

## پیشرفت جدید در کاربرد روش AVO در مخازن کربناته مطالعه موردی (حوضه رسوبی کانادای غربی)

مصطفی سبوحی\*

### چکیده:

کاربرد روش دامنه در برابر تغییر مکان (AVO) در تجزیه و تحلیل مخازن کربناته در حوضه رسوبی کانادای غربی در حال افزایش است. این مسئله با افزایش سریع دانش ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های کربناته و اکتشاف فعال و تعیین حدود مخازن کربناته همراه بوده است.

این مقاله نشان خواهد داد که نه تنها تخلخل بلکه حتی احتمالاً اثر سیال را ممکن است بتوان با روش‌های مبتنی بر AVO در انواع مشخصی از اطلاعات رخساره‌های لرزه‌ای، از مخازن کربناته محاسبه کرد. حتی با استفاده از تحلیل مشخصه‌ها و وارون‌سازی پارامتر الاستیک، اثرات سیال را می‌توان از جمع‌کننده‌های پایه AVO استخراج و مدل‌سازی کرد. پیشرفت‌های کنونی در این موضوعات با مطالعات جدید در زمینه ویژگی‌های سنگ‌های کربناته، و مشخصات AVO کربنات‌ها به دلیل تأثیر سیالات و ویژگی‌های الاستیک سنگ‌ها مورد بازنگری قرار گرفته است. این دانسته‌های پتروفیزیکی مبنای مدرج کردن AVO و تعبیر و تفسیر آنها را تشکیل می‌دهند که یک مبنای کلیدی است که باید آن را لحاظ کرد. کلمات کلیدی: روش AVO، مخازن کربناته، داده‌های لرزه‌ای، نسبت  $Vp/Vs$

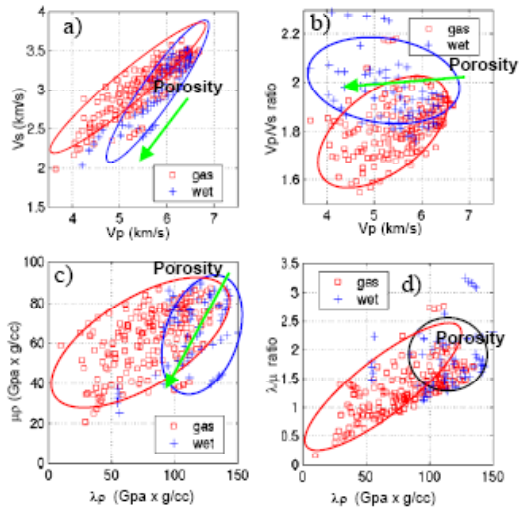
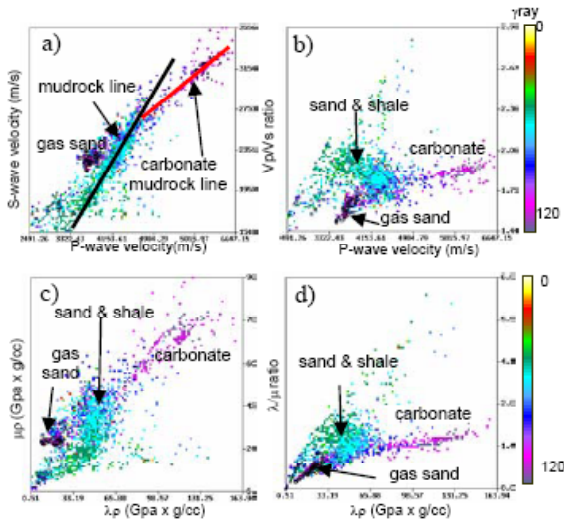
### مقدمه

در چندین سال اخیر استفاده از روش تحلیل تغییرات دامنه در مقابل دور افت<sup>1</sup> (AVO) برای مطالعه داده‌های لرزه‌ای بازتابی در اکتشاف منابع نفت و گاز اهمیت قابل توجهی یافته است. به تدریج و با توجه دانشمندان و بسط نظریه‌های مربوطه، همگام با پیشرفت فناوری و افزایش سرعت محاسبات رایانه‌ای، جنبه‌های عملی و کاربردی تحلیل AVO امکان‌پذیر شده است. (با توجه به این موضوع که اکثر مخازن هیدروکربوری جنوب ایران از نوع مخازن کربناته می‌باشد، می‌توان با الگو قرار دادن این مطالعه که از لحاظ لیتولوژی سنگ مخزن مشابه سنگ مخازن نفت و گاز در اکثر میادین جنوب ایران می‌باشد، به تکنیک‌های جدیدی در این زمینه دست یافت).

