

تحلیل AVO روی مخزن ماسه‌سنگی غار در میدان ابوذر واقع در شمال غرب خلیج فارس

هادی حاجی‌جمهوری^۱، محمدعلی ریاحی^{۲*}، غلامحسین نوروزی^۳ و امیر شمسآ^۴

^۱ کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۲ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۴ کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت، شرکت نفت فلات قاره ایران

(دریافت: ۸۹/۱۲/۳، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۲/۲۴)

چکیده

تحلیل AVO امروزه روشی معتبر و مفید برای تشخیص هیدروکربن‌ها است. با استفاده از ارتباط دامنه در برابر دورافت و روابط زوپریتس و تقریب‌های آن می‌توان نشانگرهای متفاوتی استخراج کرد تا به کمک آنها محدوده‌های مخزنی از لحاظ شماره و سنگ‌شناسی تفکیک شود. در این مقاله تحلیل AVO روی مخزن ماسه‌سنگی غار در میدان ابوذر واقع در خلیج فارس صورت گرفته است. با کمک روش‌های تحلیل AVO شامل مدل‌سازی مستقیم، مدل‌سازی جانشینی شماره، بررسی نشانگرها و کراس‌پلات‌های AVO در محدوده مخزن، شماره‌های متفاوت تفکیک شده است و نتایج به‌دست آمده، کارایی این روش را به‌منزله روشی جامع برای اکتشاف مخزن ماسه‌سنگی با هیدروکربن سبک نشان می‌دهد. این تحقیق با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و سری داده‌های دریایی دو بُعدی قبل از برانبارش، صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تغییر دامنه با دورافت، مدل‌سازی مستقیم، مدل‌سازی جانشینی شماره، نشانگر لرزه‌ای، کراس‌پلات

AVO analysis in Ghar Sand Stone Reservoir in Aboozar Oil field located in North-West of Persian Gulf

Haji Jomhouri, H.¹, Riahi, M. A.², Norouzi, G.³ and Shamsa, A.⁴

¹ M.Sc. in Oil Exploration, Mining Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

² Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Associate Professor, Mining Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran

⁴ M.Sc. in Oil Exploration, Iranian Offshore Oil Company

(Received: 22 Feb 2011, Accepted: 15 March 2011)

Abstract

AVO theory was introduced around 20 years ago. In recent years, this technique was become to a major tool in hydrocarbon sources exploration. By the help of this method with the suitable understanding from underground layers and knowing how to use this technology, quantitative specifications of reservoir can be recognized.

AVO analysis is a seismic technique that by using of pre-stack data, establish the presence of hydrocarbon in reservoir. Three basic physical parameters used in seismic interpretation are density, P-wave velocity and S-wave velocity. For applying AVO technique, having a correct understanding of this parameters is required.

Introduction: Zoeppritz equations determine Reflection and Transmission Coefficients as a function of Incidence angle, but these equations don't show how amplitude variations change with rock physical parameters truly. Zoeppritz equations approximations are simpler and more general respect to real equations. Some famous approximations for Zoeppritz equations are Aki, Richards & Fraiser (1980), Shuey and Fatti et al.

approximations. With the help of these approximations some variable attributes can be extracted.

Ghar reservoir characterizations in Aboozar oil field: Aboozar oil field is located in North-West of Persian Gulf and is 75 KM far from east of Khark Island. This field was explored in recent 1950s and its production was started in 1976. The main hydrocarbon producer layer in this field is Ghar sand stone reservoir with Oligo-Miocene age. It has an anticline structure and is alongside in north-west south-east direction. Its depth is between 820 to 880 meters. This sand stone layer is corresponded to Ahvaz sand stone member in Asmari formation.

AVO analysis in Ghar sand stone reservoir: In this paper, different techniques that are involved in AVO analysis such as Forward Modeling, Fluid Replacement Modeling (FRM), various attribute extraction and X-Plot techniques are applied in Ghar sand stone reservoir to investigate the ability of AVO method for detection of light hydrocarbon in north-west of Persian Gulf. This study was done over a seismic line crossing a well in Aboozar Field. Some well logs data that are required for Forward Modeling in this well were available such as Density, P-wave and S-wave logs.

