

تعیین نوع سیال و سنگ شناسی یکی از مخازن ناهمگن در شمال غرب خلیج فارس با استفاده از روش AVO و جانشینی سیال

سپیده یاسمی خیابانی^۱، سجاد قره چلو^{۱*}، مهران کلهری^۲، ابراهیم الیاسی^۳

۱- مربی پژوهش، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، تهران، ایران

۱- استادیار، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، تهران، ایران

۲- مربی پژوهش، پژوهشکده علوم پایه کاربردی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه آزاد ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

داده های لرزه ای علاوه بر تفسیر کیفی از نظر کمی نیز جزء داده های با ارزش یک میدان هیدروکربنی محسوب می شوند. تعیین توزیع نوع سیال و سنگ شناسی در مقیاس میدان که مخزن آسماری در آن یک سازند ناهمگن محسوب می شود بسیار حائز اهمیت است. هدف از این مطالعه، تجزیه و تحلیل تغییرات دامنه بر پایه دورافت و مطالعات فیزیک سنگ به منظور شناخت رفتار و خواص مخزن در اثر اشباع شدگی نفت، گاز یا آب می باشد. جهت پیش بینی رفتار مخزن در بخش کربناته بالایی سازند آسماری در میدان مورد مطالعه با اشباع شدگی های مختلفی مورد مدلسازی قرار گرفته است و نهایتاً پس از بررسی و شناخت رفتار لرزه ای مخزن و درک نشانگرهای اصلی در توصیف سیالات مخزنی، نشانگرهای AVO استخراج گردیده است. نتایج چهار روش ۱: جانشینی سیال ۲: وارون سازی مقاومت کشسان ۳: نسبت سرعت موج V_p/V_s و ۴: ترسیم متقاطع نشانگرهای AVO، نشان داد که در زون هدف بصورت همگن سیال گاز تجمع پیدا کرده است. همچنین از نظر سنگ شناسی نتایج نسبت V_p/V_s توزیع نوع لیتولوژی آهک، دولومیت و انیدریت را در بخش بالایی سازند آسماری مشخص کرد.

کلمات کلیدی: خصوصیات الاستیک سنگ، روش جانشینی سیال، نشانگرهای AVO، نوع سیال و لیتولوژی مخزن آسماری

مقدمه

چند سازند کربناته از سن ژوراسیک تا نئوژن در جنوب غرب ایران و بخصوص در فروافتادگی دزفول مهمترین مخازن هیدروکربنی ایران را تشکیل می دهند. سازند آسماری نیز یکی از همین مخازن می باشد که حدود ۸۰ درصد نفت ایران از این سازند تولید می شود. تنوع لیتولوژیکی، رخساره ای و دیاژنزی موجب شده است سازند آسماری یک مخزن ناهمگن باشد. در

¹ gharechelloo.sajjad@gmail.com

میدان مورد مطالعه سازند آسماری از نظر لیتولوژی شامل آهک، دولومیت، انیریت، ماسه سنگ و میان لایه های شیل آهکی است؛ بطوری که یک سازند مختلط کربناته-آواری در نظر گرفته می شود. مخزن آسماری در میدانم مورد نظر در بعضی از زونها (بخش ماسه) تولید نفت دارد و در بعضی زونهای دیگر دارای تجمع گاز می باشد. لذا میدان مورد مطالعه دارای ناهمگنی و پیچیدگی توزیع سیال و لیتولوژی را دارد.

از اواخر سال ۱۹۲۰ روش لرزه ای انعکاسی به عنوان یک روش قدرتمند در اکتشاف و بازسازی شرایط ساختمانی زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین امروزه با پیشرفتهایی که در بخش برداشت و پردازش داده های لرزه ای رخ داده است موجب شده که از ردلرزه ها اطلاعات فیزیک سنگی نیز بدست آورد. این روش ها تحت عنوان تفسیر کمی شناخته شده و شامل شناسایی جنس سنگها، نوع سیالات و خصوصیات فیزیکی سنگها می باشند.

حضور سیالات مختلف در سنگ موجب تغییر نسبت پوواسون آن خواهد شد [۱]. لذا تغییرات قابل توجهی در دامنه موج بازتابیده لرزه ای در داده های لرزه ای پیش از برنبارش اتفاق می افتد به همین دلیل از روش AVO و نشانگرهای آن برای شناسایی سیال و تغییر نسبت سرعتهای امواج تراکمی و برشی برای شناسایی جنس سنگ استفاده می شود [۲]. در تحلیل نشانگر AVO لایه های زمین بصورت افقی و همگن و همسانگرد فرض می شود. همینطور صرفا بازتاب موج تراکمی مد نظر است، کاهش انرژی ناشی از انتشار موج، موجهای تبدیلی و چندگانه در طی پردازش اصلاح می گردد. از طرفی هر مقدار که بازتابنده مورد نظر در عمق کمتر باشد زاویه بازتابش گسترده تر می گردد، به همین دلیل بازتابنده های کم عمق تر دقیقتر و کیفیت بالاتر دارند [۳]. از اینرو نشانگر AVO در شناسایی سیالات مخزنی بکار می رود [۴]. کاربرد روش AVO در تجزیه و تحلیل مخازن کربناته در حوضه رسوبی کانادای غربی در حال افزایش است. این مساله با افزایش سریع دانش ویژگی های فیزیکی سنگ های کربناته و اکتشاف فعال و تعیین حدود مخازن کربناته همراه بوده است. استراندر (۱۹۸۴)، فتی و همکاران (۱۹۹۴)، آلن و پدی (۱۹۹۳) چگونگی استفاده از AVO در شناسایی هیدروکربور را نشان دادند. کاستانگا (۱۹۹۳)، گودوی و همکاران (۱۹۹۷) و آوست (۲۰۰۰) از آن در تشخیص سنگ شناسی و میزان تخلخل سنگهای آواری استفاده کردند [۵،۶،۷،۸،۹،۱۰]. لی و همکاران (۲۰۰۳) کاربرد AVO را در اکتشاف کربناته ها شرح دادند [۱۱]. همچنین از آنجا که AVO قادر به پیش بینی فشار منفذی است می تواند در طرح ریزی برنامه های حفاری مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲]. به طور کلی، تحلیل پتروفیزیکی و AVO مرسوم، به بررسی تغییرات غیرمعمول سرعت موج تراکمی (V_p) و سرعت موج برشی (V_s) به منظور تعیین تغییرات نوع سیال و همچنین خصوصیات سنگ شناسی می پردازد [۱۳،۱۴،۱۵]. آسفا و همکاران در سال ۲۰۰۳ در مقاله خود عنوان نموده اند که تغییر سرعت های موج تراکمی و برشی می تواند مشخصات مخزن را آشکار کند [۱۶]. از

² Amplitude versus offset

نشانه‌های AVO می‌توان به شیب^۲ AVO، عرض از مبدأ^۴ AVO و یا ترکیبات آنها، و نیز مطالعه همزمان نشانه‌های مختلف تحت عنوان روش ترسیم متقاطع^۵، همچنین برآیند های جزئی^۶ (برآیند نزدیک و دور) اشاره کرد [۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰]. با استفاده از این نشانه‌ها می‌توان به بعضی از خصوصیات سنگ و سیال پی برد. در واقع خصوصیات الاستیک سنگ وابسته به خصوصیات فیزیک سنگ و سیال پرکننده حفرات سنگ می‌باشد [۲۱، ۲۲]. مخزن آسماری در میدان مورد مطالعه از نظر لیتولوژی ناهمگن است (آهک، دولومیت، انیدریت و ماسه سنگ) و همچنین بخش‌هایی از مخزن دارای گاز و زون‌های خاصی هم دارای سیال نفت می‌باشد. مطالعات گوناگون لرزه‌ای توسط محققین مختلف در بخش ماسه سنگی مخزن آسماری صورت گرفته است [۲۳]. اما زون هدف مطالعاتی این مقاله بخش کربناته بالایی سازند آسماری می‌باشد که به دلیل تنوع سنگ شناسی بخش کربناته (آهک، دولومیت و انیدریت) و ناهمگنی که در توزیع سیال در مقیاس میدانی وجود دارد کمتر تاکنون مورد توجه قرار گرفته است. لذا هدف اصلی این مقاله تعیین توزیع لیتولوژی و سیالات مخزن آسماری (بخش آهکی بالایی آسماری) با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برآیند می‌باشد.

زمین شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در شمالغرب خلیج فارس در فاصله ۷۶ کیلومتری غرب جزیره خارک واقع گردیده است (شکل ۱). وسعت میدان ۲۴۲ کیلومتر مربع، عمق آب در منطقه اغلب حدود ۳۵ متر و عمق مخزن بین ۸۲۰ تا ۸۸۰ متر می‌باشد. میدان بصورت یک طاق‌دیس با روند NW-SE و پلانژ ۱ تا ۱/۵ درجه بوده و از نقطه رأس طاق‌دیس دارای ستون هیدروکربوری در حدود ۶۲ متر می‌باشد که سازند آسماری در این میدان نقش مخزنی، سازنده پابده گورپی نقش سنگ منشا و سازند گچساران نقش پوش سنگ دارد (شکل ۲). در مخزن مورد مطالعه در زون‌های مختلف حضور گاز و نفت گزارش شده است. مخزن آسماری این میدان شامل ۳ واحد چینه‌شناسی می‌باشد: ۱- آسماری کربناته زیرین، ۲- بخش ماسه سنگی غار (معادل بخش اهواز) و ۳- آسماری بالایی کربناته (فارس زیرین). این توالی یک چرخه پیشروی-پسروی رسوبگذاری را تحت شرایط دریایی کم عمق و حاشیه‌ای کم عمق که در یک جایگاه پسرونده واقع‌اند را نشان می‌دهد. در این منطقه واحدهای کربناته یک کشیدگی به سمت غرب در سازند آسماری را نشان می‌دهد. آسماری بالایی دارای پتانسیل مخزنی بوده درحالی‌که آسماری زیرین کاملاً متراکم و بدون تخلخل می‌باشد. بخش غار در این میدان بطور عمده شامل حدود ۱۰۰ متر ماسه غیر متراکم و بین لایه‌های شیل، دولومیت و ماسه سنگ با سیمان دولومیتی و همچنین انیدریت نودولی می‌باشد. بخش ماسه‌های سست گاه‌ها بوسیله دولومیت سیمانی شده است اما با این وجود دارای نفوذپذیری قابل توجهی است. هرچند که انیدریتها و نودولهای دولومیتی واقع در

³ Gradient

⁴ Intercept

⁵ Cross plot

⁶ Partial Stack

بخشهای ماسه‌ای تخلخل را پایین می‌آورند ولی از آنجا که روی نفوذپذیری بی اثر هستند از ارزش بخش ماسه ای کم نمی‌کند.

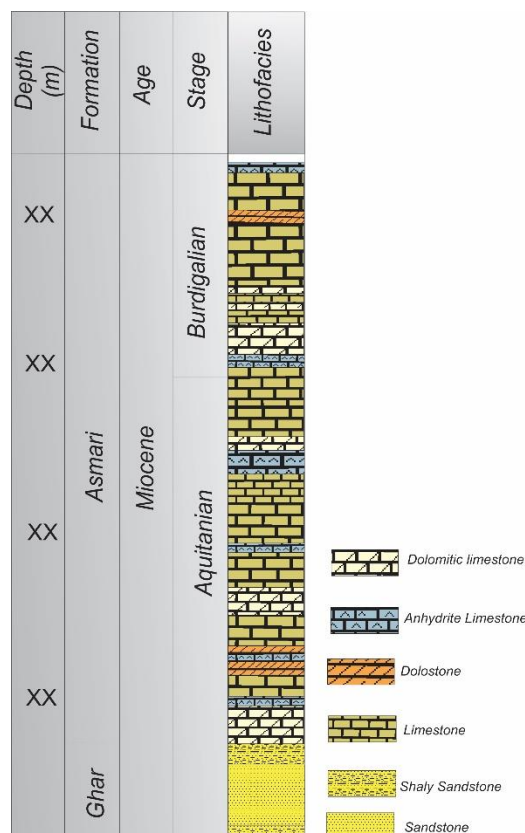
بخش کربناته بالایی سازند در محدوده متوسط از نظر تخلخل و تراوایی قرار دارد و سنگ مخزن مناسبی برای سیال گاز می باشد. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه در واقع یک سازند مختلط کربناته-آواری می باشد. زون هدف در این مطالعه بخش کربناته آسماری بالایی است. آسماری بالایی دارای تنوع سنگ شناسی شامل آهک، مارل، دولومیت و انیدریت می باشد (شکل ۳). لذا این تنوع در سنگ شناسی نیز موجب ناهمگنی‌های مخزنی نیز شده است. در این مطالعه بخش بالایی سازند به دلیل تنوع سنگ شناسی و پتروفیزیکی به ۴ زون/بخش به منظور بدست آوردن یک تصور کلی از سازند ارائه شده است. زون ۱: این زون یک زون کربناته-غالب با ۱۰ متر ماسه‌سنگ و ماسه شیلی در قاعده است. این ماسه سنگها دانه ریز تا متوسط دانه بوده و بر اساس طبقه بندی پتی جان و همکاران [۲۴] از نوع کوارتز آرنایت تا کوارتز وک می‌باشند که آثار زیست آشفنگی نیز در آن دیده می‌شود. ضخامت آن بطور متوسط ۲۵ متر است و شامل سنگ آهک خاکستری تا قهوه‌ای روشن و سنگ آهک دولومیتی و ماسه‌های همراه با ندول‌های انیدریتی است. زون ۲: این زون شامل تناوبی از شیل خاکستری، سنگ آهک ماسه‌ای و ماسه‌سنگ‌های آهکی است زون ۳: از نظر سنگ شناسی این زون از تغییرات زیادی برخوردار بوده و تناوبی از دولومیت، سنگ آهک، سنگ آهک ماسه‌ای و دولومیتی را شامل می‌شود. در قسمتهای بالایی چند لایه شیلی-آهکی نیز در آن وجود دارد. زون ۴: این زون، که عمدتاً متشکل از دولومیت، سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای روشن است، با ضخامت حدود ۳۲ متر در بالاترین بخش سازند آسماری قرار گرفته است. مقدار ستون هیدروکربن در این زون بسیار کم بوده و تنها محدود به ۲ متر در چاه شماره ۳



شکل ۱ موقعیت جغرافیای میدان مورد مطالعه در شمال غرب خلیج فارس

Age	Tectonic Event	Formation	Lithology
U. Pliocene	Convergence & Folding-thrusting	Bakhtiari Fm.	
L. Pliocene		Aghajari Fm.	
Miocene	Continental collision	Mishan Fm.	
Eocene-Oligocene		Gachsaran Fm.	
Paleocene	Arc collision & Ophiolite obduction	Asmari Fm.	
		Pabdeh-Gur. Fm.	
Cretaceous		Bangestan Gp.	
		Khami Gp.	