### بحث

در چند سال اخیر تلاش‌های بسیاری برای استفاده از روش AVO در مخازن نفت و گاز حوضه رسوبی کانادای غربی صورت گرفته است. در مطالعه‌ای که به وسیله Li and Downton (۲۰۰۰) انجام شد، امکان‌پذیری، پتانسیل و حساسیت ویژگی‌های سنگ‌های کربناته در پاسخ به مشخصات AVO تخلخل و سیال، برای انواع مخازن معمول مورد بررسی قرار گرفت. امکان کاربرد وارون‌سازی ویژگی‌های الاستیک AVO سنگ نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفت. آنها عقیده داشتند که نیازمندی به اطلاعات خواص سنگ‌های کربناته یکی از موانع کاربرد روش AVO در توصیف این مخازن است.

\* دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی / گرایش سنگ‌شناسی رسوبی و رسوب‌شناسی



بر این است که یا به طور منطقی تأثیر این سیالات بر خواص سنگ‌های کربناته باید کم باشد یا اصلاً تأثیری نداشته باشد، چرا که سنگ‌های کربناته دارای مدول دامنه بسیار بالایی هستند. راه دیگری که باید در نظر گرفت این است که سرعت بالا در

بخش زمینه سنگ‌های کربناته باعث

می‌شود که امواج لرزه‌ای بیشتر و سریع‌تر از درون زمینه سنگ عبور کنند و از سیالات درون حفره‌ای تأثیر اندکی بپذیرند. با این حال تجزیه و تحلیل داده‌های (Rafavich ۱۹۸۴) نشان می‌دهد که وجود گاز بر خواص سنگ‌های کربناته تأثیر می‌گذارد و این تأثیر چشمگیر است. (۲)

شواهد بیشتر در این زمینه را می‌توان در تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های فراوان اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی سنگ‌های کربناته WCSB یافت (شکل-۲). تجزیه و تحلیل این مجموعه داده‌ها شامل آهک و دولومیت شده که بیانگر بازه گسترده‌ای از کربنات‌های مخزنی و غیر مخزنی است و مؤید نتیجه‌گیری انجام‌شده توسط Li and Downton (۲۰۰۰) است. (۲)

شکل-۱ سنگ آهک را برحسب زمان و مدول دامنه نشان می‌دهد و به نظر می‌رسد رفتار سنگ آهک در طول اشباع گاز مشابه ماسه می‌باشد که سرعت امواج  $p$ ، نسبت  $Vs/Vp$ ، نسبت‌های  $\lambda\rho$  و  $\lambda\mu$  همگی کاهش می‌یابد. در شکل ۱ باید توجه کرد میزان حساسیت سیال تابعی از تخلخل است.

تأثیرپذیری ویژگی‌ها و خواص سنگ از سیالات شرح داده شده در بالا اشاره بر این دارد که واکنش AVO برای اشباع گاز و آب شور باید متفاوت باشد. یک برآورد علمی آزمایش شده، این تفاوت را در شکل-۳ نشان می‌دهد.

برای مخازن آهکی پوشیده‌شده توسط آهک متراکم، گرادیان برای هر دو مورد گاز و آب مشابه است و میدان نوسان گرادیان در نزدیکی صفر می‌تواند به عنوان نسبتی در تشخیص گاز از آب باشد. به هر حال ما می‌دانیم این ویژگی در تشخیص نوع سیال به عنوان تخلخل می‌تواند به تنهایی یک نتیجه و پاسخ مؤثر را برای ما داشته باشد. اثر گاز در مخازن دولومیتی پوشیده شده با آهک متراکم برای کلاس ۳، تفاوت مشخصی برای تخلخل وجود دارد که تخلخل از ۶ درصد به ۱۰ درصد تغییر می‌کند و برای کلاس ۳ به ۵ کلاس، از ۱۲ درصد به ۲۰ درصد این عدد تغییر می‌کند. تغییرات تخلخل به صورت کمی در (شکل-۳ d) تفسیر شده است.