Forward Modeling: AVO modeling applied for investigation of Amplitude Versus Offset (AVO) variations and detection of parameters that produce these variations. With the help of available logs and by usage of Zoeppritz equations and Ray Tracing, synthetic seismogram in the well was produced. After producing of primary synthetic seismogram, significant reflections on real seismic data and synthetic seismogram were compared. By Forward Modeling the time-depth curve of the well was modified and seismic data were calibrated. Then on the produced synthetic seismogram in upper boundary of Ghar sand stone reservoir, AVO curve that show variations of Reflection Coefficients versus Offsets was extracted. This curve shows that AVO anomaly from upper boundary of Ghar sand stone reservoir is a class IV type which has a positive Gradient (B) and negative Intercept (A). Class IV type is corresponded to a gas sand stone with low Acoustic Impedance. Amplitudes were decrease versus offset in upper part of the reservoir.

Fluid Replacement Modeling (FRM): In this step, to verify AVO anomalies from Ghar reservoir, FRM was applied in the well area to satisfy anomalies related to fluid and mostly affected by gas. With the help of FRM, the best attributes for identification of Ghar reservoir upper boundary were distinguished. These attributes are related mostly to intergranular fluid. The base of FRM is Gassmann equation. For this purpose, 3 logs (P-wave velocity, S-wave velocity and density) in 3 fluid situations (real situation, 100% water saturation and 80% gas - 20% water saturation) were calculated and synthetic seismograms were produced.

AVO attributes study in seismic data: The time-sections of AVO attributes were extracted for real seismic data to use them for identification of AVO anomalies. Some of attributes are Gradient (B), Intercept (A), S-wave Reflection Coefficient (Rs), P-wave Reflection Coefficient (Rp) and Poisson Ratio Variations ($\Delta\sigma$). From extracted attributes, Intercept (A) and Poisson Ratio Variations ($\Delta\sigma$) attributes show the reservoir area more accurate. Also Poisson Ratio Variations ($\Delta\sigma$) section has most variations in upper boundary of Ghar reservoir and identify the reservoir area more precise. On the Gradient (B) attribute section, the upper boundary of Ghar sand stone has negative values and by the help of Intercept (A) and Gradient (B), the type of AVO anomaly was distinguished.

X-Plot techniques

(a) Intercept (A) versus Gradient (B) X-Plot by synthetic seismogram from well data
Intercept versus Gradient X-Plot can be use for interpretation of AVO analysis. It is a

technique for classification of AVO responses and hydrocarbon sediment identification. By usage of rock physic parameters, AVO modeling and X-plot technique, AVO anomalies polarity can be analyzed. X-plot technique was applied for separation of reservoir fluids on real seismic data and synthetic seismogram from well data. A 100 mille-second window was considered on the synthetic seismogram at the Ghar reservoir area to use its related points in producing X-Plot Intercept versus Gradient. In the resulted X-Plot, most of points show a wet trend (in direction of second & fourth quarter). The rest points which are trended toward first and third quarter show the hydro carbon section.

(a) Intercept (A) versus Gradient (B) X-Plot by real seismic data

The X-Plots are powerful technique for separation of different zones with different fluid content and lithology. To obtain more accurate results and determine precise boundaries of reservoir, the X-Plot were done on the seismic line between 200 and 300 X-lines. The mentioned X-Plot was produced in a 150 mille-second window which is symmetric to 750 mille-second time limit (time limit of upper boundary of Ghar sand stone). This X-Plot enables us to separate reservoir section. According to obtained points, three zones were determined as bellow:

- Water zone trended to bisector of first and third quarters.
- First hydrocarbon zone in upper part of reservoir.
- Second hydrocarbon zone in lower part of reservoir and top of water zone.

Results obtained from this X-Plot are best-correlated to results of well seismogram X-Plot.