شکل ۲ ستون چینہ شناسی میدان مورد مطالعه که سازند آسماری نقش مخزنی دارد



شکل ۳ ستون لیتولوژی در یکی از چاه های مطالعاتی میدان

روش پژوهش

داده های مورد استفاده در این مطالعه شامل داده های نگار چاه پیمایی و سرعت موج برشی، شوت کنترل، سرسازندها و داده سه بعدی لرزه ای پیش از برانبارش می باشد. داده های ذکر شده در سه چاه از میدان استفاده شده است بطوریکه چاه های مورد استفاده در این پژوهش، دارای نگار موج فشاری و دانسیته که برای انجام این پژوهش مورد نیاز است (شکل ۴). همچنین لاگهای پتروفیزیکی که در این مطالعه استفاده شده است کنترل کیفی و تصحیحات محیطی بر روی آنها انجام شده است. از طرفی تنها چاه A-17 دارای نگار موج برشی بوده و سرعت موج برشی در این چاه باعث بهبود کیفیت نتایج حاصله می گردد چرا که در بسیاری از موارد، تخمین سرعت امواج برشی با بهره گیری از امواج فشاری و روابط مربوطه منجر به بروز خطاهایی در نتایج نهایی می گردد. محدوده مورد مطالعه در این تحقیق بخش کربناته بالایی سازند آسماری می باشد. این سازند در این ناحیه از لیتولوژی های مختلفی تشکیل شده است که مقادیر میانگین آنها در جدول ۱ آورده شده است. این مقادیر در مدل سازی های

فیزیک سنگی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱ درصد لیتولوژی های موجود در بخش کربناته بالایی سازند آسماری

درصد کلسیت	درصد شیل	درصد دولومیت
۱۵	۵	۸۰

داده های لرزه ای که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته اند متعلق به قسمتی از میدان از کراس لاین^۷ ۱۶۰۰ تا ۱۹۰۰ و از این لاین^۸ ۵۴ تا ۶۱۴ می باشد. فاصله بین هر دو گروه نقطه میانی مشترک ۱۲/۵ متر و فاصله نمونه برداری ۲ میلی ثانیه می باشد. به کمک دو کابل دریایی^۹ هر کدام شامل ۲۴۰ کانال با طول ۳۰۰۰ متر به فاصله ۱۰۰ متر از یکدیگر و دو تفنگ بادی در عمق ۴ متر به فاصله ۵۰ متر از یکدیگر که فاصله بین دو چشمه متوالی ۱۸/۷۵ متر می باشد، داده ها با فرمت SEG-D روی نوارهای ۳۵۹۰ برداشت شده است. البته مکانهای چشمه^{۱۰} از چهار کابل دریایی استفاده گردیده است. مراحل پردازشی که روی داده های پیش از برانبارش صورت گرفته است شامل تصحیح گسترش هندسی، تصحیح برونراند نرمال و مهاجرت پیش از برانبارش با هدف بازیافت دامنه صحیح، مناسب برای تحلیل AVO می باشد. خروجی پردازش گروههای نقطه میانی مشترک^{۱۱} با فرمت SEG-Y، و فاصله دور افت بین ۱۳۷ تا ۳۰۳۷ می باشد. زون هدف در این مطالعه بخش آسماری بالایی (فارس زیرین) می باشد که بین افق فارس زیرین^{۱۲} و افق بالای غار^{۱۳} قرار دارد.

در این مطالعه به منظور تطابق نتایج بخش سائزمیک از نظر سنگ شناسی با داده های پلاگ، خرده های حفاری و گزارش

⁷ X line

⁸ In line

⁹ Streamer

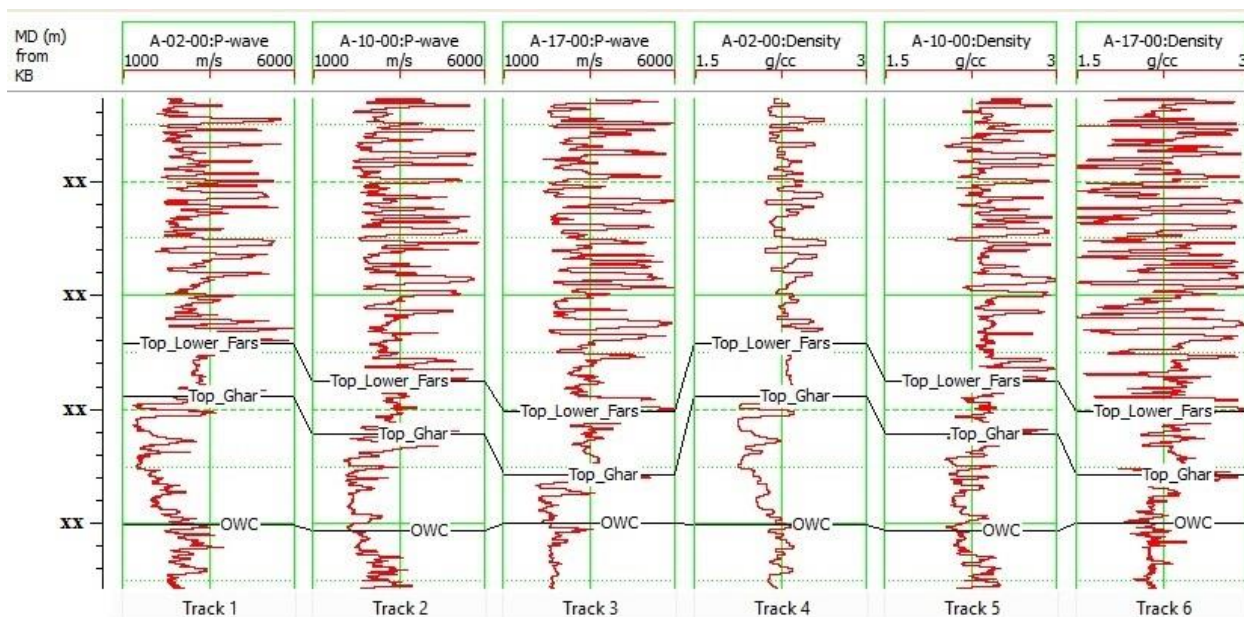
¹⁰ Undershot

¹¹ Common Mid Point

¹² Top Lower Fars

¹³ Top Ghar

زمین شناسی مقایسه شده است و در بخش سیال با گزارش آزمایش ساقه مته تطابق داده شده است.



شکل ۴ لاگهای پتروفیزیکی چگالی و صوتی در سه چاه مطالعاتی

وارون سازی پیش از برانبارش همزمان

وارون سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش با نام وارون سازی همزمان نیز نامگذاری شده است زیرا دو یا چند حجم از پارامترهای فیزیکی به طور همزمان تولید می‌شوند. در این روش، با استفاده از الگوریتم وارون سازی AVA^{14} در مدل سازی پیشرو با ترکیب کردن موجک و بازتاب پذیری‌های وابسته به زاویه و همچنین اعمال و دخالت دادن روند تغییرات فرکانس پایین Z_s ، Z_p ، D_n (مقاومت تراکمی، مقاومت برشی، چگالی) که از اطلاعات درون‌یابی شده چاه به دست می‌آید، مقطع نهایی و مدل تخمینی حاصل می‌شود. در موقعیت هر نقطه میانی مشترک چندین رد لرزه داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش در زوایای مختلف دیده می‌شود که این رد لرزه‌های داده‌های پیش از برانبارش ناشی از هم‌میخت چند موجک خاص وابسته به زاویه با سری ضرایب بازتاب به دست آمده از فضای فرضی مدل مورد نظر می‌باشد. سری ضرایب بازتاب به صورت تابعی از مقادیر تعریف شده‌اند تا بر این اساس بتوان مقطع نسبتاً مشخص و قابل قبولی از مدل الاستیکی زمین ارائه نمود.

نتایج روش وارون سازی پیش از برانبارش شامل مقاومت تراکمی، مقاومت برشی، چگالی، نسبت پوواسون و ضرایب لامه می‌باشند. در واقع منظور از مقایسه روش وارون سازی پیش از برانبارش با وارون سازی پس از برانبارش، فقط مربوط به دقت تعیین مدل

¹⁴ Amplitude Versus Angle

تطابق اطلاعات چاه و لرزه نگاری^{۱۵} و استخراج موجک

در این مرحله باید بین نگارهای چاه و داده‌های لرزه‌ای انطباق به وجود آورد. تطابق نگارهای چاه با داده‌های لرزه‌ای نه تنها یک مرحله اولیه مهم در تفسیر لرزه‌ای می‌باشد بلکه یک اولویت بسیار مهم در انجام وارون سازی است. این مرحله، انطباق بین وقایع لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از نگارهای چاه و داده‌های لرزه‌ای را بهبود می‌دهد. از نگارهای صوتی و چگالی، ضرایب بازتاب حاصل می‌شوند و با هم‌میختن این ضرایب با یک موجک استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای، نگاشت مصنوعی حاصل می‌گردد که اگر موجک استخراج شده مناسب باشد این لرزه نگاشت مصنوعی تطابق خوبی با داده‌های لرزه‌ای خواهد داشت. لذا در این قسمت، برای کالیبره کردن داده چاهها با اطلاعات لرزه نگاری، ابتدا رابطه زمان-عمق نمودارهای صوتی^{۱۶} به کمک اطلاعات سرعتی^{۱۷} تصحیح می‌گردید. در مرحله بعد لرزه‌نگاشت مصنوعی به کمک موجک استخراج شده از اطلاعات لرزه‌ای^{۱۸} با فاز صفر ساخته شد. بعد از مقایسه با رد لرزه‌ای‌های مجاور در اطلاعات لرزه‌نگاری با اعمال جابجایی^{۱۹} یا فشردگی و کشش^{۲۰}، تطابق اولیه بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و اطلاعات لرزه‌نگاری انجام پذیرفت. پس از استخراج موجک آماری که تنها از اطلاعات لرزه‌ای بدست می‌آید، موجک لرزه‌ای نهایی در محدوده مخزن با تلفیق داده‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌گردد. بعد از اینکه تطابق همه چاهها با موجک مربوط به خود انجام گرفت جهت بهبود کیفیت مطالعات ژئوفیزیک مخزنی، در مرحله بعد استخراج موجک لرزه‌ای^{۲۱} با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای و اطلاعات چاه^{۲۲} صورت گرفت و از اطلاعات سه چاه A-۱۰، A-۱۷ و A-۱۷ برای استخراج موجک نهایی استفاده شد تا اطلاعات مناسبی از فاز موجک لرزه‌ای بدست آید و مدل‌های حاصله از صحت بیشتری در محدوده مخزن مورد مطالعه بهره‌مند گردند. شکل ۵ موجک نهایی استخراج شده برای انجام مدلسازی‌های AVO و ادامه مطالعات این پژوهش را نشان می‌دهد. سپس تطابق کلیه چاهها با اطلاعات لرزه‌نگاری با استفاده از این موجک انجام گرفت.

¹⁵ Well Seismic Correlation

¹⁶ Sonic

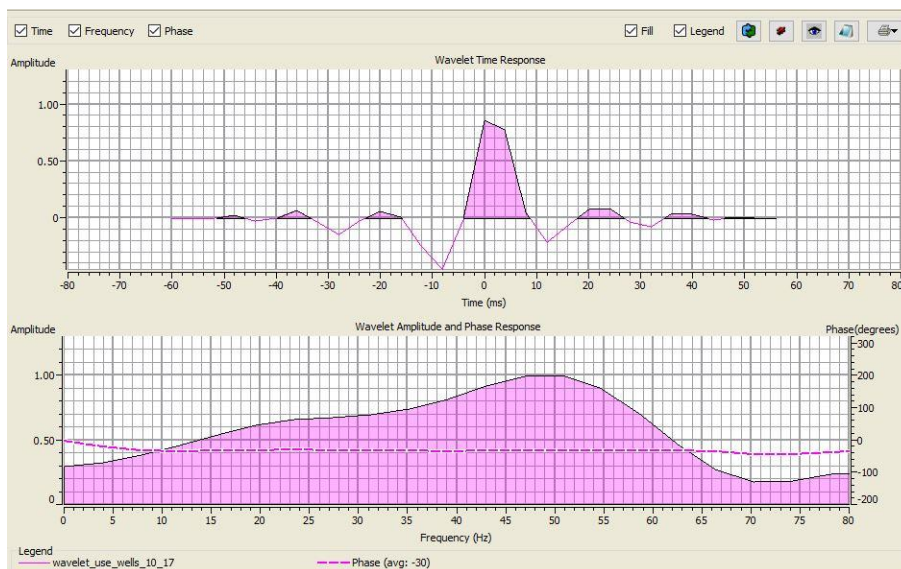
¹⁷ Check Shot

¹⁸ Statistical Wavelet

¹⁹ Shift

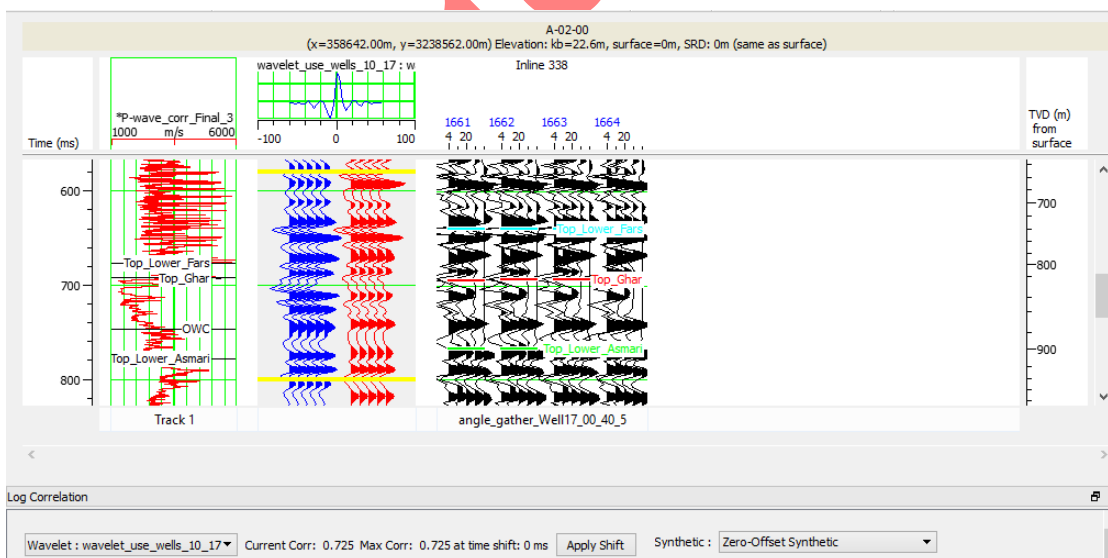
²⁰ Squeeze and Stretch

²¹ Stratigraphic Wavelet Extraction



شکل ۵ موجک نهایی استخراج شده در این مطالعه. بالا: رفتار زمانی موجک، پایین: طیف دامنه

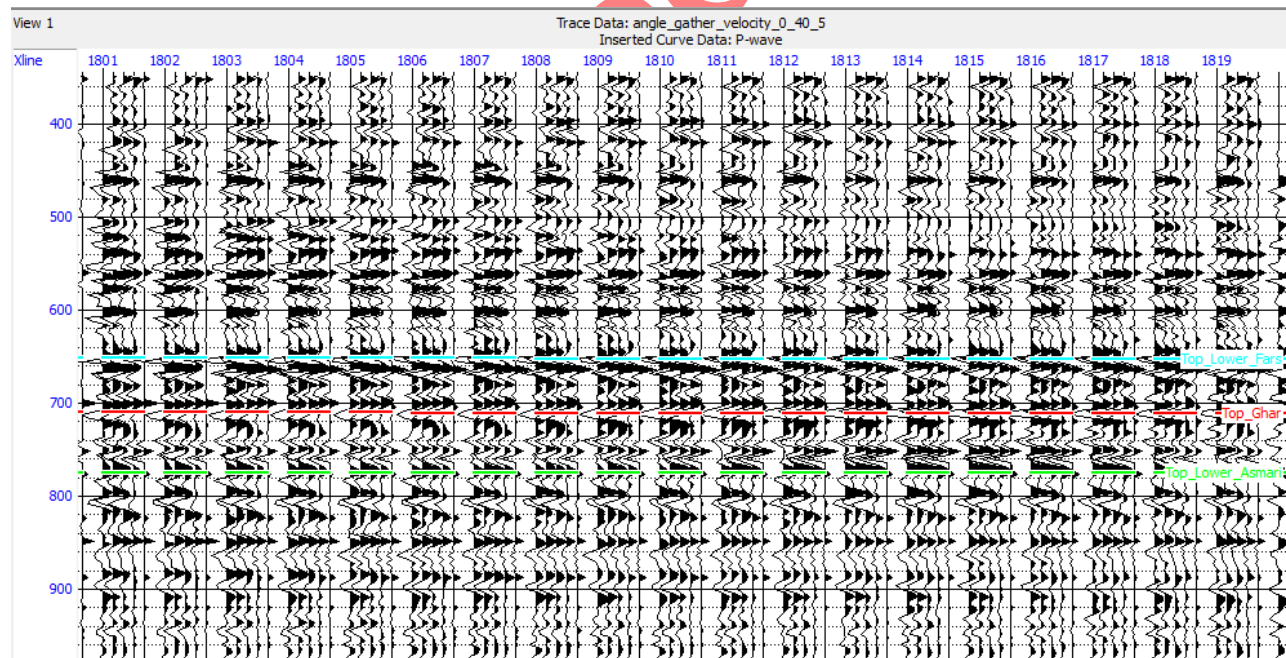
شکل ۶ انطباق بین وقایع نگارهای چاه و وقایع متناظر آنها در داده‌های لرزه‌ای را در چاه مورد استفاده را نشان می‌دهد. رد لرزه‌های قرمز رنگ مربوط به رد لرزه‌های اطراف چاه می‌باشند و رد لرزه‌های آبی رنگ رد لرزه‌های مصنوعی هستند که با استفاده از داده‌های چاه و گروه موجک استخراجی ساخته شده‌اند که تطابق نسبتاً خوبی را نشان می‌دهند.