این وضعیت به دلیل استفاده قابل توجه از داده‌های شماری از لاگ‌های سونیک دوقطبی و نمونه‌برداری از انواعی از لیتولوژی‌ها و مخازن کربناته بهبود یافته است. این لاگ‌های تازه به دست آمده و گرفته شده اطلاعات درجا از بخش‌های مخزن و غیرمخزن را در اختیار ما قرار می‌دهند که ممکن است از پیش‌بینی‌های تئوری و آزمایشگاهی خواص فیزیکی سنگ دقیقاً سازگار نباشد.

در شاخه لرزه‌ای، تجربه در زمینه پردازش و تفسیر AVO و تحلیل دامنه و تحلیل وارون‌سازی ویژگی‌های سنگ‌ها نیز در حال رشد می‌باشند.

مسائل و مشکلات عمده و شناخته شده‌ای که در کاربرد AVO در مخازن کربناته وجود دارند عبارتند از:

۱. ارتباط فیزیکی میان ویژگی‌های سنگ‌های مختلف
۲. حساسیت سیال در ویژگی‌ها و شاخص‌های شناسایی‌کننده سنگ‌های کربناته
۳. داده‌پردازی
۴. مدرج‌سازی و تعبیر و تفسیر آنها.

در این مطالعه سعی شده است تا بر تمام جنبه‌های این موضوع نظری افکنده شود اما توجه عمده به مدرج‌سازی و تعبیر و تفسیر معطوف شده است.

### ویژگی‌ها و خواص سنگ‌های کربناته

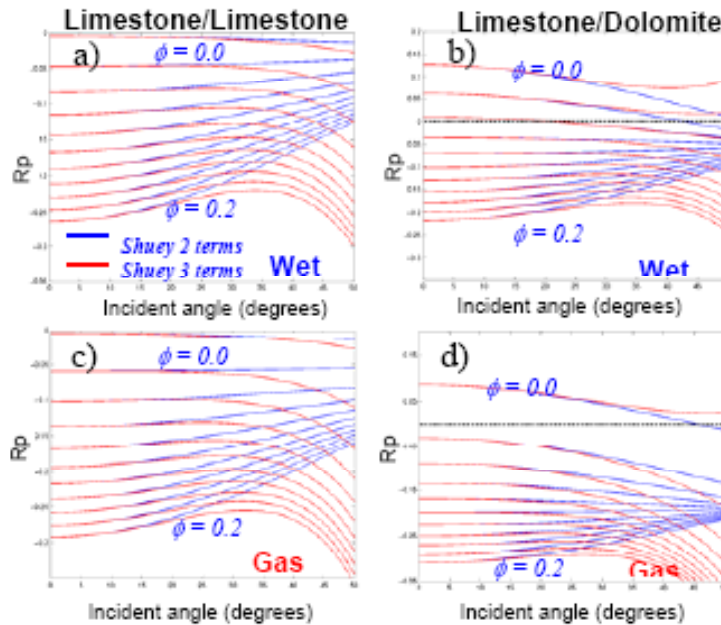
توصیف کلی برای نشان دادن ویژگی‌های سنگ‌های کربناته و ارتباط آنها با سنگ‌های آواری با توجه به دامنه سرعتی و با کمک لاگ چاه‌های دوقطبی WCSB، را Li and Downton در سال ۲۰۰۰ ارائه کرده‌اند. (۲)

برای تأکید بر این مقایسه شکل آن در دامنه مدول‌های الاستیک در شکل-۱ آمده است.

در شکل (۱-۱) خط گل‌سنگ در آواری‌ها  $Vs = 0.862Vp - 1172.4$  است. خط گل‌سنگ کربناته  $Vs = 0.4878Vp + 230.0$  می‌باشد که بستگی به لیتولوژی گروه کربنات‌ها دارد. برای این چاه نمونه، سنگ‌ها مرطوب بوده و اکثراً از سنگ آهک می‌باشند.