Conclusion: The purpose of this paper is identification of AVO method abilities in exploration of hydrocarbon reservoirs using pre-stack seismic data at north-west areas of Persian Gulf. The results of this study truly reveal these abilities. For this purpose, synthetic seismogram of well logging data produced for Aboozar oil field using Forward Modeling and with the help of that the reason of observed anomalies on pre-stack seismic data was detected at the upper boundary of Ghar reservoir. With producing AVO curve, the related anomaly type which is class IV, was determined. In this step, the time-depth curve was corrected by matching well and seismic data and the seismic data were calibrated.

In Forward Modeling step, well logging data were produced synthetically using Fluid Replacement Modeling (FRM) and with the help of synthetic seismogram and extraction of different attributes in 3 different fluids situations (real situation, 100% water saturation and 80% gas - 20% water saturation), the most suitable fluid affected attributes, which are able to distinguish the upper boundary of Ghar reservoir, were determined. These attributes are as following: Intercept (A) attribute, attribute of Poisson Ratio Variations ($\Delta\sigma$), attribute of P-wave Reflection Coefficient and $A \times \text{Sign}$ (B) attribute.

In this study, AVO attributes were extracted from real seismic data using different methods. The most suitable attributes which enable us to distinguish reservoir boundaries were determined and a suitable correlation observed between these attributes and results obtained from Forward Modeling. With the help of different attributes, X-Plots of Intercept (A) versus Gradient (B) were produced in reservoir area. By usage of these plots, hydrocarbon limited area was separated in lower and upper sections of reservoir which had a well matching comparison to results obtained from X-Plot of Intercept (A) versus Gradient (B) of synthetic seismogram in reservoir area.

Key words: Amplitude versus offset, Forward Modelling, Fluid Replacement Modelling, Seismic attributes, Cross Plot

۱ مقدمه

نظریه AVO از حدود بیست سال پیش معرفی شده است. در سال‌های اخیر، این روش به یک ابزار اصلی در اکتشافات منابع هیدروکربوری تبدیل شده است. به کمک این روش با داشتن درک مناسبی از لایه‌های زیرزمین و دانستن چگونگی به کارگیری این فناوری می‌توان خصوصیات کمی مخزن را مشخص کرد. (راسل، ۲۰۰۳)

تحلیل AVO فنی لرزه‌ای است که با استفاده از داده‌های پیش از برانبارش (Pre-Stack)، وجود هیدروکربن در مخزن را مشخص می‌کند. سه پارامتر فیزیکی اساسی که در تفسیر داده‌های لرزه‌ای به کار می‌رود عبارت‌اند از چگالی، سرعت موج P و سرعت موج S. برای استفاده از فن AVO، داشتن درک درستی از این پارامترها ضروری است. (راسل، ۲۰۰۳)

زوپریتس در ۱۹۱۹ و نات در ۱۸۹۹ تحقیقاتی را به انجام رساندند که نتیجه آن معادلاتی در مورد بازتاب و شکست امواج کشسان همساز (Harmonic) در مرز بین دو جامد کشسان همگن و همسانگرد بود. اولین کارها به منظور درک این معادلات و درک بازتاب‌های لرزه‌ای را موسکات و مرس در ۱۹۴۰ عملی ساختند. آنها نتیجه گرفتند که انرژی بازتابی از سطوح متفاوت کشسان، با افزایش زاویه تابش، کاهش خواهد یافت. (کولمب، ۱۹۹۳)

تفکیک انرژی یک موج فرودی به یک سطح بازتابی را می‌توان با چندین دسته معادلات نشان داد که نسبت دامنه امواج فرودی به بازتابی را محاسبه می‌کنند. معادلات زوپریتس به توصیف جابه‌جایی ذرات می‌پردازد. حل معادله زوپریتس برای یک بازتابنده خاص به تفاوت میان سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و چگالی هر دو محیط وابسته است. (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۹۳)

هدف از نگارش این مقاله، بررسی توانایی روش AVO در تشخیص هیدروکربن‌های سبک در منطقه شمال

غرب خلیج فارس است که این بررسی روی مخزن ماسه‌سنگی غار در میدان ابوذر صورت گرفته است.