شکل ۶ تطابق چاه A-02 با استفاده از موجک استخراج شده از اطلاعات چاه و لرزه (ضریب همبستگی ۷۲ درصد)

تهیه مقطع داده‌های با زاویه فرود یکسان

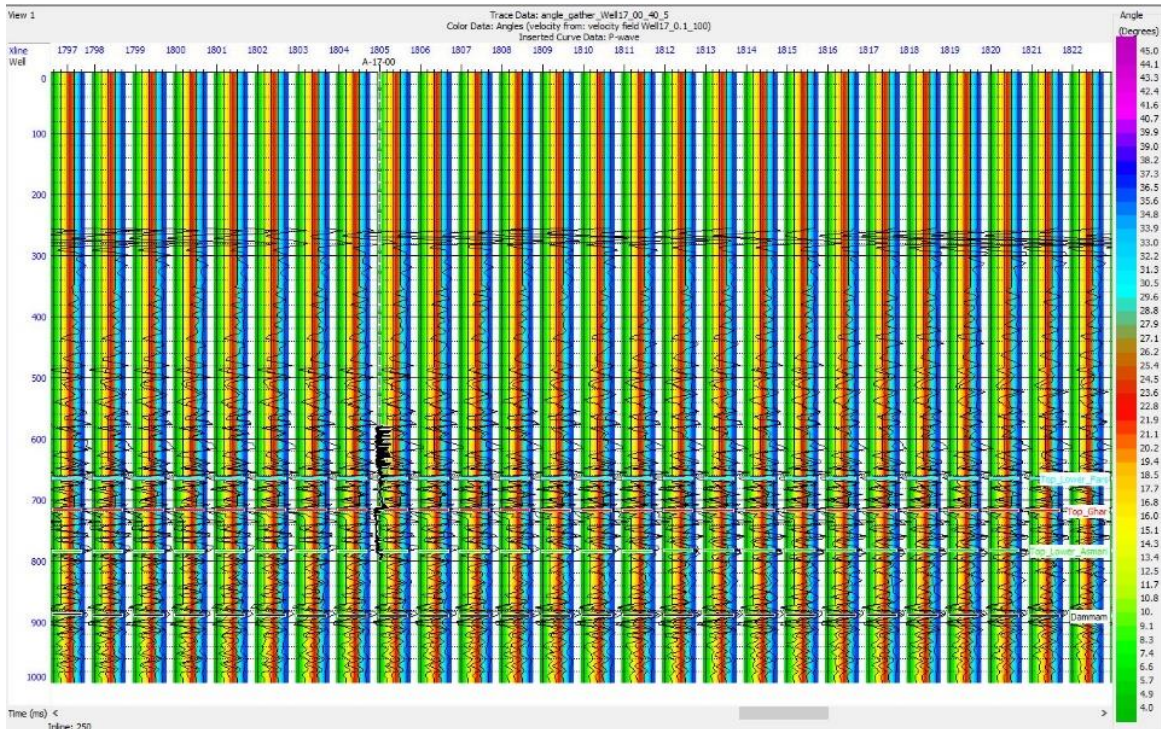
برای انجام وارون سازی همزمان یک فرض اولیه وجود دارد و آن این است که داده‌ها باید با زاویه فرود یکسان باشند. زیرا وارون سازی پیش از برانبارش در حوزه زاویه تابش عمل می‌کند. از اینرو پیش از انجام مطالعات نیاز به تبدیل مقادیر دورافت به زاویه و تولید برانبارش زاویه ضروری می‌باشد. برای نیل به این هدف، با بهره‌گیری از یک مدل سرعتی مقادیر دورافت به زاویه قابل تبدیل می‌باشند [۲۵]. در واقع بیان صحیح‌تر مطالعات AVO که به بررسی تغییرات دامنه بر اساس دورافت می‌پردازد، عبارت AVA است که به بررسی تغییرات دامنه لرزه‌ای بر اساس زاویه تابش موج به فصل مشترک دو محیط می‌باشد. از آنجاییکه در این پژوهش داده‌های پیش از برانبارش بر اساس دورافت^{۲۳} می‌باشند لذا از مکعب سرعت سایز میک استفاده شده و در ابتدا آنها را به زاویه تبدیل نموده ایم و در نهایت از آن super gather به نحوی تهیه شده که به جای اینکه در هر زاویه یک رد لرزه‌ای داشته باشیم هر رد لرزه‌ای معرف مجموعه زاویه شده و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز افزایش یافته و مراحل وارون سازی بهتر و با سرعت بیشتری انجام شده است. یکی از خروجی‌های مراحل فوق (مربوط به این لاین ۵۵۰) به صورت Angle gather و به عنوان نمونه در شکل ۷ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در حین تهیه Angle gather بازه زاویه از ۰ تا ۴۰ درجه، و تعداد ۵ بازه زاویه ای تعیین شد که مخزن مورد مطالعه در این بازه ۵ زاویه را تحت پوشش قرار می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود هر رد لرزه متعلق به یک زاویه تابش مشخص است و از اینرو امکان انجام آنالیزهای دامنه بر اساس زاویه بر اساس روابط زئوپریتس یا سایر روشهای تقریبی دیگر میسر می‌گردد.



²³ Offset

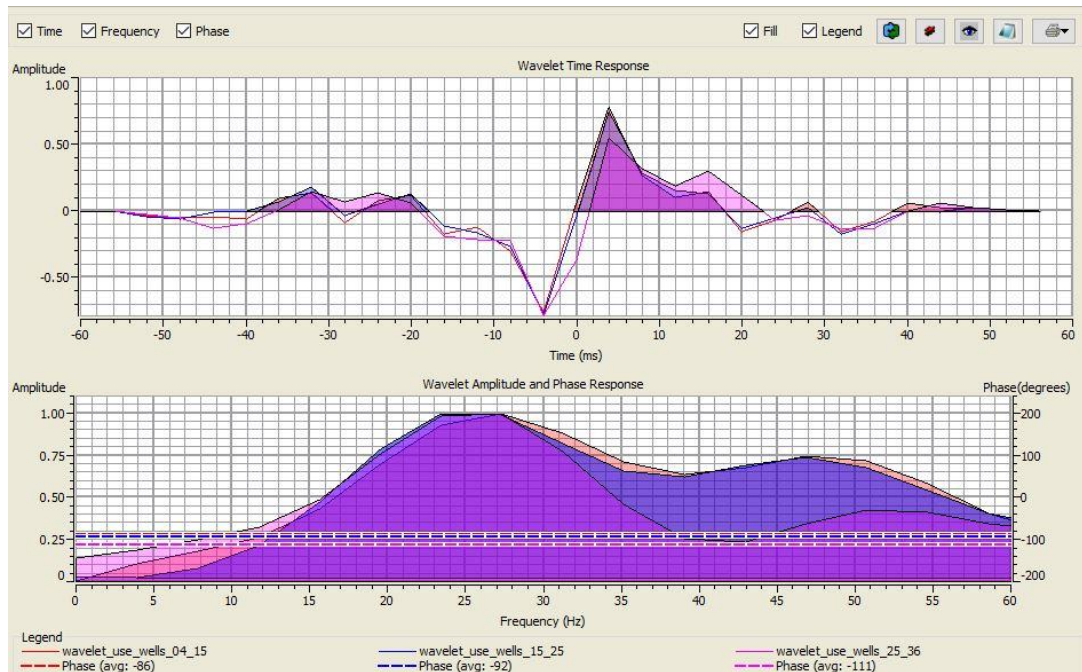
شکل ۷ نمونه ای از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش به صورت زاویه فرود یکسان از ۴ تا ۳۶ درجه (مربوط به این لاین ۵۵۰)

در شکل ۸ برانبارش زاویه تولید شده با طیف رنگی زاویه تابش در اطراف چاه ۱۷-A نشان داده شده است. همانگونه که قبلاً نیز اشاره شده این چاه دارای نگار موج برشی می‌باشد. با توجه به تفسیر انجام شده برای افق فارس پایینی یا همان بخش کربناته آسماری بالایی، تغییرات دامنه بر اساس زاویه در این بازتابنده مشهود است. اثر مشاهده شده می‌تواند هم به سیال درون مخزن مرتبط باشد و هم ناشی از تغییرات زاویه تابش به دو لیتولوژی متفاوت باشد. از این رو جهت شناخت بهتر رفتار مخزن، در قسمتهای بعدی پژوهش، مدلسازی AVO انجام پذیرفته است تا شناخت بهتری نسبت به رفتار سیالات مخزن حاصل گردد. پس از انجام این مرحله و در اصطلاح تولید برانبارش زاویه امکان آنالیزهای AVO و همچنین انجام وارون سازی پیش از برانبارش همزمان وجود دارد.



شکل ۸ نمایش Angle Gather به دست آمده جهت مطالعات AVO با طیف رنگی زاویه تابش در اطراف چاه ۱۷-A

پس از تبدیل دورافت به زاویه، امکان استخراج موجکهای وابسته به زاویه میسر می‌گردد. در برخی از روشهای وارون سازی داده های پیش از برانبارش، نیاز به استفاده از موجک معرف برای هر دسته از زوایای مورد وارون سازی است. در این بخش نتیجهی استخراج سه موجک لرزه‌ای در زوایای ۰۴-۱۵، ۱۶-۲۵ و ۲۵-۳۶ از داده های لرزه ای در شکل ۹ نمایش داده شده است. فاز متوسط این داده ها در حدود ۹۰- درجه بوده و موجکهای استخراج شده از تطابق قابل قبولی نسبت به یکدیگر برخوردارند که این مسئله امکان بکارگیری یک موجک معرف را برای داده ها امکان پذیر می‌سازد.



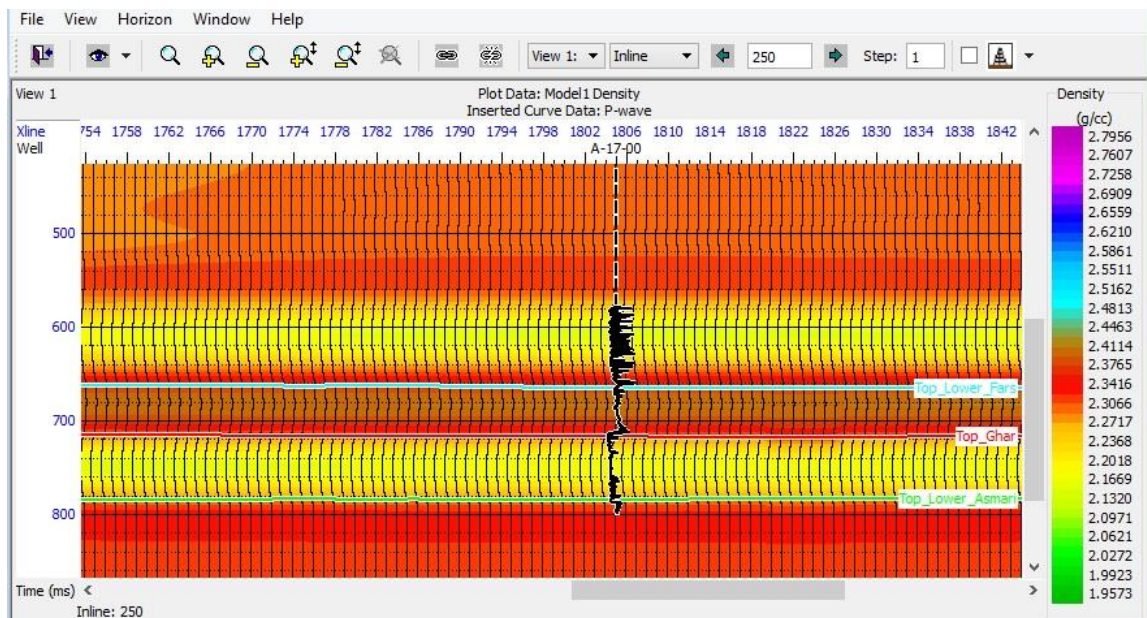
شکل ۹ موجکهای استخراج شده برای زوایای بازتابش کم، متوسط و زیاد

تهیه مدل مقاومت صوتی اولیه

گام بعدی ساخت مدل اولیه برای مرحله وارون سازی است. مقاطع فرکانس پایین امیدانس صوتی، امیدانس برشی و چگالی برای انجام مرحله وارون سازی مورد نیاز هستند. داده‌های لرزه‌ای پهنای باند محدودی دارند و بنابراین فرکانس‌های پایین و فرکانس‌های بالا را شامل نمی‌شوند. به خاطر از دست رفتن فرکانس‌های پایین و بالا در فرایند لرزه‌نگاری، اطلاعات مورد نیاز جهت بازتولید پروفیل مقاومت در داده‌های لرزه‌ای به تنهایی موجود نمی‌باشد بنابراین علاوه بر داده‌های لرزه‌ای، یک مدل مقاومتی فرکانس پایین نیز به عنوان اطلاعات اولیه در وارون سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶]. در واقع این اطلاعات فرکانسی پایین به عنوان روند زمینه برای درک بهتر از شرایط زیر سطحی مورد نیاز هستند. الگوریتم وارون سازی داده‌های AVA با استفاده از اطلاعات روند فرکانس پایین مقادیر جهت انجام تغییرات لازم بر روی مدل اولیه تولید شده و در بالا بردن تفکیک پذیری مقطع اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این مقاطع از درون‌یابی جانبی بین نگارهای چاه و همچنین افق‌های تفسیر شده به دست می‌آیند. برای ساختن این سه مدل نیاز به داشتن اطلاعات نگارهای صوتی و چگالی می‌باشد. بخش دیگری از اطلاعات که برای ساخت مدل اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند، مربوط به افق‌های تفسیر شده زمانی ذکر شده هستند. همچنین برای اینکه مدل اولیه و نتایج نهایی عاری از هر گونه نویز باشند، یک فیلتر پایین گذر 10/15 Hz بر روی مدل اولیه اعمال شد. در شکل ۱۰ نمونه ای از مدل اولیه چگالی

نشان داده شده است. به دلیل اینکه چاه‌ها در فواصل دور از هم قرار گرفته اند امکان ارائه این مدل‌ها به نحویکه هر ۳ چاه در آن نمایش داده شوند میسر نیست لذا به تفکیک برای هر چاه مدل جداگانه تهیه شده است.

