

ادغام وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای و روابط فیزیکی سنگی برای تحلیل و تعیین توزیع انواع شیل در یکی از میادین خلیج فارس

بنیامین خادم العموم^۱، عبدالرحیم جواهریان^{۲*}، و محمدرضا صابری^۴

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ استاد بازنشسته، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۴ مدیر توسعه و تحقیق فیزیکی سنگ، شرکت CGG، لاهه، هلند

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱)

چکیده

توصیف مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای که با عنوان توصیف لرزه‌ای مخزن شناخته می‌شود، یکی از روش‌های بهینه برای شناخت مخازن هیدروکربنی است. با توجه به نقش یکپارچه‌کننده فیزیکی سنگ، استفاده از آن در توصیف لرزه‌ای مخزن ضروری است. یکی از کمیت‌های مخزنی مهم در توصیف لرزه‌ای مخزن، حجم شیل و به‌طور کلی مطالعه شیل موجود در مخزن است. وجود فراوان شیل در ناحیه‌ای از مخزن باعث کاهش کیفیت مخزنی می‌شود و باید مناطق مخزنی از مناطق غیرمخزنی تفکیک شوند؛ بنابراین با توجه به اثرهای مخربی که شیل‌ها بر کیفیت مخزن دارند، شناسایی توزیع انواع گوناگون شیل‌ها نیز مهم است. در پژوهش حاضر به بررسی و مطالعه شیل‌های موجود در یکی از میادین غربی خلیج فارس با استفاده از فیزیکی سنگ پرداخته شده است. برای تفکیک نحوه توزیع انواع شیل‌ها در این میدان، از قالب‌های فیزیکی سنگی، نتایج وارون‌سازی توأم، مدل‌سازی تجربی فیزیکی سنگی و مدل توماس و استیبر استفاده شده است. پس از بررسی‌ها مشخص شد نواحی انتهایی این مخزن، حاوی شیل‌های ساختاری و قسمت‌های میانی حاوی شیل‌های پراکنده و لایه‌ای است که باعث کاهش کیفیت مخزن می‌شوند. با توجه به روش ارائه‌شده در این مقاله می‌توان محل توزیع انواع شیل‌ها را شناسایی کرد و به‌این ترتیب به شناسایی بهتر مخزن میدان مورد نظر پرداخت.

واژه‌های کلیدی: توصیف لرزه‌ای مخزن، مدل‌سازی فیزیکی سنگی، مدل توماس و استیبر، وارون‌سازی توأم

۱ مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا برای منابع هیدروکربنی و کاهش منابع هیدروکربنی مرسوم، که برای بهره‌برداری و اکتشاف آنها به تلاش زیادی نیاز نیست، لازم است بار دیگر میادینی را که در حال بهره‌برداری هستند، با روش‌های متفاوتی که امروزه معرفی شده‌اند، از جنبه‌های مختلف تحلیل و بررسی کرد. یکی از این روش‌ها، مدل‌سازی‌های فیزیکی سنگی است. از این مدل‌ها که باید با تمام اطلاعات مخزنی موجود سازگار باشند، می‌توان در بسیاری از برنامه‌های مختلف و گردش کارهایی نظیر توصیف مخزن، تحلیل و بررسی ناهمسانگردی، امکان‌سنجی چهاربعدی و مدل‌سازی و تحلیل و بررسی تغییرات دامنه نسبت به دورافت و آزمون استفاده کرد (صابری، ۲۰۱۳).

در میان کمیت‌های پتروفیزیکی، حجم شیل و به‌طور کلی ویژگی‌های آن در توصیف مخزن حائز اهمیت است. در مطالعات پتروفیزیکی مرسوم است که برای قسمت جامد تمام سنگ‌ها، دو تشکیل‌دهنده در نظر گرفته‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: خمیره و شیل. رسوبات تشکیل‌شده از کانی‌های آلومینوسیلیکاته (Aluminosilicate) آبدار را شیل می‌نامند. مجموع قسمت‌های جامد تشکیل‌دهنده سنگ‌ها (دانه‌های اصلی و سیمان) به جز شیل را خمیره در نظر می‌گیرند. به این ترتیب وجود رس در سنگ‌ها بر حسب درصد و مشخصات آنها در مطالعات تأثیر می‌گذارد.

پژوهشگران مطالعات مختلفی به منظور توصیف مخزن برای استخراج کمیت‌های پتروفیزیکی انجام داده‌اند. توماس و استیبر (۱۹۷۵) یک مدل فیزیکی سنگی ارائه کردند که با آن می‌توان تفکیک توزیع شیل را علاوه بر تعیین تخلخل ماسه‌سنگ و درصد آن محاسبه کرد. سمز و آندریا (۲۰۰۱) به مطالعه تأثیر انواع شیل در مدل‌سازی‌ها و پاسخ‌های کشتان ناشی از آنها پرداختند. آوست و

اودگارد (۲۰۰۴) روش قالب‌های فیزیکی سنگی را معرفی کردند که می‌توان با استفاده از آن و به کارگیری مدل‌سازی فیزیکی سنگی، تفسیر نمودارهای عرضی مختلف را برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های مختلف و سیالات آنها از یکدیگر ساده کرد. از بین بررسی‌هایی که با قالب‌های فیزیکی سنگی انجام می‌شوند، می‌توان به مطالعات چی و هن (۲۰۰۹) اشاره کرد. برای توصیف مخزن همچنین می‌توان از ترکیب روش‌های وارون‌سازی قطعی، تصادفی و مقاومت کشتان تعمیم‌یافته استفاده کرد که وایت کمب و همکاران (۲۰۰۲) معرفی کردند. پرادهان و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از ارزیابی‌های پتروفیزیکی و مدل توماس و استیبر، اقدام به شناسایی مناطق مناسب از نظر نبود شیل برای ذخیره گاز دی‌اکسید کربن کردند. سامبا و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مفهوم مقاومت کشتان تعمیم‌یافته، به توصیف مخزن و استخراج کمیت‌های پتروفیزیکی نظیر اشباع آب و حجم شیل در میدان نانگا حوضه کنگو غربی پرداختند. ژیانگ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از وارون‌سازی توأم و تحلیل و بررسی در فضای لاند-مو-رو (Lambda-Mu-Rho, LMR) مخزن را توصیف و کمیت‌های پتروفیزیکی آن را استخراج کردند. دونگ و همکاران (۲۰۱۸) با ادغام ارزیابی‌های پتروفیزیکی، رسوب‌شناسی و پتروگرافی به توصیف مخزن ماسه‌ای مک‌کی واقع در حوضه تاراناکا نیوزیلند پرداختند و برای شناسایی توزیع شیل در مخزن، از نمودار عرضی (cross plot) تخلخل به دست آمده از نگار چگالی بر حسب تخلخل حاصل از نگار نوترون استفاده کردند. آنها با تهیه این نمودار عرضی و با توجه به مکان قرارگیری نمونه‌های مختلف در این نمودار، نحوه توزیع انواع مختلف شیل را تفکیک کردند.

در این مقاله، با توجه به اهمیت شناسایی نوع توزیع شیل و وجود مشکلاتی نظیر کاهش تراوایی و تخلخل مخزن ناشی از انواع شیل‌ها، ابتدا مدل فیزیکی سنگی

مخزن ماسه‌ای یکی از میادین غربی خلیج فارس واقع در ایران ساخته می‌شود و از آن به‌عنوان قالب فیزیک سنگی برای تفکیک نواحی حاوی شیل از دیگر سنگ‌شناسی‌های موجود در منطقه استفاده می‌شود. در مرحله بعد، با استفاده از مدل توماس و استیبر به تحلیل نحوه توزیع شیل در ناحیه مورد بررسی پرداخته می‌شود سپس برش عمقی از مکعب حجم شیل ساخته شده برای شناسایی نواحی حاوی شیل ارائه می‌شود.

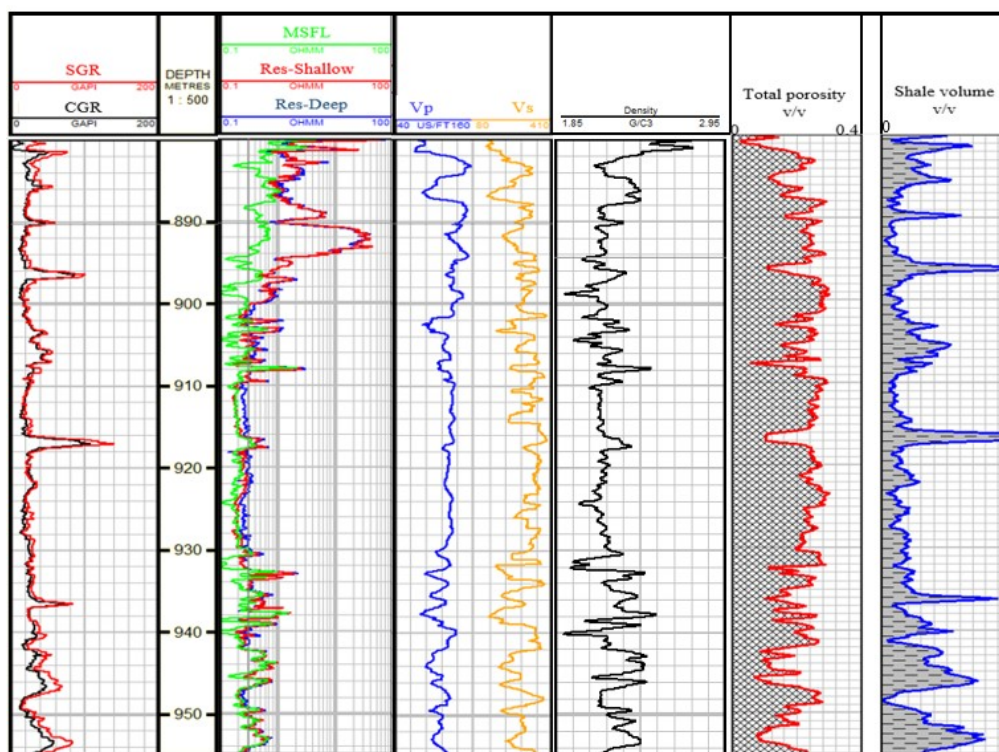
۲ توصیف میدان و داده‌ها

در حوضه خلیج فارس گستره وسیعی از چینه‌های مختلف و مخازن متعدد وجود دارد. سنگ‌های مخزنی موجود در این ناحیه از ژوراسیک میانی (Middle Jurassic) تا الیگو-میوسن (Oligo-Miocene) را دربرمی‌گیرد. میدان مورد بررسی در قسمت غربی خلیج فارس، در ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی جزیره خارک واقع شده است. عمده تولید هیدروکربن این میدان از بخش ماسه‌سنگی اهواز است که تصور می‌شود دنباله سازند غار در کویت و جنوب شرق عراق باشد که به سمت شمال تا منطقه اهواز به‌صورت زبانه‌ای ظاهر و به‌صورت بین‌انگشتی در قاعده سازند آسماری وارد می‌شود (خسرو تهرانی، ۱۳۸۹). بخش‌های فرعی مخزنی این میدان، آسماری بالایی (فارس زیرین) و آسماری زیرین هستند. پوش سنگ قسمت مخزنی این میدان چند متر از انتهای آسماری بالایی است که سنگ‌شناسی انیدریتی دارد. ضخامت این مخزن در حدود ۸۰ تا ۹۰ متر است و شامل دانه‌های ماسه‌ای ریز تا متوسط همراه با میان‌لایه‌های شیلی و دولومیتی است. در این میدان کیفیت مخزنی بسیار خوب است و تخلخلی در حدود ۳۰ درصد و تراوایی در حدود ۲ تا ۴ میلی‌داری دارد. مخزن ماسه‌سنگی این میدان جوان‌ترین و همچنین کم‌عمق‌ترین مخزن تولیدکننده نفت در خلیج فارس است. ماسه‌های این بخش حاوی کوارتز و

مقدار کمی فلدسپار هستند. این ماسه‌ها در زمینه‌ای از کانی‌های رسی آواری و مقادیر کمی مواد آلی قرار دارند. مخزن در این میدان شامل سه واحد آسماری کربناته تحتانی، ماسه‌سنگ غار (بخش ماسه‌ای اهواز) و آسماری کربناته فوقانی (فارس زیرین) است که در این مقاله به بررسی واحد میانی آن پرداخته می‌شود.

در مطالعه این منطقه از سه چاه استفاده شده است که اطلاعات مربوط به سرعت موج تراکمی، چگالی، پرتوی گاما و مقاومت الکتریکی آنها موجود است. به‌جز یکی از چاه‌ها، بقیه چاه‌ها فاقد نگار سرعت موج برشی هستند که برای تخمین سرعت موج برشی آنها از مدل گریبرگ و کاستاگنا (۱۹۹۲) استفاده شده است. شایان ذکر است که نتایج این تخمین با مدل‌سازی‌های فیزیک سنگی نیز بررسی شده است و با هم تطابق دارند. شکل ۱ داده‌های موجود در یکی از چاه‌ها را نشان می‌دهد. به‌منظور استخراج کمیت‌های پتروفیزیکی حجم شیل و تخلخل که برای پیشبرد این مقاله به آنها نیاز است، به‌ترتیب از نگارهای پرتوی گاما و چگالی استفاده شده است (شکل ۱).

