذیرفت. نتایج حاصل نشان داد که ترکیب مناسب بین پارامترهای الاستیک استفاده شده در الگوهای استاندارد (روابط روتین ریاضی)، منجر به بهبود میزان تفکیک لیتولوژی با افزایش ۷ درصدی و جدایش زون‌های متخلخل با افزایش میزان بهبود ۶ درصدی نسبت به الگوهای استاندارد اولیه در منطقه مورد مطالعه گردیده است.

**کلمه‌های کلیدی:** نشانگر سنگ‌شناسی و تخلخل، نسبت سرعت موج تراکمی به برشی، الگوی استاندارد فیزیک سنگ، پارامترهای الاستیک

## ۱ مقدمه

تاکنون نشانگرهای لیتولوژی و تخلخل متعددی معرفی گردیده و مشاهده شده است که اکثریت آنها نسبت به تغییرات سنگ شناسی و حضور هیدروکربن حساس می‌باشند. از لحاظ تئوری، نشانگرهای سنگ شناسی و سیال که در ارتباط با تغییرات تخلخل و اشباع شدگی هستند، در واقع انحراف‌های مرتبط با پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن اشباع از هیدروکربن را در یک حوزه خاص اندازه‌گیری می‌کنند. نشانگرهای لیتولوژی و تخلخل در تجزیه و تحلیل و تفسیرهای لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، تشخیص و تفکیک سیال‌های منفذی به کاهش خطرهای عملیات اکتشاف و افزایش میزان حفاری کمک خواهد نمود. نخستین روشهای جداسازی لیتولوژی و سیال‌های منفذی از اوایل دهه ۱۹۷۰ معرفی گردیدند. در این بین، تغییرات دامنه با دورافت، به عنوان نخستین نشانگرهای سیال در عملیات AVO شناخته شده است. با توسعه تئوری‌های فیزیک سنگ، حساسیت برخی از پارامترهای الاستیک نسبت به سیال‌های مخزن مشخص گردید. استفاده از کمیت‌های  $\mu p$  و  $\lambda p$  در ساخت نشانگرهای سیال و سنگ شناسی در اغلب تحقیق‌ها مشاهده شده است. این کمیت‌ها توسط مقادیر امپدانس موج تراکمی، امپدانس موج برشی و چگالی قابل محاسبه هستند. با استفاده از پارامترهایی نظیر ضرایب کشسان لامه، می‌توان تغییرات لیتولوژی و محتوای سیال منفذی و همچنین سایر پارامترهای الاستیک را با معرفی نمودن فاکتور سیال و سنگ شناسی مناسب، بررسی نمود. امواج تراکمی و برشی هرکدام بطور جداگانه‌ای به تغییرات لیتولوژی و سیال منفذی واکنش نشان می‌دهند. به دلیل تاثیر پذیری اندک سرعت موج برشی از تغییرات محتوای سیال منفذی، جداسازی مرزهای سیال‌های و لیتولوژی توسط نسبت سرعت‌های

موج برشی به تراکمی و کمیت‌های لاندا - میو - رو امکان پذیر می‌شود. داده‌های حاصل از تغییرات دامنه با دورافت، علاوه بر بررسی مقدار و نحوه تغییرات دامنه با جابه‌جایی، اطلاعاتی را در خصوص لیتولوژی و نوع سیال‌های منفذی در اختیار می‌گذارد [۱۲]. به منظور تعیین و توسعه فاکتور سنگ شناسی مناسب و بررسی روند تغییرات تخلخل، از ترکیب نسبت‌های صحیح بین پارامترهای الاستیک (مانند لاندا، میو و سرعت‌های لرزه‌ای) استفاده می‌شود. همچنین با توجه به تحقیقات صورت گرفته در مورد میزان ناهمسانگردی، بررسی میزان اختلاف سرعت مولفه‌های سریع و کند موج برشی به دلیل ورود موج برشی به زون ناهمسانگرد، می‌تواند در تعیین شدت ناهمسانگردی و راستای درزه و شکاف که منطبق بر جهت یافتگی تخلخل است، موثر باشد. ترکیب‌های مناسب بین ضرایب لامه می‌تواند نشانگر برخی از پارامترهای مخزنی باشد. به عنوان مثال، ترکیب پارامترهای لاندا - میو می‌تواند تغییرات و روند اشباع شدگی را در یک زون مخزنی بازگو نماید.

اسمیت و گیلدو (۱۹۸۷)، تفاوت وزن‌دار بین بازتاب‌های سرعت موج برشی و تراکمی را به عنوان یک فاکتور سیال معرفی نمودند [۱۶]. وزن‌های مربوط به شدت بازتاب‌ها توسط اندازه‌گیری‌های محلی و یا از طریق معادله Mudrock کاستانیا حاصل می‌گردند [۳]. در ادامه پژوهش‌های مرتبط با فاکتور سیال و سنگ‌شناسی، نشانگرهای تغییرات دامنه با فاصله توسط استراندر (۱۹۸۴) و شویی (۱۹۸۵) به عنوان تفکیک‌کننده‌های سیال‌های منفذی معرفی شدند [۱۶].