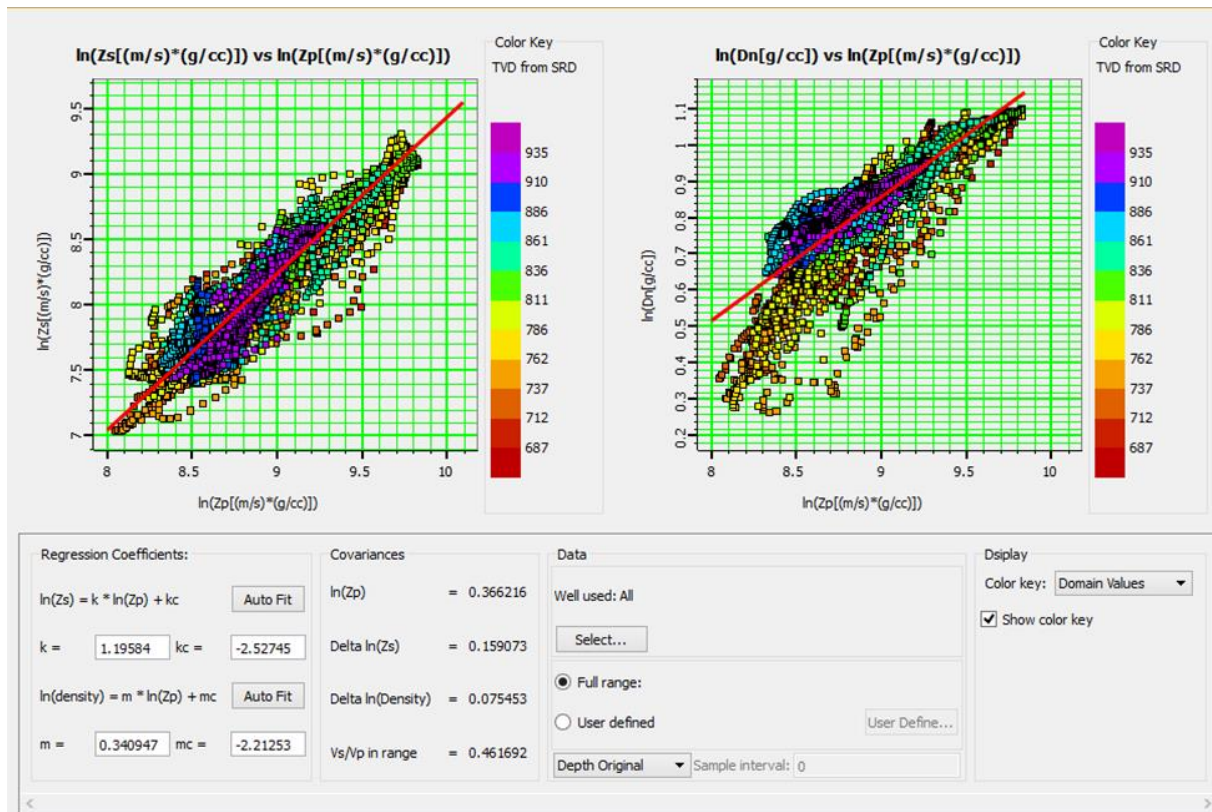


شکل ۱۰ اینلاین شماره ۲۵۰ از مدل اولیه چگالی در محدوده چاه A-17. مقیاس رنگی تغییرات چگالی در مدل را نسبت به زمان نشان می‌دهد

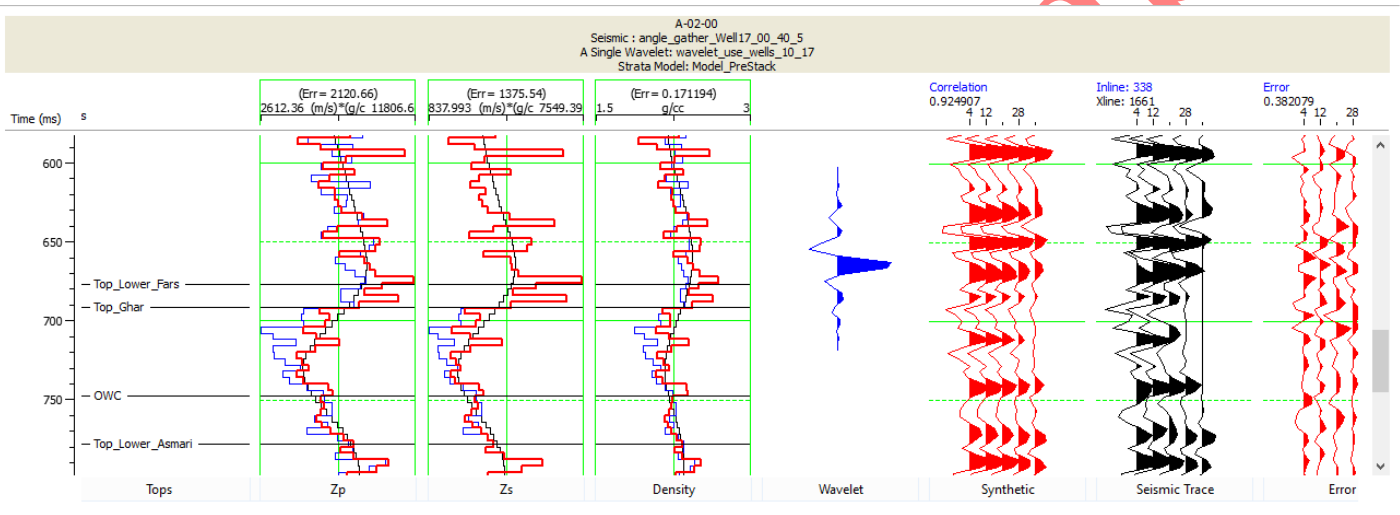
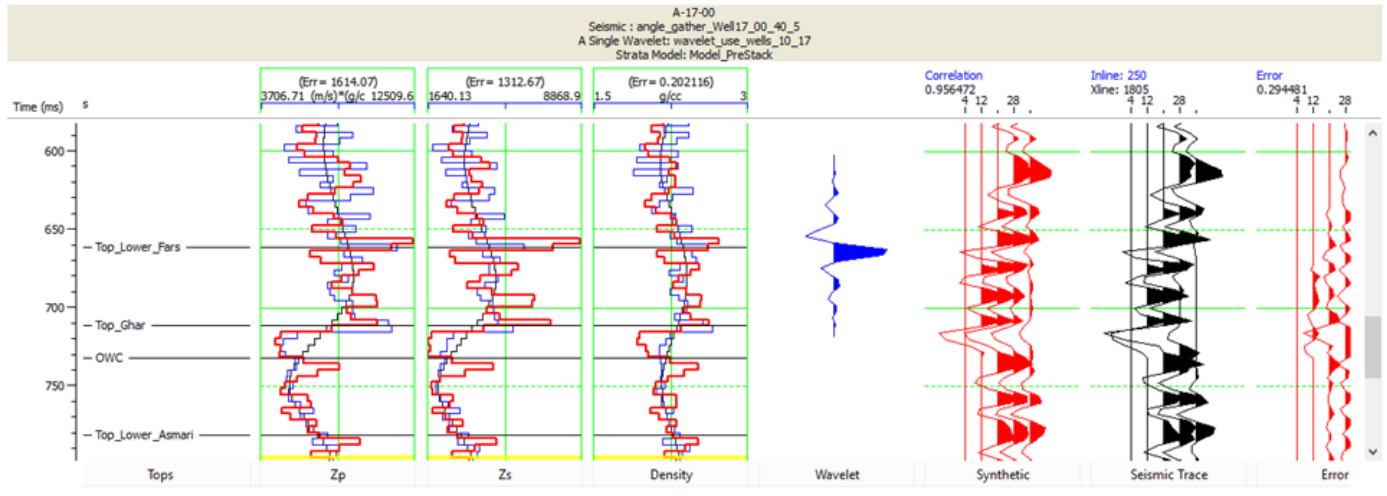
تحلیل وارون سازی و کنترل کیفیت وارون سازی در محل چاه

در این مرحله در محل چاه یک وارون سازی انجام می‌پذیرد. هدف از وارون سازی در محل چاه این است که پارامترهای وارون سازی مناسبی را بدون اینکه کل حجم داده‌ها وارون سازی شوند به دست آورد و پس از آن بر کل حجم داده، وارون سازی اعمال شود. الگوریتم این وارون سازی با اختصاص دادن مجموعه‌ای از رد لریزه‌ها در محدوده‌های زاویه ای یکسان و موجک‌هایی برای هر محدوده، مدل‌های اولیه برای مقاومت تراکمی، مقاومت برشی و چگالی آغاز می‌شود. برای هر محدوده زاویه ای یک موجک می‌بایست اختصاص داده شود. در شکل ۱۱ چگونگی برازش خطوط مربوطه در ترسیم‌های متقاطع $\ln(Z_p)$, $\ln(Z_p)$, $\ln(D_n)$, $\ln(Z_s)$ به وسیله انجام یک رگرسیون ساده و به دست آمدن ضرایب نمایش داده شده است. پارامتر دیگر تاثیرگذار، تعداد تکرار است که در این مطالعه عدد ۵۰ انتخاب شده است. به دلیل حجم بالای داده‌های پیش از برنبارش، افزایش این پارامتر تاثیر زیادی در زمان اجرای برنامه می‌گذارد. در این قسمت به منظور چک کردن وارون سازی در محدوده چاه‌ها، نتایج به دست آمده بررسی شده و مقاومت صوتی اولیه با مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی مقایسه و ضریب همبستگی بین آنها مشخص می‌شود. پس از اعمال پارامترهای فوق، برای مثال در شکل ۱۲، نتایج انجام این مرحله در چاه شماره ۱۷-A و ۲-A نمایش داده شده است. در این شکل نگارهای آبی مربوط به نگارهای اولیه چاه می‌باشند و نگارهای قرمز نگارهایی هستند که از وارون سازی منتج شده‌اند. انتخاب بهینه وارون سازی باید در جهتی باشد که تا حد امکان نگارهای

قرمز با نگارهای آبی منطبق باشند. در شکل مذکور منحنی‌های مربوط به مقاومت صوتی اولیه و مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی در محل چاه A-17 و ضریب همبستگی بیش از ۹۵ درصد نشان داده شده است.



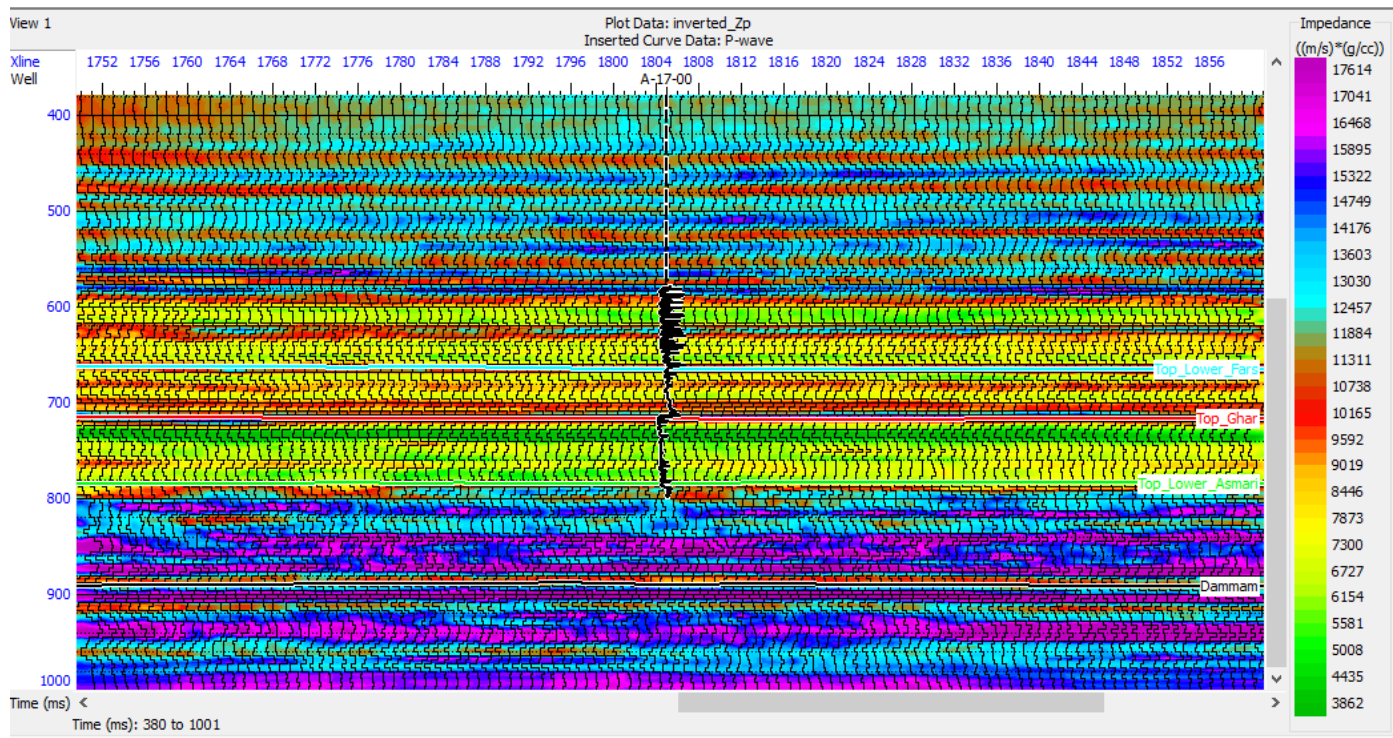
شکل ۱۱ رابطه خطی بین مقاومت برشی-مقاومت تراکمی و چگالی-مقاومت تراکمی. سمت چپ: رابطه بین مقاومت برشی و مقاومت تراکمی که از برازش خطی در ترسیم متقاطع $\ln(Z_p)$ و $\ln(Z_s)$ به دست می‌آید. سمت راست: نشان دهنده برازش خطی در ترسیم متقاطع $\ln(Z_p)$ و $\ln(D_n)$ می‌باشد که رابطه خطی دوم را نتیجه می‌دهد.