برای انجام مراحل تفسیری به‌ویژه مراحل توصیف لرزه‌ای مخزن باید از داده‌های لرزه‌نگاری به‌خصوص داده‌های سه‌بعدی لرزه‌نگاری استفاده کرد. داده‌های لرزه‌ای استفاده‌شده در این مقاله از داده‌های تفسیرشده سه‌بعدی قبل از برانبارش تهیه شده که در سال ۲۰۰۲ از کل این میدان واقع در نواحی غربی خلیج فارس برداشت شده است. داده‌های لرزه‌ای متعلق به خطوط چشمه ۱۶۰۰ تا ۱۹۰۰ و خطوط گیرنده ۵۴ تا ۶۱۲ است. فاصله بین هر دو نقطه میانی مشترک ۱۲/۵ متر و فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه است. برداشت به‌کمک دو کشانه که هرکدام حاوی ۲۴۰ کانال با طول ۳۰۰۰ متر و فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر هستند و با استفاده از دو تفنگ بادی در عمق ۴ متر و به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر انجام شده است. فاصله میان دو چشمه متوالی ۱۸/۷۵ متر است. داده‌ها در قالب



شکل ۱. نمایش نگارهای موجود در چاه C برای بخش غار به همراه کمیت‌های پتروفیزیکی استخراج‌شده برای همان چاه

های عمیق‌تر است. عضو ماسه‌سنگی اهواز در این میدان در اعماق کم واقع شده و به دلیل ضخامت مناسب آن، از نظر لرزه‌نگاری قابل شناسایی است. داده‌های لرزه‌ای از کیفیت مناسبی برخوردار هستند؛ بنابراین برای مطالعات وارون‌سازی لرزه‌ای مناسب هستند. در طول کل مقطع لرزه‌ای، مخزن ماسه‌سنگی و قسمت گازی آن با مقاومت صوتی کم مشخص می‌شوند درحالی‌که میان‌لایه‌های دولومیتی و ماسه‌های حاوی سیمان دولومیتی مقاومت صوتی زیادی دارند (غضبان، ۲۰۰۹). قسمت فوقانی این ماسه‌سنگ یک اختلاف مقاومت صوتی واضح و قوی منفی را با نهشته‌های سخت‌تر دولومیتی و انیدریتی روی خود نشان می‌دهد. با توجه به کیفیت خوب داده‌ها، پیدا کردن قسمت فوقانی ماسه‌سنگ ذکر شده آسان است. به دلیل وجود کلاهیگ گازی در این مخزن و تخلخل زیاد آن، تا حدودی بی‌هنجاری‌های سرعتی در آن دیده می‌شود که کیفیت داده‌های لرزه‌ای را مقداری کاهش می‌-

SEGD روی نوارهای ۳۵۹۰ برداشت شده‌اند. مراحل پردازشی که قبل از برانبارش روی داده‌ها انجام شده است شامل تصحیحات گسترش هندسی، تصحیح برنراند نرمال، مهاجرت قبل از برانبارش با هدف بازیافت دامنه صحیح و مناسب برای تحلیل تغییرات دامنه نسبت به دورافت و تصحیح اثر جذب است. خروجی پردازش، برداشت‌های نقطه میانی مشترک با فاصله زمانی نمونه- برداری ۴ میلی‌ثانیه در قالب SEG-Y و فاصله دورافت بین ۱۳۷ تا ۳۰۳۷ است. فاصله هر دو برداشت نقطه میانی مشترک ۱۲/۵ متر است. همچنین شایان ذکر است که در این مقاله از خطوط چشمه و گیرنده عبورکننده از چاه‌های A، B و C استفاده شده و تمام وارون‌سازی‌ها و تفاسیر صورت گرفته در همین ناحیه انجام شده است. هدف تفسیر لرزه‌نگاری سه‌بعدی در این میدان، توصیف بهتر وضعیت ساختمانی بخش فوقانی عضو غار در مخزن آسماری و سازندهای عمیق‌تر و نیز شناخت الگوی گسل-

سپس برای ساخت مدل فیزیک سنگی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در ادامه، ابتدا به مفاهیم و روابط ریاضی مدل-های استفاده‌شده پرداخته می‌شود سپس نحوه ساخت و استفاده از این مدل‌سازی‌ها بیان خواهد شد.

۳-۱ روابط فیزیک سنگ

به‌طور کلی می‌توان گفت که سنگ مخزن از سه بخش عمده کانی‌های سنگ، حفرات و سیالات داخل این حفرات تشکیل شده است. برای هر کدام از این بخش‌ها از روابط فیزیک سنگی متعددی استفاده می‌شود سپس این روابط با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا مدل سنگ مخزن مورد نظر ساخته شود.

به‌منظور ساخت اجزای تشکیل‌دهنده سنگ (کانی‌های سنگ) از مدل‌های محیط مؤثر استفاده می‌شود. یکی از این مدل‌ها، مدل هشین-شیرینکمن (۱۹۶۳) است که در گروه مدل‌های مرزی طبقه‌بندی می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که ماده، کشسان، خطی و همسانگرد است و هیچ‌گونه قیدی برای هندسه اجزای تشکیل‌دهنده وجود ندارد. بریمن (۱۹۹۵) روابط تعمیم‌یافته هشین-شیرینکمن را برای بیش از دو فاز تعمیم داد:

$$\begin{aligned} K^{HS+} &= \Lambda(\mu_{\max}), \\ K^{HS-} &= \Lambda(\mu_{\min}), \\ \mu^{HS+} &= \Gamma(\xi(K_{\max}, \mu_{\max})), \\ \mu^{HS-} &= \Gamma(\xi(K_{\min}, \mu_{\min})), \end{aligned} \quad (1)$$

که + و - نشان‌دهنده مرزهای فوقانی و تحتانی، K ضریب بالک و μ ضریب برشی کانی‌های سنگ است و

$$\begin{aligned} \Lambda(z) &= \left\langle \frac{1}{K(r) + z} \right\rangle^{-1} - \frac{4}{3}z, \\ \Gamma(z) &= \left\langle \frac{1}{\mu(r) + z} \right\rangle^{-1} - z, \\ \xi(K, \mu) &= \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right), \end{aligned}$$

دهد. وجود کلاهک گازی در مخزن ماسه‌سنگی متخلخل غیرفشرده و قرار گرفتن سازند آسماری روی آن باعث ایجاد اختلاف مقاومت صوتی قوی شده است. بخش تحتانی این مخزن ماسه‌سنگی نیز نشان‌دهنده یک اختلاف مقاومت صوتی واضح و قوی است؛ زیرا یک بخش نرم روی یک بخش سخت‌تر (آسماری تحتانی) قرار گرفته است (غضبان، ۲۰۰۹). با وجود نکات ذکر شده، کیفیت داده‌های لرزه‌ای برای انجام مطالعات توصیف لرزه‌ای مخزن مناسب است.

۳ فیزیک سنگ

فیزیک سنگ پلی میان خواص کشسان، خواص مخزنی و ساختار مخزن ایجاد می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت که علم فیزیک سنگ به دنبال پیدا کردن رابطه‌ای بین خواص مخزنی و پاسخ‌های کشسانی مشاهده‌شده در عملیات مختلف است و ساختن چنین مدل‌هایی یکی از اهداف فیزیک سنگ است. یکی دیگر از اهداف فیزیک سنگ این است که می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت داده‌های موجود یا تخمین‌زده‌شده استفاده کرد. هدف دیگر، استفاده از مدل‌های ساخته‌شده به‌منظور تفسیر نمودارهای عرضی مختلف برای دقیق‌تر کردن فرایند تفسیر است که از آن با عنوان قالب‌های فیزیک سنگی یاد می‌شود. مدل‌های فیزیک سنگی متعددی وجود دارد. آوست و همکاران (۲۰۰۵) مدل‌های فیزیک سنگی را به سه گروه کلی مدل‌های نظری، تجربی و ابتکاری تقسیم‌بندی کردند. باوجود این، نگاه دقیق‌تر به مدل‌های فیزیک سنگی و چگونگی انجام آنها به بهبود این طبقه‌بندی منجر شد؛ طبقه‌بندی براساس مراحل ساخت مدل‌های فیزیک سنگی تغییر کرد و مدل‌ها به چهار گروه مدل‌های سیال منفدی، مدل‌های تجربی و ابتکاری، مدل‌های نظری و مدل‌های ترکیبی تقسیم شد (صابری، ۲۰۱۷). براین اساس، ابتدا سیال و خمیره سنگ به‌طور جداگانه ساخته می‌شود

که C میانگین تعداد نقاط تماس دانه‌ها، P فشار مؤثر و U ضریب پواسون است. برای به‌دست آوردن میانگین تعداد نقاط تماس دانه‌ها می‌توان از رابطه گارسیا و مدینا (۲۰۰۶) استفاده کرد:

$$C = 4.46 + 9.7(0.384 - \phi)^{0.48}, \quad (۴)$$

که ϕ تخلخل سنگ است. پس از ساخت چارچوب خشک سنگ دانه‌ای در تخلخل بحرانی که نقطه آغازین مدل است، باید مقادیر ضرایب بالک و برشی سنگ خشک برای تخلخل‌های کمتر از این مقدار نیز تعمیم یابند؛ بنابراین از مدل ماسه نرم استفاده می‌شود. مدل ماسه نرم که به مدل ماسه سیمان‌نشده نیز معروف است، امکان محاسبه ضرایب کشسان بالک و برشی خشک ماسه-سنگی را فراهم می‌کند که سیمان آن دور از نقطه تماس دانه‌ها ته‌نشین شده است. نقطه آغازین این مدل، مدل هرترز-میندلین است و تعمیم آن برای تخلخل‌های کمتر از تخلخل بحرانی با مدل مرز تحتانی بهبودیافته هشین-شیرینکمن به‌صورت زیر نوشته می‌شود (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$K_{MHS} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{K_{HM} + \frac{4}{3}\mu_{HM}} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{K + \frac{4}{3}\mu_{HM}} \right]^{-1} \frac{4}{3}\mu_{HM},$$

$$\mu_{MHS} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{\alpha_{soft}} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{\beta_{soft}} \right]^{-1} - \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right), \quad (۵)$$

$$\alpha_{soft} = \mu_{HM} + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right),$$

$$\beta_{soft} = \mu + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right),$$

که ϕ_0 میزان تخلخل نقطه آغازین، K_{HM} و μ_{HM} به-ترتیب ضرایب کشسانی بالک و برشی هرترز-میندلین، K

که $\langle - \rangle$ نشان‌دهنده میانگین‌گیری است.

برای مدل‌سازی سیالات موجود در سنگ، به مدل‌های سیال منفذی نیاز است. با توجه به چگونگی قرار گرفتن سیالات موجود در کنار یکدیگر، مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی وجود دارد. یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها برای سیالات، مدل وود (۱۹۵۵) است و زمانی استفاده می‌شود که سیالات داخل مخزن به-صورت همگن و یکپارچه در کنار یکدیگر قرار داشته باشند. این مدل با رابطه زیر بیان می‌شود (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\frac{1}{K_{fl}} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i}, \quad (۲)$$

که K_{fl} ضریب بالک سیال منفذی، f_i درصد هر سیال و K_i ضریب بالک سیالات موجود در مخزن است. برای مدل‌سازی چارچوب خشک سنگ‌های دانه‌ای نظیر ماسه-سنگ‌ها به مدل‌های تماسی نیاز است. در این راستا می‌توان از مدل هرترز-میندلین (میندلین، ۱۹۴۹) استفاده کرد. به‌طور کلی خواص کشسان مؤثر، چیدمانی از دانه‌های کره‌ی شکل وابسته به سختی عمودی و مماسی دو دانه در حال تماس است. برای چیدمان تصادفی تعدادی کره، ضرایب بالک و برشی مؤثر، با تخلخل، تعداد نقاط تماس دانه‌های میانگین، شعاع کره، سختی عمودی و مماسی کنترل می‌شود. با استفاده از مدل هرترز-میندلین، ضرایب بالک و برشی برای محیطی با چیدمان تصادفی و مشابهی از کره‌ها را به‌ترتیب می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$K_{HM} = \left[\frac{C^2(1-\phi)^2 \mu^2}{18\pi^2(1-\nu)^2} P \right], \quad (۳)$$

$$\mu_{HM} = \frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \left[\frac{3C^2(1-\phi)^2 \mu^2}{2\pi^2(1-\nu)} P \right],$$

درون‌چاهی) با یکدیگر متفاوت هستند؛ زیرا مقیاس آنها متفاوت است. روابط گسمن در فرکانس‌های کم صادق هستند که مرتبط با عملیات لرزه‌نگاری است ولی تخمین آزمایشگاهی و نگارهای درون‌چاهی برای فرکانس‌های بالا صادق هستند. شکل اولیه روابط گسمن به صورت زیر بیان می‌شود (ماو کو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\frac{K_{sat}}{K_m - K_{sat}} = \frac{K_{dry}}{K_m - K_{dry}} + \frac{K_{fl}}{\phi(K_m - K_{fl})}, \quad (7)$$

$$\mu_{sat} = \mu_{dry},$$

که K_{sat} ضریب بالک نمونه اشباع، K_{dry} ضریب بالک چارچوب سنگ، K_{fl} ضریب بالک سیال، K_m ضریب بالک خمیره سنگ، μ_{sat} و μ_{dry} به ترتیب ضریب برشی حالت اشباع و چارچوب سنگ هستند.

افزودن اطلاعات سرعت موج برشی به اطلاعات سرعت موج تراکمی معمولاً امکان تفاوت قائل شدن را میان اثر سنگ‌شناسی، سیالات منفذی و فشار منفذی فراهم می‌کند. این موضوع، دلیل اصلی و اساسی موفق بودن تحلیل و بررسی تغییرات دامنه با دورافت و مقاومت کشسانی برای توصیف مخزن و تشخیص هیدروکربن است. همچنین اطلاعات سرعت موج برشی راهکاری برای یافتن تمایز میان تغییرات فشار و اشباع در داده‌های چهاربعدی لرزه‌ای است. از کاربردهای دیگر اطلاعات سرعت موج برشی می‌توان به پدیده جدایش سرعت موج برشی در محیط‌های ناهمسانگرد اشاره کرد که یکی از مشخص‌کننده‌های مطمئن برای شکاف در مخازن است. توجه به این نکته ضروری است که همیشه استفاده از داده‌های سرعت موج برشی کارآمد نیست و کارآمدی آن، تابعی از تراکم‌پذیری سیال، عمق، سختی سنگ و میزان سیگنال به نوفه است (آوست و همکاران، ۲۰۰۵). در عمل به دلیل پرهزینه بودن اندازه‌گیری سرعت موج برشی، تلاش بر ایجاد روش‌هایی برای تخمین آن به کمک روابط

و μ به ترتیب ضرایب کشسانی بالک و برشی دانه‌ها هستند. گفتنی است از این کمیت‌ها به عنوان ضریب بالک خشک و ضریب برشی خشک در رابطه گسمن (۱۹۵۱) استفاده می‌شود.