۲ تعریف

معادلات زوپریتس ضرایب بازتاب و عبور موج را به صورت تابعی از زاویه تابش مشخص می‌کنند، ولی این معادلات چگونگی تغییرات دامنه با تغییر پارامترهای فیزیکی سنگ را به درستی نشان نمی‌دهند. تقریب‌های معادلات زوپریتس نسبت به معادلات کلی، ساده‌تر و عمومی‌تر هستند. از جمله تقریب‌های مشهوری که برای معادله زوپریتس عرضه شده، تقریب آکی ریچاردز و فریزر (۱۹۸۰)، تقریب شوی (۱۹۸۵) و تقریب فاتی و همکارانش (۱۹۹۴) است. به کمک این تقریب‌ها نشانگرهای متفاوتی استخراج می‌شود.

۳ رده‌بندی پاسخ‌های AVO

رادرفورد و ویلیامز (۱۹۸۹) براساس نحوه تغییرات ضریب بازتاب و دامنه نسبت به دورافت، سه رده متفاوت برای مرز بالای یک ماسه‌گازدار در نظر گرفتند. کاستاگنا (۱۹۹۷) نیز رده چهارمی را پیشنهاد کرد که در آن ضریب بازتاب منفی بود و با افزایش دورافت، بیشتر می‌شد. رده‌بندی ماسه‌های گازی در شکل ۱ نشان داده شده است. قسمت الف مربوط به سه رده اول، دوم و سوم رادرفورد و ویلیامز و قسمت ب مربوط به رده چهارم کاستاگنا است که در آنها نحوه تغییرات دامنه و ضریب بازتاب با دورافت مشخص است.

۴ نشانگرهای AVO

نشانگرها پارامترهایی هستند که با روابط متفاوت استخراج می‌شوند و هر کدام قابلیت‌های خاص خود را دارند. برخی از آنها در تشخیص شاره و برخی در تشخیص سنگ‌شناسی توانایی بیشتری دارند. رایج‌ترین نشانگرهای AVO عبارت‌اند از:

بمانند. این نشانگر اغلب برای تشخیص هیدروکربور نامناسب است، چراکه فقط وقتی که تقاطع و گرادیان هر دو منفی باشد مثبت و کارآمد است؛ بنابراین اغلب در تشخیص بی‌هنجاری رده نوع سوم به کار می‌رود.

$$1-7 \text{ نشانگر } \left(\frac{A-B}{2} \right)$$

این نشانگر معادل نشانگر ضریب بازتاب نرمال موج برشی است (معادله ۱).

$$\frac{A-B}{2} = Rs_0 \quad (1)$$

به طوری که: Rs_0 : ضریب بازتاب نرمال موج برشی

$$2-7 \text{ نشانگر } \left(\frac{A+B}{2} \right)$$

با توجه به معادله (۱) این نشانگر می‌تواند تقریب مناسبی از تفاوت ضریب بازتاب موج تراکمی و برشی باشد (معادله ۲). این نشانگر اغلب در مرز بین شیل به ماسه‌گازی منفی است و کارآیی آن بیشتر در ماسه‌های گازی با سرعت موج تراکمی کم می‌باشد. از مزایای این نشانگر نسبت به نشانگرهای دیگر این است که اغلب برای ماسه‌های گازدار نسبت به ماسه‌های آبدار دارای مقدار منفی تری است و ممکن است برای ماسه‌های گازی مثبت، صفر یا منفی باشد.

