



ارزیابی کیفی ذخایر هیدرات گازی دریای عمان با استفاده از وارون‌سازی مقاومت کشسان

حسین خوشدل^۱، مدیریت اکتشافاحسان صالحی، عبدالرحیم جواهریان، مجید عطایی، بور^۲، هاشمکاه صنعتی امیرکبیر
ناصر کشاورز، روح‌خواه^۳، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

شرایط ترمو-باریک (فشار و دما) که تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی را ممکن می‌سازد، به گونه‌ای است که امکان حضور این کریستال‌ها را در رسوبات حاشیه شیب قاره فراهم می‌نماید. در این شرایط، روش‌های لرزه‌ای به‌عنوان یک ابزار کاربردی در ارزیابی این ذخایر اهمیت می‌یابند. وارون‌سازی مقاومت کشسان (EI) از جمله‌ی این روش‌هاست که امکان تعیین خواص کشسان و شناسایی جنس سنگ و سیال رسوبات حاوی هیدرات و گاز آزاد را از مقاطع برانبارش با زاویه‌ی محدود فراهم می‌سازد. در مقایسه با مقاطع برانبارش، تفکیک محدوده‌های زوایای تابش مختلف دارای این مزیت است که اثر تغییرات دامنه در هر محدوده به‌صورت جداگانه ارزیابی می‌شود. حضور هیدرات‌های گازی در رسوبات دریای عمان بر اساس شواهد لرزه‌ای به اثبات رسیده است. هیچ‌چاه دریایی در منطقه موردنظر حفر نشده و داده‌های لرزه‌ای دو بعدی، تنها اطلاعات در دسترس در این منطقه هستند. در این شرایط، برای ساخت مدل فرکانس پایین از سرعت برانبارش، برای تعیین سرعت موج تراکمی از نمودارهای متقاطع نشانگرهای عرض از مبداء و گرادیان، برای تعیین سرعت موج برشی، و از روابط تجربی، برای تعیین چگالی استفاده گردید. در مقایسه با مقطع لرزه‌ای اصلی، مقطع EI قدرت تفکیک بالاتری داشت و تفسیر پدیده‌هایی که در مقطع لرزه‌ای قابل مشاهده نبودند، را ممکن نمود.

واژگان کلیدی: هیدرات گازی، وارون‌سازی مقاومت کشسان، دریای عمان

مقدمه

نقاط مختلف دنیا با استفاده از اطلاعات EI صورت گرفته که در همه آن‌ها، دسترسی به اطلاعات چاه وجود داشته است [۴] و [۵]. در این مطالعه، محاسبه مقاطع مقاومت کشسان بدون در اختیار داشتن داده‌های چاه و تنها با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به تغییرات دامنه صورت پذیرفته است. با توجه به این موضوع که در منطقه‌ی مورد مطالعه در دریای عمان هیچ چاه دریایی حفر نشده است و داده‌های لرزه‌ای دو بعدی تنها اطلاعات در دسترس هستند، به کارگیری روشی برای تعیین خواص کشسان رسوبات بدون استفاده از اطلاعات چاه حائز اهمیت است و به ارزیابی بهتر این ذخایر کمک می‌کند. در این مطالعه، فرآیند وارون‌سازی برای هر یک از مقاطع برانبارش با زاویه محدود توسط روش خا‌های پراکنده مقید انجام پذیرفت [۶].

۱- هیدرات گازی

نیاز روزافزون جهان به انرژی و کاهش حجم ذخایر هیدروکربوری جهان موجب گشته تا طی دو دهه گذشته، ذخایر هیدرات گازی به‌عنوان بزرگترین منبع بالقوه تأمین‌کننده انرژی جهان در سال‌های آینده، توجه روزافزونی را به خود جلب کنند [۷]. شرایط ترمودینامیکی (دما و فشار) خاصی که

ذخایر هیدرات گازی به‌عنوان یک منبع احتمالی تأمین‌کننده انرژی در آینده در نظر گرفته می‌شود. اکتشاف این ذخایر نامتعارف از دهه هفتاد میلادی آغاز شده و در سال‌های پس از آن، رشد فزاینده‌ای را به‌منظور شناسایی ذخایر و تعیین درصد اشباع هیدرات داشته است [۱]. شرایط ترمو-باریک (فشار و دما) که تشکیل و پایداری هیدرات‌های گازی را ممکن می‌سازد، به گونه‌ای است که امکان حضور این کریستال‌ها را در رسوبات حاشیه شیب قاره فراهم می‌نماید. در این شرایط، روش‌های لرزه‌ای به‌عنوان یک ابزار کاربردی در ارزیابی این ذخایر اهمیت می‌یابند.