گیلدو و همکاران (۱۹۹۲) و همچنین فاتی و همکاران (۱۹۹۴)، با تبدیل سرعت‌های امواج برشی و تراکمی به امپدانس‌های صوتی و برشی، وزن‌های مربوط به بازتاب‌های سرعت‌های لرزه‌ای را به صورت وزن‌های

شده توسط معادله خط برازش، میزان تفکیک سیال‌های منفذی از یکدیگر را در مخازن ماسه سنگی نرم افزایش دهند [۱۷]. در سال ۲۰۱۹، صابری با تلفیق داده های چاه پیمایی و نشانگرهای لرزه ای و همچنین با معرفی نمودار متقاطع مربع سرعت تراکمی نرمال شده و نسبت سرعت ها، توانست به شناسایی و مانیتورینگ تغییرات سیال های منفذی در مخازن کربناته بپردازد.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از عملیات روتین ریاضی (جمع، تفریق و ضرب) بر روی کمیت های بکار رفته در ساخت الگوهای استاندارد فیزیک سنگ (لاندا-میو-امپدانس صوتی و برشی، چگالی و تخلخل) با هدف افزایش میزان جدایش روندهای لیتولوژی و تخلخل، میزان تفکیک لیتولوژی و زون های متخلخل بهبود یابد. مراحل این تحقیق به شرح زیر می باشند:

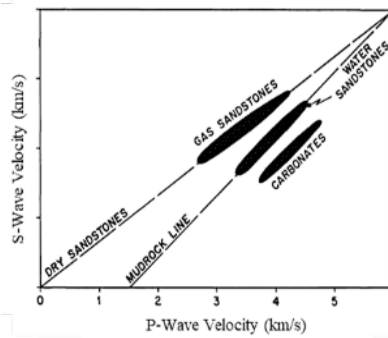
الف) تعیین سرعت موج تراکمی، برشی و چگالی با استفاده از لاگ های پتروفیزیکی

ب) محاسبه مقادیر  $\lambda p$ ،  $\mu p$ ،  $Vp/Vs$ ،  $I_p$ ،  $I_s$   
ج) ساخت فاکتور جدید سنگ شناسی و تغییرات تخلخل با استفاده از ترکیب کمیت های فوق  
د) مقایسه میزان تفکیک لیتولوژی و زون های متخلخل، بین فاکتور جدید و سایر فاکتورها با استفاده از نمودارهای متقاطع.

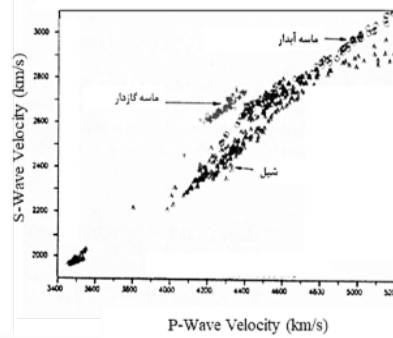
## ۲ تئوری روش

الگوهای استاندارد فیزیک سنگ که توسط پارامترهای الاستیک همانند لاندا - میو و امپدانس های امواج طولی و عرضی ساخته می شوند، می توانند جهت تفکیک محتوای لیتولوژی و سیال های منفذی مخازن هیدروکربنی بکار برده شوند. همانطور که بیان شد، مفهوم نشانگر سیال نخستین بار توسط اسمیت و گیلدو (۱۹۸۷) به منظور تفکیک ماسه سنگ های گازدار و آبدار و همچنین شیل از یکدیگر، معرفی شد. در نمودار متقاطع

امپدانس سرعت های امواج برشی و تراکمی تعریف نمودند [۷ و ۹]. لاندا - میو - رو برای نخستین بار توسط گودوی و همکاران (۱۹۹۷)، به عنوان تفکیک کننده سیال های منفذی معرفی گردیدند. ترکیب ۳ کمیت مذکور، یکی از اصلی ترین تفکیک کننده های سیال منفذی در حوضه امپدانس محسوب می شود. همچنین آنها مشاهده کردند که تفکیک لیتولوژی ها و سیال های منفذی از جمله شیل، ماسه آبدار و ماسه گاز دار توسط نمودار متقاطع لاندا - رو و میو - رو دقیق تر از نمودار متقاطع امپدانس موج برشی و تراکمی صورت می پذیرد [۱۰]. اسمیت و گیلدو (۲۰۰۰) با مقایسه نشانگرهای بازتابی و کمیت های لاندا، میو و رو، دریافتند که پارامترهای مذکور ارتباط تنگاتنگی با فاکتور سیال داشته و هر دوی آنها به عنوان نشانگرهای هیدروکربنی می توانند مورد استفاده قرار گیرند. همچنین در این تحقیق، نسبت های مختلف پارامترهای الاستیک مورد بررسی قرار گرفته و ترکیبی از پارامترهایی که جدایش بین سیال های منفذی و واحدهای سنگی مجزا را بهتر و واضح تر نشان دهد، به عنوان فاکتور تفکیک سیال و سنگ شناسی در نظر گرفته می شود [۶]. در سال ۱۳۹۶، فلاح و همکارانش با در اختیار داشتن داده های سرعت موج تراکمی و برشی حاصل از برداشتهای لرزه نگاری چهاربعدهی و دامنه امواج در زوایای تابشی کم و زیاد، نشانگرهایی را به منظور محاسبه تغییرات فشار و اشباع شدگی حاصل از برداشت و تزریق مخازن هیدروکربنی در دریای شمال ساختند. ماهیت نشانگرهای ساخته شده بیشتر جنبه کیفی داشته و بررسی جنبه کمی این نشانگرها، نیازمند مطالعه های جامع و دقیق در ناحیه مذکور می باشد. ژائو و هیلترمن (۲۰۱۰) توانستند با برازش خط بر نمودار متقاطع امپدانس صوتی و برشی ( $I_s$  و  $I_p$ ) و یافتن معادله خط، مقادیر جدید امپدانس برشی را برحسب تفاضل مقادیر اولیه امپدانس برشی و مقدار تقریب زده



(ب)



(ف)

شکل ۱. الف) نمودار متقاطع موج تراکمی و برشی در چاه F-AD-1 در خلیج موسل و ب) نمودار شماتیک سرعت موج تراکمی در مقابل سرعت موج برشی.

با توجه به فرمول حاصل، در صورتیکه لایه‌های بالا و پایین مرزی که بازتاب ایجاد می‌کنند روی خط Mudrock قرار داشته باشند، آنگاه  $\Delta F = 0$  می‌شود. در صورتیکه یکی از لایه‌ها روی Mudrock و دیگری خارج از آن قرار گیرد،  $\Delta F \neq 0$  می‌گردد. فلاح و همکارانش (۱۳۹۶) نشانگرهای تغییرات اشباع شدگی و فشار مخزن در اثر عملیات تزریق و برداشت مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری چهاربعدی ارائه کردند.