$$\frac{A+B}{2} = Rp_0 - Rs_0 \quad (2)$$

به طوری که Rp_0 : ضریب بازتاب نرمال موج تراکمی

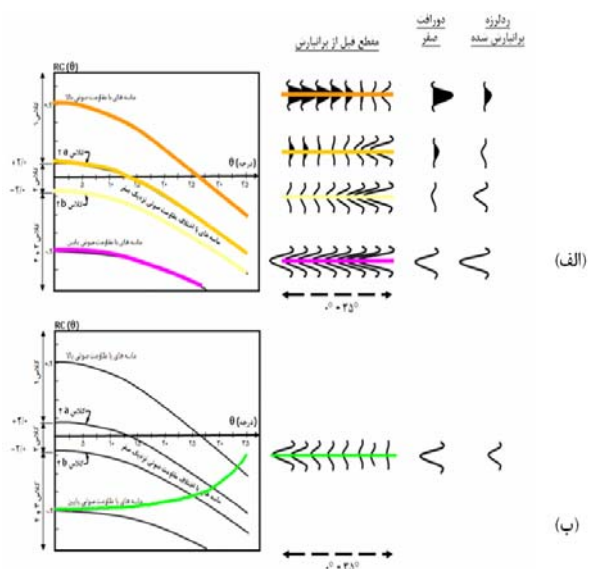
۸ نشانگر تغییر نسبت پواسون

ضریبی از $A+B$ با توجه به ساده‌سازی‌های معادله خطی شوی (۱۹۸۵) می‌تواند بیانگر تغییرات نسبت پواسون باشد (راسل، ۲۰۰۳). گرادیان با استفاده از معادله خطی شوی به صورت معادله (۳) نوشته می‌شود.

$$B = Rp_0 A_0 + \frac{\Delta \sigma}{(1-\sigma)^2} \quad (3)$$

۵ نشانگر تقاطع (A) (Intercept)

این نشانگر تقریبی از ضریب بازتاب نرمال است که روی مقطع برانبارش معمولی نشان داده می‌شود.



شکل ۱. رده‌های متفاوت ماسه‌های گازدار و نحوه تغییرات دامنه و ضریب بازتاب با دورافت. الف) مربوط به سه رده اول رادرفورد و ویلیامز. ب) رده چهارم کاستاگانا.

۶ نشانگر گرادیان (B) (Gradient)

این نشانگر مقدار گرادیان AVO را برای هر نقطه میانی مشترک نشان می‌دهد. تغییرات گرادیان وابستگی زیادی به تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده دارد. این نشانگر به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده تغییرات دامنه با دورافت باشد از این رو می‌باید با نشانگر تقاطع به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد. ماسه‌های گازدار دارای گرادیان و تقاطع منفی تری نسبت به ماسه‌های آبدار هستند. (رادرفورد و ویلیامز، ۱۹۸۹)

۷ نشانگر حاصل ضرب تقاطع در گرادیان (A*B)

این نشانگر از حاصل ضرب نشانگر تقاطع در گرادیان حاصل می‌شود. در مواردی که ضریب بازتاب نرمال، منفی و گرادیان نیز منفی باشد، پاسخ به صورت مثبت ظاهر می‌شود. (بی‌هنجاری AVO رده نوع سوم). پدیده‌هایی با دامنه فرود نرمال ضعیف ممکن است در این مقاطع پنهان

بنابراین، فاکتور شماره ΔF به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta F = Rp - 1.16(Vs/Vp)Rs \quad (10)$$

اگر لایه های بالا و پایین مرز بازتابش روی خط گل-سنگ قرار گیرند، $\Delta F = 0$ است. ولی اگر یکی از لایه ها شیل یا ماسه اشباع از آب و لایه دیگر ماسه گازدار باشد، ماسه گازدار اندکی در خارج از خط قرار می گیرد و در این حالت ΔF صفر نخواهد بود. بنابراین می توان گفت که مقدار ΔF در مرز بالایی و پایینی ماسه های گازدار صفر نیست.