با تعمیم روابط مربوط به مقاومت صوتی (AI) و در نظر گرفتن زوایای تابش غیرصفر، امکان استفاده از اطلاعات سرعت موج برشی برای محاسبه مقاومت کشسان (EI) پدید آمد [۲]. در مقایسه با مقاطع برانبارش، تفکیک محدوده‌های زوایای تابش مختلف دارای این مزیت است که اثر تغییرات دامنه در هر محدوده به‌صورت جداگانه ارزیابی شده و امکان مقابله با برخی پدیده‌های نامطلوب مانند اثر پدیده تداخل بازتاب‌ها را ممکن می‌سازد. استفاده از مقاومت کشسان برای توصیف ذخایر هیدراته، نخستین بار توسط مالک صورت گرفت [۳]. پس از آن، چندین ارزیابی دیگر در

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (e_salehi@aut.ac.ir)

ذخایر و محاسبه درصد اشباع و حجم آن‌ها، قابل بهره‌برداری خواهند بود [۹].

۲- مقاومت کشسان

مفهوم مقاومت کشسان برای اولین بار توسط کونولی معرفی شد [۲]. مقاومت کشسان، مقدار تعمیم یافته کمیّت مقاومت صوتی است و همان گونه که می‌توان با استفاده از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش، مقدار IA را محاسبه نمود، کمیّت IE نیز ساختار با ثباتی را برای وارون‌سازی داده‌های پیش از برانبارش ایجاد می‌کند. این کمیّت تابعی از چهار متغیر شامل سرعت موج (V_p) ، سرعت موج (V_s) ، چگالی (ρ) و زاویه تابش (θ) بوده و رابطه‌ی آن به صورت زیر است [۴]:

$$EI(\theta) = V_p \frac{1 + \tan^2 \theta}{V_s} \frac{1 - 4\gamma \sin^2 \theta}{\rho} \quad (1)$$

که $\gamma = V_s^2 / V_p^2$ و V_p و V_s میانگین سرعت دو موج در دو سوی یک سطح مشترک هستند. شکل‌های ۱- و ۲- مزیت به کارگیری IE به جای IA را در مطالعات مخزن نشان می‌دهند. شکل ۱- هیستوگرام توزیع مقادیر IA و IE را برای ماسه حاوی نفت، ماسه حاوی آب‌نمک و شیل نشان می‌دهد. علاوه بر کمتر بودن انحراف از معیار توزیع هر یک از سه گروه در IE، هم‌پوشانی کمتری نیز بین سیال منفذی نفت و آب‌نمک در مقاومت کشسان وجود دارد. در شکل ۲- میزان تغییرات مقاومت کشسان و صوتی در برابر تغییرات اشباع نفت، نشان داده شده است. میزان تغییر IE با افزایش درصد اشباع نفت از ۵۰ تا ۹۰، چهار برابر تغییرات IA در شرایط مشابه است. علاوه بر این، نرخ تغییرات IE در هر درصد اشباع بیشتر است. کمیّت IE برای اولین بار در منطقه‌ای به کار گرفته شد که در آن، کیفیت داده‌های لرزه‌ای به علت وجود تکراری‌های gel-gep مطلوب نبود و به خصوص در دورافت‌های نزدیک و حضور بازتابنده‌هایی با ویژگی‌های کلاس دو OVA، نسبت سیگنال به نوفه به شدت کاهش می‌یافت. بنابراین، نیاز به کمیّتی بود تا بتوان داده‌های چاه را با بازتاب‌های زوایای بزرگ منطبق نموده و بدون نیاز به انطباق با داده‌های دورافت نزدیک، فرآیند وارون‌سازی را انجام داد. به طور کلی می‌توان مزایای EI را نسبت به AI در ۱- تفکیک اثر زوایای تابش مختلف و ۲- تفکیک پذیری بهتر نمونه‌های مختلف سنگ و سیال و مزیت EI نسبت به AVO را در ۱- تضعیف اثر نامطلوب حضور نوفه بر نشانگر

پایداری هیدرات‌های گازی را سبب می‌شود، موجب گشته تا این ذخایر در موقعیت‌های زمین‌شناسی خاص مانند مناطق قطبی^۱، حاشیه شیب قاره و یا گوه‌های افزایشی^۲ و در نقاطی که عمق آب متجاوز از چندصد متر است، ایجاد شوند.