شکل ۱۲ نتیجه وارون سازی در محل چاه شماره ۱۷ و ۲، نگارهای آبی مربوط به نگارهای اولیه چاه بوده و نگارهای قرمز از وارون سازی منتج شده اند

اعمال وارون سازی پیش از برانبارش همزمان بر کل داده های لرزه ای در منطقه مورد مطالعه

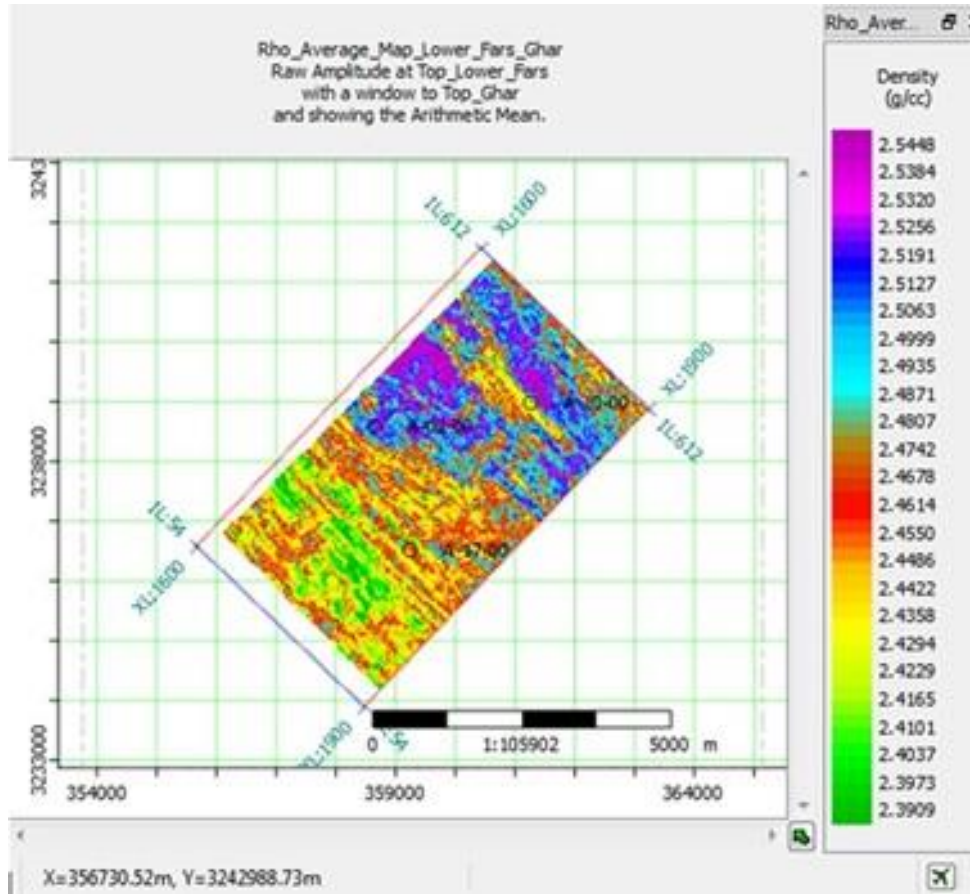
پس از انجام وارون سازی در محل چاه و انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترها، می توان وارون سازی را بر کل حجم داده ها اعمال نمود. خروجی این وارون سازی، مقاطع مقاومت تراکمی، مقاومت برشی و چگالی، نسبت سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی است که به طور همزمان به دست می آیند. برای نمونه یک مقطع امپدانس صوتی (شکل ۱۳) و یک مقطع چگالی (شکل ۱۴) از میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱۳ مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی در محدوده چاه A-17 (مقیاس رنگی میزان تغییرات این نسبت را نشان

Accepted

می دهد).



شکل ۱۴ نقشه میانگین تغییرات چگالی برای مرز بالای مخزن آسماری تا بالای افق غار (بخش کربناته بالایی آسماری)

تعیین نوع سیال

۱- روش جانشینی سیال

تغییر نوع سیال و مقدار اشباع آن در مخزن و تولید نگارهای مصنوعی مرتبط با این تغییرات تحت عنوان مدل‌سازی جانشینی سیال معرفی می‌شود. از آنجا که تعداد نقاط حاوی داده در محل چاه اندک می‌باشد و در اغلب موارد تنها یک چاه در دسترس قرار دارد که در افق خاصی به نوعی هیدروکربور برخورد کرده است. در چنین شرایطی بهترین راه حل انجام مدل‌سازی سنگ مخزن و سیالات موجود در آن و سپس پیش‌بینی نگارهای مصنوعی به کمک این مدل‌سازی می‌باشد. با داشتن نگارهای موج تراکمی، موج برشی و چگالی و استفاده از معادلات زوپریتس یا یکی از ساده‌سازیهای آن می‌توان رفتار AVO مخزن را در حالات مختلف حضور سیالات منفذی تخمین زد و با داده‌های لرزه‌ای از طریق ساخت لرزه نگاشت مصنوعی مقایسه کرد.

برای انجام مدل‌سازی سنگ مخزن از معادلات گسمن (۱۹۵۱) استفاده می‌شود [۲۷]. گسمن به منظور پیش‌بینی تغییرات خصوصیات لرزه‌ای مخزن یعنی چگالی، سرعت امواج تراکمی و برشی در اثر جابه‌جایی سیال بر اساس ویژگی بافتی سنگ مخزن معادله ۱ را ارائه داد.

$$K = K_{dry} + \frac{(1 - \frac{k_{dry}}{K_m})^2}{\frac{Q}{K_f} + \frac{1-Q}{K_m} + \frac{K_{dry}}{K_m^2}} \quad (1)$$

که در آن K مدول بالک سنگ مخزن اشباع شده از سیالی با مدول بالک K_f ، K_{dry} مدول بالک اسکلت سنگ در حالت خشک، K_m برآیند مدول بالک کانیهای سازنده سنگ مخزن و Q تخلخل سنگ مخزن بصورت اعشاری می‌باشد. پس از آنکه ثابتهای معادله گسمن از داده‌های چاه، سنگ‌شناسی و سایر داده‌های مخزنی بدست آمد در معادله (۱) وارد و با تغییر اشباع سیال و خواص مربوط به هیدروکربور، نگارهای مصنوعی مورد نیاز تولید می‌گردند.

معمولاً در هنگام ساختن مدل مخزن در مناطقی که داده‌های چاه کامل نمی‌باشد نیاز به تولید نگارهای مصنوعی مورد نیاز با استفاده از داده‌های موجود می‌باشد. این روش یکی از روش‌ها بدست آوردن رابطه ریاضی بین نگار مورد نظر و سایر نگارهای موجود است که به کمک این رابطه می‌توان قسمتهای نبود داده چاه را پیش‌بینی کرد. این شیوه شاید برای پیش‌بینی مناطق حاوی آب و نفت تا حدودی مناسب باشد اما در مناطق گازدار بدلیل ایجاد تغییرات بزرگ در خواص سیال خالی از اشکال نیست. بنابراین پیشنهاد می‌شود به کمک روش FRM^{24} نسبت به تخمین صحیح آنچه مورد نظر است پرداخته شود.

بدین ترتیب به کمک معادلات گسمن (۱۹۵۱) تخمین مقادیر سرعتهای تراکمی و برشی سنگهای متخلخل با مقدار متفاوت گاز امکان‌پذیر می‌باشد. وجود درصد کمی گاز در یک سنگ متخلخل مثل ماسه سنگ سرعت موج تراکمی را کاهش داده، در

حالیکه سرعت موج برشی در اشباع بالاتر کمی افزایش می‌یابد (در $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ مقدار μ ثابت بوده ولی ρ با ورود گاز

کاهش می‌یابد). بنابراین نسبت $\frac{V_p}{V_s}$ هنگامی که درصد اشباع گاز ناچیز باشد بصورت عمده کاهش می‌یابد. ماسه‌های گازدار بصورت نظری دارای نسبت پواسون زیر ۰.۲ می‌باشند. ماسه‌های آبدار و شیلها دارای نسبت پواسون بیشتری (۰.۲۵ تا ۰.۴) هستند.

²⁴ Fluid Replacement Model

در این بخش از پژوهش نیاز به پیش بینی رفتار لرزه‌ای مخزن در شرایط مختلف اشباع شدگی، تغییرات کانی شناسی و سایر خواص مخزنی همچون دما و فشار است. لذا سناریوهای مختلفی جهت پیش بینی رفتار مخزن کربناته میدان مورد نظر با اشباع شدگی‌های مختلفی مدلسازی شده است.

اطلاعات مختصری که از مطالعات پیشین میدان مورد نظر در دسترس قرار گرفته حاکی از آن است که محل چاه‌های مورد استفاده در زون نفتی قرار دارد ولی حضور گاز نیز در این میدان محتمل است. بنابراین برای سه حالت گازی، نفتی و آبدار، مدلسازی جان‌شینی سیال انجام شد و سپس به کمک این مدل‌سازی، نگارهای مصنوعی که در واقعیت اندازه‌گیری نشده‌اند ساخته شده است. به منظور انجام این کار در ابتدا یک فیلتر میانه (۱۰۰) روی نگارهای چاه اولیه مورد نیاز اعمال گردید تا خارهای^{۲۵} موجود در نگارها باعث اشکال در مدل مصنوعی نشده و همچنین زمان محاسبه کمتر باشد. در مدل‌سازی سنگ مخزنی از معادله گسمن (معادله ۱) و نرم‌افزار همپسون-راسل استفاده گردید و رفتار مخزن با پارامترهای موجود جهت صحت سنجی الگوریتم‌های مورد استفاده بازسازی شد. جداول ۲ و ۳ به ترتیب خواص در نظر گرفته شده برای سنگ و سیال مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

جدول ۲ پارامترهای کشسان سنگ مخزن با توجه به درصد کانی‌های موجود در آن که در مدلسازی مخزن مورد استفاده قرار گرفت.

اجزای اصلی سنگ مخزن با توجه به اطلاعات مغزه‌ها و نگارها	درصد	چگالی g/cc	مدول بالک (K) Gpa	ضریب برشی (μ) Gpa
کلسیت	۱۵	۲/۷۱	۷۶/۸	۳۲
شیل	۵	۲/۵۵	۲.۵	۹
دولومیت	۸۰	۲/۸۷	۹۴/۹	۴۵

چگالی محاسبه شده برای سنگ مخزن برابر ۲/۶۵ g/cc

مدول بالک محاسبه شده برای سنگ مخزن برابر ۳۶/۶ Gpa

ضریب برشی محاسبه شده برای سنگ مخزن برابر ۴۵ Gpa

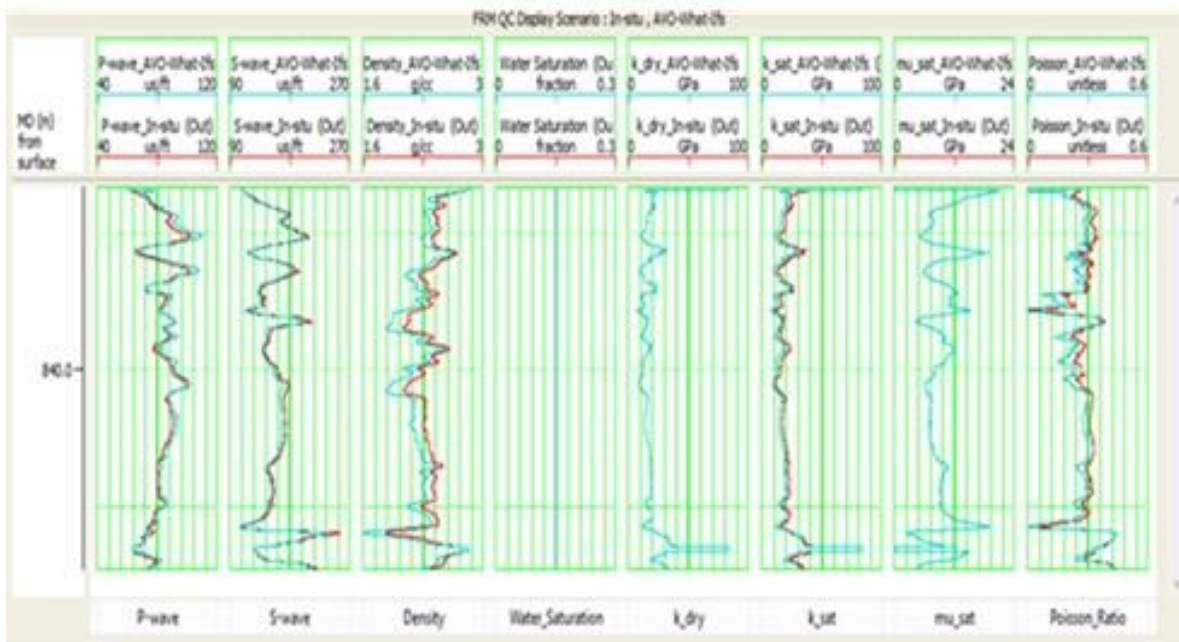
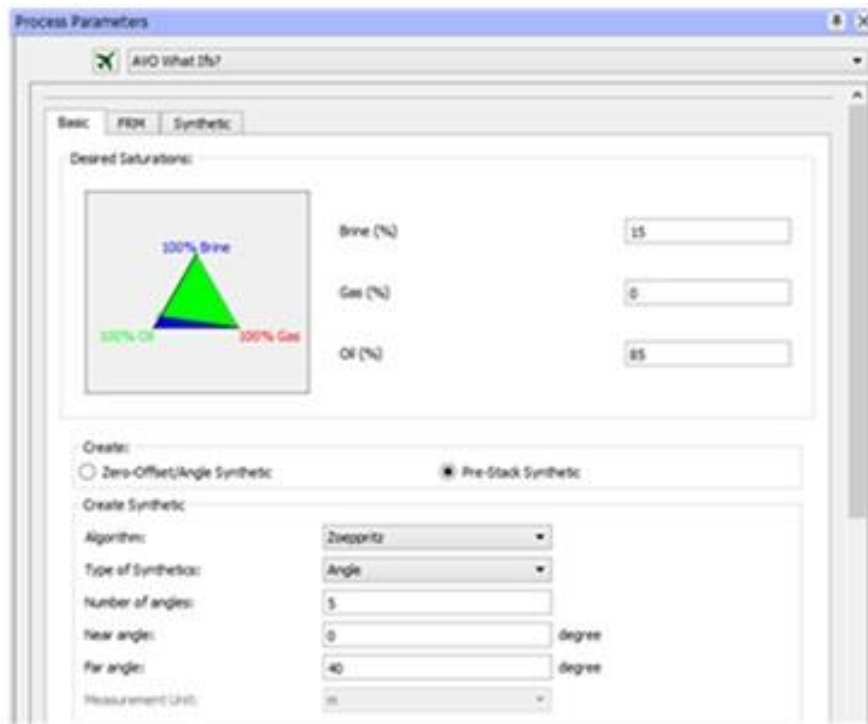
جدول ۳ پارامترهای کشسانی مربوط به سیالات مختلف که در مدلسازی مخزن مورد استفاده قرار گرفت.