درمقابل مدل ماسه نرم، مدل ماسه سخت قرار دارد که از همان فرضیات مدل ماسه نرم استفاده می‌کند با این تفاوت که نقطه آغازین را که همان مدل هرتر-میندلین در تخلخل بحرانی است، مدل مرز فوقانی بهبودیافته هشین-شیرینکمن برای تخلخل‌های کمتر از تخلخل بحرانی تعمیم می‌دهد (ماو کو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$K_{MHS} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{K_{HM} + \frac{4}{3}\mu} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{K + \frac{4}{3}\mu} \right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu,$$

$$\mu_{MHS} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{\alpha_{stiff}} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{\beta_{stiff}} \right]^{-1} - \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right), \quad (6)$$

$$\alpha_{stiff} = \mu_{HM} + \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right),$$

$$\beta_{stiff} = \mu + \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right).$$

روابط گسمن برای محاسبه اثر جایگزینی سیال بر خواص لرزه‌ای به کمک خواص چارچوب سنگ استفاده می‌شود. این روابط ضریب بالک یک محیط متخلخل اشباع از سیال را با استفاده از ضرایب بالک خمیره سنگ، چارچوب سنگ و سیال منفذی محاسبه می‌کنند. گفتنی است که خمیره سنگ، شامل کانی‌های سازنده سنگ است، چارچوب سنگ به اسکلت سنگ اطلاق می‌شود و سیال منفذی می‌تواند آب، گاز، نفت یا ترکیبی از آنها باشد. در روابط گسمن فرض می‌شود که جایگزینی سیال اثری بر ضریب برشی سنگ ندارد و همان ضریب برشی چارچوب سنگ در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که کمیت‌های تخمین زده شده از روابط گسمن و سایر روش‌ها (مانند تخمین‌های آزمایشگاهی و نگارهای

سازی سیالات، نوبت ساخت چارچوب سنگ است که با توجه به سخت نبودن ماسه‌سنگ مورد نظر، از مدل هرترز-میندلین استفاده شد. مراحل بعدی انجام گرفته برای ساخت مدل بخش غار عبارت‌اند از:

الف. ساخت چارچوب خشک سنگ در تخلخل بحرانی آن با مدل هرترز-میندلین

ب. تعمیم چارچوب ساخته‌شده برای مقادیر تخلخل کمتر از تخلخل بحرانی (بعد از تخلخل بحرانی، ذرات سنگ به‌طور معلق در سیال قرار می‌گیرند و قبل از آن، سنگ‌شدگی رخ می‌دهد.) در این مرحله، از مدل‌های ماسه‌سنگ نرم و ماسه‌سنگ سخت برای ارتباط تخلخل بحرانی به تخلخل صفر استفاده می‌شود.

ج. استفاده از مدل جانیشینی سیال گسمن برای تبدیل حالت خشک آن به حالت اشباع مورد نظر و ساخت کمیت‌های مورد نیاز.

شکل ۲ مدل ساخته‌شده برای بخش غار واقع در سازند آسماری را نشان می‌دهد. با توجه به این محدود-سازی، در این مقاله فقط از قسمت قبل از تخلخل بحرانی استفاده می‌شود که در آن، سنگ شکل گرفته است. همچنین از مدل‌سازی فیزیک سنگی می‌توان به‌منظور ساخت قالبی برای توصیف مؤثرتر مخزن استفاده کرد (چی و هن، ۲۰۰۹).

مختلف است. روابط و روش‌های متعددی برای تخمین سرعت موج برشی وجود دارد که در میان آنها، روابط تجربی گرینبرگ و کاستاگنا (۱۹۹۲) بسیار پرکاربرد است و برای تخمین سرعت موج برشی از سرعت موج تراکمی در سنگ اشباع از آب و کانی‌های مختلف ارائه شده است. در این روابط سرعت موج برشی سنگ اشباع از آب و مرکب از کانی‌های مختلف با میانگین‌گیری ساده آماری و همساز هرکدام از اجزای تشکیل‌دهنده سنگ به‌دست می‌آید. در این راستا به‌منظور نمایش ساده‌تر این روابط، ماوکو و همکاران (۲۰۰۹) چندجمله از این روابط را ارائه کردند که حاوی ضرایب برازش برای هر جزء تشکیل‌دهنده سنگ است. روابط گرینبرگ و کاستاگنا را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$V_S = a_{i2}V_P^2 + a_{i1}V_P + a_{i0}, \quad (8)$$

که سرعت‌ها برحسب کیلومتر بر ثانیه است. ضرایب برازش در جدول ۱ ارائه شده‌اند. توجه به این نکته ضروری است که روابط بیان‌شده در قبل برای سنگ‌هایی است که به‌طور کامل اشباع از آب هستند. به‌منظور تخمین سرعت موج برشی برای حالت‌های دیگر اشباع سیالات مختلف باید از روابط گسمن (۱۹۵۱) به‌صورت بازگشتی استفاده کرد.

۲-۳ مدل‌سازی فیزیک سنگ و قالب‌های فیزیک سنگی

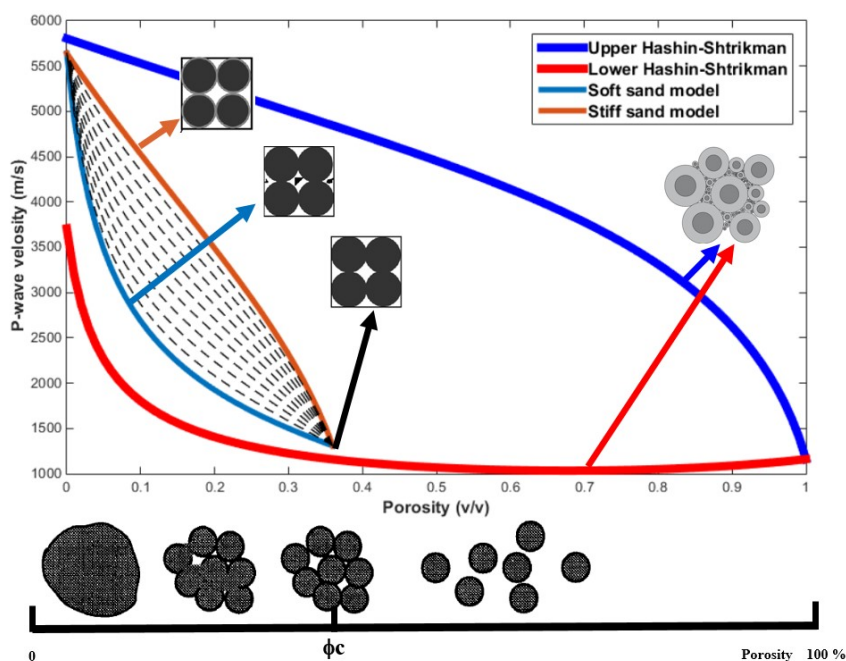
برای مدل‌سازی بخش غار ابتدا نیاز به ساخت کانی همگن است. برای دستیابی به این هدف، از مدل هشین-شیرینکمن استفاده شد. در مرحله بعد، سیال بخش غار باید ساخته شود که در این راستا، با توجه به اینکه چند نوع سیال در مخزن وجود دارد و با فرض اشباع همگن سیالات مخزنی، از مدل وود (۱۹۵۵) استفاده شد. بعد از یکپارچه-

جدول ۱. ضرایب برازش برای سنگ‌شناسی‌های مختلف

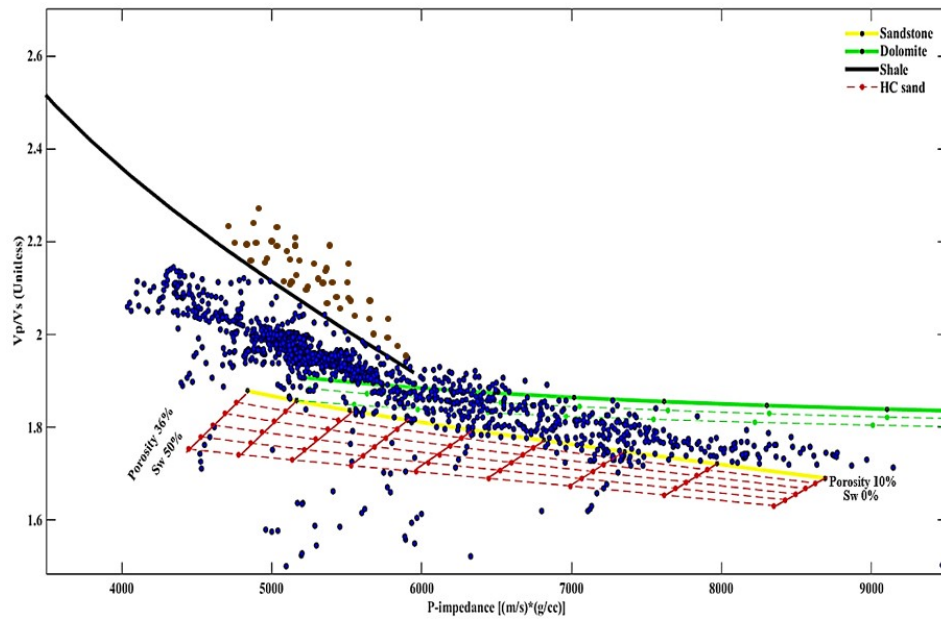
سنگ‌شناسی	a_{i3}	a_{i2}	a_{i1}
ماسه‌سنگ	۰	۰/۸۰۴۱۶	۰/۸۵۵۸۸
آهک	-۰/۰۵۵۰۸	۰/۰۱۶۷۷	۱/۰۳۰۴۹
دولومیت	۰	۰/۵۸۳۲۱	۰/۰۷۷۷۵
شیل	۰	۰/۷۶۹۶۹	۰/۸۶۷۳۵

می‌شوند. همچنین باید قسمت‌هایی از نمودار نیز مشخص شود که نشان‌دهنده حضور سیالات هیدروکربنی هستند. به‌همین علت با استفاده از روابط گسمن برای تخلخل‌های مختلف و حالت اشباع‌های مختلف از سیالات موجود در غار، قالب فیزیک سنگی مذکور بهبود یافت. قالب فیزیک سنگی ساخته‌شده به‌همراه داده‌های یکی از چاه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. با ساخت قالب فیزیک سنگی مناسب و مرتبط با منطقه مورد مطالعه، مراحل تفسیر نتایج وارون‌سازی شامل دو مرحله ساده استفاده از داده‌های چاه‌نگاری برای بازبینی اعتبار قالب فیزیک سنگی منتخب و استفاده از قالب فیزیک سنگی بازبینی شده است (آوست و اودگارد، ۲۰۰۴).

برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های مختلف و سیالات از یکدیگر، نمودارهای عرضی کمیت‌های کشسان رسم می‌شوند. تعداد بسیار زیادی از این نمودارهای عرضی وجود دارد که مهم‌ترین و معروف‌ترین آنها نمودار عرضی مقاومت صوتی موج تراکمی برحسب نسبت سرعت امواج تراکمی به سرعت امواج برشی است. بدون استفاده از قالب‌های فیزیک سنگی، تفسیر و تفکیک سنگ‌شناسی‌های مختلف و سیالات از یکدیگر کار آسانی نیست. در ساخت قالب‌های فیزیک سنگی ابتدا با در نظر گرفتن سنگ‌شناسی‌های موجود در منطقه - که در اینجا شامل کوارتز، شیل و دولومیت است - این مدل‌ها با استفاده از مدل‌سازی‌های فیزیک سنگی بیان‌شده در قبل، برای هر کدام از کانی‌های موجود و اشباع ۱۰۰٪ آب ساخته



شکل ۲. مدل ساخته‌شده به همراه نمایش فیزیکی دانه‌ها برای بخش غار. پیکان‌های قرمز، آبی پررنگ، مشکی، آبی کم‌رنگ و نارنجی تیره به ترتیب نمایش فیزیکی هشین-شیرینکمن پایین، هشین-شیرینکمن بالا، ماسه اولیه در تخلخل بحرانی، ماسه اولیه به همراه کانی‌های پرکننده منافذ و ماسه اولیه به همراه سیمان تماسی هستند. نمودار قرارگرفته در زیر، نشان‌دهنده ذرات تشکیل‌دهنده سنگ در حالت‌های مختلف قبل و بعد از تخلخل بحرانی است.



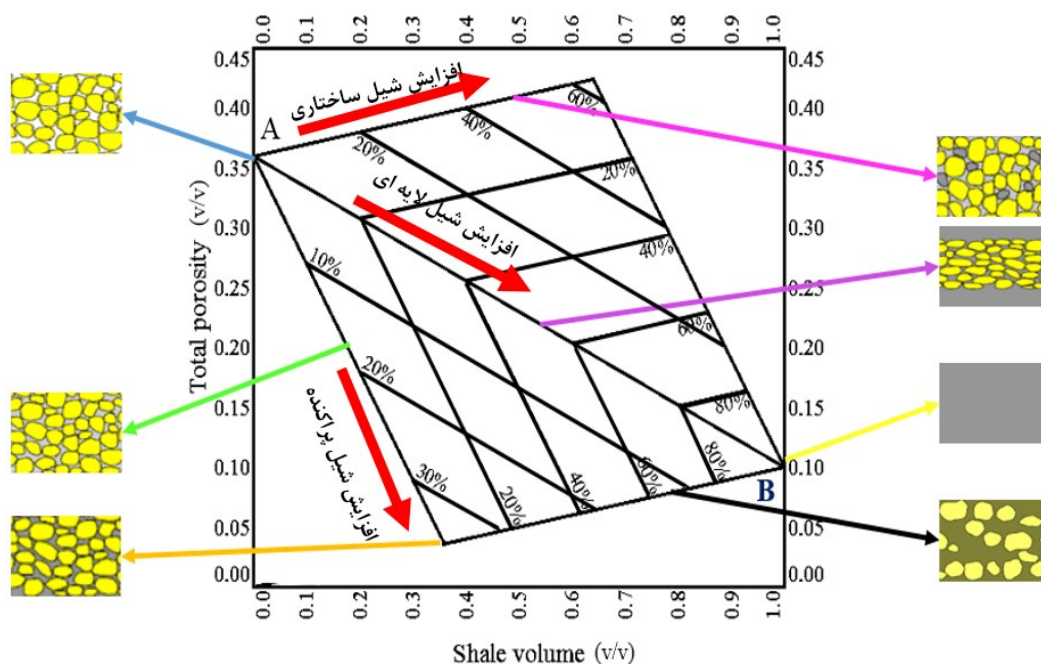
شکل ۳. قالب فیزیک سنگی ساخته‌شده برای چاه C. نقاط آبی‌رنگ نشان‌دهنده داده‌های مربوط به چاه است. مناطقی که در قسمت‌های خط چین قرمز قرار دارند، حاوی نفت (HC sand) و نقاط روی خط زردرنگ، اشباع از آب هستند. شیل‌ها با نقاط قهوه‌ای‌رنگ مشخص شده‌اند.

که تأثیری بر تخلخل مخزن ندارد ولی می‌تواند تراوایی عمودی را کاهش دهد. شیل‌های ساختاری نیز به جای دانه‌های سنگ قرار می‌گیرند و هیچ تأثیری بر تخلخل و تراوایی ندارند. شکل ۴ نشان‌دهنده این نمودار عرضی و توزیع شیل‌های مختلف برای یک مدل مصنوعی از ماسه-سنگ و شیل است.