### ۳ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان هیدروکربنی مورد مطالعه، یک میدان گازی با میعان‌های نفتی است که در خلیج فارس واقع شده است. در این پژوهش، داده‌ها از یک چاه مربوط به مخزن گازی تهیه گردیده است. با توجه به داده‌های حاصل و مطالعه‌های صورت گرفته در منطقه مورد نظر، لیتولوژی قالب منطقه دولومیت، کلسیت و انیدریت بوده و به مقدار جزئی حاوی کانی‌های رسی می‌باشد. مخزن مورد مطالعه، حدود ۳۰۰۰ متر زیر بستر دریا و در عمق آب ۶۵ متری قرار دارد و از دو سازند گازدار مستقل به نام‌های کنگان (تریاس) و دالان بالایی (پرمین) تشکیل شده است. هر سازند به دو لایه مخزن مختلف تقسیم می‌شود.

سرعت موج تراکمی در برابر سرعت موج برشی (شکل ۱) لیتولوژی‌های شیل و ماسه سنگ به همراه سیال‌های منفذی شان قابل تفکیک می‌باشند. ماسه‌سنگ‌های اشباع از آب، سیلتستون‌ها و همچنین شیل‌ها تقریباً در امتداد خط گل قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه ماسه سنگ‌های اشباع شده از گاز، دارای سرعت موج تراکمی پایین و سرعت موج برشی اندکی بالاتر هستند، در داخل زون گازدار واقع می‌شوند. ماسه سنگ‌های متخلخل در محدوده زون کم سرعت و ماسه سنگ‌های با تخلخل کم در محدوده زون پر سرعت قرار می‌گیرند.

کاستانیا و همکاران (۱۹۸۵) معادله خط Mudrock را به صورت زیر ارائه نمودند:

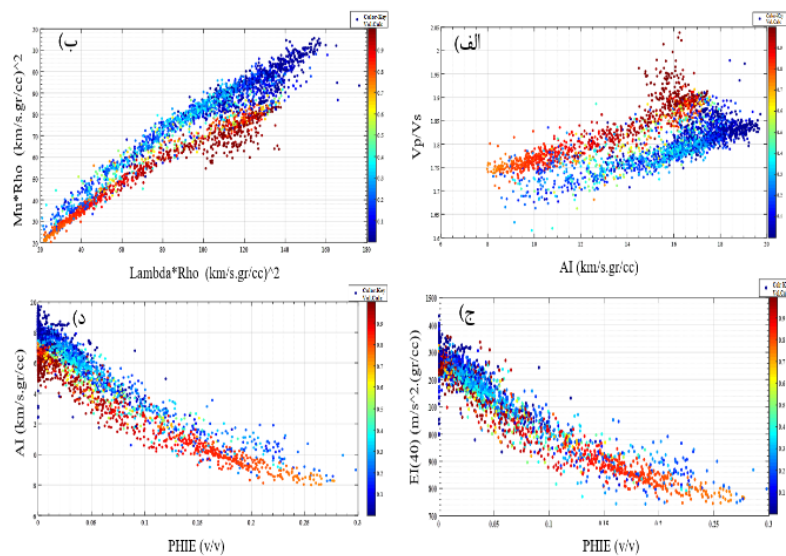
$$V_P = 1360 + 1.6V_S \left(\frac{m}{s}\right) \quad (1)$$

با انجام عملیات مشتق‌گیری و افزودن ضرایب مورد نیاز، رابطه‌نهایی که در تفکیک سیال‌های منفذی مورد نیاز است، بدست می‌آید:

$$\Delta F = R_P - 1.6 \left(\frac{V_S}{V_P}\right) R_S \quad (2)$$

که  $\Delta F$ : فاکتور سیال،  $R_P$ : ضریب بازتاب موج تراکمی،  $V_S$ : سرعت موج برشی،  $V_P$ : سرعت موج تراکمی و  $R_S$ : ضریب بازتاب موج برشی می‌باشند.

نگاره‌های چاه پیمایی مانند تخلخل، امپدانس موج تراکمی، نسبت سرعت ها و ضرایب لامه، برای لیتولوژی غالب در منطقه و تخلخل سازند مورد مطالعه، ترسیم می‌گردند (شکل ۲). در این شکل، مقیاس رنگی کسر حجمی لیتولوژی آهکی را نشان می‌دهد. در حالت کلی چهار الگوهای استاندارد جهت تفکیک لیتولوژی بکار برده می‌شوند. در مرحله بعدی، با توجه به مقایسه روند تغییرات نمودار حاصل در هر یک از الگوهای استاندارد فیزیک سنگ، اقدام به ترکیب پارامترهای مذکور از طریق عملیات متعارف ریاضی (جمع- تفریق- ضرب و تقسیم) می‌شود تا میزان جدایش در نمودارهای فیزیک سنگ (به عنوان مثال نمودار تغییرات روند سنگ شناسی یا تخلخل)، تا حد قابل قبولی افزایش یابد. با انجام ترکیب های جبری حاصل از ضرایب لاندا، میو و سرعت‌های لرزه‌ای در تفکیک سیال های منفذی، یک نشانگر تخلخل و سنگ‌شناسی جدید از کمیت‌های مذکور ساخته می‌شود.



شکل ۲. الگوهای استاندارد فیزیک سنگ ساخته شده جهت تفکیک لیتولوژی توسط کمیت های الف) امپدانس صوتی و نسبت سرعت‌ها، ب) لاندا-رو و میو-رو، ج) الاستیک امپدانس در زاویه ۴۰ درجه و تخلخل، د) امپدانس صوتی موج تراکمی و تخلخل برای لیتولوژی غالب (آهکی) در منطقه مورد مطالعه.