تلاش‌های جاری در خصوص امکان‌سنجی اقتصادی برداشت از ذخایر هیدرات، بر فناوری مورد نیاز در سه حیطه‌ی زیر متمرکز شده است:

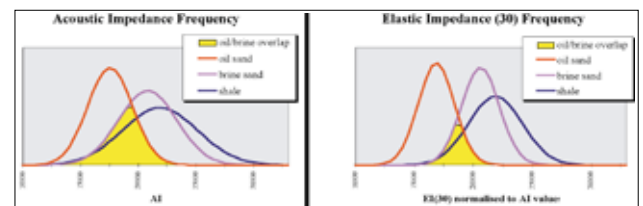
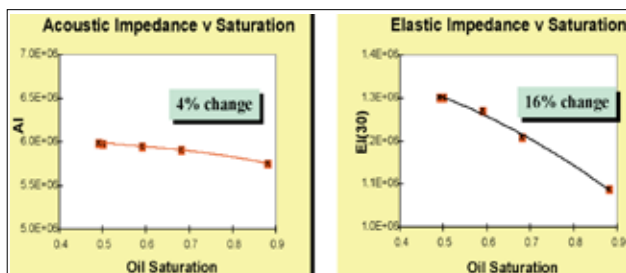
۱. تهیه پروتکل‌های جامع اکتشافی به منظور شناسایی نهشته‌های هیدرات‌گازی با پتانسیل مخزنی

۲. توسعه فناوری با هدف برداشت از این ذخایر در مقیاس صنعتی

۳. تهیه پروتکل‌های ارزیابی تأثیر برداشت بر مولفه‌های زیست محیطی.

فاز جامد هیدرات‌ها در شرایط پایداری موجب می‌گردد تا حضور این کریستال‌ها در رسوبات، کاهش چشم‌گیر تراوایی را به دنبال داشته و به همین علت، می‌تواند نقش پوش سنگی را برای گاز آزاد تجمع یافته در زیر رسوبات حاوی هیدرات داشته باشد [۸]. در صورت تغییر در شرایط ترمو-باریکی و زمین‌ساختی، عمق و محدوده پایداری هیدرات‌ها تغییر خواهد کرد که این موضوع، نشان از متغیر بودن سطح تلاقی گاز آزاد و هیدرات دارد. از آنجایی که که گاز متان بخش اعظم هیدرات‌های گازی را تشکیل می‌دهد، آزاد شدن مولکول‌های این گاز در اثر ناپایداری طبیعی و ورود به جو، با ایجاد اثر گلخانه‌ای در گرم شدن کره زمین و تغییر در شرایط جهانی آب و هوا تأثیر گذار خواهد بود. ایجاد مشکلات و مخاطرات در حفاری از جمله تأثیرات دیگر هیدرات‌های گازی است. بخشی از این مشکلات مربوط به تغییر فاز گاز استخراج شده از اعماق و گرفتگی لوله‌های حفاری است. همچنین، عدم استحکام سیمان پشت لوله‌های جداری، سست شدن ناگهانی رسوبات و دشوار بودن کنترل چاه، از دیگر معضلات ایجاد شده توسط هیدرات‌گازی است.

فعالیت‌های متعددی در خصوص مطالعات کیفی و کمی هیدرات‌های گازی به منظور تعیین پراکندگی و تخمین درجه اشباع آن‌ها انجام شده است. بر اساس مطالعات لرزه‌ای و به کارگیری نشانگرهای لرزه‌ای، وجود هیدرات‌های گازی در بخش ایرانی دریای عمان نیز به اثبات رسیده و ۵۵ هدف اکتشافی برای آن تعیین شده است. محدوده این رسوبات در آب‌های ایران در حدود ۷۲۰۰۰ کیلومتر مربع بوده که در صورت شناخت دقیق این



شکل ۱ | هیستوگرام AI و EI (30) برای سه گروه سنگ و سیال شامل:

ماسه‌سنگ نفت‌دار، ماسه‌سنگ حاوی آب‌نمک و شیل. انحراف از معیار

نرمال شده برای این سه گروه به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۱ و ۰/۱۵ در AI

و ۰/۰۸، ۰/۰۹ و ۰/۱۰ در EI است [۲].