۴ امکان‌سنجی برای توصیف لرزه‌ای مخزن

مطالعات توصیف لرزه‌ای مخزن و به‌طور کلی‌تر، مطالعات ژئوفیزیک مخزن نیازمند انجام دادن مراحل است که اولین مرحله از آن، بررسی‌های امکان‌سنجی است. در این مرحله که مرحله آغازین است، می‌توان از نگاره‌های درون‌چاهی به همراه مدل‌سازی فیزیک سنگی بهره برد و در نهایت، درباره توانایی شناسایی کمیت مورد مطالعه در منطقه تصمیم گرفت. با توجه به بررسی شیل در این مقاله، امکان‌سنجی شناسایی این کمیت ضروری است. در شکل ۵ به مطالعه توانایی تفکیک شیل در منطقه مورد مطالعه با

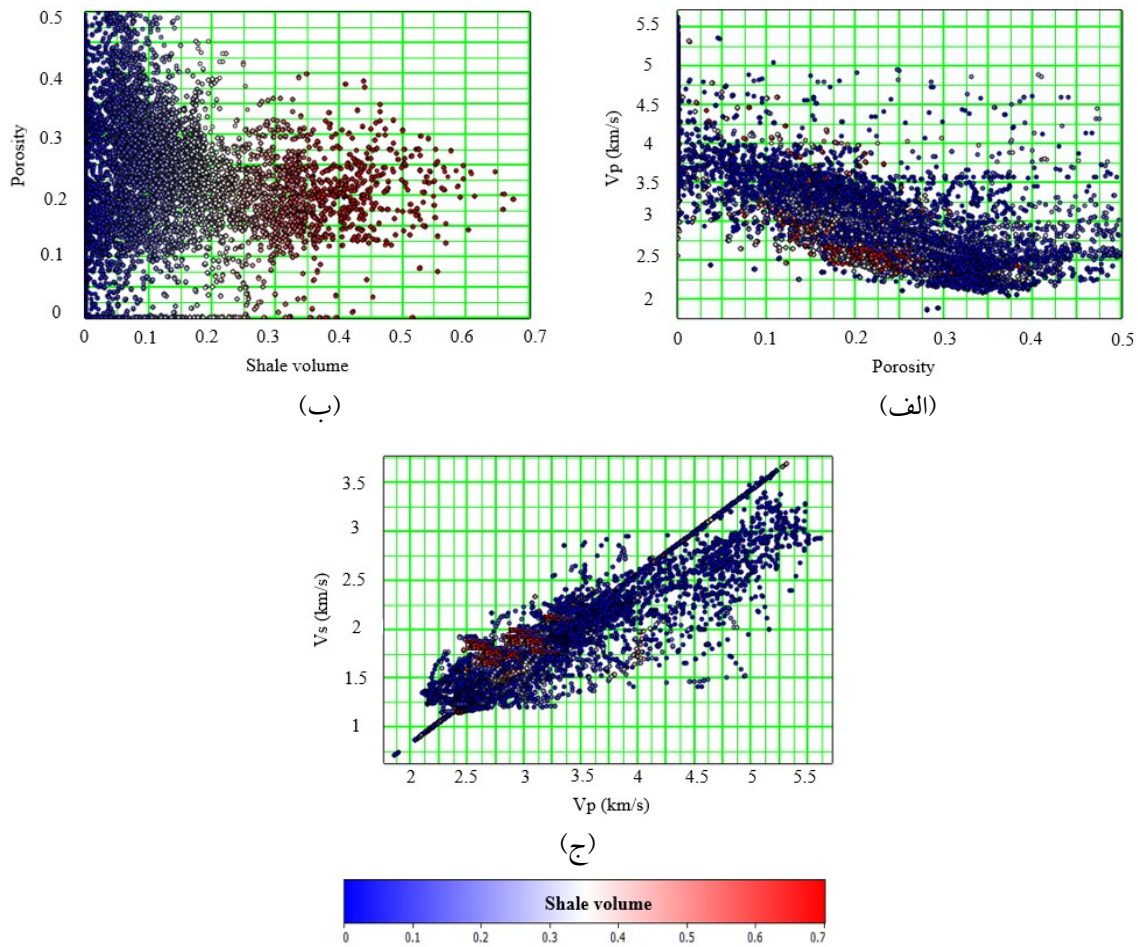
معمولاً حجم شیلی که از نگاره‌های پرتوی گاما به-دست می‌آید، برای تصحیح پاسخ باقی نگارها برای اثر شیل استفاده می‌شود. با توجه به توزیع مختلف شیل‌ها در مخزن، انتظار پاسخ‌های متفاوت داده‌های چاه‌نگاری وجود دارد و از همین پاسخ‌های متفاوت می‌توان نوع توزیع آنها را شناسایی کرد؛ بنابراین می‌توان توزیع شیل‌ها در مخزن را به چهار صورت شیل‌های پراکنده (dispersed shale)، شیل‌های لایه‌ای (laminar shale)، شیل‌های ساختاری (structural shale) و شیل‌های بین‌لایه‌ای (interstitial shale) در نظر گرفت (سمز و آندریا، ۲۰۰۱). توماس و استیبر (۱۹۷۵) بر مبنای نمودار عرضی تخلخل برحسب پرتوی گاما و با استفاده از اعمال ریاضی روی روابط تخلخل و مرتبط ساختن آنها به پرتوی گاما، توانستند این تفکیک را برای توزیع شیل‌ها انجام دهند. شیل‌های پراکنده فضای میان تخلخل‌ها را اشباع می‌کنند و باعث کاهش تخلخل و تراوایی مخزن می‌شوند. شیل‌های لایه‌ای به صورت لایه‌هایی از شیل در میان سنگ قرار می‌گیرند



شکل ۴. نمودار عرضی و توزیع شیل‌های مختلف برای یک مدل مصنوعی با استفاده از مدل توماس و استیبر (۱۹۷۵). پیکان آبی نشان‌دهنده ماسه‌سنگ تمیز و پیکان سبز نشان‌دهنده افزایش شیل‌های پراکنده است. پیکان نارنجی نقطه‌ای را نشان می‌دهد که تمام منافذ ماسه‌سنگ با شیل پراکنده پر شده است. پیکان مشکی نشان‌دهنده این است که سنگ، بیشتر از شیل پراکنده و مقداری دانه‌های ماسه تشکیل شده است. با نزدیک شدن به سمت راست نمودار، میزان شیل افزایش می‌یابد تا در نهایت، به پیکان زرد می‌رسد که سنگ شیلی را نشان می‌دهد. پیکان بنفش معرف شیل‌های لایه‌ای است که با حرکت از سمت چپ نمودار به سمت راست، میزان آنها نیز افزایش می‌یابد. پیکان صورتی شیل‌های ساختاری را نشان می‌دهد که هرچه به سمت بالای خط AB می‌رود، این میزان نیز افزایش می‌یابد. پیکان-های قرمز نشان‌دهنده محل و جهت افزایش انواع شیل‌ها در این مدل هستند.

رسوبات منطقه مورد بررسی را نیز از نظر توانایی تفکیک باقی سنگ‌شناسی‌های محتمل در منطقه ارزیابی کرد. در این راستا با استفاده از مدل فیزیک سنگی ماسه‌سنگ نرم که در بخش قبلی درباره آن بحث شد، می‌توان روندهای مختلف سنگ‌شناسی مورد انتظار را برای منطقه مورد بررسی به همراه سایر اطلاعات زمین‌شناسی ساخت و در نهایت، قابلیت تفکیک آنها را نیز بررسی کرد. نتایج ساخت روندهای سنگ‌شناسی مورد انتظار در منطقه مطالعاتی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، روندهای سنگ‌شناسی مورد انتظار در منطقه از یکدیگر تفکیک شده‌اند که نشان‌دهنده وجود قابلیت تفکیک انواع سنگ‌شناسی‌های مختلف است.

چاه‌های موجود پرداخته شده است. شکل ۵-الف نمودار سرعت موج تراکمی برحسب تخلخل است و نشان‌دهنده این نکته مهم است که حضور شیل باعث کاهش سرعت موج تراکمی شده است. شکل ۵-ب نمودار تخلخل برحسب مقدار شیل را نشان می‌دهد که برای کنترل کیفیت داده‌های چاه استفاده می‌شود. مطابق شکل، با افزایش مقدار شیل، میزان تخلخل کاهش می‌یابد. شکل ۵-ج نمودار سرعت موج برشی برحسب سرعت موج تراکمی را به تصویر کشیده است که نشان‌دهنده توانایی تفکیک شیل از دیگر سنگ‌شناسی‌های منطقه است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، علاوه بر کنترل کیفیت نتایج چاه‌ها می‌توان قابلیت تفکیک این سنگ‌شناسی را در منطقه مورد بررسی مشاهده کرد. علاوه بر این نوع امکان‌سنجی، می‌توان



شکل ۵. امکان‌سنجی برای مطالعات توصیف لرزه‌ای مخزن به‌منظور یافتن توانایی تشخیص شیل در منطقه مورد مطالعه (محدوده مخزنی تمام چاه‌ها را دربرمی‌گیرد). (الف) نمودار سرعت موج تراکمی برحسب تخلخل. همان‌طور که دیده می‌شود، وجود شیل باعث کمتر شدن سرعت موج تراکمی شده است. (ب) نمودار تخلخل برحسب مقدار شیل. این نمودار که برای کنترل کیفیت داده‌های چاه به‌کار می‌رود، نشان‌دهنده این است که با افزایش مقدار شیل، میزان تخلخل کاهش می‌یابد. (ج) نمودار سرعت موج برشی برحسب سرعت موج تراکمی که نشان‌دهنده توانایی تفکیک شیل از سایر سنگ‌شناسی‌های منطقه است. در تمام شکل‌ها میزان شیل زیاد با رنگ قرمز و میزان شیل کم با رنگ آبی مشخص شده است.

۵ وارون‌سازی توأم

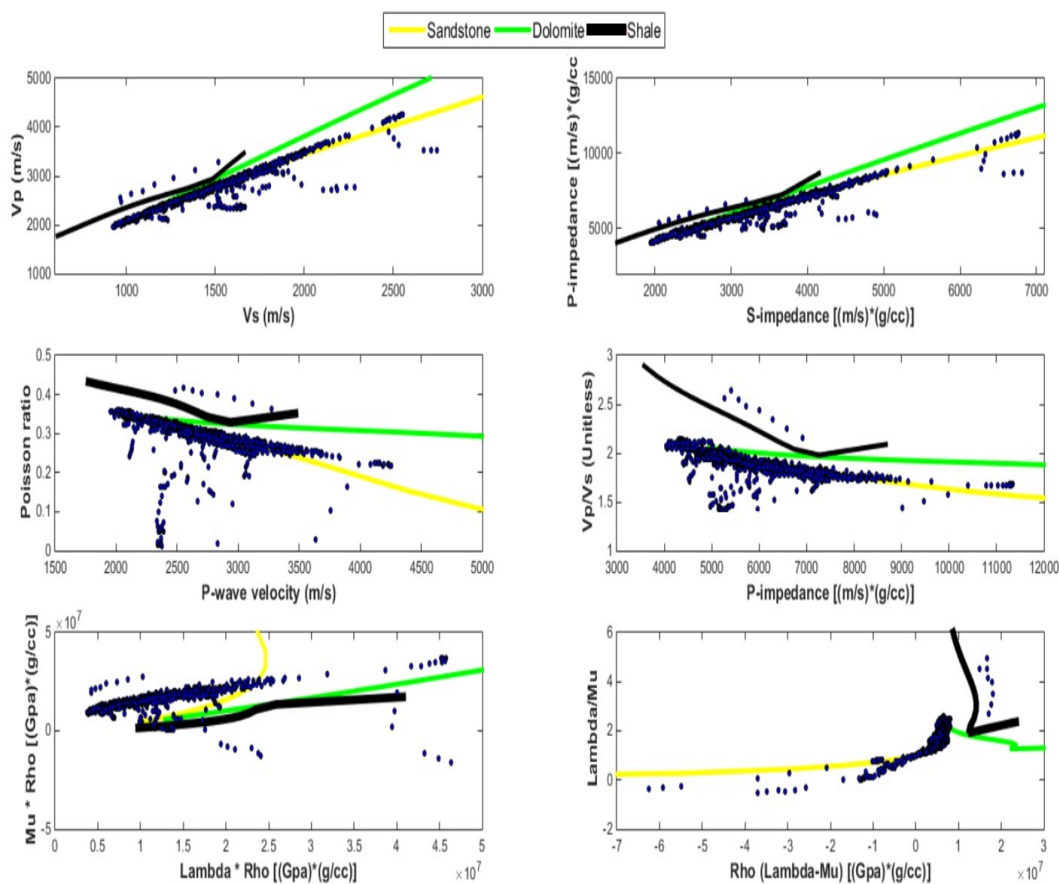
باکوس (۱۹۹۶) و بولاند و عمره (۲۰۰۳) به‌دست آمده است و این امکان را فراهم می‌کند که داده‌های لرزه‌ای به‌صورت مستقیم به مقاومت صوتی موج تراکمی، مقاومت صوتی موج برشی و چگالی تبدیل شوند. چنین روش‌هایی را وارون‌سازی توأم می‌نامند. عمل وارون‌سازی در این الگوریتم با استفاده از رابطه تخمین‌زده‌شده برای ضریب بازتاب (فتی و همکاران، ۱۹۹۴) و تغییر شکل نوشتار مدل هم‌میختی برای یک ردلرز لرزه‌ای انجام می‌شود که شامل هم‌میخت موجک و سری بازتابی زمین است. چنانچه برای

از اهداف وارون‌سازی داده‌های قبل از برانبارش، تخمین مناسب و مطمئن سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی به‌منظور پیش‌بینی خواص سنگ و سیالات زیرسطحی است. پژوهشگران الگوریتم‌های متعددی را به این منظور و با هدف استخراج هم‌زمان خواص ذکرشده ابداع کرده‌اند. یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم هم‌سوز و همکاران (۲۰۰۵) است که در این مقاله از آن استفاده شده است. این الگوریتم براساس توسعه الگوریتم‌های سیمونز و