منظور تفکیک بهتر زون های متخلخل و تخمین لیتولوژی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به منظور ترکیب مناسب

که توسط لایه های نفوذ ناپذیر از هم جدا شده اند. این میدان از چهار لایه مخزن مستقل K1، K2، K3 و K4 تشکیل شده است. با وجود کیفیت بالای نگاره های حاصل، عواملی مانند ریزش دیواره چاه و پدیده آبشویی در برخی فواصل، منجر به بروز خطاهای جزئی و عدم قطعیت در نگاره های پتروفیزیکی شده است.

#### ۴ روش شناسی

به منظور ساخت یک نشانگر سنگ شناسی و سیال با رویکرد تغییرات تخلخل، شناخت پارامترهای اصلی موثر در تخمین لیتولوژی و تعیین محتوای سیال های منفذی ضروری می‌باشد. این پارامترها با توجه به اغلب مطالعه های صورت گرفته در این زمینه، شامل سرعت‌های موج برشی، تراکمی، چگالی و تخلخل می‌باشند. لاگ‌های پتروفیزیکی گزینه مناسبی جهت تعیین پارامترهای مذکور هستند. بعد از تعیین پارامترهای موثر، الگوهای فیزیک سنگ استاندارد توسط کمیت های حاصل از

هدف از ترکیب بهینه کمیت‌های الاستیک، افزایش میزان جدایش نمودارهای فیزیک سنگ حاصل، به

گردیده است. با توجه به تغییرات لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه که شامل لیتولوژی آهکی، دولومیتی، انیدریتی و شیلی می باشد، رنگ‌های غالب قرمز و آبی در نمودارهای شکل ۲ به ترتیب به لیتولوژی آهکی و دولومیتی/انیدریتی در منطقه مورد مطالعه مربوط هستند. همانطور که در نمودارهای استاندارد مشاهده می‌شود، میزان جدایش لیتولوژی‌های سازند مورد مطالعه آنچنان مشهود نبوده و درصد تفکیک قائم آنها نیز مقادیر پایینی را نشان می‌دهد. ترکیب‌های حاصل از عملیات جبری اعمال شده بر روی پارامترهای الاستیک هر یک از محورهای افقی و قائم (جدول ۱)، باید چنان باشند که بیشترین میزان تفکیک را در بین ترکیب‌های ممکن به خود اختصاص دهند. با در نظر گرفتن نقطه میانی محورهای افقی و قائم در هر یک از الگوهای فیزیک سنگ جهت تعیین ضریب یکسان سازی در ترکیب کمیت‌های الاستیک، معادله‌های ۶ و ۷ در دستگاه مختصات جدید (X-Y) برای نوع عملیات (- و -) (به‌عنوان نمونه) حاصل گردیدند (شکل ۳).

$$X = (\text{Lambda} * \text{Rho}) - A \times (\text{AI}), A=7 \quad (4)$$

$$Y = (\text{Mu} * \text{Rho}) - B \times (\text{Vp/Vs}), B=42 \quad (5)$$

در این روابط، A و B ضرایب ثابت برای هم مقیاس سازی پارامترهای اصلی، AI: امپدانس موج تراکمی، Lambda و Mu: ضرایب لایه و Rho: چگالی می باشند. روش محاسبه ضرایب (A و B) بدین صورت می‌باشد که با توجه به خطوط افقی و قائم ترسیم شده از اواسط منحنی‌ها، محل تقاطع با هر یک از محورهای افقی و قائم در هر دو کراس - پلاتی که قرار است با یکدیگر جهت افزایش قدرت تفکیک، ترکیب شوند، مشخص می‌گردد. مقادیر مربوط به محل تقاطع محورهای افقی در هر دو کراس - پلات به ترتیب برای لایه - رو و امپدانس صوتی مقادیر ۹۷ و ۱۴ می‌باشند. مقدار عددی

کمیت‌ها در الگوهای استاندارد فیزیک سنگ، باید در ابتدا هم مقیاس سازی بین کمیت‌ها صورت بگیرد. جهت هم مقیاس سازی، مقادیر عددی میانگین تغییرات کمیتها (اواسط منحنی‌ها) در هر دو محور مختصات تعیین شده و ضرایب مربوط به هر یک از کمیت‌ها (برای هر دو محور قائم و افقی) جهت یکسان سازی عددی افزوده شود. در مرحله پایانی، جهت مقایسه و تعیین میزان جدایش نمودارهای حاصل از ترکیب الگوهای استاندارد فیزیک سنگ ترسیم شده، از پارامتری بنام درصد تفکیک قائم استفاده می‌شود که طبق رابطه ۵ تعریف می‌گردد:

$$(3) \quad \text{درصد تفکیک قائم} = \frac{y_2 - y_1}{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}}$$

در این رابطه،  $y_{\text{max}}$ : حد بالایی تغییرات کمیت برچسب شده به محور  $y$  و  $y_{\text{min}}$ : حد پایینی تغییرات کمیت برچسب شده در محور  $y$  می‌باشد. صورت کسر نیز بیانگر میزان جدایش دو روند از یکدیگر در الگوهای استاندارد فیزیک سنگ می‌باشد. به منظور محاسبه درصد تفکیک قائم، ابتدا بازه میانی منحنی‌های ترسیم شده مربوط به لیتولوژی در نمودارهای مربوط به الگوهای استاندارد فیزیک سنگ، مشخص نموده و سپس مقادیر مربوط به مختصات خط قائم ترسیم شده از مرکز منحنی‌ها را (مقادیر  $y_1$  و  $y_2$ ) محاسبه نموده و در رابطه ۵ جایگذاری می‌گردد. بالا بودن درصد تفکیک قائم نشان دهنده قدرت تفکیک بالای پارامترهای ترکیبی حاصل از مدول‌های الاستیک در جداسازی لیتولوژی منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