شکل ۲ | رابطه بین اشباع نفت و AI در سمت چپ و اشباع نفت و EI در سمت راست. نتایج فوق حاصل اندازه‌گیری نمونه‌های مغزه است [۲].

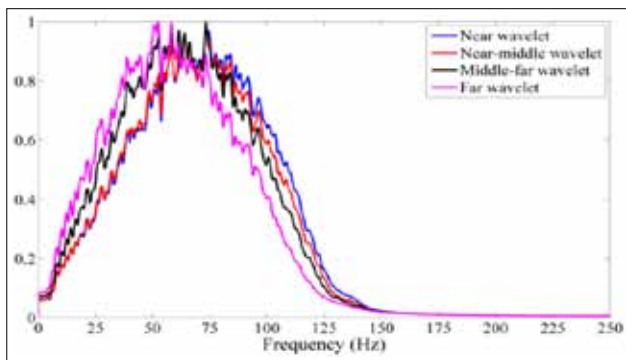


در این شکل، تفاوت دامنه‌های بازتابنده‌های مختلف در چهار مقطع فوق است. تفکیک محدوده‌های زوایای تابش مختلف دارای این مزیت است که اثر تغییرات دامنه در هر محدوده به صورت جداگانه ارزیابی شده و امکان مقابله با برخی پدیده‌های نامطلوب مانند اثر پدیده تداخل بازتاب‌ها را ممکن می‌سازد. وارون‌سازی مقاومت کشسان علاوه بر تفکیک اثر زوایای تابش مختلف، دارای یک مزیت مهم دیگر است که آن، عبارت است از در نظر گرفتن موجک‌های مختلف مربوط به زوایای تابش متفاوت. این موضوع از این جهت حائز اهمیت است که موجک در دورافت‌های مختلف دچار تغییر شکل ناشی از افت فرکانسی می‌شود. شکل-۴، طیف دامنه چهار موجک مربوط به چهار مقطع شکل-۳ را نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه تابش، باند فرکانسی موجک‌ها به تدریج به سمت فرکانس‌های کمتر جابه‌جا شده است. مرحله‌ی بعد از انجام فرآیند وارون‌سازی EI، مربوط به محاسبه مدل فرکانس پایین است. این مدل بر اساس تعریف EI ساخته شده و متشکل از سرعت برانبارش و

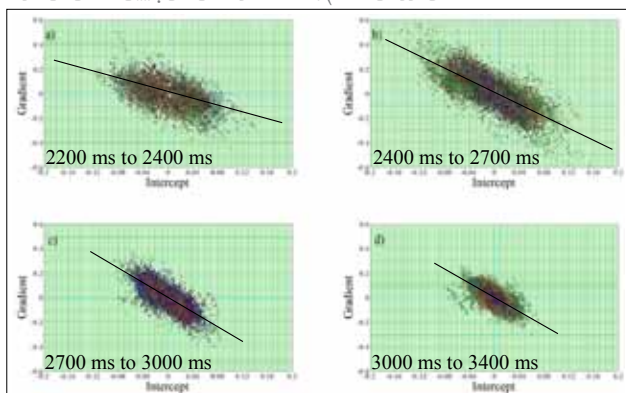
گرادیان (علی‌رغم به کارگیری نرم‌های پایدار)، ۲- استخراج موجک‌های جداگانه برای هر یک از محدوده‌های دورافت مختلف و ۳- در نظر گرفتن افت محتوای فرکانسی با افزایش دورافت عنوان نمود.