عوامل مؤثر بر تأثیر سیالات در سنگ‌های کربناته، به ویژه اگر که این سیال گاز باشد، بحث و اختلاف نظر زیادی وجود دارد، اما موضوعی که جالب و مورد توجه است نظر عمومی

شکل-۳، تأثیر AVO برای مخازن کربناته به صورت تئوری



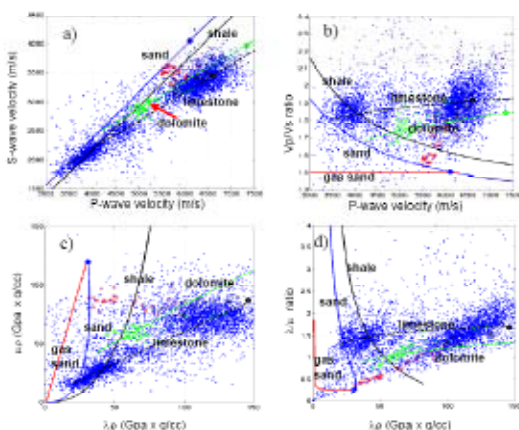
### موارد مطالعاتی

با انتخاب چند چاه نمونه و تفسیر دقیق لاگها، مخازن دولومیتی اشباع از گاز در عمق حدود ۳۷۰۰ متری و مخازن دولومیتی اشباع از آب در عمق ۳۰۰۰ متری را مورد آزمایش و آنالیز قرار می‌دهیم. در شکل ۴، اطلاعات لاگ چاه به روش ترسیم متقاطع (Cross-Plot) ترسیم و نقاط مربوط به اطلاعات گاز، آب و آهک متراکم به ترتیب به صورت مربع‌های قرمز، سبز و سیاه مشخص شده‌اند.

نسبت‌های تجربی برای ماسه، شیل و کربنات‌ها در این کراس پلات‌ها روی خطوط قرار گرفته‌اند. این کراس پلات‌ها لیتولوژی آواری‌ها را با کربنات‌ها مقایسه می‌کند. که این مقایسه توافق آزمایش‌های بین لاگ‌ها و آزمایشگاه را به خوبی نشان می‌دهد. نقاط مربوط به ماسه حاوی گاز را می‌توان از اطلاعات شکل ۱- به دست آورد. به دنبال این مشاهدات می‌توان این کراس پلات‌ها را طراحی و تفسیر کرد:

a) تأثیر گاز آشکار است و دامنه آن در نسبت  $V_p/V_s$ ،  $\lambda/\mu$  و محدوده‌های  $\lambda_p$  به صورت واضح نشان داده شده است.

شکل-۴. مخازن اشباع گاز و آب در سرعت و محدوده‌های استاندارد. (نقاط آبی داخل، نقاط لاگ چاه هستند).