## ۵ نتایج و بحث

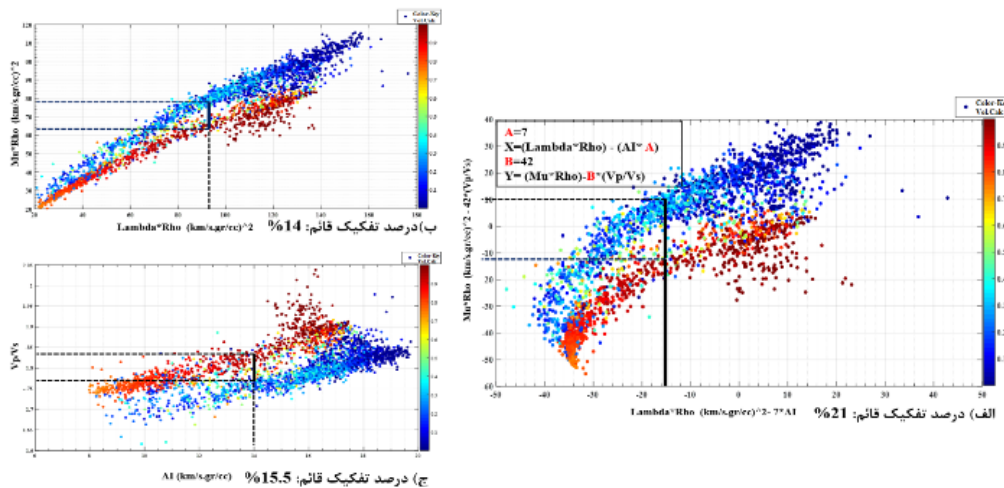
### ۵-۱ ساخت نشانگر سنگ شناسی

همانطور که در بخش قبلی بیان شد، در شکل ۲، چهار الگوی استاندارد فیزیک سنگ برای لیتولوژی غالب منطقه (سنگ آهک) و تخلخل سازند مورد مطالعه ترسیم

مقدار ۹۵ و ۱۴ به یکدیگر حاصل می شود که برابر با عدد روش دیگری که مشابه روش ژائو و هیلترمن (۲۰۱۰) می باشد، با پارامترهای لاندرا - رو - میو رو در منطقه مورد مطالعه جهت تفکیک لیتولوژی بکار گرفته شد (شکل ۴). در این روش ابتدا معادله رگرسیون خطی بین نقاط در نمودارهای فیزیک سنگ هم بعد (لاندرا - رو و میو - رو) تعیین می شود. سپس مقدار کمیت تخمین زده شده (پارامتر میو - رو) در معادله رگرسیونی، از مقدار مشاهده شده (اندازه گیری شده) همان کمیت، کسر می گردد و

ضریب A برای هم مقیاس سازی دو محور از تقسیم دو ۶/۹۳ می باشد. روش مشابهی برابر یافتن ضریب B همانند روش A بکار رفته است.

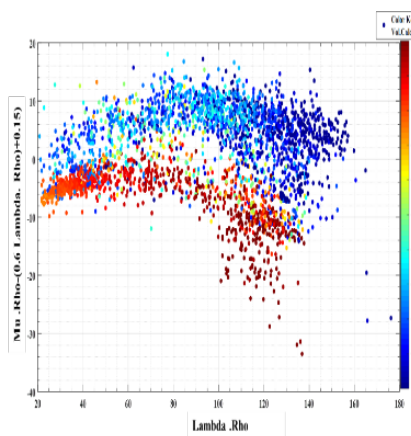
برای سایر عملیات روتین ذکر شده در جدول ۱، درصد تفکیک قائم محاسبه شده است (جدول ۲). با توجه به مقادیر درصد تفکیک قائم (جدول ۲)، الگوی که از عملیات (- و -) حاصل شده است، بیشترین مقدار تفکیک قائم لیتولوژی را در بین سایر الگوها به خود اختصاص داده است.



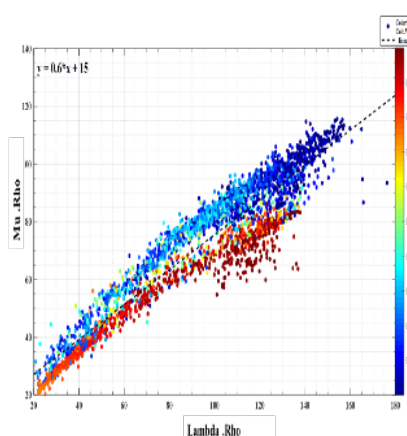
شکل ۳. اعمال عملیات ریاضی متعارف بر روی پارامترهای الاستیک و ترکیب آنها در نمودارهای استاندارد فیزیک سنگ جهت تفکیک لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه، به عنوان نمونه، از بین ۸ نوع عملیات روتین ریاضی در جدول ۱، نمودار متقاطع در وضعیت تفاضل کمیت های محور افقی و تفاضل کمیت های محور قائم (الف) مربوط به دو الگوی فیزیک سنگ استاندارد (ب و ج)، در این شکل آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود میزان تفکیک قائم در الگوهای استاندارد ب و ج به ترتیب ۱۴ و ۱۵/۵ درصد می باشند. در صورتیکه در نمودار الف، میزان تفکیک قائم افزایش یافته و به ۲۱ درصد رسیده است.

جدول ۱. تشریح کامل عملیات ریاضی متعارف بین کمیت های الاستیک فیزیک سنگ در ساخت الگوهای استاندارد فیزیک سنگ.