²⁵ Spikes

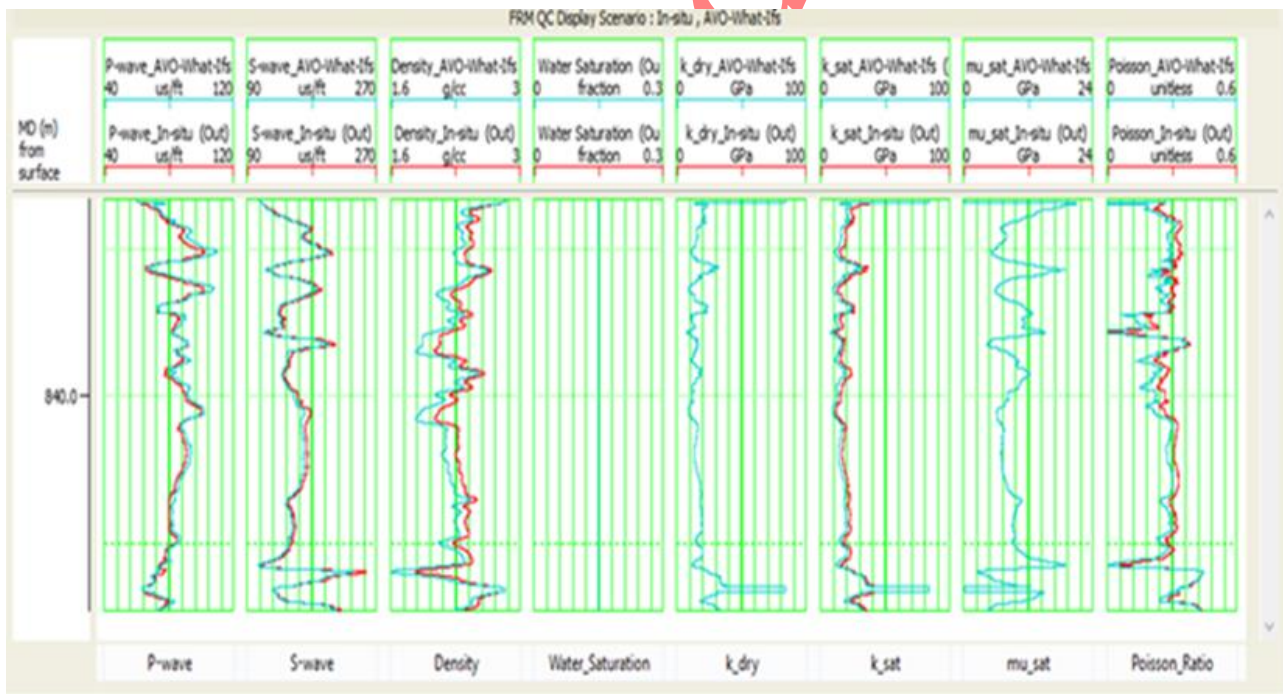
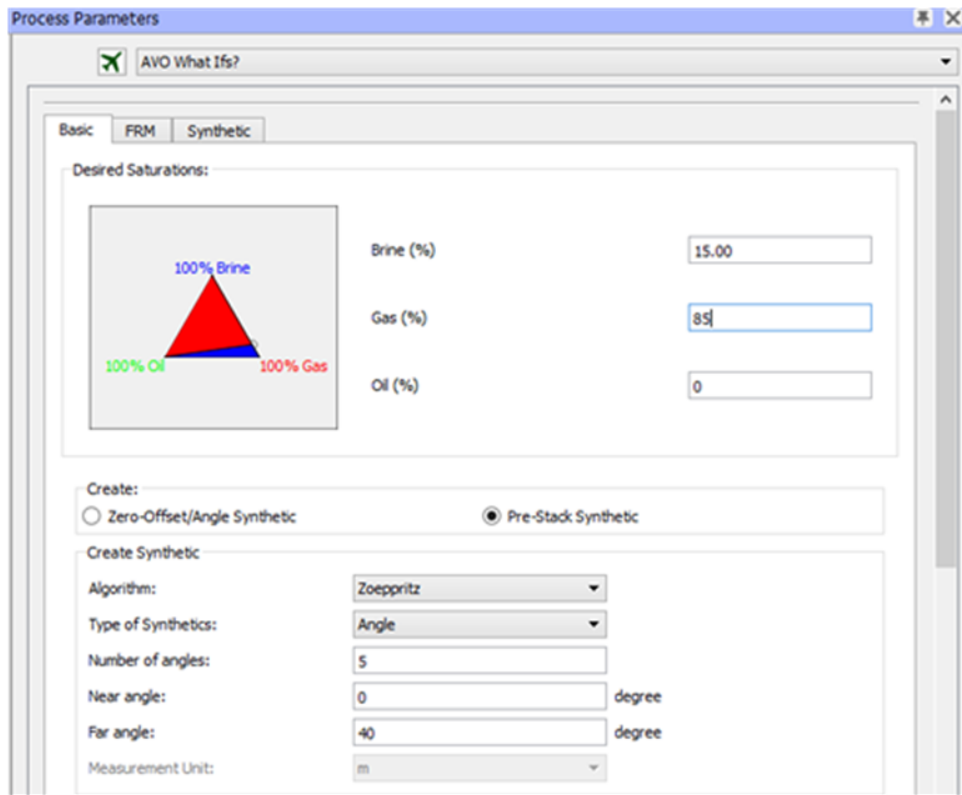
سیال منفذی	چگالی g/cc	ضریب بالک Gpa
آب	۱/۰۹	۲/۳۸
نفت	۰/۷۵	۱
گاز	۰/۱۳	۰/۰۴۱

بدین ترتیب ثابتهای مربوط به معادله گسمن از جمله تخلخل متوسط، اشباع آب، مدول بالک ماتریکس و اسکلت سنگ و ضریب برشی و چگالی مربوطه، همچنین اطلاعات مربوط به سیالات مختلف که از داده‌های چاه، مطالعه مغزه‌ها و سایر داده‌های مخزنی تهیه شده‌اند در این معادله وارد و با تغییر اشباع آب و خواص مربوط به هیدروکربور، نگارهای مصنوعی برای حالت‌های مختلف ساخته شد. همچنین با استفاده از روابط فیزیک سنگی و بهره‌گیری از داده‌های فوق، با استفاده از نمودار اشباع شدگی آب حاضر در مخزن به تخمین نگاره‌های سرعت امواج فشاری و برشی، چگالی و ... در محدوده مخزنی پرداخته شده است. در این مرحله از مطالعه، تطابق نگاره‌های تخمین زده شده و نگاره‌های موجود نشان دهنده شناخت رفتار صحیح فعلی مخزن از نقطه نظر ترکیب سنگ شناسی و سیالات موجود در آن است.

نکته قابل توجه در این مدلسازی این است که با توجه به این حقیقت که خواص سنگ شناسی مخزن بصورت میانگین در نظر گرفته شده‌اند، نگاره‌های بدست آمده الزاماً دارای تطابق صد در صد با نگاره‌های اولیه نمی‌باشند. شکل ۱۵ مراحل مختلف انجام جاننشینی سیال را برای حالتی که سنگ مخزن با اشباع کامل نفت (۸۵ درصد نفت) در نظر گرفته شده را به همراه نگاره‌های تخمین زده با شرایط مورد اشاره اشباع شدگی مخزن برای این حالت نشان می‌دهد. پس از این مرحله، دو سناریوی دیگر با هدف شناخت بهتر رفتار لرزه‌ای مخزن در شرایط جاننشینی فازهای مختلف سیالات دیگر مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱۶ سناریوی مربوط به سنگ مخزن با اشباع کامل گاز (۸۵ درصد گاز) با در نظر گرفتن آب همراه سنگ مخزن را نشان می‌دهد. آنچه از این اشکال مشهود است وقتی سیال از نفت به گاز جایگزین می‌شود نگاره‌های تخمینی متفاوت با نگاره‌های اولیه است که از تفاسیر پتروفیزیکی به دست می‌آید و با فرض وجود نفت نگارها مشابه نگاره‌های اولیه می‌شوند ولی تغییر سیال به گاز در چاه A-17 باعث تغییر در مقادیر نگارها می‌شود. خصوصاً این مقادیر اختلاف در دانسیته و ضریب K بسیار مشهود است. نکته قابل توجه این مرحله از پژوهش، شباهت زیاد سناریوی اشباع کامل گاز با سناریوی شرایط واقعی مخزن است. از اینرو انتظار می‌رود رفتارهای مشاهده شده در سناریوی اشباع کامل شباهت زیادی را با رفتار داده‌های لرزه‌ای واقعی نشان دهد. این شواهد به احتمال زیاد حاکی از گازی بودن سیال هیدروکربنی است. نتایج آزمون ساقه مته در یکی از چاه‌های مطالعاتی در این زون به ضخامت ۲۶ متر چگالی سیال مخزنی ۰/۰۰۰۸۵۳۳ می‌باشد که نشان دهنده سیال گازی در زون هدف می‌باشد.



شکل ۱۵ بالا: مقایسه نگاره‌های بدست آمده از آنالیزهای فیزیک سنگی برای تخمین سرعت موج فشاری، کششی و چگالی در شرایطی که مخزن دارای ۸۵ درصد نفت است. پایین: نمودارهای آبی رنگ مربوط به مقادیر واقعی و نمودارهای قرمز رنگ مربوط به مقادیر تخمین زده شده می‌باشند



شکل ۱۶ بالا: مقایسه نگاره‌های بدست آمده از آنالیزهای فیزیک سنگی برای تخمین سرعت موج فشاری، کششی و چگالی در شرایطی که مخزن دارای ۸۵ درصد گاز است. پایین: نمودارهای آبی رنگ مربوط به مقادیر واقعی و نمودارهای قرمز رنگ مربوط

به مقادیر تخمین زده شده می‌باشند

۲- وارون سازی مقاومت کشسان^{۲۶}

مفهوم مقاومت کشسان (EI) در تفسیر و تحلیل سنگ‌شناسی بسیار مورد استفاده است [۲۸،۲۹]. کونولی (۱۹۹۹) از معادله (۲) جهت تعیین مقاومت کشسان استفاده کرد [۳۰].

$$EI(\theta) = Vp^{(1+\tan\theta^2)} V_s^{(-8K \sin\theta^2)} \rho^{(1-4K \sin\theta^2)} \quad (2)$$

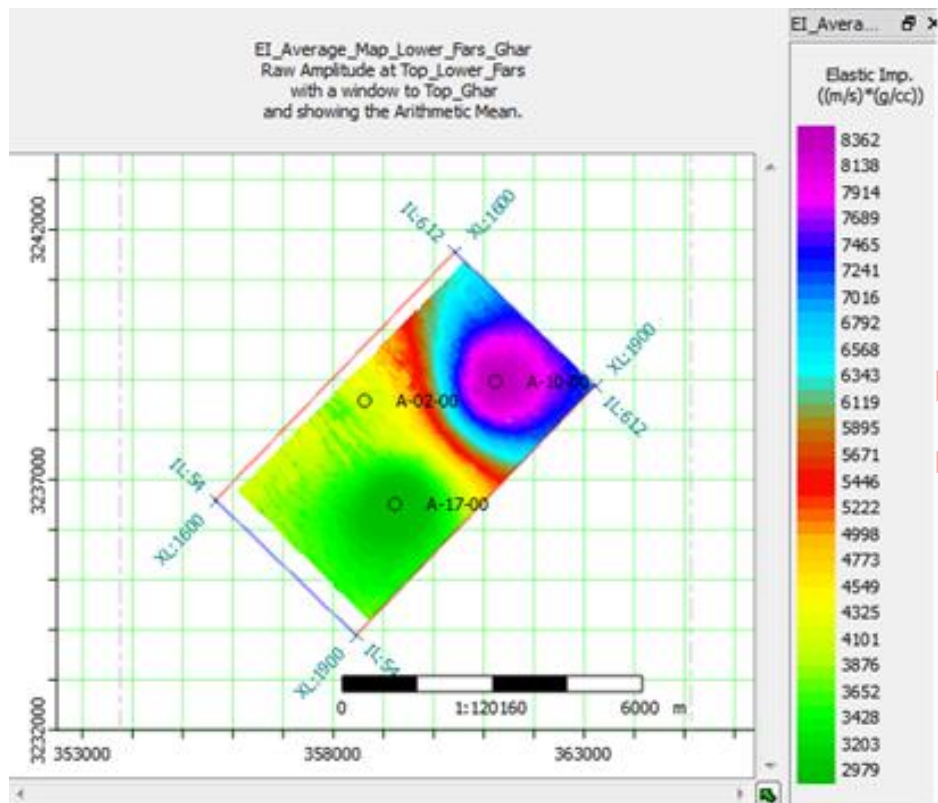
که K مقدار میانگین V_s/Vp دو لایه بالایی و پایینی و θ زاویه برخورد می‌باشد. وایت کمب (۲۰۰۲) نشان داد که نرمالیزه کردن EI واحدی مشابه با مقاومت لرزه‌ای خواهد داشت و از اینرو مقاومت کشسان در زاویه برخورد صفر همان مقاومت می‌باشد (AI=EI(0)) و ضریب بازتاب $R(\theta)$ در معادله (۳) بطور مشابهی همچون ضریب بازتاب نرمال قابل محاسبه است [۲۷].

$$R(\theta) = \frac{EI_2 - EI_1}{EI_2 + EI_1} \quad (3)$$

مطالعات نشان می‌دهد که لایه‌های حاوی گاز مقدار EI نسبتاً پایینی دارند که بزرگی آن با زاویه فرود تغییر می‌کند [۲۸].

همانگونه که قبلاً اشاره شد با روش وارون سازی همزمان مقاطع چگالی، سرعت موج تراکمی و برشی، برای زوایای دور و نزدیک قابل استخراج است لذا با وارون سازی مقاومت کشسان نسبت به تهیه نقشه تغییرات الاستیک امیدانس نیز برای محدوده مورد مطالعه اقدام شد که در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. همانگونه که از این مقطع مشخص است این مقدار به سمت غرب یعنی محدوده چاه A-۱۷ کم شده است که افت این مقدار را می‌توان به حضور گاز نسبت داد و افزایش آن به سمت شمال شرق که شواهد آن در چاه A-۱۰ مشهود است می‌تواند ناشی از تغییر سیال به نفت باشد.

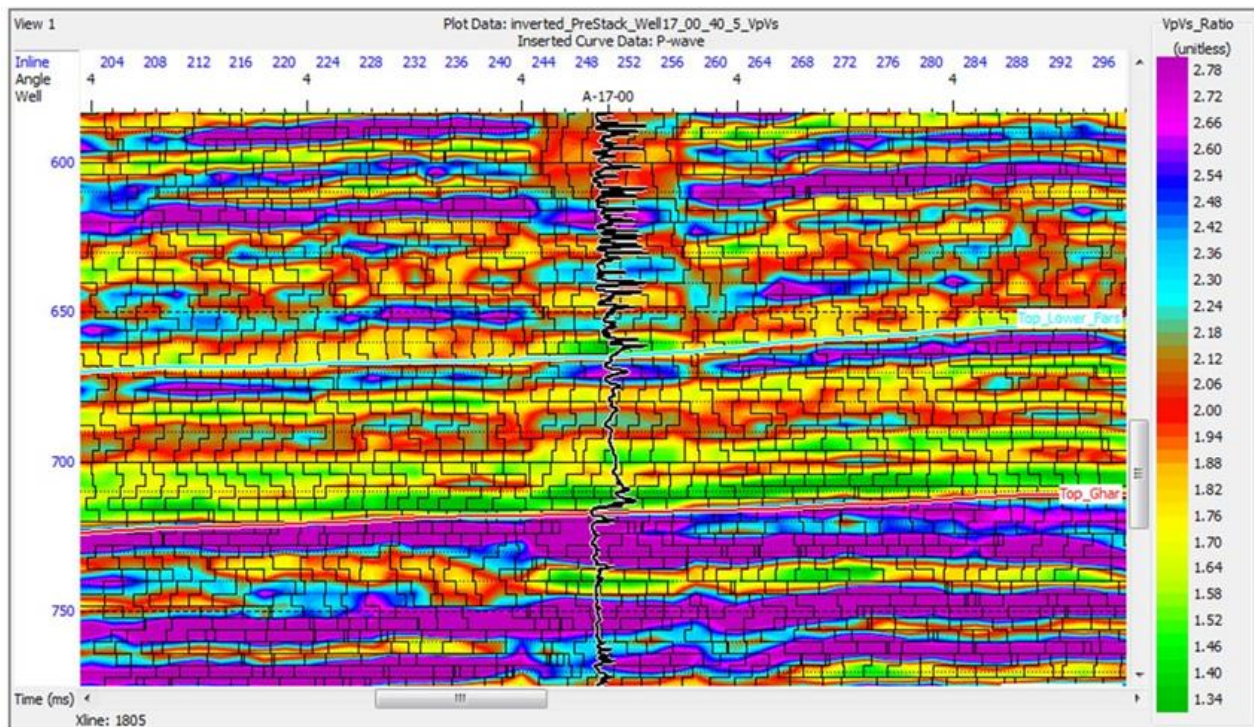
²⁶ elastic impedance



شکل ۱۷ نقشه تغییرات الاستیک امیدانس برای مرز بالای مخزن آسماری تا بالای افق غار. بسمت غرب میدان مقدار امیدانس کاهش می یابد (حضور سیال گازی).