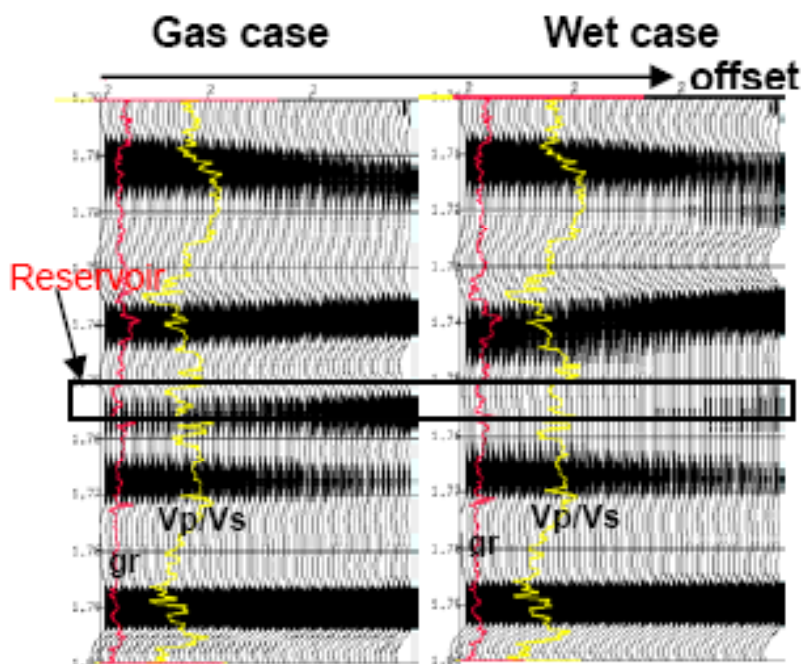
در این مخازن کربناته، تأثیرات AVO از کلاس ۳ به کلاس ۵، با جابجایی حداکثری به طرف صفر، منعکس کننده مخازن گازی با یک تخلخل خوب می‌باشد، به هر حال در مرز تبدیل شیل به آهک، اثر کلاس ۲ و یا کلاس ۳ می‌تواند مشخص باشد، که این سطح باید در آنالیز استاندارد AVO مورد توجه قرار گیرد. در شکل ۳، تأثیر AVO برای مخازن کربناته در هر دو دسته ۲ و ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود مشخص است که اگر در این تفسیر از دسته دوم استفاده شود چه مقدار از اطلاعات ذخایر کربناته می‌تواند نادیده گرفته شود. لذا تفسیر دقیق بسیار مهم است.

در واقع تأثیرات AVO در مخازن کربناته با مخازن آواری متفاوت بوده و متذکر می‌شویم که برای آواری‌ها و کربنات‌ها باید کالیبراسیون مجزایی صورت گیرد. چه این ترکیب اثرات کالیبراسیون، می‌تواند مشخصات و ویژگی‌ها و همچنین تجزیه و تحلیل را وارون کند.

انواع مخازن کربناته و دولومیتی بحث شده در بالا، در کل آهک و دولومیت هستند، به هر حال انواع دیگری از سطوح مشترک و نیز مخازن مرتبط با کربنات‌ها نیز در WCSB وجود دارند. دولومیت‌های پوشیده شده با انیدریت، سطوح مشترک شیل با کربنات‌ها، ماسه‌های پوشیده شده با کربنات‌ها و ماسه‌های قرار گرفته بر روی کربنات‌ها نیز در این میدان وجود دارند.

به دلیل افزایش پیچیدگی لیتولوژی‌ها، چنین مدلی باعث می‌شود تا ما بتوانیم حالت‌های خاص زمین‌شناختی، را با مدل سازی AVO انجام داده و با تشخیص نوع ناهنجاری‌های حالت خاص زمین‌شناختی منطقه را نشان دهیم. در این مدل، مخازن کربناته شکسته شده نیز ممکن است وجود داشته باشند که با تکنیک‌های دیگر از جمله موج P آزیموتی AVO و استفاده از بازگشت موج برشی می‌توان اطلاعات با ارزشی را به دست آورد.

شکل-۵. پاسخ AVO در مخازن دولومیتی پرشده از گاز و اشباع از آب.



دامنه جابجایی صفر بسیار کم را تغییر می‌دهد که این امر با پیش‌بینی‌های تئوریک و آزمایشگاهی نیز صدق می‌کند. (شکل-۳).

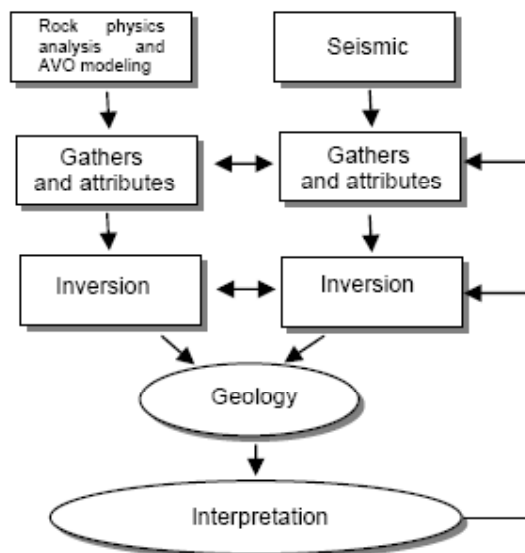
مثال تبدیل AVO برای دولومیت دارای ذخیره گاز به ژرفای ۳۰۰۰ متر در شکل-۶ آمده است. تخلخل این مخزن در حدود ۱۴ بوده و ویژگی‌های سنگی بر مبنای محاسبات تبدیلی در یک صفحه شبکه‌بندی شده (Cross-Plot)، با نقاط سیاه نشان داده شده است. در عملیات تبدیل از روش گودوی و همکاران Goodway et al (۱۹۹۷) استفاده شده است. (۲)