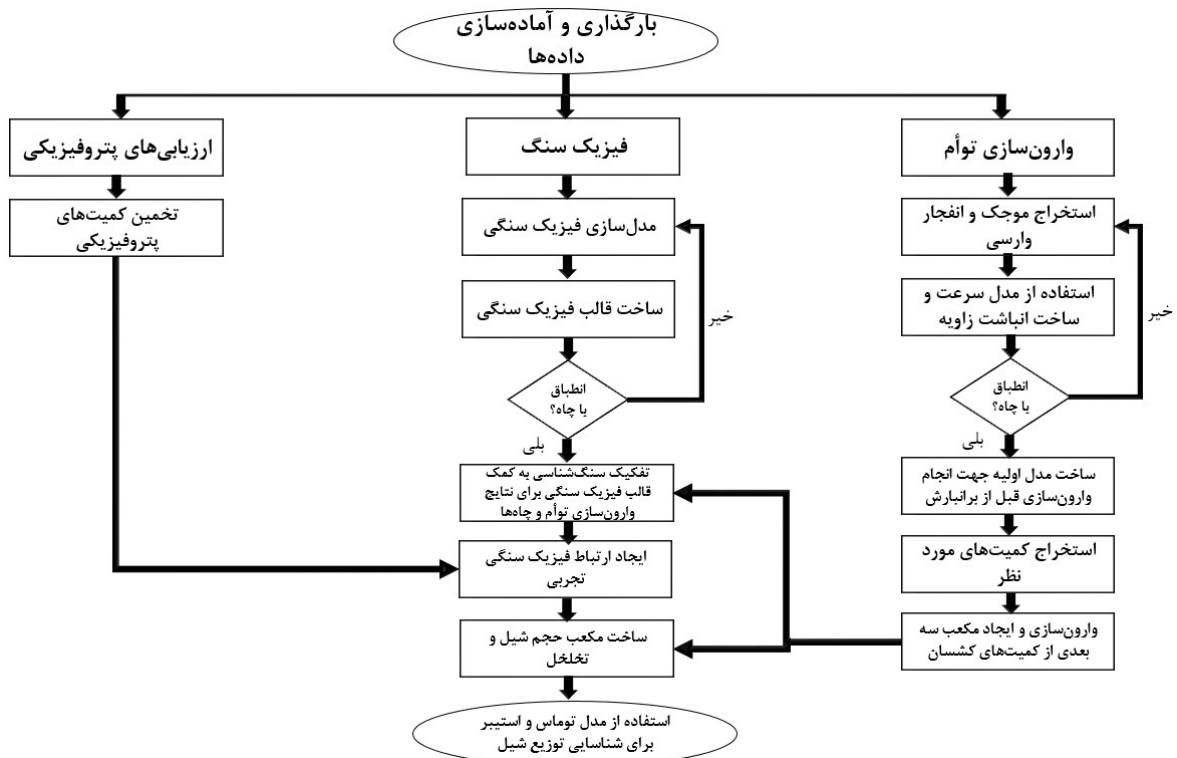
۶ روش تحقیق

مراحل پیشبرد اهداف بیان‌شده، در طرح‌واره شکل ۷ نمایش داده شده است. مطابق این طرح‌واره، در ابتدا داده‌های مورد نیاز آماده‌سازی و بارگذاری شده‌اند. در مرحله ارزیابی‌های پتروفیزیکی برای تخمین کمیت‌های مخزنی نظیر حجم شیل و تخلخل کل به ترتیب از نگارهای پرتوی گاما و چگالی استفاده شده است (نظیر کمیت‌های استخراج‌شده که در شکل ۱ نمایش داده شده است). همچنین می‌توان با استفاده از قالب‌های فیزیک سنگی، سنگ‌شناسی‌های مختلف را برای چاه‌ها تفکیک کرد.

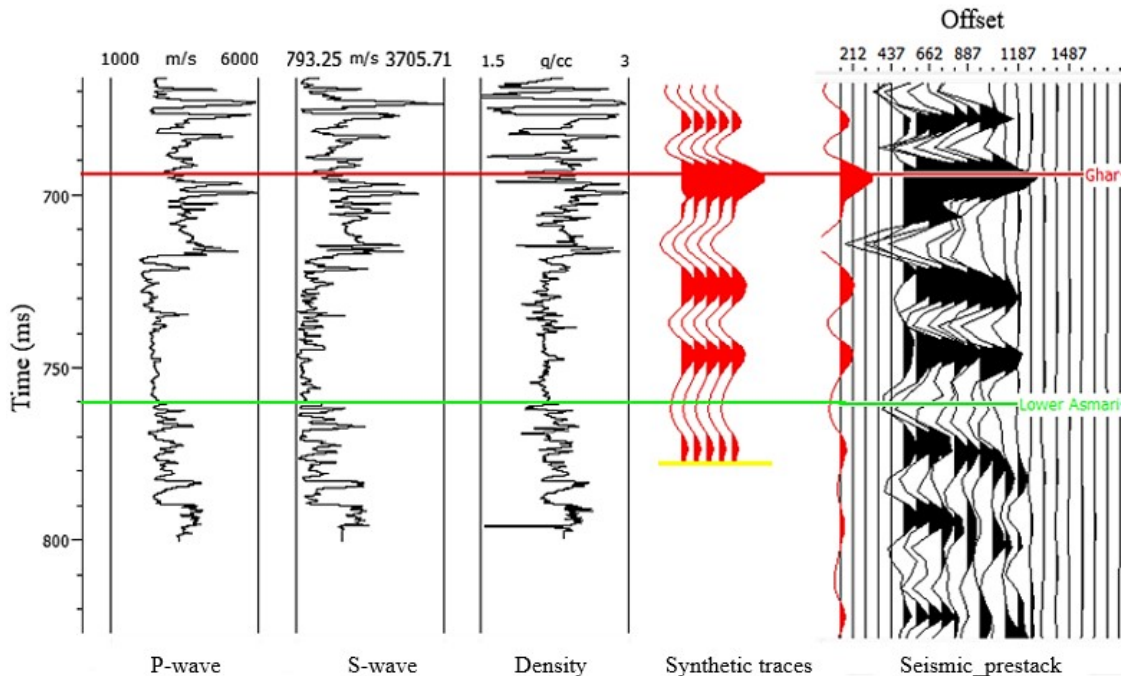
حل رابطه توصیف‌شده پیشین از روش وارون‌سازی ماتریس استاندارد استفاده شود، مشکلاتی نظیر ناپایدار بودن ماتریس و بازیافت نشدن فرکانس‌های پایین رخ می‌دهد. برای حل این مشکل می‌توان یک مدل اولیه از مقاومت صوتی موج تراکمی ساخت سپس با تکرار، آن را با روش شیب‌های مزدوج (Conjugate gradients) حل کرد. به این نکته توجه شود که ماهیت این نوع وارون‌سازی، قطعی است و در نتیجه، عدم قطعیت‌هایی در آن وجود دارد؛ بنابراین با استفاده از وارون‌سازی توأم می‌توان ردلرزه‌های لرزه‌ای را تبدیل به خواص کشسان زیر زمین کرد سپس با استفاده از فیزیک سنگ به تفسیر آنها پرداخت. توضیح دقیق این وارون‌سازی برای پیشبرد این مقاله در بخش بعدی بیان می‌شود.



شکل ۶. روندهای سنگ‌شناسی موجود در غار. نقاط به رنگ آبی تیره برای چاه C هستند. در تمام منحنی‌ها، خطوط به رنگ زرد، سبز و مشکی به ترتیب نشان‌دهنده ماسه‌سنگ اشباع از آب، دولومیت اشباع از آب و شیل اشباع از آب هستند.



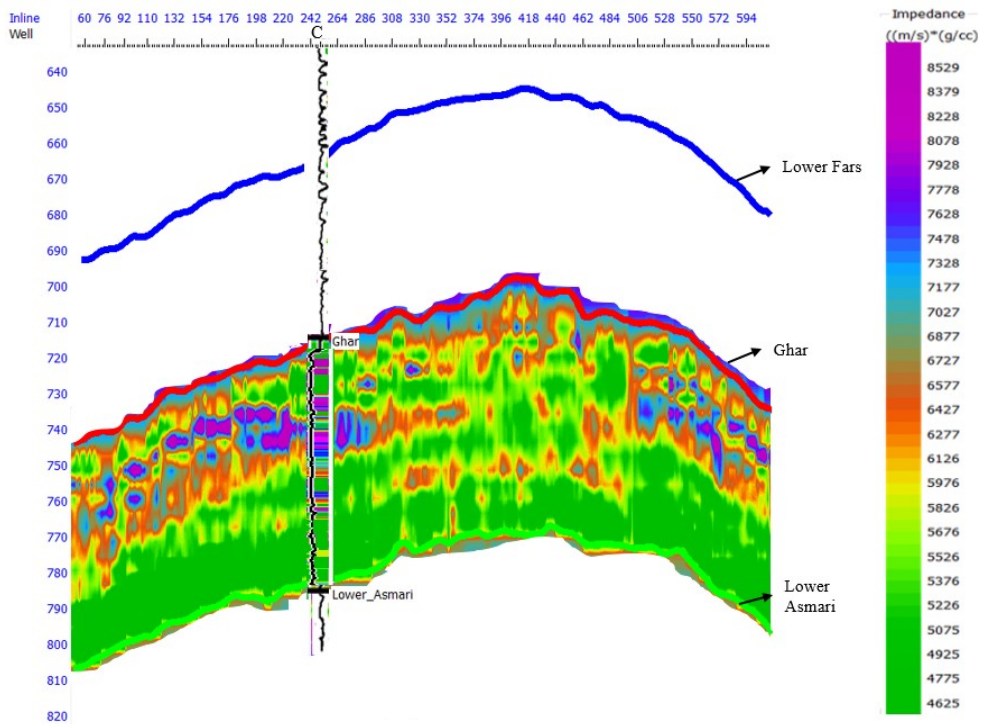
شکل ۷. طرح‌واره تعیین و تفکیک توزیع شیل



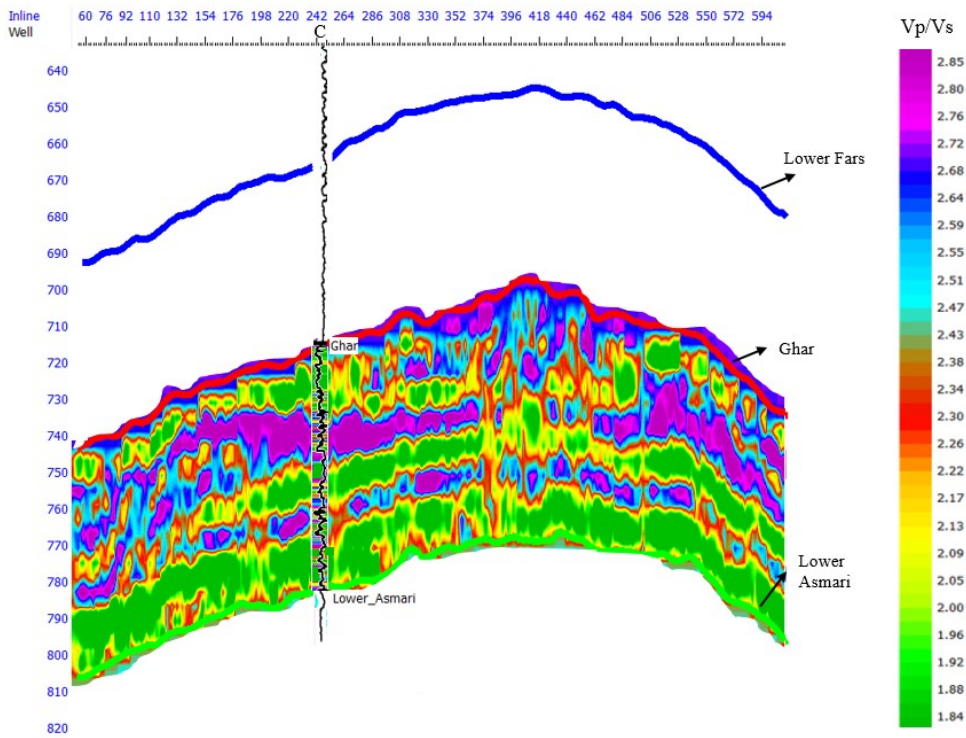
شکل ۸. اعمال انطباق لرزه‌ای برای چاه C. ردلرزه‌های لرزه‌ای قرمز رنگ لرزه‌نگاشت مصنوعی ساخته شده و ردلرزه‌های مشکی رنگ لرزه‌نگاشت واقعی است که با هم در حدود ۷۲ درصد انطباق دارند.

استخراج و درنهایت، با توجه به میزان همبستگی میان چاه-ها، مناسب‌ترین موجک برای منطقه انتخاب شده است. در مرحله بعد، ثابت‌های موجود در روابط معرفی شده برای این الگوریتم باید استخراج شوند. به این منظور، نمودار $\ln(D_n)$ برحسب $\ln(Z_p)$ و نمودار $\ln(Z_p)$ برحسب $\ln(Z_s)$ ترسیم شد سپس با توجه به مدل اولیه ساخته شده، عمل وارون‌سازی توأم برای استخراج کمیت‌های کشسان نظیر مقاومت صوتی امواج تراکمی و برشی، چگالی و نسبت سرعت امواج تراکمی به برشی در محل چاه‌ها صورت پذیرفت. به دنبال آن، با استفاده از موجک‌های استخراج شده، ردلرزه‌های مصنوعی ساخته و با داده‌های لرزه‌ای واقعی مقایسه شد. نمونه‌ای از مقطع‌های مقاومت موج تراکمی و نسبت سرعت امواج تراکمی به برشی حاصل از وارون‌سازی توأم در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با ورود به ناحیه مخزنی، کمیت‌های مقاومت صوتی موج تراکمی و نسبت سرعت امواج تراکمی به برشی نیز کاهش می‌یابد. پس از ساخت مقطع‌هایی از کمیت‌های کشسان، می‌توان با استفاده از قالب‌های فیزیک سنگی، سنگ‌شناسی‌های مختلف را تفکیک کرد. توجه به این نکته ضروری است که مقیاس لرزه‌نگاری و چاه‌نگاری با یکدیگر متفاوت است؛ چاه‌نگاری فرکانس بیشتری نسبت به لرزه‌نگاری دارد؛ در نتیجه انتظار مشاهده ارتباط دقیقاً یکسان بین آنها وجود ندارد، ولی باین حال، کم‌وبیش ارتباط مناسبی بین آنها دیده می‌شود؛ زیرا هر دو حاصل اندازه‌گیری خواص یک ناحیه هستند. پس با انجام کنترل کیفیتی نظیر آنچه که در شکل ۹ انجام شده است، می‌توان به مطمئن بودن یا نبودن ارتباط آنها پی برد. با توجه به کنترل کیفیت انجام گرفته که حاکی از مشاهده ارتباط به نسبت خوب است، نتایج تا حدودی قابل اعتماد خواهند بود.