۳- نسبت سرعت موج V_p/V_s

نسبت سرعت موج p و s می تواند خصوصیات الاستیک و یا پوروالاستیک سنگ را نشان دهد. همچنین مطالعات خصوصیات الاستیک سنگ با استفاده از نسبت سرعتهای موج فشاری و تراکمی می تواند نوع سیال اشباع کننده را در سازندهای کربناته تشخیص دهد [۲۹]. بطوریکه کاهش مقدار نسبت V_p/V_s در سازندهای کربناته نشانه حضور سیال گاز می باشد. در این بخش نسبت V_p/V_s بدست آمده است که یک مقطع از آن در محل چاه شماره ۱۷ نشان داده شده است (شکل ۱۸). این مقطع از نسبت سرعتها در زون هدف نشان می دهد که سیال غالب در این زون گاز می باشد.



شکل ۱۸ یک مقطع از نسبت v_p/v_s که در قسمتهای پایینی زون هدف مقدار آن کم می‌شود (حضور سیال گازی).

۴- ترسیم مقاطع نشانگرهای AVO

تغییرات دامنه موج تراکمی با دورافت می‌تواند نشانگر خوبی جهت رویدادهای لرزه‌ای باشد [۵]. البته این آنومالی‌های دامنه می‌توانند به علت توده‌های نفوذی آذرین یا بر اثر وجود رخساره‌های کربناته در سنگ‌ها و یا رسوبات آواری نیز باشد. بنابراین روش AVO می‌تواند به عنوان یک روش قابل اعتماد برای تشخیص ویژگی‌های مدل واقعی زمین شامل توده سنگ و سیال و همچنین ارزیابی عکس‌العمل‌های توام این دو در شرایط طبیعی زمین از روی داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل‌های AVO آنومالی‌های سرعت بین امواج تراکمی و برشی و یا تغییر نسبت پواسون که بر اثر تغییرات ایجاد شده در سیال منفذی یا سنگ شناسی صورت می‌پذیرد را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. این آنومالی‌ها دلالت بر پرشدگی منافذ از سیمان یا سیال می‌باشد. در حالی که روش‌های تحلیلی دیگر از تبدیل و یا وارون سازی داده‌های لرزه‌ای و با استفاده از پارامترهای الاستیکی از جمله اختلاف در مقاومت لرزه‌ای و چگالی به خصوصیات سنگ مخزن پی می‌برند.

در معادلات زوپریتس تعداد زیادی مجهولات وجود دارد و همچنین طبیعت پیچیده زمین، معادلات با شکل ساده و دقت مناسب توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفتند. از جمله تقریبهای متعددی که رابطه ضریب بازتاب نسبت به زاویه فرود را نشان می‌دهد، معادله تغییر یافته شوی^{۲۷} (۱۹۸۵) به صورت زیر است [۱].

$$R(\theta) = R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} (\tan^2 \theta + \sin^2 \theta) \quad (۴)$$

که در آن، R_0 ضریب بازتاب نرمال موج تراکمی و سایر ضرایب به صورت زیر تعریف شده اند.

$$A_0 = B_0 - 2(1 + B_0) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma} \quad \text{و} \quad B_0 = \frac{\Delta V_P / V_P}{\Delta V_P / V_P + \Delta \rho / \rho} \quad (۵)$$

$$\sigma = (\sigma_2 + \sigma_1) / 2 \quad \text{و} \quad \Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (۶)$$

در این صورت می‌توان گفت که قسمت اول معادله شوی نمایانگر ضریب بازتاب نرمال، قسمت دوم آن مشخصه تغییرات $R(\theta)$ در زوایای تابش متوسط و قسمت سوم معادله مربوط به زوایای تابش بحرانی می‌باشد. ضرایب معادله شوی اساس مراحل مختلف برانبارش وزنی^{۲۸} است. برانبارش وزنی به معنی تبدیل اطلاعات پیش از برانبارش به ردلرزه نشانگرهای AVO برحسب زمان می‌باشد. این کار با محاسبه زاویه تابش برای هر نمونه زمانی و سپس حل یک معادله دو یا سه قسمتی همچون معادله (۷) می‌باشد [۳۶].

$$R(\theta) = A + B \sin^2 \theta + C \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (۷)$$

از آنجا که در این معادله عبارت سوم تنها در زوایای بزرگ اهمیت دارد و در مطالعات لرزه‌ای زوایای بیشتر از ۳۰ درجه اغلب در نظر گرفته نمی‌شود، در اینصورت در بسیاری از موارد تقریب دو قسمتی این معادله در نظر گرفته می‌شود در حالیکه A ، B و C از مبدأ یا همان ضریب بازتاب نرمال و شیب AVO می‌باشد [۳].

این فرض که دامنه‌های بازتاب برانبارش مشابه بازتاب تابش نرمال است توسط خیلی از مفسران مورد انتقاد قرار گرفته است. از اینرو پتانسیل تحلیل AVO بطور عموم مورد توجه واقع شد. اگر تغییرات دامنه در برابر دور افت در یک گروه CMP نسبت به $\sin^2 \theta$ رسم شود، می‌توان خطی را به تغییرات دامنه برازش کرد که شیب این خط نشانگر شیو AVO و مقدار دامنه در

²⁷ Shuey

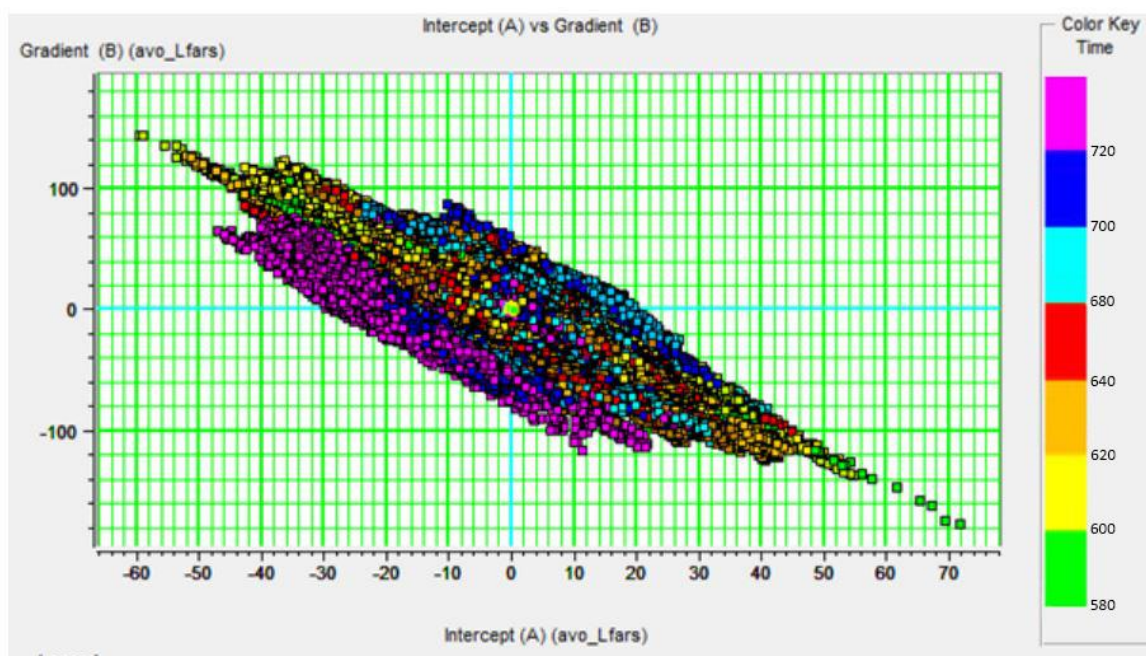
²⁸ geostack

زاویه تابش یا دورافت صفر نشانگر عرض از مبدأ می‌باشد. به طور کلی در زمینه مدل سازی لرزه ای، اینترسپت به زاویه ای اشاره دارد که در آن موج لرزه ای به سطح مشترک برخورد می‌کند و از سطح بازتاب می‌شود. و گرادیان هم می‌تواند به سرعت فضایی تغییر دامنه های لرزه ای اشاره داشته باشد.

معمولی ترین مقاطع نشانگرهای AVO عبارتند از:

- مقطع عرض از مبدأ، طبق آنچه گفته شد این مقطع تقریبی از ضریب بازتاب نرمال که یک مقطع برانبارش معمولی نمایش می‌دهد.
 - مقطع شیب، این مقطع مقدار شیب AVO را برای هر CMP در مقطع نشان می‌دهد. تغییرات شیب بطور چشمگیری مربوط به تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده است. این نشانگر به تنهایی نمی‌تواند نشان دهد که دامنه با دورافت کاهش یا افزایش می‌یابد از اینرو می‌بایست با نشانگر عرض از مبدأ بصورت ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد [۳۴].
- ترسیم مقاطع نشانگرها در AVO می‌تواند به عنوان ابزار تشخیص سیالات هیدروکربوری بکار رود [۸،۳۵]. ترسیم مقاطع لرزه‌ای به دلیل پیچیدگی زیرسطحی و غیریکتا بودن پاسخهای کشسان لرزه‌ای همچنین نیاز به نمایش چندین نشانگر بطور همزمان می‌باشد.

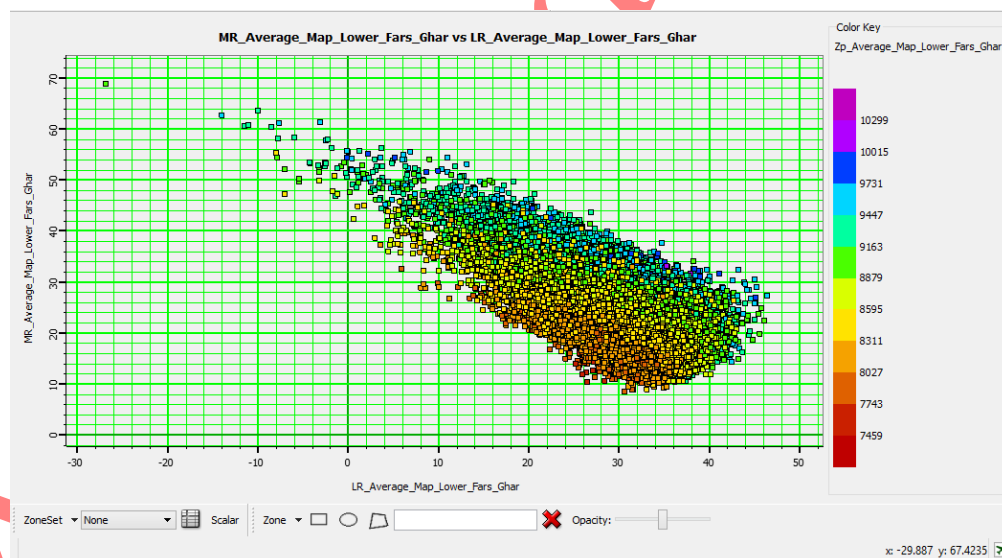
ترسیم مقاطع نشانگرهای AVO به شناسایی آنومالیها، شیب زمینه و یا پراکندگی آن کمک می‌کند. حضور هیدروکربن که وابسته به آنومالیهای AVO باشد ممکن است کاهش یا افزایش دامنه نسبت به دورافت را شامل شود. در شکل ۱۹ ترسیم مقاطع شیب بر حسب عرض از مبدأ نمایش داده شده است. در این شکل نیز مقیاس رنگی نمایشگر زمان می‌باشد.



شکل ۱۹ نمودار متقاطع نشانگرهای AVO در زون مخزنی هدف (حدود ۶۸۰ تا ۷۲۰ میلی ثانیه) همگونی مشخصی دارد (رنگ بنفش و آبی).

بر اساس نتایج بدست آمده در زون کربناته، به طور کلی همگونی مشخصی در قسمت مورد مطالعه از مخزن کربناته مشاهده می‌شود که این مسئله می‌تواند بیانگر حضور سیال یکسانی در این ناحیه باشد. با توجه به مشاهدات منطقه ای و نیز نتایج مدل‌سازی جانیشینی سیال، مخزن کربناته در این بخش از میدان می‌تواند دارای سیال گاز باشد.

همچنین در این مطالعه از کراس پلات لاند-رو-مو-رو هم استفاده شده است. در مورد سنگ‌های کربناته، لی و همکاران [11] به این صورت برآورد کردند که معمولاً مقدار $\lambda\rho$ حساس به تغییر نوع سیال است در حالیکه $\mu\rho$ بیشتر حساس به سنگ شناسی است، به این صورت که در این مخازن $\lambda\rho$ به علت حضور هیدروکربور افزایش می‌یابد ولی $\mu\rho$ به علت مدول بالای سنگ‌های کربناته مقدار کمتری افزایش می‌یابد. بنابراین تهیه مقاطع این دو نشانگر و ترسیم متقاطع آنها می‌تواند اطلاعات مناسبی جهت تفکیک رخیاره‌های مختلف یک مخزن، توزیع سیال و همچنین سنگ شناسی ناحیه مخزنی به منظور تفسیر ناحیه مخزنی و ارزیابی مخازن در اختیار قرار دهد. با توجه به این موضوع، ترسیم متقاطع مربوطه در زون کربناته ترسیم شده است که الگوی خاصی را برای تفکیک سنگ و سیال نشان نمی‌دهد (شکل ۲۰). یکی از دلایل این مسئله می‌تواند توزیع یکسان اشباع سیال در محدوده مورد مطالعه باشد.

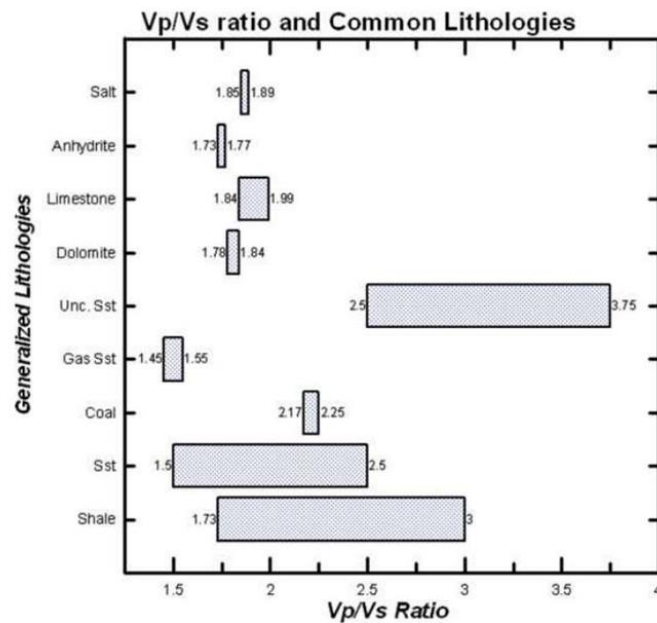


شکل ۲۰ نمودار متقاطع $\lambda\rho$ - $\mu\rho$ توزیع یکسان اشباع یک نوع سیال در زون هدف را نشان می‌دهد.