نوع عملیات	محور قائم (میو - رو و نسبت سرعتها)	محور افقی (لاندرا - رو و امپدانس تراکمی)
(+ و +)	جمع کمیت های محور قائم	جمع کمیت های محور افقی
(- و -)	تفاضل کمیت های محور قائم	تفاضل کمیت های محور افقی
(- و +)	جمع کمیت های محور قائم	تفاضل کمیت های محور افقی
(+ و -)	تفاضل کمیت های محور قائم	جمع کمیت های محور افقی
(* و *)	ضرب کمیت های محور قائم	ضرب کمیت های محور افقی
(÷ و ÷)	تقسیم کمیت های محور قائم	تقسیم کمیت های محور افقی
(* و ÷)	تقسیم کمیت های محور قائم	ضرب کمیت های محور افقی
(÷ و *)	ضرب کمیت های محور قائم	تقسیم کمیت های محور افقی



(ب)



(الف)

شکل ۴. افزایش میزان جدایش نمودارهای پتروفیزیکی (جهت تفکیک لیتولوژی) با اعمال روش مشابه ژائو و هیلترمن (۲۰۱۰)، الف) الگوی استاندارد اولیه، ب) تفکیک لیتولوژی بوجود آمده بعد از اعمال روش مشابه ژائو و هیلترمن (مقیاس قائم رنگی برحسب تغییرات کسر حجمی لیتولوژی غالب منطقه مورد مطالعه (آهکی) می باشد.

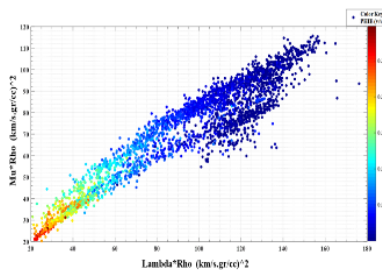
### ۲-۵ ساخت نشانگر با رویکرد تغییرات تخلخل

مراحل ساخت نشانگر تغییرات تخلخل همانند مراحل ساخت نشانگر سنگ شناسی در بخش قبلی می باشد. الگوهای استاندارد فیزیک سنگ برای بررسی روند تغییرات تخلخل در شکل ۵ ترسیم گردیده است. با توجه

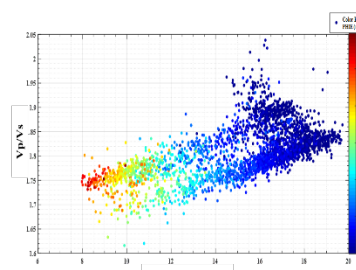
به عنوان یک کمیت جدید در محور مربوطه قرار می‌گیرد (معادله های ۶ و ۷).

$$\text{Mu} - \text{Rho (predicted)} = 0.6 \times (\text{Lambda} - \text{Rho}) + 15$$

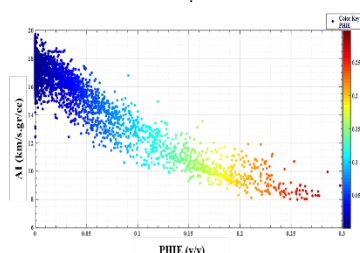
$$\text{Mu} - \text{Rho (New)} = \text{Mu. Rho (Observed)} - \text{Mu. Rho (Predicted)} \quad (۷)$$



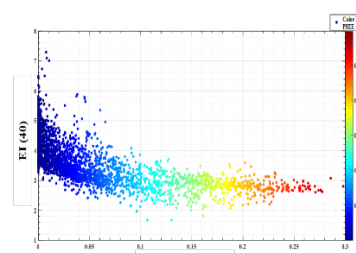
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. چهار الگوی استاندارد فیزیک سنگ به منظور بررسی روند تغییرات تخلخل (مقیاس قائم رنگی برحسب کسر حجمی تغییرات تخلخل می باشد). الف) الگوی امپدانس موج تراکمی - نسبت سرعت ها، ب) لاندا - رو و میو - رو، ج) تخلخل و الاستیک امپدانس در زاویه ۴۰ درجه و د) تخلخل و امپدانس موج تراکمی.

دو محور قائم و افقی در دستگاه مختصات جدید (X-Y) حاصل گردید.

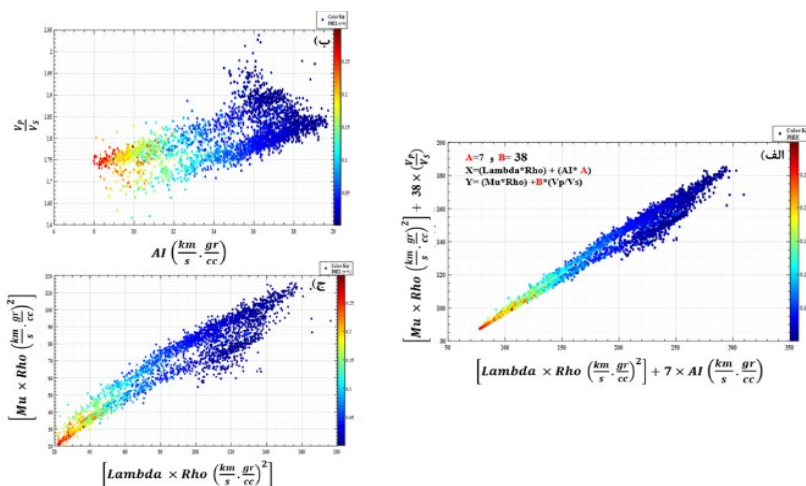
$$X = (\text{Lambda} \times \text{Rho}) + \text{AI} \times \text{A}, \text{A} = 7 \quad (8)$$

$$Y = (\text{Mu} \times \text{Rho}) + \text{B} \times \left(\frac{V_P}{V_S}\right), \text{B} = 38 \quad (9)$$

پارامترهای A و B همانند روابط قبلی ضرایب یکسان سازی می باشند. با اعمال عملیات روتین ریاضی بر روی پارامترهای الاستیک و ترکیب آنها در نمودارهای استاندارد فیزیک سنگ، همانند عملیات مربوط به تفکیک لیتولوژی، ۸ الگوی استاندارد حاصل گردید که در بین آنها، نمودار شکل ۶ (وضعیت: جمع محورهای قائم - جمع محورهای افقی)، بیشترین درصد تفکیک در زون های متخلخل را نشان می دهد. همانطور که بیان شد، در بررسی روند تغییرات تخلخل، برخلاف روند لیتولوژی، الگویی که بیشترین فشردگی را در مقابل تغییرات تخلخل از خود نشان می دهد به عنوان نشانگر با قدرت تفکیک بالا و همچنین با کمینه تاثیرپذیری از پارامترهای دیگر استفاده می شود.