در ابتدا بازتاب موج P و موج S از نقطه عمقی مشترک (CMP) جمع شده و این بازتاب‌ها به سمت موج P و موج S ظاهری منحرف شدند. نسبت‌هایی که مورد استفاده قرار گرفتند

b) دولومیت مرطوب و یا آهک مرطوب یا ترکیبی از هر دو را باید به عنوان زمینه مرجع (مبنا) از لحاظ کیفیت تأثیر گاز مشخص کرد. برای تعیین تأثیر اشباع‌شدگی سیال روش جان‌شینی Biot-Gassmann انجام می‌شود که در حالت کلی این نظریه می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

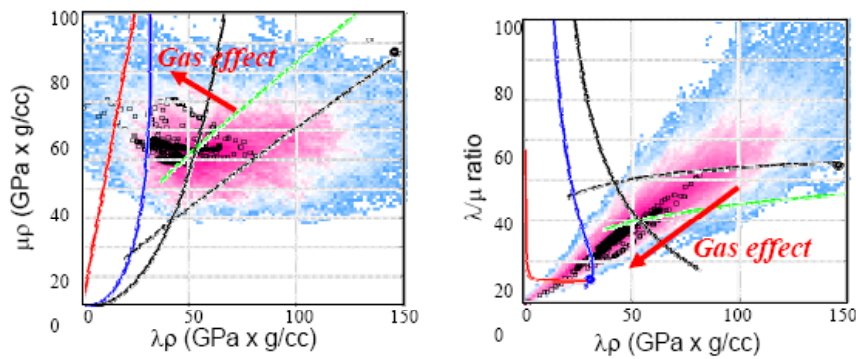
با استفاده از سرعت موج P (و چگالی انتخابی) برای یک تخلخل و اشباع آب معلوم، سرعت‌های موج P و موج S و نسبت پواسن در تخلخل‌ها و اشباع‌ات آب مختلف به دست می‌آید و یک مدل AVO ایجاد می‌شود که در شکل-۵ دیده می‌شود. در شکل-۵ حالت گازی یک ناهنجاری AVO دسته دوم یا سوم ایجاد می‌کند که دامنه آن در جابجایی زیاد مشخص می‌شود. در مورد شوراب‌ها (brine case)، AVO دسته دوم با

شکل-۷. فلوجارت مراحل پردازش AVO و تفسیر آن در مخازن کربناته.





شکل-۶. کراس پلات انحراف الاستیک در مخازن دولومیتی اشباع از گاز



عبارتند از:

$$\lambda\rho = Ip^2 - 2Is^2 \text{ و } \mu\rho = Is^2 \text{ و } \lambda/\mu \text{ و } \mu\rho$$

برهم نگاشت ارتباطات لیتولوژی تجربی که در اینجا به کار رفته‌اند همانند شکل-۴ هستند. گاز را می‌توان با توجه به دولومیت اشباع از آب شناسایی کرد. باید توجه داشت که اگر ویژگی‌های سنگ مخزن دولومیتی را با کمک روش الگوی رشد یافته از آواری‌ها تعبیر و تفسیر می‌کنید، بیشتر مجموعه داده‌های نقطه‌ای را به اشتباه شیل و یا ماسه شیلی تشخیص خواهید داد.

بررسی نادرست گردآوری‌های نقطه عمقی مشترک Common Mid Point = CMP و مقیاس‌بندی نادرست آنها در هر مرحله از پردازش داده‌ها با اطلاعات پایه‌ای نادرست سرعت و چگالی در تبدیل AVO، ممکن است از ارزش ویژگی‌های به‌دست‌آمده برای آن سنگ بکاهد و در نتیجه موقعیت نقاط داده‌ها را به‌صورت نادرستی نشان دهد.