تعیین لیتولوژی

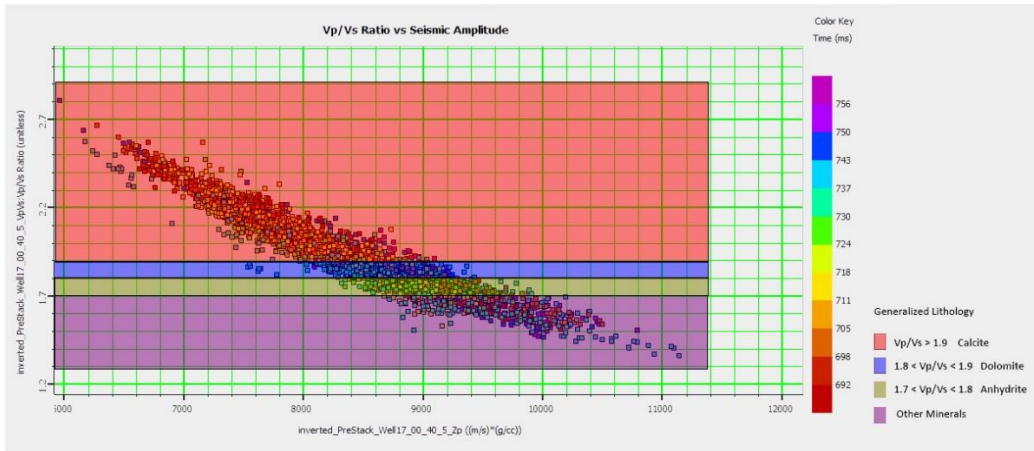
تعیین لیتولوژی در شرایط زیرسطح به منظور استخراج هیدروکربن از درون زمین بسیار حائز اهمیت است. تعیین لیتولوژی در محل چاه توسط نگارها و همچنین داده‌های مغزه انجام می‌شود. اما این داده‌ها محدود به محل چاه می‌باشند. سرشت نمایی مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای موجب تعیین لیتولوژی در مقیاس میدان نیز خواهد شد. لذا در این مطالعه تلاش شد

لیتولوژی مخزن در یکی از ناهمگن ترین میادین کشور از لحاظ لیتولوژی که شامل آهک، دولومیت، شیل و ماسه سنگ می باشد تعیین شود. برای تعیین لیتولوژی در این مطالعه از نسبت سرعتهای Vp/Vs استفاده شد. محققان قبلی مانند پیکت ۱۹۶۳ نسبت سرعت موج در لیتولوژی های مختلف سنگ رسوبی را تعیین کرده اند [۳۶]. در شکل ۲۱ ارتباط این نسبت ها با مقادیر لیتولوژی نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که در این تقسیم بندی، نسبت Vp/Vs برابر ۱.۹ به بالا برای کلسیت، ۱.۸ برای دولومیت و ۱.۷ برای انیدریت و کمتر از ۱.۷ برای مابقی کانیها لحاظ شده است.

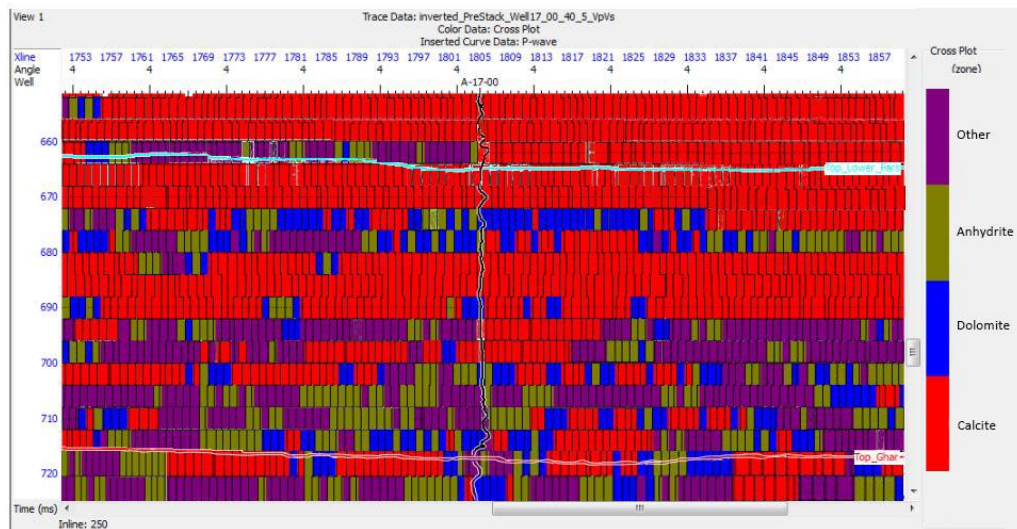


شکل ۲۱ تعیین لیتولوژی با استفاده از روش نسبت سرعتها

به همین منظور برای میدان مورد مطالعه نمودار متقاطع نسبت Vp/Vs در مقابل مقاومت صوتی حاصل از وارونسازی همزمان ترسیم گردید. سپس بر اساس ارتباط بین لیتولوژی و نسبت سرعتها (شکل ۲۱) زون بندی برای تفکیک لیتولوژی انجام شده است (شکل ۲۲). در این تقسیم بندی، نسبت Vp/Vs برابر ۱.۹ به بالا برای کلسیت، ۱.۸ برای دولومیت و ۱.۷ برای انیدریت و کمتر از ۱.۷ برای مابقی کانیها لحاظ شده است. پس از اعمال زون بندی در نسبت سرعتها، در زون هدف تنوع توزیع سنگ شناسی از آهک، دولومیت و انیدریت دیده می شود (شکل ۲۳). به منظور اعتبار سنجی نتایج این بخش با نتایج لیتولوژی حاصل از داده مغزه (شکل ۳) مقایسه شد که لیتولوژی انیدریت و دولومیت در بخش پایینی سازند آسماری بیشتر می باشد.



شکل ۲۲ زون بندی لیتولوژی (کلسیت، دولومیت، انیدریت) بر اساس نسبت سرعتها



شکل ۲۳ مقطع نسبت Vp/Vs برای شناسایی لیتولوژی کلسیت، دولومیت و انیدریت

نتیجه گیری

میدان مورد مطالعه یکی از میدادین ناهمگن کشور از نظر لیتولوژی و توزیع هیدروکربن می باشد. در این میدان مخزن آسماری از نظر لیتولوژی شامل ماسه سنگ، کربنات، آهک، دولومیت و انیدریت می باشد. همچنین بخش هایی از مخزن دارای گاز و زون های خاصی هم دارای سیال نفت می باشد. در طی سالهای اخیر از داده های رقومی لرزه ای با پردازش کامپیوتری و تفسیر

کیفی مقاطع لرزه ای برای شناسایی لیتولوژی و سیال استفاده شده است. لذا در این مطالعه برای درک بهتر از توزیع لیتولوژی و سیالات در مقیاس مخزن از داده های لرزه ای استفاده شده است. نتایج زیر از این مطالعه حاصل شد:

- وارون سازی پیش از برانبارش همزمان بر روی داده های سه بعدی لرزه ای با دقت ۷۲ درصد انجام شد. سه دسته از زوایای مورد استفاده در وارون سازی لرزه ای که سه موجک لرزه ای از آن استخراج شد تطابق قابل قبولی نسبت به یکدیگر نشان دادند و در نهایت یک موجک معرف برای کل حجم داده لرزه ای استفاده شد.
- چهار روش برای تعیین نوع سیال بکار رفته است: ۱- روش جانشینی سیال: با تطابق ۸۰ درصدی نشان داد که بخش آهک بالایی آسماری دارای سیال گاز می باشد. ۲- روش وارون سازی مقاومت کشسان: با ترسیم نقشه تغییرات مقاومت کشسان در زون هدف نشان داد که به سمت غرب میدان مقدار آن کاهش می یابد که نشان دهنده حضور سیال گاز در این بخش میدان می باشد. همچنین به سمت شمال شرق میدان مقدار مقاومت کشسان افزایش می یابد که حاکی از حضور سیال نفت در این بخش میدان می باشد. ۳- روش ترسیم متقاطع نشانگرهای AVO: با بررسی نمودار متقاطع نشانگرهای AVO در زون هدف با توجه به روند تغییرات ضریب شیب در برابر عرض از میدان بطور کلی یک همگونی در نوع سیال مشاهده می شود که نشانگر حضور یک نوع سیال (گاز) در آن زون می باشد. ۴- روش نسبت سرعت موج V_p/V_s : مقطع این نسبت در زون هدف کاهش یافته (بخصوص در بخش پایینی) که نشان دهنده حضور سیال گاز در این زون می باشد. همچنین می توان گفت از روشهای بالا، روش جانشینی سیال دقت بیشتری دارد.
- شناسایی توزیع لیتولوژی با استفاده از روش نسب V_p/V_s : مقادیر این نسبت نشان داد که در زون هدف لیتولوژی های آهک، دولومیت و انیدریت گسترش دارند. البته لیتولوژی آهک بیشترین گسترش را در زون میانی میدان دارد.

منابع

1. Smith, G. C., & Gidlow, P. M. (1987). Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas. *Geophysical prospecting*, 35(9), 993-1014.
2. Ismail, A., Ewida, H. F., Al-Ibiary, M. G., & Zollo, A. (2020). Application of AVO attributes for gas channels identification, West offshore Nile Delta, Egypt. *Petroleum Research*, 5(2), 112-123.
3. Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists.
4. Farfour, M., & Foster, D. (2022). A new AVO fluid indicator using the fluid line: Theory and application. *Journal of Applied Geophysics*, 204, 104732.
5. Ostrander, W. J. T. (1984). Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence. *Geophysics*, 49(10), 1637-1648.
6. Fatti, J. L., Smith, G. C., Vail, P. J., Strauss, P. J., & Levitt, P. R. (1994). Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique. *Geophysics*, 59(9), 1362-1376.
7. Allen, J. L., & Peddy, C. P. (1993). Amplitude variation with offset: Gulf Coast case studies. Society of exploration geophysicists.
8. Castanga, J.P., (1993). AVO analysis tutorial and review, in Backus, M.M., Ed., *Offset-dependent reflectivity-theory and practice of AVO analysis*. Soc. Of Expl. Geophys., pp. 3-36.
9. Goodway, B., Chen, T., & Downton, J. (1997). Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters; “ $\lambda\rho$ ”, “ $\mu\rho$ ”, & “ λ/μ fluid stack”, from P and S inversions. In SEG technical program expanded abstracts 1997 (pp. 183-186). Society of Exploration Geophysicists.

10. Avseth, P. A. (2000). Combining rock physics and sedimentology for seismic reservoir characterization of North Sea turbidite systems. Stanford University.
11. Li, Y., Downton, J., & Goodway, B. (2003). Recent applications of AVO to carbonate reservoirs in the Western Canadian Sedimentary Basin. *The Leading Edge*, 22(7), 670-674.
12. Carcione, J. M., & Gangi, A. F. (2000). Gas generation and overpressure: Effects on seismic attributes. *Geophysics*, 65(6), 1769-1779.
13. Gassman, M. M. (1951). Rome: Georgia's" City of Seven Hills". *The Georgia Review*, 5(3), 369-377.
14. Tatham, R. H. (1982). V p V s and lithology. *Geophysics*, 47(3), 336-344.
15. Castagna, J. P., & Backus, M. M. (Eds.). (1993). Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis. Society of Exploration Geophysicists.
16. Assefa, S., McCann, C., & Sothcott, J. (2003). Velocities of compressional and shear waves in limestones. *Geophysical prospecting*, 51(1), 1-13.
17. Castagna, J. P., & Smith, S. W. (1994). Comparison of AVO indicators: A modeling study. *Geophysics*, 59(12), 1849-1855.
18. Foster, D. J., & Keys, R. G. (1999). Interpreting AVO responses. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999 (pp. 748-751). Society of Exploration Geophysicists.
19. Castagna, J. P., & Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The leading edge*, 16(4), 337-344.
20. Fawad, M., Hansen, J. A., & Mondol, N. H. (2020). Seismic-fluid detection-a review. *Earth-Science Reviews*, 210, 103347.
21. Gharechelou, S., Sohrabi, S., Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H., Honarmand, J., & Montazeri, G. (2016). A seismic-driven 3D model of rock mechanical facies: An example from the Asmari reservoir, SW Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 146, 983-998
22. Gharechelou, S., Amini, A., Bohloli, B., Tavakoli, V., Ghahremani, A., & Maleki, A. (2022). An integrated geomechanical model for a heterogeneous carbonate reservoir in SW Iran, using geomechanical unit concept. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(7), 268
23. Abdolahi, A., Chehrazi, A., Kadkhodaie, A., & Seyedali, S. (2023). Identification and modeling of the hydrocarbon-bearing Ghar sand using seismic attributes, wireline logs and core information, a case study on Asmari Formation in Hendijan Field, southwest part of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 111-128.
24. Pettijohn, F.J., (1975). *Sedimentary rocks*, 2nd Edition, Wiley.
25. Chopra, S., & Castagna, J. P. (2014). *Avo*. Society of Exploration Geophysicists.
26. Russell, B. H. (1988). Introduction to seismic inversion methods (No. 2). SEG Books.
27. Gassman, M. M. (1951). Rome: Georgia's" City of Seven Hills". *The Georgia Review*, 5(3), 369-377.
28. Savic, M., VerWest, B., Masters, R., Sena, A., & Gingrich, D. (2000, August). Elastic impedance inversion in practice. In SEG International Exposition and Annual Meeting (pp. SEG-2000). SEG.
29. Mallick, S. (2001). AVO and elastic impedance. *The leading edge*, 20(10), 1094-1104.
30. Connolly P. (1999). Elastic impedance. *The Leading Edge*, 1999, vol. 18, pp. 438-452.
31. Whitcombe, DN, (2002). Elastic impedance normalization. *Geophysics*, 2002, vol. 67, pp. 60-62.
32. Shaoming, L., and McMechan, G. A. (2004). Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas: *Geophysics*, 69, 164-179.
33. Mansouri Siahgoli, H., Riahi, M. A., Heidari, B., & Mohebian, R. (2020). Identifying gas-bearing carbonate reservoir using extended elastic impedance. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, 9(3), 102-115.
34. Kassouri, A., & Djaffer, H. (2003, October). Lithology and gas detection by AVO crossplot polarization and intercept inversion. In 1st EAGE North African/Mediterranean Petroleum & Geosciences Conference & Exhibition (pp. cp-8). European Association of Geoscientists & Engineers.
35. Ross, C. P., & Kinman, D. L. (1996). Nonbright-spot AVO: Two examples.
36. Pickett, G. R. (1963). Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum technology*, 15(06), 659-667.

Determining the fluid type and lithology of one of the heterogeneous reservoirs in the northwest of the Persian Gulf using the AVO method and fluid replacement method

Seismic data, in addition to qualitative interpretation, are also considered to be valuable numerical data in hydrocarbon fields. It is very important to determine the distribution of the fluid type in the field scale and also to determine the lithology in the Asmari reservoir, which is considered a heterogeneous formation in this field. This study aims to analyze the variation of amplitude versus offset based on depth and rock physics studies to understand the behavior and properties of the reservoir due to oil, gas, or water saturation.

To predict the behavior of the reservoir in the upper carbonate part of Asmari, the target field has been modeled with different saturations. Finally, after investigating and understanding the seismic behavior of the reservoir the main indicators in the description of reservoir fluids, AVO attributes have been extracted.

For the determination of fluid type in the Asmari reservoir four methods: 1: fluid replacement method (FRM), 2: elastic impedance inversion, 3: AVO attributes, and 4: V_p/V_s ratio showed that gas fluid has accumulated homogeneously in the target zone. Also, based on the V_p/V_s ratio results, the distribution of three lithology types, limestone, dolomite, and anhydrite, was determined in the upper part of the Asmari Formation.

Keywords: Rock elastic; fluid replacement; AVO; Fluid type; Asmari reservoir; lithology

Accepted