به شکل ۵، تغییرات تخلخل در دو نمودار تخلخل - امپدانس صوتی و تخلخل - الاستیک امپدانس (برای زاویه ۴۰ درجه)، بخوبی صورت گرفته و روند تغییرات تخلخل تدریجی بوده است. به منظور افزایش میزان تفکیک زون های متخلخل همانند بخش مربوط به تفکیک لیتولوژی، از ترکیب های حاصل از اعمال عملیات روتین ریاضی بین پارامترهای الاستیک استفاده می شود (شکل ۶). ترکیب های حاصل از عملیات ریاضی صورت گرفته بر روی پارامترهای الاستیک (جدول ۳) باید به طریقی باشند که بیشترین میزان تفکیک را در بین ترکیب های ممکن داشته باشند. با توجه به مطالب بیان شده، نموداری که پراکندگی دیتای کمتری داشته و زون های تفکیک شده آن با توجه به مقیاس رنگی نمودار دارای مرز مشخصی می باشند، می توانند به عنوان نشانگر زون های متخلخل در نظر گرفته شوند.

با در نظر گرفتن نقطه میانی محورهای افقی و قائم در هر یک از نمودارهای فیزیک سنگ جهت تعیین ضریب یکسان سازی در ترکیب کمیت های الاستیک، معادله های ۱۱ و ۱۲ برای وضعیت جمع کمیت های هر



شکل ۶. الف) اعمال عملیات ریاضی روتین بر روی پارامترهای الاستیک و ترکیب آنها، ب) الگوی استاندارد فیزیک سنگ امپدانس موج تراکمی و نسبت سرعت ها و ج) الگوی استاندارد فیزیک سنگ لاند - رو و میو - رو، جهت بررسی روند تغییرات تخلخل (مقیاس رنگی قائم تغییرات تخلخل را نشان می دهد). از بین ۸ الگوی استاندارد حاصل، به عنوان نمونه، الگوی استاندارد (بالاترین فشردگی) را در بین زون های متخلخل به خود اختصاص داده است (با افزایش ۶ درصدی میزان تفکیک قائم) انتخاب گردید. (حروف A و B در نمودار الف بیانگر ضرایب یکسان سازی می باشند).

## ۶ نتیجه‌گیری

تفکیک لیتولوژی و بررسی روند تغییرات تخلخل، نقش مهمی در تحقق و پیشبرد عملیات اکتشافی دارد. ترکیب پارامترهای الاستیک در قالب الگوهای استاندارد فیزیک سنگ می‌تواند به عنوان معیاری جهت جداسازی لیتولوژی و بررسی روند تغییرات تخلخل با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری در زون‌های مخزنی مورد استفاده قرار گیرد. ساخت یک فاکتور سنگ شناسی و تخلخل مناسب با استفاده از پارامترهای الاستیک و ترکیب آنها، می‌تواند کمک بسزایی در تخمین لیتولوژی و جداسازی زون‌های متخلخل داشته باشد. در این پژوهش، با ترکیب پارامترهای الاستیک بکار رفته در الگوهای استاندارد فیزیک سنگ توسط چهار عمل اصلی ریاضیات، فاکتورهای مناسبی جهت تفکیک لیتولوژی و بررسی روند تخلخل استخراج گردید. به منظور تفکیک بهتر سنگ شناسی در منطقه مورد مطالعه، از بین ۸ الگوی

استاندارد ساخته شده توسط کمیت‌های الاستیک، الگویی که محورهای افقی و قائم آن به ترتیب بیانگر حاصل تفریق مقادیر کمیت‌های محورهای افقی (لاندا - رو و امیدانس صوتی) و محورهای قائم (میو - رو و نسبت سرعت‌ها) است، بیشترین تفکیک را در بین سایر الگوها به خود اختصاص داده است. در بررسی روند تغییرات تخلخل، الگوی استاندارد که محورهای افقی و قائم آن به ترتیب بیانگر تفاضل مقادیر کمیت‌های محورهای افقی (لاندا - رو - امیدانس صوتی) و محورهای قائم (میو - رو - نسبت سرعت‌ها) می‌باشد، بیشترین حساسیت به تخلخل و کمترین حساسیت را به پارامترهای دیگر دارد. با توجه به الگوهای حاصل مشاهده گردید که هرچقدر جدایش بین روندها کمتر و راستای حاصل فشرده‌تر باشد، تفکیک زون‌های متخلخل بهتر صورت می‌گیرد.

## منابع

- Bazvand, P., Kadkhodaei, A. (2016). "Comparison of reservoir characteristics and pore network of calcareous and dolomitic horizons; Case study: Kangan and Dalan gas reservoirs in South Pars field" 2016, Journal of Oil Research, Volume: 26, Issue: 5, <https://civilica.com/doc/1864809> (in Persian).
- Memariani, M. M., Khadrelou, R., Kermanshahi, H. (2016). "Geochemical investigation of gas condensates of South Pars field in the Persian Gulf basin, Iran", 2016, Iranian Petroleum Geology Journal, 20.1001.1.22518738.1390.1.1.6.4, <https://civilica.com/doc/1895825> (in Persian)
- Castagna, J. P., Batzle, M. L. and Eastwood, R.L. (1985). Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks: Geophysics, 50, 571-581.
- Domenico, S. N. (1974). Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale, GEOPHYSICS 39: 759-769. <https://doi.org/10.1190/1.1440464>.
- Falahat, R., McBeth, K., Shams, A., 2017, Presentation of applied four-dimensional seismic indicators for calculating pressure and saturation changes resulting from withdrawal and injection of oil and gas reservoirs, Scientific-Research Journal of Petroleum Geomechanics, Volume 1, Number2 (in Persian).
- Farfour, M., Russell, B. (2024). The old and new of fluid indicators: An overview and application. The Leading Edge 2024; 43 (5): 294-302. doi: <https://doi.org/10.1190/tle43050294.1>.
- Fatti, J. L., Vail, P. J., Smith, G.C., Strauss, P.J., and Levitt, P.R. (1994). Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case study history using the Geostack technique: Geophysics, 59, 1362-1376.
- George C. S., Gidlow, M. (2000). "A comparison of the fluid factor with  $\lambda$  and  $\mu$  in AVO analysis," SEG Technical Program Expanded Abstracts: 122-125. <https://doi.org/10.1190/1.1815615>.
- Gidlow, P.M., Smith, G.C., and Vail, P.J. (1992). Hydrocarbon detection using fluid factor traces, a case study: How useful is AVO analysis? Joint SEG/EAEG summer research