برای فراهم آوردن خواص کشسان برای کل منطقه مورد نظر، از الگوریتم وارون‌سازی توأم (همسون و همکاران، ۲۰۰۵) استفاده شده است. این الگوریتم برای شروع نیاز به برداشت‌های زاویه و استخراج موجک دارد. پس از اعمال تصحیحات (انفجارهای واریسی، check shot)، استخراج موجک به روش آماری (تنها با در نظر گرفتن طیف دامنه از داده‌های لرزه‌ای و فرض ثابت بودن طیف فاز آن)، استفاده از مدل سرعت برای ساخت برداشت زاویه و درنهایت، انطباق با تمام چاه‌های موجود در منطقه، مدل اولیه مقاومت صوتی موج تراکمی ساخته شد. معمولاً داده‌های لرزه‌ای برداشت شده در داخل چاه (انفجارهای واریسی) و نگار صوتی انطباق خوبی با یکدیگر ندارند. اطلاعات نگار صوتی در نواحی متخلخل تحت تأثیر گل حفاری نفوذ کرده در سنگ قرار می‌گیرد، در حالی که در داده‌های لرزه‌ای سطحی و درون‌چاهی، لایه‌ها به صورت عادی و دست‌نخورده بررسی می‌شوند. یکی از مراحل اولیه برای کالیبره کردن داده‌های چاه، استفاده از تصحیحات انفجار واریسی است. هدف از انجام تصحیحات انفجار واریسی تطابق سرعتی داده‌های نگار صوتی و داده‌های لرزه‌ای و تصحیح نگار صوتی است. پس از اعمال این تصحیحات بر چاه‌های موجود در منطقه، در محل آنها لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی ساخته می‌شود و میزان انطباق لرزه‌نگاشت مصنوعی با داده‌های لرزه‌ای واقعی مقایسه می‌شود. در شکل ۸ نمونه‌ای از این مراحل، که به تحلیل گره‌زدن لرزه‌ای معروف است، برای چاه C آورده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پس از اعمال تصحیحات انفجارهای واریسی و ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی در این چاه انطباق قابل قبولی حاصل شده است. میزان این انطباق در حدود ۷۲ درصد است. گفتنی است که در منطقه مورد مطالعه، برای هر چاه دو موجک برای زوایای ۰ تا ۱۵ درجه و ۱۶ تا ۲۷ درجه

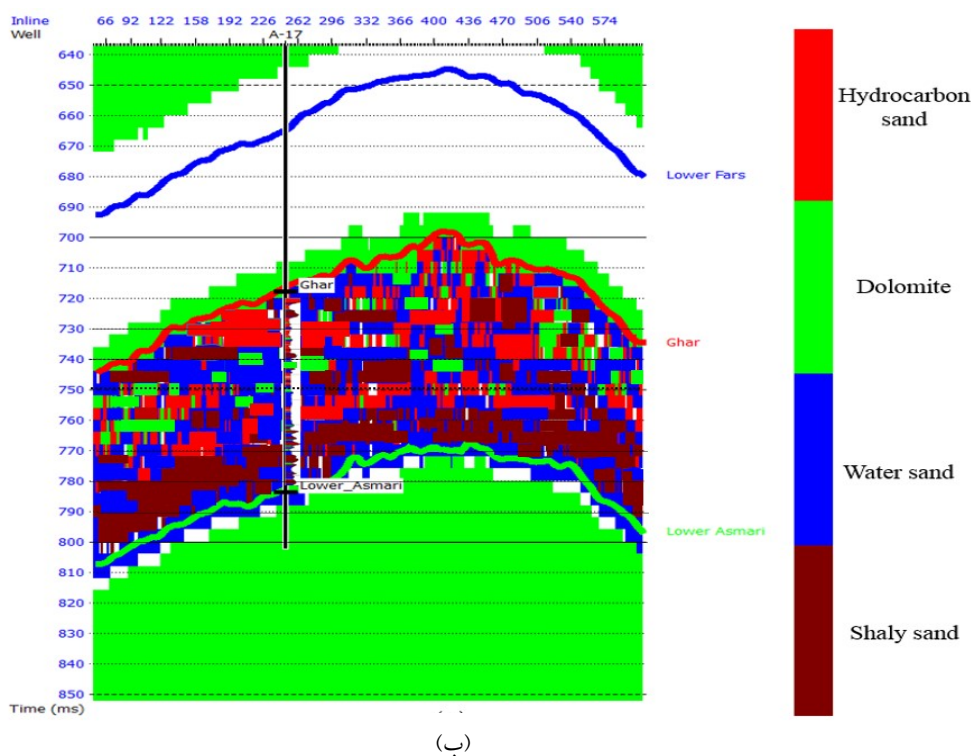
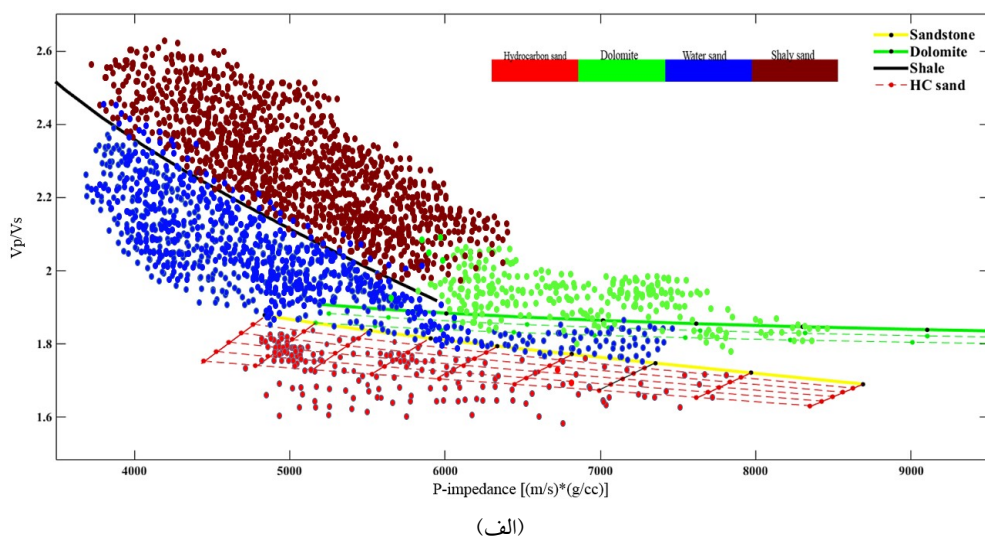


(الف)



(ب)

شکل ۹. نتایج حاصل از وارون‌سازی توأم. (الف) مقطع مقاومت موج تراکمی حاصل از وارون‌سازی توأم. (ب) مقطع نسبت سرعت موج تراکمی به موج برشی حاصل از وارون‌سازی توأم. نگار مَشکی رنگ در شکل (الف) معرف مقاومت صوتی موج تراکمی و در شکل (ب) معرف نسبت سرعت موج تراکمی به موج برشی برای چاه C است. همچنین مقدار این نگارها به صورت رنگی نیز کدگذاری شده‌اند.



شکل ۱۰. (الف) اعمال قالب فیزیک سنگی برای نتایج وارون‌سازی توأم از مقطع عبوری از چاه C (ب) تفکیک سنگ‌شناسی و سیالات توسط قالب فیزیک سنگی ساخته شده. نگار سنگ‌شناسی برای چاه عبور از این مقطع نیز در شکل قرار گرفته است.

خطوط چشمه در شکل ۱۰-الف نشان داده شده است. مشابه همین تفکیک را می‌توان برای چاه‌های منطقه نیز اعمال کرد. پس از تفکیک نواحی حاوی شیل با استفاده از مدل توماس و استیبر، نحوه توزیع انواع شیل‌های موجود در منطقه نیز شناسایی شد. برای تفکیک نحوه توزیع شیل

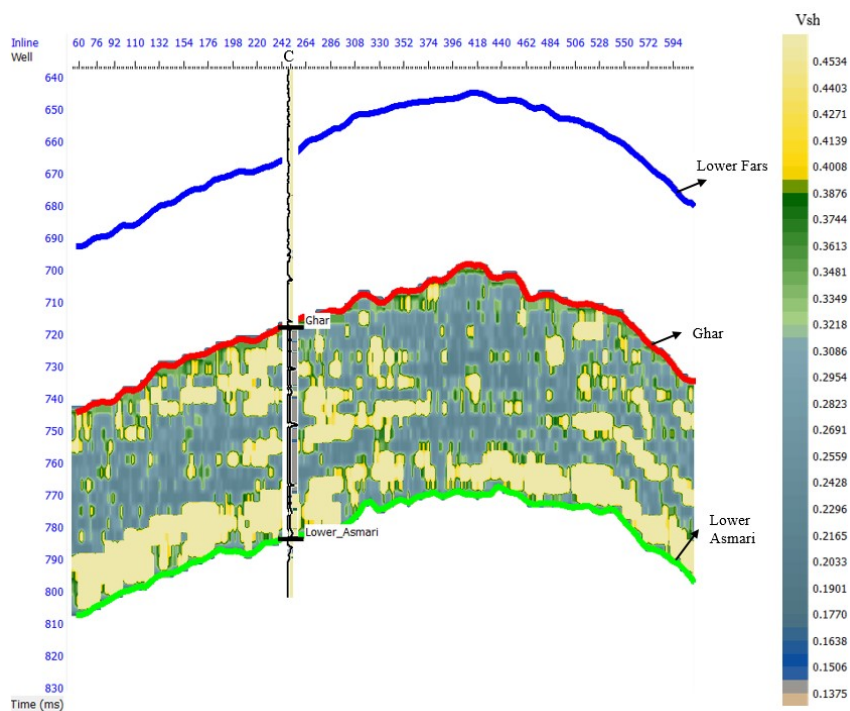
قالب‌های فیزیک سنگی ابزار مناسبی برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های مختلف از یکدیگر هستند؛ بنابراین قالب فیزیک سنگی مناسبی ساخته شد که مانند قالب بررسی-شده در بخش قبل است. نتایج تفکیک با قالب‌های فیزیک سنگی برای مقطع لرزه‌ای عبورکننده از یکی از

لرزه‌ای امواج تراکمی و برشی و کمیت حجم شیل به مقاومت موج برشی و سرعت موج برشی مرتبط شدند که می‌توان روابط را به صورت کلی زیر نوشت:

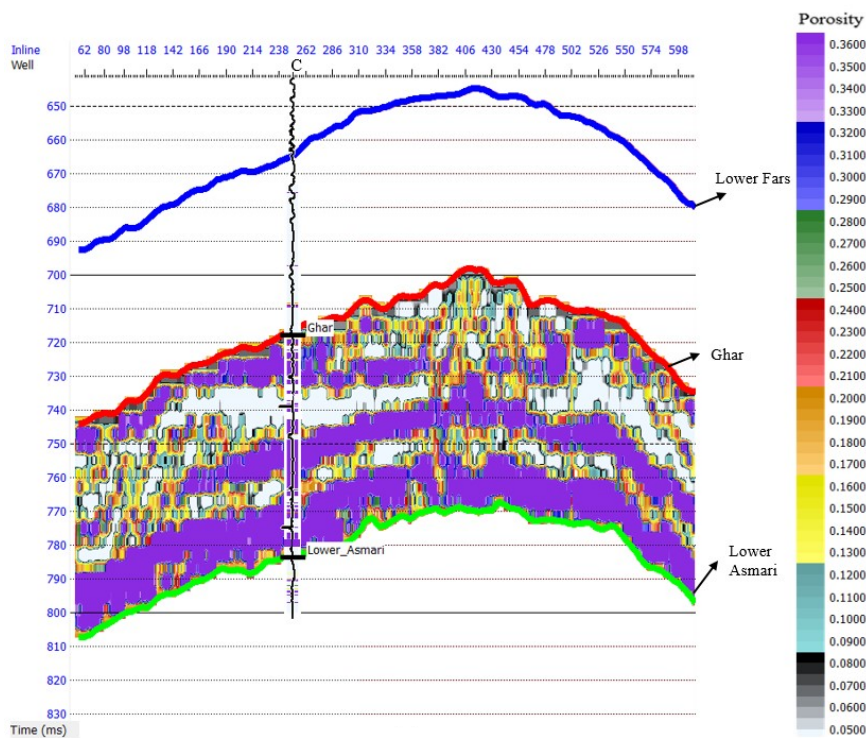
$$\begin{aligned} \phi &= 0.4484 - 0.0000156Z_p - 0.0000385Z_s, \\ V_{cl} &= 0.0878 + 0.0001152Z_s + 0.000010563V_s, \end{aligned} \quad (9)$$

که ϕ تخلخل، Z_p و Z_s به ترتیب مقاومت لرزه‌ای امواج تراکمی و برشی، V_{cl} حجم شیل و V_s سرعت موج برشی است. مقطع حجم شیل تبدیل یافته از نتایج وارون‌سازی توأم برای یکی از عمودبه‌خط‌ها (cross lines) به همراه چاه عبوری از آن در شکل ۱۱-الف نمایش داده شده است. به همین ترتیب مکعبی از کمیت‌های مخزنی برای مطالعات توصیف لرزه‌ای مخزن برای بخش غار واقع در سازند آسماری ایجاد شد. مشابه عملیات ذکر شده در قبل، مقطعی از تخلخل کل نیز ساخته شده است که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که در ساخت مدل فیزیکی سنگی تجربی در این مقاله از دو چاه استفاده شد و از چاه باقی‌مانده (چاه A) به عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت نتایج تبدیل کمیت‌های کشسان به حجم شیل استفاده شد. شکل ۱۲ نشان‌دهنده همین موضوع است. پس از تبدیل نتایج وارون‌سازی توأم به کمیت‌های مخزنی مورد نظر، باید یک مقطع عمقی از کل بخش غار برای یافتن محل‌های مناسب مخزنی ساخته شود. با این کار می‌توان قسمت‌های مخزنی را از قسمت‌های غیرمخزنی تمیز داد؛ بنابراین از کل بخش غار برای حجم شیل، مقطع عمقی شکل ۱۳ ساخته شد. این مقطع عمقی حاصل میانگین‌گیری آماری حجم شیل برای کل بخش غار است. برای تفکیک و شناسایی نحوه توزیع شیل با مدل توماس و استیبر، در ابتدا این نحوه تفکیک برای چاه عبوری از عمودبه‌خط مورد مطالعه اجرا شد سپس همین اقدام برای این مقطع لرزه‌ای نیز انجام شد.