۱-۲- وارون‌سازی مقاومت کشسان

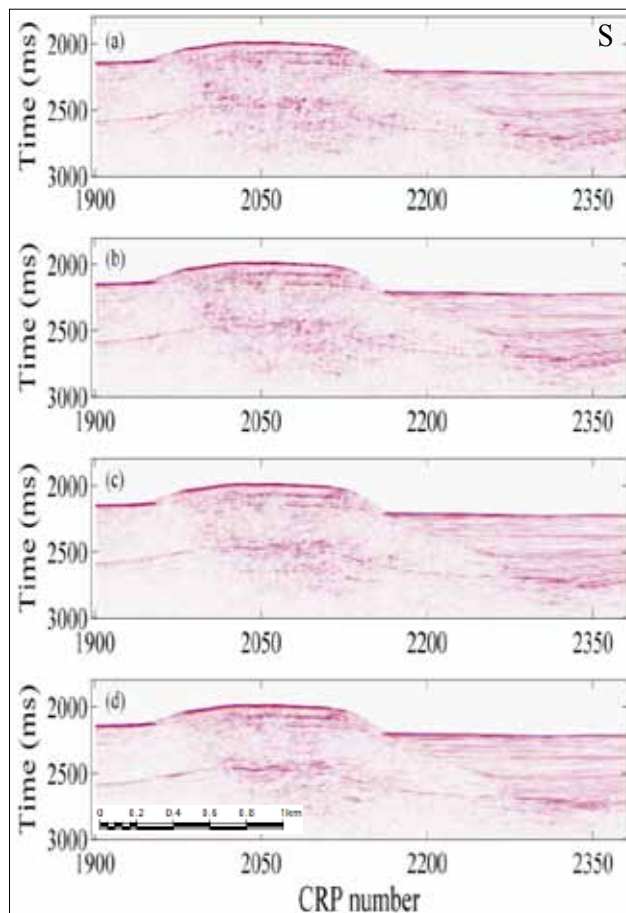
محاسبه مقادیر EI نیازمند به کارگیری مقاطع برانبارش با زاویه محدود است. برای ساخت این مقاطع ابتدا داده‌ها، از حیثه دورافت به حیثه زاویه تابش منتقل شدند و سپس، ردلرزه‌های متعلق به یک محدوده معین از زاویه‌های تابش با یکدیگر جمع شدند. در این مطالعه، چهار مقطع زاویه محدود ساخته شد که به ترتیب محدوده ۸-۳، ۱۶-۹، ۲۴-۱۷ و ۳۲-۲۵ درجه از زوایای تابش را در بر می‌گرفتند. این مقاطع برانبارش برای یک خط شمالی-جنوبی از داده‌های لرزه‌ای دریای عمان در شکل-۳ نشان داده شده است. مراحل بازیابی دامنه‌ها و اصلاحات انجام شده بر این داده‌ها توسط صالحی و همکاران مورد بحث قرار گرفته است [۱۰]. نکته قابل توجه



شکل ۴ | طیف دامنه مربوط به چهار موجک استخراج شده از مقاطع شکل ۳. با افزایش زاویه تابش، طیف دامنه موجک (که در بردارنده اطلاعات طیف دامنه داده‌ی لرزه‌ای است) به سمت فرکانس‌های پایین منتقل می‌شود.



شکل ۵ | نمودار متقاطع عرض از مبدا، و گرادیان برای چهار پنجره زمانی مختلف (از بستر دریا تا ۳۴۰۰ میلی ثانیه). در هر پنجره، شیب خط برآش شده به نقاط به مقادیر VS/VP نسبت داده شد که در نهایت برای ساخت مدل فرکانس پایین ورودی به فرآیند وارون‌سازی EI مورد استفاده قرار گرفت.

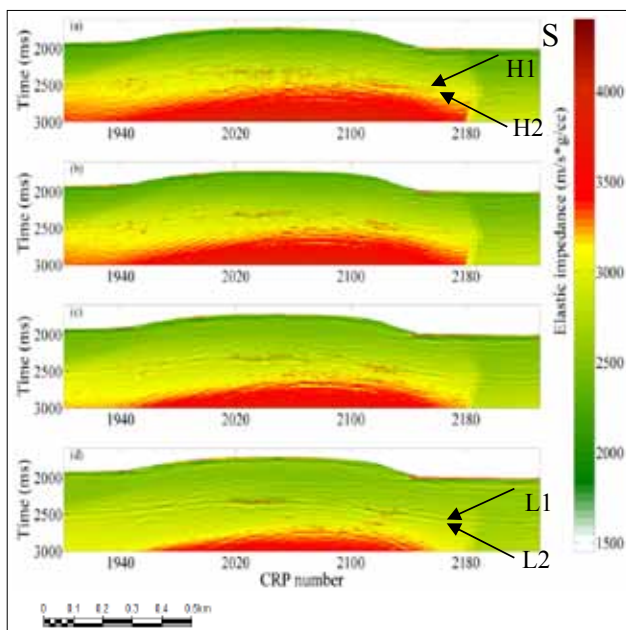


شکل ۶ | چهار مقطع لرزه‌ای زاویه محدود. (a) مقطع مربوط به زوایای نزدیک (زاویه میانی ۵ درجه)، (b) مقطع مربوط به زوایای میانی ۱ (زاویه میانی ۱۲ درجه)، (c) مقطع مربوط به زوایای میانی ۲ (زاویه میانی ۲۰ درجه) و (d) مقطع مربوط به زوایای دور (زاویه میانی ۲۸ درجه).