- workshop, Technical Program and Abstracts, 78-89.
- Goodway, B., Chen, T., Downton, J. (1997). Soc. Expl. Geophys. 67th Ann. Int. Mtg, Expanded Abstracts, 183–186.
- Liu, Z., Sun, S. (2015). The differential Kuster–Toksöz rock physics model for predicting S-wave velocity, Journal-
- Menlikli, C., Hayes, F., Zhao, J., Wakelin, A., Xu, Z., Fan, H., Umbaar, D., Wilkinson, K., Lomas, K., Purcell C. (2024). Poisson's ratio-LambdaRho rock-physics templates and a study on sensitivity of different fluid indicators. *Interpretation* 2024; doi: <https://doi.org/10.1190/INT-2024-0003.1>.
- Nasrnia, B., Falahat, R., Kadkhodaie, A. (2024). Log-based estimation of magnitude, azimuth and causes of anisotropy using a committee machine-based model. *Earth Science Informatics*. 17. 1-21. 10.1007/s12145-024-01275-w.
- Saberi, M.R. (2020), "Fluid detection in carbonate rocks by integrating well logs and seismic attributes," *Interpretation* 8: SA1-SA10. <https://doi.org/10.1190/INT-2019-0054.1>.
- Shuey, R. T. (1985). A simplification of the Zepppritz equations. *Geophysics*, 50(4), 609-614.
- Smith, G.C., Gidlow, P.M. (1987). Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas. *Geophys. Prospect.*, 35, 993–1014.
- Zhou, Z., Hilterman, F.J. (2010), "A comparison between methods that discriminate fluid content in unconsolidated sandstone reservoirs," *GEOPHYSICS* 75: B47-B58. <https://doi.org/10.1190/1.3253153>.

## Providing new factors for estimating lithology and investigating porosity changes using a combination of compressional and shear wave velocities

Behzad Nasrnia<sup>1</sup> and Reza Falahat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Petroleum Engineering, Exploration, Faculty of Petroleum and Gas Engineering, Tabriz University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Exploration, Faculty of Petroleum and Gas Engineering, Tabriz University of Technology, Tabriz, Iran

(Received: 25 February 2025, Accepted: 21 April 2025)

### Abstract

Electrical resistivity tomography is a non-invasive, near-surface geophysical technique commonly used. In recent decades, lithological and porosity factors have been used to a limited extent using seismic data as a criterion that shows lithology type, porosity changes, and saturation in hydrocarbon reservoirs. Most lithological factors have been introduced based on analyses of amplitude changes with offset from the source and determination of the ratio of compressional and shear wave velocities. Thus, by using the relationships related to amplitude changes with offset period as well as the approximating relationships of the Zoeppritz equations, various lithology and fluid factors can be extracted. For example, estimating and calculating saturation and pore pressure changes resulting from production and injection operations in hydrocarbon reservoirs, is also considered one of the applications of Seismography. Lithological separation and investigation of porosity changes play an important role in the realization and advancement of exploration operations. Constructing an appropriate lithological and porosity factor using elastic parameters and their combination can be of great help in estimating lithology and separating porous zones. In addition to conventional factors, cross-plotting compressional wave velocity changes versus shear wave velocity changes, provides valuable information about lithology and their characteristics. The use of standard rock physics templates in many hydrocarbons, reservoirs has led to the separation of gas-bearing from water-bearing reservoirs. In this study, using standard rock physics templates and combinations of elastic parameters involved in them (such as compressional-to-shear wave velocity ratio,  $\lambda$ ,  $\rho$ , and elastic impedance) through mathematical routine operations, the trend of porosity and lithology changes was investigated and analyzed with the aim of increasing the resolution. These new combinations were presented with the aim of directly using the results of seismic inversion. In this study, by combining elastic parameters used in standard rock physics templates with four main mathematical operations, appropriate factors for lithological separation and investigation of porosity trends were extracted. In order to better distinguish the lithology in the study area, among the 8 standard patterns made by elastic parameters, the pattern whose horizontal and vertical axes represent the result of subtracting the values of the quantities on the horizontal axes ( $\lambda$ - $\rho$  and acoustic impedance) and the vertical axes ( $\mu$ - $\rho$  and velocities ratio), respectively, has the highest separation among the other patterns. In examining the trend of porosity changes, the standard pattern whose horizontal and vertical axes represent the difference between the values of the quantities on the horizontal axes ( $\lambda$ - $\rho$  - acoustic impedance) and the vertical axes ( $\mu$ - $\rho$  - velocities ratio), respectively, has the highest sensitivity to porosity and the lowest sensitivity to other parameters. In the study area, the results showed that the appropriate combination of elastic parameters ( $\lambda$ - $\mu$ - $\rho$  with acoustic impedance quantities and velocity ratios) led to an improvement in the lithology resolution by 7% and the separation of porous zones by 6% compared to the initial standard templates in the study area.

**Keywords:** lithological and porosity factors, compressional to shear wave velocity ratio, standard rock physics templates, elastic parameters