این امر به اشتباه در تعبیر و تفسیر خواهد انجامید و همانگونه که اشاره شد بدترین حالت این است که برای سنگ‌های آواری غیرمخزنی مورد استفاده قرار گیرد.

فلوچارت کالیبره کردن و تعبیر و تفسیر کربنات‌ها با استفاده از AVO در شکل-۷ آمده است که دو شاخه عمده مدل‌سازی AVO و پردازش لرزه‌ای را نشان می‌دهد. اطلاعات زمین‌شناسی مورد نیاز در مرحله تعبیر و تفسیر و نیز در مرحله مدرج سازی QC نهایی به کار می‌روند. یک سنگ آهک سخت

و یا یک واحد زمین‌شناسی زمینه‌ای و مشخص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد تا اینکه کنترل کند که تبدیل به‌طور کامل انجام شده است.

گذشته از توجه به فرآیندهای حفظ دامنه، به افتادگی‌های موجود در نمودار نیز باید توجه کرد و در تعبیر و تفسیر آنها دقت داشت. در این نمونه تشابه ویژگی‌های سنگی میان کربنات‌های متخلخل یا کربنات‌های متخلخل و شیل‌های محتوی گاز است. به‌دلیل اینکه شیل اغلب با کربنات‌ها همراه است می‌توان آن را یا به‌صورت مخازن دارای گاز یا بدون گاز تفسیر کرد. هر سه شکل ۱، ۴، ۶، این واقعیت را به نمایش می‌گذارند. به عبارتی، با افزایش تخلخل، سنگ‌های کربناته در محدوده شیل متمرکز می‌شوند. در چنین شرایطی، اطلاعات زمین‌شناسی در محدود کردن تعبیر و تفسیر حیاتی هستند. گذشته از این، تداخل امواج تبدیل شده خود به عنوان یک دسته درجه ۲ خوبی از ناهنجاری‌های AVO به شمار می‌آیند و مرز شیل و کربنات‌ها را می‌توان به عنوان

ناهنجاری AVO دسته ۳ طبقه‌بندی کرد. ضریب‌ها نیز مسئله‌ای است که کیفیت مجموعه‌های پیش از گردآوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پایان، عواملی که پیچیدگی ساختاری و حفظ دامنه تصویربرداری می‌شوند را باید لحاظ کرد و از بابت شدت تغییرات AVO مورد آزمایش قرار داد.

### نتیجه

امروزه تحلیل AVO می‌تواند یک ابزار پی‌جویی معتبر و مفید برای تشخیص لیتولوژی سنگ‌های کربناته و سیال درون آن در مخازن باشد. با درک بهتر خواص سنگ‌های کربناته و بروز پیشرفت‌هایی در بررسی داده‌های لرزه‌ای، کالیبراسیون و تفسیر صحیح اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مهمترین مرحله در تحلیل AVO پردازش داده‌ها است، چرا که یک پردازش نادرست ممکن است بی‌هنجاری AVO را از بین ببرد و یا اینکه یک بی‌هنجاری مصنوعی ایجاد کند. با بررسی و تحلیل داده‌های صحیح مدل‌سازی AVO، اطلاعات ورودی زمین‌شناسی و هشدار نسبت به حفره‌های پوشیده، میزان ریسک استفاده از فن‌آوری‌های AVO در اکتشاف مخازن کربناته می‌تواند کاهش داده شود.

### منابع:

1. Goodway, W., Chen, T., and Downton, J., 1997, Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé's petrophysical parameter, CSEG Recorder, 22, No.7, 3-5.
2. Li, Y.Y., and Jon Downton, 2000, Application of amplitude versus offset in carbonate reservoirs: re-examining the potential, SEG Expanded Abstracts, 166-169.
3. Li, Y.Y., Goodway, B., and Downton, J., 2000, Recent advances in application of AVO to carbonate reservoirs, Core Lab Reservoir Technologies Division, EnCana Corporation. 1-7
4. Rafavich, F., Kendall, C. H. St. C., and Todd, T. P., 1984, The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks, Geophysics, 49, 1622-1634.