در کل ناحیه مورد بررسی باید در ابتدا با ساخت مدل فیزیکی سنگی تجربی، داده‌های حاصل از وارون‌سازی توأم را به کمیت‌های مخزنی حجم شیل و تخلخل کل تبدیل کرد تا بتوان از آنها در مدل توماس و استیبر استفاده کرد. به این منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های چاه‌ها، میان کمیت مخزنی مورد نظر و خواص کشسان مربوطه رابطه‌ای تجربی استخراج و از این رابطه برای تبدیل نتایج وارون‌سازی توأم به کمیت‌های مخزنی مدنظر نظیر تخلخل و حجم شیل استفاده شد. به عبارت دیگر، محاسباتی برای تعیین ارتباط ریاضی دو یا چند متغیر صورت گرفت و از آن روابط برای توصیف لرزه‌ای مخزن استفاده شد سپس بهترین خواص کشسانی برای تبدیل آنها به کمیت‌های مخزنی تعیین و برای افزایش قدرت پیش‌بینی، ترکیبی از آنها استفاده شد. به عبارتی، پارامتر آماری ضریب شباهت میان ترکیب‌های مختلف نتایج وارون‌سازی محاسبه و بهترین ترکیب کمیت کشسان با استفاده از این ضریب استخراج و با استفاده از برازش چندجمله‌ای، روابط مدنظر میان کمیت‌های کشسان و کمیت‌های پتروفیزیکی ساخته شد؛ بنابراین با استفاده از تجزیه و تحلیل ذکر شده برای پیدا کردن بهترین خواص کشسانی و ترکیب آنها، نتایج وارون‌سازی توأم به کمیت‌های مخزنی نظیر حجم شیل تبدیل شد. به این ترتیب تخلخل با ترکیب مقاومت صوتی موج تراکمی و مقاومت صوتی موج برشی و از طرف دیگر حجم شیل نیز با ترکیب مقاومت صوتی و سرعت موج برشی در ارتباط بود. آوست و همکاران (۲۰۰۵) در ارتباط بودن مقاومت صوتی موج تراکمی و موج برشی را با کمیت‌های پتروفیزیکی نظیر تخلخل و شیل بررسی کردند که نتایج پژوهش حاضر نیز این ارتباط را تأیید می‌کند. با توجه به بررسی آماری چاه‌های موجود در منطقه، بهترین ارتباط به صورت خطی است؛ در نتیجه باید از برازش خطی استفاده کرد. در این راستا، کمیت تخلخل به مقاومت



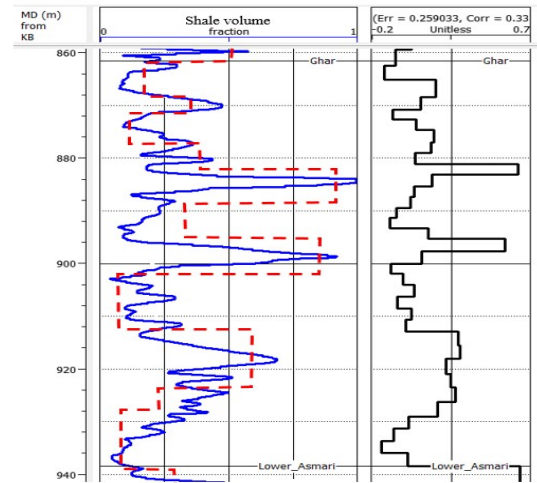
(الف)



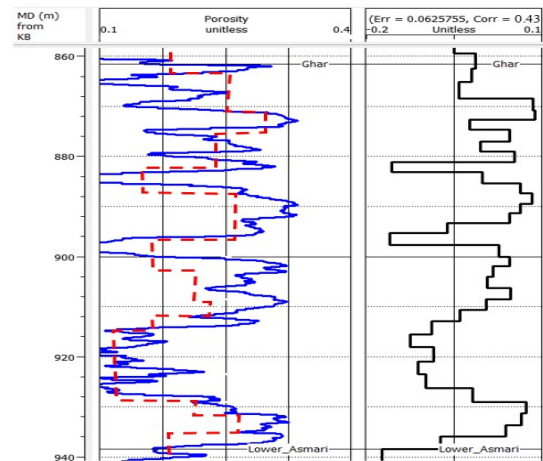
(ب)

شکل ۱۱. (الف) مقطع حجم شیل تبدیل یافته از نتایج وارون‌سازی توأم برای کراس‌لاینمورد مطالعه. نگار مشکی رنگ نشان دهنده نگار حجم شیل چاه C است که به صورت رنگی کدگذاری شده است. (ب) مقطع تخلخل تبدیل یافته. نگار مشکی رنگ نشان دهنده نگار تخلخل چاه C است که به صورت رنگی کدگذاری شده است.

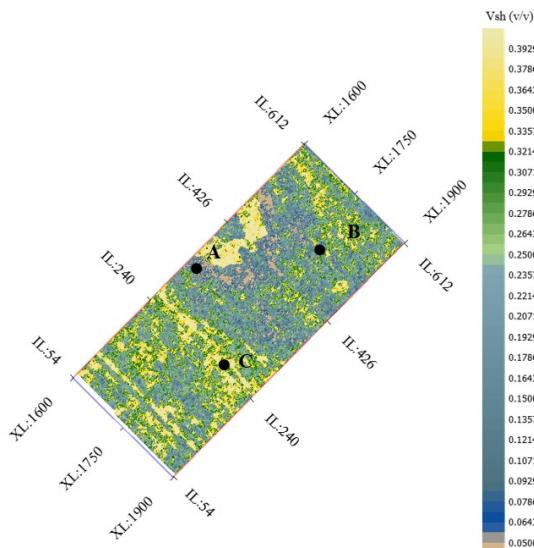
ب). همان‌طور که در شکل ۱۴-ب دیده می‌شود، نواحی سطحی‌تر یا به عبارت دیگر، نواحی کم‌عمق‌تر، شیل‌های پراکنده و لایه‌ای دارند و در مقابل، نواحی عمیق‌تر، بیشتر از شیل‌های ساختاری تشکیل شده‌اند که با مطالعات انجام شده درباره چاه و گزارش‌های زمین‌شناسی سازگار است. همان‌طور که انتظار می‌رود، شیل‌های پراکنده و لایه‌ای که گاه نقش مخرب برای مخزن بازی می‌کنند، در نواحی میانی مخزن غار و شیل‌های ساختاری که نقشی در افزایش یا کاهش کیفیت مخزنی ایفا نمی‌کنند، در نواحی انتهایی این مخزن قرار گرفته‌اند. برای تطابق بهتر و مشاهده نواحی شیل‌دار به شکل ۱۱-الف رجوع شود. در نهایت، با توجه به تفکیک توزیع انواع گوناگون شیل با مدل توماس و استیبر، مقطعی ساخته شد که نشان‌دهنده مکان شیل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱۵). این مقطع با توجه به مقادیر حاصل از تبدیل نتایج وارون‌سازی توأم با استفاده از مدل‌سازی فیزیک سنگی تجربی و موقعیت آنها ساخته شده است؛ بنابراین با دانستن مقادیر آنها و معلوم بودن عمق آن این امر محقق می‌شود.



(الف)



(ب)

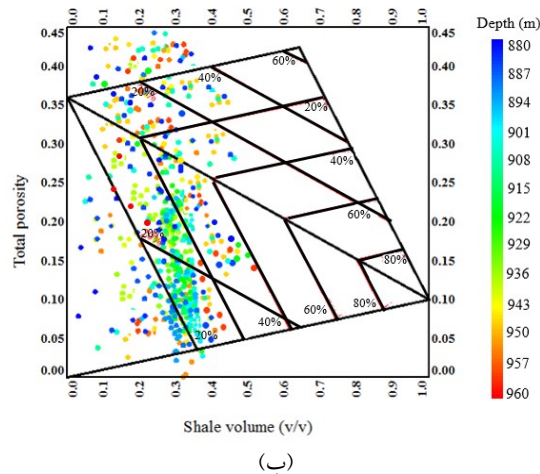
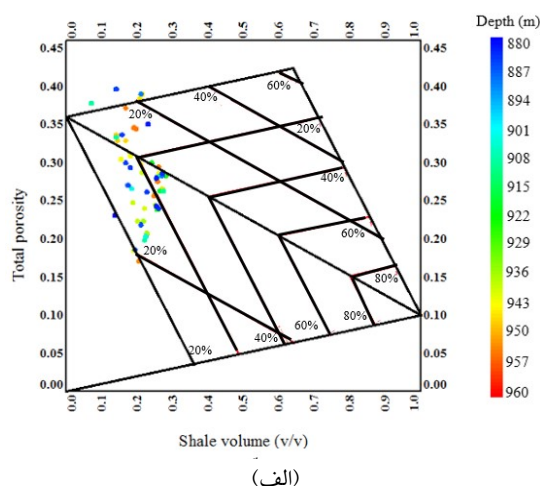


شکل ۱۳. مقطع عمقی از رأس غار تا رأس آسماری تختانی برای حجم شیل حاصل از وارون‌سازی توأم. نقاط مشکی رنگ نشان‌دهنده موقعیت چاه‌های استفاده شده است.

شکل ۱۲. تطابق داده‌های چاه A با نتایج حاصل از تبدیل داده‌های وارون‌سازی توأم به (الف) حجم شیل و (ب) تخلخل. در شکل نگار آبی رنگ مربوط به نگار حجم شیل چاه A و نگار قرمز رنگ خط‌چین مربوط به نتیجه تبدیل یافته از وارون‌سازی توأم است. همچنین نگار مشکی رنگ معرف خطا بین نگار اصلی و نگار تبدیل یافته است.

شکل ۱۴ این نوع تفکیک و شناسایی را به‌خوبی نشان می‌دهد. در شکل ۱۴-الف نحوه تفکیک توزیع شیل برای چاه عبوری از مقطع عمودبه‌خط مورد مطالعه انجام شده است. مطابق شکل در این طبقه‌بندی قسمت‌های کم‌عمق‌تر این چاه بیشتر شیل‌های پراکنده و لایه‌ای در حدود ۲۰٪ دارند و نواحی عمیق‌تر شیل‌های ساختاری دارند. مشابه همین امر برای مقطع عمودبه‌خط مورد مطالعه نیز انجام شد (شکل ۱۴-ب).

سنگی نیز یکی دیگر از روش‌هایی است که از آن برای کنترل کیفیت مقادیر سرعت موج برشی تخمین زده شده با الگوریتم گرینبرگ و کاستاگنا استفاده شد. از دیگر کاربردهای فیزیک سنگ، استفاده از مدل فیزیک سنگی ساخته شده در نمودارهای عرضی مختلف (قالب‌های فیزیک سنگی) است که از آنها می‌توان برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های گوناگون بهره جست. پس از ساخت مدل فیزیک سنگی مناسب برای سنگ‌شناسی‌های مورد انتظار در منطقه و انواع میزان اشباع‌های مختلف، برای تفکیک سنگ‌شناسی‌های موجود در منطقه از این مدل در نمودار عرضی مقاومت صوتی موج تراکمی بر حسب نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی استفاده شد. به عبارت دیگر، با استفاده از این قالب‌های فیزیک سنگی تفسیر بهتری صورت گرفت. این تفکیک برای داده‌های چاه و نتایج وارون‌سازی توأم انجام شد. شایان ذکر است که در مدل‌سازی فیزیک سنگی، به اطلاعات زمین‌شناسی و چاه‌نگاری منطقه نیاز است تا مدل‌سازی بهینه‌ای انجام شود. با استفاده از نتایج وارون‌سازی توأم، رابطه فیزیک سنگی تجربی ساخته شده و برازش حاصل از داده‌های چاه‌نگاری، مقطعی از حجم شیل ساخته شد. پس از یافتن ارتباط میان خواص کشسان و حجم شیل برای چاه‌های موجود در منطقه، از آن برای تبدیل نتایج وارون‌سازی توأم به حجم شیل استفاده شد. به همین ترتیب مکعبی از کمیت‌های مخزنی برای مطالعات توصیف لرزه‌ای مخزن برای بخش غار ایجاد شد. همچنین از کل بخش غار برای کمیت مخزنی نامبرده مقطع عمقی از رأس غار تا رأس آسماری تحتانی نیز ساخته شد تا بتوان نواحی شیل‌دار و به نسبت تمیز را از یکدیگر تفکیک کرد. این مقطع عمقی حاصل میانگین‌گیری آماری حجم شیل برای کل بخش غار است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، نواحی میانی ناحیه مورد مطالعه (مناطق بین چاه‌های A, B و C)، از نظر مخزنی کیفیت به نسبت مناسبی دارند (شکل



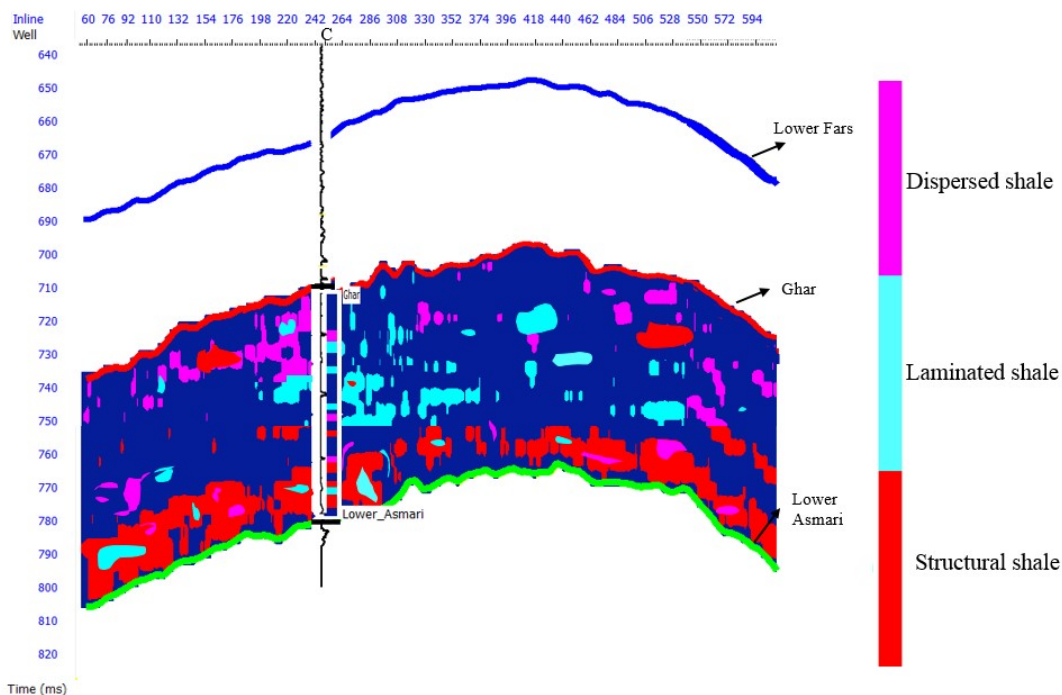
شکل ۱۴. تفکیک نحوه توزیع شیل با استفاده از مدل توماس و استیبر. (الف) تفکیک توزیع شیل برای چاه A که همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های واقع در مثلث بالایی نشان دهنده شیل‌های ساختاری و نمونه‌های واقع در مثلث پایینی معرف شیل‌های پراکنده و لایه‌ای است. (ب) تفکیک توزیع شیل برای مقطع عبوری از چاه C که با توجه به قرارگیری نمونه‌های مختلف در نمودار توماس و استیبر دارای شیل‌های لایه‌ای و پراکنده است. مقیاس رنگی نشان دهنده عمق نمونه‌ها است.