زوایای تابش و ارزیابی جداگانه آن‌ها، امکان مشاهده و رهگیری پدیده‌هایی را فراهم نمود که بر روی مقطع لرزه‌ای قابل تشخیص نبودند. علاوه بر این، امکان محاسبه مقاطع مقاومت دو موج V_s و V_p نیز بر اساس نتایج وارون‌سازی EI فراهم می‌گردد. الگوریتم وارون‌سازی برای تخمین ρV_s و ρV_p نیازمند حداقل ۲ مقطع مستقل EI است [۴]:

$$\ln(EI) \approx (1 + \sin^2\theta)\ln(\rho V_p) - 8\gamma\sin^2\theta\ln(\rho V_s) - 6\gamma(0.25 - \gamma)(1/a\gamma - \gamma/b)\sin^2(\theta) \quad (3)$$

که برای مقادیر γ کوچک‌تر از 0.25 ؛ $a=0.8$ و $b=0.5$ و برای مقادیر γ بزرگتر از 0.25 ؛ $a=0.3$ و $b=0.3$ است. شکل ۷- مقطع V_s/V_p حاصل از رابطه بالا را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نسبت V_s/V_p برای روند پس‌زمینه، لایه حاوی هیدرات و لایه حاوی گاز آزاد به ترتیب $0.27-0.24$ ، $0.24-0.21$ و حدود 0.53 است. برای محیط‌هایی با عمق تدفین کم، مانند منطقه مورد مطالعه در مکران، عدم استحکام کافی سنگ (رسوبات) موجب پایین بودن سرعت موج برشی آن می‌گردد. این موضوع سبب پایین بودن نسبت V_s/V_p آن نیز می‌شود. در اینجا، برای رسوبات اشباع با آب، مقدار (پس‌زمینه) V_s/V_p در حدود 0.25 است که تقریباً نصف مقدار اندازه‌گیری شده‌ی آن در رسوبات استحکام یافته است (در اغلب مطالعات، اندازه این نسبت 0.5 در نظر گرفته شده است). این مقدار از رقم 0.64 اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه یا روابط نظری به دو دلیل فاصله فاحشی دارد؛ نخستین که وزن بیشتری نیز دارد، مربوط به عدم استحکام این رسوبات کم‌عمق و کوچک بودن



شکل ۶- نتایج وارون‌سازی EI با استفاده از روش خارهای پراکنده مقید. ترتیب مقاطع این شکل مشابه با شکل ۳ است. حضور دو لایه پرسرعت تقریباً بر روی هر چهار مقطع مشاهده می‌شود.

چگالی محاسبه شده از رابطه همیلتون است [۱۱]. اما برای تولید مدل EI می‌باید اطلاعاتی از سرعت موج برشی نیز در دسترس باشد. در نبود چنین اطلاعاتی در منطقه‌ی مورد مطالعه، سرعت موج برشی از تحلیل نمودار متقاطع AVO محاسبه شد (شکل ۵-). در این نمودارها، امکان تعیین شیب روند کلی (مربوط به رسوبات اشباع با آب) وجود دارد و پس از آن، از روابط کاستانگنا و همکاران برای محاسبه نسبت سرعت موج برشی به سرعت موج تراکمی استفاده شد [۱۲]. بدین منظور، در مرحله وارون‌سازی AVO، پس از محاسبه‌ی نشانگرهای عرض از مبدا و گرادیان، نمودار متقاطع آنها ترسیم شد و یک خط به نقاط درون این نمودار برازش گردید. پس از اندازه‌گیری شیب این خط، نسبت V_s/V_p از رابطه‌ی زیر محاسبه گردید [۱۲]:

$$B = [1 - 8(V_s/V_p)^2]A, \quad (2)$$

که A و B به ترتیب، عرض از مبدا و گرادیان هستند. با توجه به تغییرات عمقی و جانبی نسبت V_s/V_p که تحت تأثیر فشردگی و استحکام رسوبات است، محاسبه این نسبت در پنجره‌های زمانی متغیر جانبی و زمانی انجام پذیرفت. زمانی که برای ردلرزه مرکزی هر پنجره، تغییرات نسبت V_s/V_p با زمان تعیین شدند، این تغییرات درون‌یابی شده تا مقاطع V_s/V_p تولید شوند. این مقاطع سپس، در مقادیر مقاومت صوتی اولیه ضرب شدند تا یک مقطع فرکانس پایین نرم شده، مقاومت موج برشی را خروجی دهند.

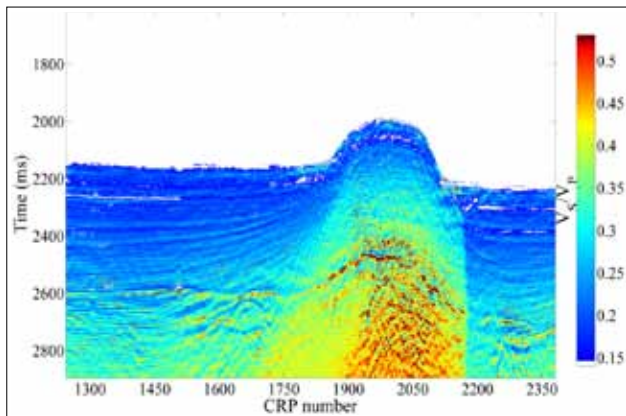
۳- وارون‌سازی EI و تفسیر نتایج برای ذخایر هیدرات گازی دریای عمان

برای وارون‌سازی EI، روش خارهای پراکنده مقید (CSSI) به کار رفت [۶]. این روش را می‌توان به صورت ترکیبی از دو روش وارون‌سازی خار پراکنده و روش مبتنی بر مدل در نظر گرفت. اگرچه این روش برای وارون‌سازی مقاومت صوتی توسعه داده شده است، اما امکان بازیابی سری مقاومت کشسان را نیز داراست [۶]. تابع هدف در این روش، ترکیبی از سه تابع مجزای عدم تناسب^۳ است که به ترتیب شامل؛ کمینه کردن مجموع مقادیر خارها در سری بازتاب، تناسب داده‌ی لرزه‌ای مشاهده شده و داده‌ی لرزه‌ای مصنوعی و تبعیت نتیجه وارون‌سازی از مدل فرکانس پایین ورودی به الگوریتم است. شکل ۶- مقاطع EI خروجی این وارون‌سازی را نشان می‌دهد. بنابر تعریف مقاومت صوتی که مربوط به زوایای تابش نزدیک به صفر است، مقطع بخش (a) این شکل به عنوان کمیت AI قابل تفسیر خواهد بود. در خصوص بازتابنده BSR، نتیجه مربوط به محدوده تابش دور (زاویه ۲۸ درجه)، بهترین تفکیک، لایه حاوی هیدرات و لایه حاوی گاز را دارا بود و امکان رهگیری BSR و تعیین مناطق با درصد اشباع بالاتر گاز و هیدرات را فراهم می‌نمود. دو لایه با مقاومت بالا در مقاطع EI کاملاً قابل مشاهده هستند (H1 و H2). علاوه بر این، در این مقاطع، یک لایه با مقاومت کشسان پایین در زیر لایه H2 قابل مشاهده است (L2) که احتمال حضور گاز در زیر H2 و همچنین، تفسیر آن به عنوان BSR دو گانه را تقویت می‌کند. در نتیجه، وارون‌سازی EI علاوه بر تفکیک



زیر آن‌ها در مقطع وارون شده‌ی خط لرزه‌ای وجود داشت. امکان مشاهده این دولایه به ترتیب از مقطع EI دور به مقطع EI نزدیک کاهش می‌یافت.

۴- محاسبه EI امکان محاسبه مقطع V_s/V_p را فراهم ساخته و امکان رهگیری لایه‌های حاوی هیدرات و گاز را ممکن می‌ساخت. ■



شکل ۷ | مقطع V_s/V_p که با استفاده از دو مقطع مقاومت کشسان ۵ و ۲۸ درجه محاسبه شده است. لایه قرمز رنگ در این شکل مربوط به اثر حضور گاز است که باعث کاهش قابل ملاحظه VP و افزایش V_s/V_p شده است. بر روی لایه هیدراته، مجموعه‌ای از نقاط با V_s/V_p بالا (کم مقاومت) به صورت پراکنده دیده می‌شوند که احتمالاً مربوط به حضور گاز است.

سرعت V_s آنهاست. دومین دلیل، اندک بودن درصد اشباع گاز در این رسوبات است. با توجه به این موضوع، می‌توان بیان داشت که کم بودن نسبت V_s/V_p در لایه حاوی گاز در شکل ۷، به احتمال زیاد، به علت عدم استحکام رسوبات است. همچنین، در بخش قرار گرفته بر روی لایه هیدراته، مجموعه‌ای از نقاط کم مقاومت به صورت پراکنده دیده می‌شوند. این نقاط احتمالاً مربوط به حضور گازی است که از بخش‌های پایین‌تر، از طریق درزه و شکستگی‌ها فرار کرده و به بخش بالایی رسیده است. البته، عدم امکان رهگیری این بخش تا بستر دریا، امکان اظهار نظر در خصوص وجود دودکش گازی را فراهم نمی‌کند، گرچه با توجه به مشاهده این پدیده در سایر نقاط، نمی‌توان این فرض را نیز رد نمود. در هر صورت، مقطع V_s/V_p ، امکان شناسایی پدیده‌هایی را به وجود آورد که در مقطع لرزه‌ای اصلی قابل مشاهده نبودند.

نتیجه‌گیری

- ۱- روش وارون‌سازی EI با تفکیک اثر زوایای مختلف تابش، موجب شناسایی دقیق‌تر محدوده‌های حاوی هیدرات و گاز شد.
- ۲- در این روش، دورترین مقطع برانبارش با زاویه محدود، بیشترین حساسیت را به حضور گاز و هیدرات داشت.
- ۳- امکان تفسیر دو لایه پُرسرعت (حاوی هیدرات) و لایه‌های کم مقاومت

پانویس‌ها

¹ permafrost

³ misfit

² accretionary wedge

منابع

- [1] Milkov, A.V., and Sassen, R., Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces: Marine and Petroleum Geology, 2002, 19, 111-.
- [2] Connolly, P., Elastic impedance: The Leading Edge, 1999, 18, 438-452.
- [3] Mallick, S., AVO and elastic impedance: The Leading Edge, 2001, 20, 1094-1104.
- [4] Lu, S., and McMechan, G.A., Elastic impedance inversion of multichannel seismic data from unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas: Geophysics, 2004, 69, 164-179
- [5] Riedel, M., Bellefleur, G., Dallimore, S.R., Taylor, A., and Wright, F.J., Amplitude and frequency anomalies in regional 3D seismic data surrounding the JAPEx/JNOC/GSC Mallik 5L-38 research site: Geophysics, 2006, 71, B183-B191.
- [6] Helgesen, J., Magnus, I., Prosser, S., Saigal, G., Aamodt, G., Dolberg, D., and Busman, S., Comparison of constrained sparse spike and stochastic inversion for porosity prediction at Kristin field: The Leading Edge, 2000, 19, 400-407.
- [7] Kvenvolden, K.A., A primer on gas hydrate; The future of energy gases: U. S. Geological Survey Professional Paper, 1993, 1570, 279291-
- [8] Max, M.D., Johnson, A.H., and Dillon, W.P., Economic geology of natural gas hydrate, Dordrecht, Springer, 2006.
- [9] ترازنامه هیدروکربوری کشور در سال ۱۳۸۷، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۸۸، تهران.
- [10] Salehi, E., Javaherian, A., Ataee Pour, M., KeshavarzFarajkhah, N., and SeddighArabani, M., Quantitative seismic pre-stack analysis of potential gas-hydrate resources in the Makran Accretionary Prism, offshore Iran: Marine and Petroleum Geology, 2013, 48, 160170-.
- [11] Hamilton, E.L., Vp/Vs and Poisson's ratios in marine sediments and rocks: Journal of Acoustic Society of America, 1976, 66, 10931101-.
- [12] Castagna, J.P., Swan, H.W. and Foster, D.J., Framework for AVO gradient and intercept interpretation: Geophysics, 1998, 63, 948956-.