۷ بحث

همان‌طور که بیان شد، به غیر از یکی از چاه‌های موجود در منطقه، سایر چاه‌ها فاقد اندازه‌گیری‌های سرعت موج برشی (که در این‌گونه مطالعات حائز اهمیت هستند) بودند؛ از این رو با کمک فیزیک سنگ و الگوریتم گرینبرگ و کاستاگنا (۱۹۹۲)، این کمیت برای چاه‌های فاقد سرعت موج برشی محاسبه شد. مدل‌سازی فیزیک

شیل‌های ساختاری و شیل‌های پراکنده به میزان کم است. همچنین با کدگذاری رنگی این نمونه‌ها براساس عمق‌شان می‌توان محل آنها را تا حدودی شناسایی کرد. با توجه به شکل ۱۵، مناطق میانی این مخزن حاوی شیل‌های لایه‌ای و شیل‌های پراکنده است که این موضوع باعث کاهش کیفیت مخزنی در نواحی میانی شده است. از طرف دیگر، نواحی عمیق این مخزن حاوی شیل‌های ساختاری است که بر کیفیت مخزنی تأثیری ندارد. با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌های صورت گرفته، به دلیل ماهیت شیل‌های ساختاری و تراوایی بیشتر، نواحی حاوی این شیل‌ها از نظر مخزنی کیفیت بهتری دارند و از منظر بهره‌برداری می‌توانند مناسب باشند؛ بنابراین توصیه می‌شود که تمرکز بیشتری بر نواحی انتهایی این مخزن صورت گیرد و مطالعات بیشتری درباره آن انجام شود.

۱۳). از طرف دیگر، برای شناسایی انواع توزیع شیل در منطقه مورد مطالعه از مدل فیزیک سنگی توماس و استیبر استفاده شد. برای این نوع شناسایی نحوه توزیع شیل، ابتدا باید دو نقطه مشخص شود. یکی از این نقاط، تخلخل ماسه‌سنگ تمیز و نقطه دیگر تخلخل شیل است. در این راستا از نمودار عرضی پرتوی گاما برحسب تخلخل استفاده شد. نقطه‌ای که بیشترین پرتوی گاما را نشان می‌دهد، معرف تخلخل شیل است و برعکس. پس از استخراج این نقاط، با استفاده از روابط توماس و استیبر، منحنی‌های مورد نیاز برای تفکیک نحوه توزیع شیل ساخته شد. در مرحله بعد ابتدا داده‌های چاه و سپس داده‌های حاصل از تفکیک با قالب‌های فیزیک سنگی روی این منحنی‌ها قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود، منطقه مورد مطالعه حاوی میان‌لایه‌های شیلی،



شکل ۱۵. تفکیک نحوه توزیع شیل در مخزن مطالعه شده. همان‌طور که انتظار می‌رود نواحی میانی حاوی شیل‌های لایه‌ای و پراکنده است و نواحی انتهایی حاوی شیل‌های ساختاری است. نواحی آبی پررنگ براساس شکل ۱۰ (ب) مربوط به بخش ماسه‌ای و دولومیتی سنگ مخزن است. رنگ صورتی، نیلی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده شیل پراکنده، شیل لایه‌ای و شیل ساختاری است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نواحی انتهایی حاوی حجم بالای شیل و همچنین مقادیر زیاد تخلخل است که به دلیل وجود شیل‌های ساختاری امکان‌پذیر گردیده است.

سازگار است. شایان ذکر است که این‌گونه مطالعات با عدم قطعیت‌هایی همراه هستند، اما با توجه به روش پژوهش این مقاله، می‌توان نتایج را تا حدودی معتبر دانست. برای افزایش دقت و اعتبار نتایج، به نظر می‌رسد علاوه بر داده‌هایی نظیر مغزه، استفاده از وارون‌سازی تصادفی به دلیل افزایش دقت و میزان تفکیک‌پذیری آن لازم است.

۸ نتیجه‌گیری

مشخص کردن نواحی حاوی شیل برای تفکیک مناطق مخزنی از غیرمخزنی و نیز تفکیک انواع توزیع شیل‌های موجود در مخزن لازم است؛ زیرا باعث کاهش کیفیت مخزنی می‌شود. در این مقاله به بررسی و مطالعه شیل در یکی از میداین غربی خلیج فارس پرداخته شده است. با انجام مطالعات مشخص شد پس از تفکیک نواحی حاوی شیل از سایر رخساره‌ها و استفاده از مدل توماس و استیبر می‌توان انواع شیل‌ها با توزیع‌های گوناگون را از یکدیگر تفکیک کرد سپس با استفاده از مدل‌های تجربی فیزیک سنگی و نتایج وارون‌سازی توأم، مقاطعی از میزان تخلخل و حجم شیل ساخت تا با استفاده از آنها و مدل توماس و استیبر (۱۹۷۵)، نحوه توزیع شیل‌ها و مکان‌های آنها برای کل میدان مشخص شود. با انجام مراحل ذکر شده مشخص شد که نواحی میانی بیشتر متشکل از شیل‌های پراکنده و شیل‌های لایه‌ای هستند و نواحی انتهایی مخزن از شیل‌های ساختاری تشکیل شده‌اند؛ بنابراین با توجه به ماهیت انواع شیل‌ها انتظار می‌رود نواحی میانی کیفیت مخزنی کمتری داشته باشند. با ساخت برش عمقی حجم شیل از رأس و کف مخزن مورد مطالعه مشخص شد که مناطق واقع در بین چاه‌های A، B و C از نظر مخزنی کیفیت مناسبی ندارند ولی قسمت‌های انتهایی این مخزن با توجه به ماهیت شیل ساختاری می‌تواند کیفیت مخزنی مناسب‌تری داشته باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود، علی‌رغم تعداد کم چاه‌های استفاده‌شده در منطقه، تطابق به نسبت خوبی حاصل شده است. گفتنی است چنانچه از مدل‌سازی‌های معکوس فیزیک سنگی مانند معکوس‌سازی عددی برای تبدیل خواص کشسانی به کمیت‌های مخزنی استفاده شود، دقت این مطالعه افزایش می‌یابد. در روش معکوس‌سازی عددی، جدولی از تمام حالت‌های ممکن مدل فیزیک سنگی ساخته شده تهیه و از آنها برای تبدیل کمیت‌های کشسان به کمیت‌های مخزنی استفاده می‌شود. از طرف دیگر، دلیل دیگر تطابق کم نگارها نیز می‌تواند همین موضوع استفاده از برازش به جای مدل فیزیک سنگی معکوس باشد. با وجود این، برازش به معنای ساخت مدل فیزیک سنگی به روش تجربی است و دقت کمتری نسبت به مدل‌سازی معکوس دارد، اما با توجه به داده‌های موجود برای انجام این مقاله، مدل‌سازی فیزیک سنگی به صورت تجربی بهترین روش ممکن است.

با توجه به نتایج، به کمک روش ارائه‌شده در این مقاله می‌توان به نحوه توزیع انواع شیل در منطقه مورد مطالعه پی برد. برای اعتبارسنجی و مطمئن بودن از صحت نتایج، به داده‌های مستقیم نظیر مغزه نیاز است، ولی در صورت نبود آن می‌توان از نتایج فیزیک سنگ و ارتباط میان نتایج وارون‌سازی و مشاهدات پتروفیزیکی استفاده کرد. در این حالت علاوه بر اعتبار نتایج نمودار توماس و استیبر مبنی بر شناسایی نحوه توزیع شیل در مخزن مورد بررسی و انطباق با گزارش‌های زمین‌شناسی موجود در منطقه برای سنگ‌شناسی‌ها، مقطع‌های حجم شیل و تخلخل کل حاصل از مدل‌سازی تجربی فیزیک سنگ نیز با هم ارتباط دارند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت نمودار توماس و استیبر برای نواحی انتهایی که میزان شیل به نسبت زیاد است و میزان تخلخل نیز رفتار به نسبت افزایشی از خود نشان داده است، شیل‌های ساختاری را تشخیص داده است که با رفتار این نوع شیل که اثری بر میزان تخلخل ندارد،

- behaviour of multiphase materials: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **11**(2), 127-140.
- Mavko, G. Mukerji, T. and Dvorkin, J., 2009, *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*: Cambridge University Press.
- Mindlin, R.D., 1949, Compliance of elastic bodies in contact: *Journal of Applied Mechanics*, **ASME**, **16**, 259-268.
- Pradhan, S., Moeck, I. and Rostron, B., 2015, Determining porosity and permeability in laminated sandstones for combined CO₂-geothermal reservoir utilization: *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Saberi, M.R., 2013, Rock physics integration: From petrophysics to simulation: In 10th Biennale International Conference and Expositions, P444.
- Saberi, M.R., 2017, A closer look at rock physics models and their assisted interpretation in seismic exploration: *Iranian Journal of Geophysics*, 71-84.
- Samba, C.P., Lu, H., and Mukhtar, H., 2017, Reservoir properties prediction using extended elastic impedance: the case of Nianga field of West African Congo basin: *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **7**(3), 673-686.
- Sams, M.S., and Andrea, M., 2001, The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones: *Geophysical Prospecting*, **49**(1), 128-150.
- Simmons Jr., J.L., and Backus, M.M., 1996, Waveform-based AVO inversion and AVO prediction-error: *Geophysics*, **61**(6), 1575-1588.
- Thomas, E.C., and Stieber, S.J., 1975, The distribution of shale in sandstones and its effect upon porosity: In *SPWLA 16th Annual Logging Symposium*, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Wood, A.W., 1955, *A Textbook of Sound*: McMillan Co., New York.
- Whitcombe, D.N., Connolly, P.A., Reagan, R.L., and Redshaw, T.C., 2002, Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction: *Geophysics*, **67**(1), 63-67.
- Xiang, L.M., and Lubis, L.A., 2017, Application of simultaneous inversion characterizing reservoir properties in X Field, Sabah Basin: In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **88**(1), 012022, IOP Publishing.
- منابع**
- خسروتهرانی، خ.، ۱۳۸۹، چینه‌شناسی ایران: انتشارات دانشگاه تهران، ۵۶۸ ص.
- Avseth, P.A., and Odegaard, E., 2004, Well log and seismic data analysis using rock physics templates: *First Break*, **22**(10), 37-43.
- Avseth, P. Mukerji, T. and Mavko, G., 2005, *Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk*: Cambridge University Press.
- Berryman, J.G., 1995, Mixture theories for rock properties. *Rock physics and phase relations: A Handbook of physical constants*, **3**, 205-228.
- Buland, A., and Omre, H., 2003, Bayesian linearized AVO inversion: *Geophysics*, **68**(1), 185-198.
- Chi, X.G., and Han, D.H., 2009, Lithology and fluid differentiation using a rock physics template: *The Leading Edge*, **28**(1), 60-65.
- Dong, S.P., Shalaby, M.R., and Islam, M.A., 2018, Integrated reservoir characterization study of the McKee formation, Onshore Taranaki Basin, New Zealand: *Geosciences*, **8**(4), 105.
- Fatti, J., Smith, G., Vail, P., Strauss, P., and Levitt, P., 1994, Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3D seismic case history using the Geostack technique: *Geophysics*, **59**, 1362-1376.
- García, X., and Medina, E.A., 2006, Hysteresis effects studied by numerical simulations: Cyclic loading-unloading of a realistic sand model: *Geophysics*, **71**(2), F13-F20.
- Gassmann, F., 1951, Über die elastizität poröser medien, *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich*, **96**, 1-23.
- Ghazban, F., 2009, *Petroleum Geology of the Persian Gulf*: Tehran University Press.
- Greenberg, M.L., and Castagna, J.P., 1992, Shear-wave estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and applications: *Geophysical Prospecting*, **40**(2), 195-209.
- Hampson, D., Russell, B., and Bankhead, B., 2005, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: SEG, Expanded abstracts, 1633-1637.
- Hashin, Z., and Shtrikman, S., 1963, A variational approach to the theory of the elastic

Integration of seismic inversion and rock physics relationships for determining of shale distribution in one of the reservoirs in the Persian Gulf

Benyamin Khademalomum¹, Abdolrahim Javaherian^{2,3*}, and Mohammad Reza Saberi⁴

¹ M. Sc., Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

² Retired Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Retired Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

⁴ Product Development Manager, Rock physics, CGG, The Hague, The Netherland

(Received: 02 September 2018, Accepted: 21 January 2019)

Summary

Characterization of siliciclastic reservoirs from seismic data is very sensitive to their clay and shale content. Clay can affect P- and S-wave velocities through its type and shape as well as location. Such an elastic behavior of clay infers that reservoir properties can be overlooked if their clay content is not understood and interpreted adequately. Clay can exist in different types with their specific shape and even can be distributed within siliciclastic rocks in various forms- structural, laminar, interstitial and dispersed clay- with different velocity responses. The mixture of the various clay types and forms can make their velocity interpretation for reservoir properties more complicated. Therefore, a proper strategy to separate the effects of clay types and clay forms is necessary for any seismic reservoir characterization on siliciclastic reservoirs with high clay content. Rock physics is a bridge between seismic and reservoir properties. An important goal of this branch of science is to understand the physical properties of the reservoir, so it is important for this kind of study. This study integrates rock physics modeling and simultaneous seismic inversion in order to find different clay distribution (forms) in one of the oilfields in the western part of the Persian Gulf. The well log data (wells A, B, and C) from this field show how the reservoir quality varies within the field with no obvious relationship to their shale content. This independent behavior of shale content and reservoir properties could be an indication that clay distribution may vary and clay type is not the only parameter for clay effects on the reservoir properties. Therefore, Thomas-Stieber rock physics template, first, is used to characterize shale distribution at well location and then the same template is applied on the reservoir properties derived from simultaneous seismic inversion to understand clay distribution in the whole area. Our results confirm that at wells, clay distribution is varying from top to the bottom of the reservoir. We find out that reservoir quality is not changed within the bottom part of the reservoir with high clay content (due to structural clay) while the same clay content reduced reservoir quality in the top and middle parts of the reservoir (due to the dispersed and layered clay). In order to do reservoir characterization, a map of shale content from top Ghar and top lower Asmari is generated. This generated map differentiates proper reservoir interval from the non-reservoir interval. Therefore, by using the proposed method in this study, one can delineate the potential zones of the reservoir for the future plan of drilling and production.

Keywords: seismic reservoir characterization, rock physics modeling, Thomas and Stieber model, simultaneous inversion