۱۰ مشخصات مخزن غار، میدان نفتی ابوذر

میدان نفتی ابوذر در شمال غرب خلیج فارس و در ۷۵ کیلومتری شرق جزیره خارک واقع شده است (شکل ۲). این میدان در اواخر دهه ۵۰ میلادی مورد اکتشاف قرار گرفت و سرانجام در ۱۹۷۶ کار تولید از آن آغاز شد. افق اصلی تولیدکننده نفت در این میدان مخزن ماسه سنگی غار با سن الیگو-میوسن است که به صورت یک تاقدیس با امتداد شمال غرب-جنوب شرق بین عمق تقریبی ۸۲۰ تا ۸۸۰ متر واقع شده است. این بخش ماسه سنگی معادل بخش ماسه سنگی اهواز در سازند آسماری است (ژئوسیستم جی سون).



شکل ۲. موقعیت میدان ابوذر در حوزه خلیج فارس (ژئوسیستم جی سون).

به طوری که:

$$A_0 = C - 2(1 + C) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma}$$

$$C = \frac{\Delta Vp/Vp}{\Delta Vp/Vp + \Delta \rho/\rho}$$

$\Delta \sigma$ تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده و σ میانگین نسبت پواسون دو محیط است. اگر نسبت Vp/Vs برابر ۲ باشد می توان گرادیان را به شکل ساده معادله (۴) نوشت.

$$B = -Rp_0 + \frac{4}{9} \Delta \sigma \quad (4)$$

همچنین معادله (۴) را می توان برحسب تغییرات نسبت پواسون نوشت.

$$\Delta \sigma = \frac{A + B}{2.25} \quad (5)$$

۹ نشانگر فاکتور شماره

مفهوم فاکتور شماره توسط اسمیت و گیدلو در ۱۹۸۷، به منظور تشخیص ماسه های گازدار عرضه شد. ماسه ها و سنگ های سیلیسی (Siltstone) اشباع از آب و شیل در مقطع کراس پلات Vp نسبت به Vs تقریباً روی خط گل سنگ قرار می گیرند، درحالی که ماسه های اشباع از گاز، سرعت موج تراکمی کمتر و تا حدودی سرعت موج برشی بیشتری دارند و از این رو در زون گازدار قرار می گیرند (راسل و همکاران، ۲۰۰۱). ماسه های با تخلخل زیاد در قسمت سرعت کم و ماسه های با تخلخل کم در قسمت سرعت زیاد قرار می گیرند (کاستاگنا و سوان، ۱۹۹۷). به طور تجربی معادله خط گل سنگ و مشتق آن را به صورت زیر پیشنهاد داده اند.

$$Vp = 1360 + 1.16Vs \quad (6)$$

$$\Delta Vp = 1.16 \Delta Vs \quad (7)$$

که می تواند به صورت زیر تغییر کند.

$$(\Delta Vp / 2V) = 1.16(Vs / Vp)(\Delta Vs / 2Vs) \quad (8)$$

$$Rp - 1.16(Vs / Vp)Rs = 0 \quad (9)$$

معادله (۹) فقط در طول خط گل-سنگ صحیح است،

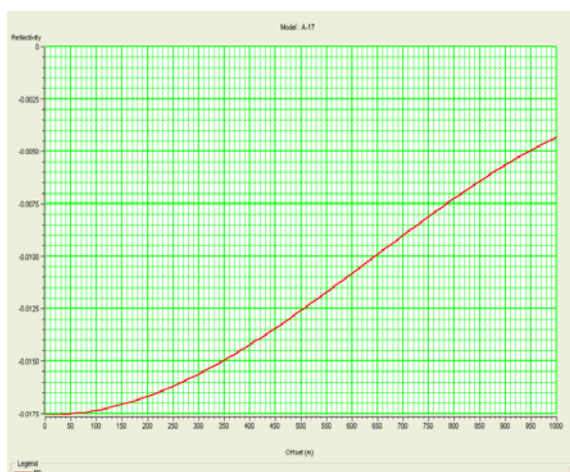
۱۱ تحلیل AVO روی مخزن غار

در این مقاله روش‌های مدل‌سازی مستقیم، جانشینی شماره، استخراج نشانگرهای گوناگون و ترسیم کراس پلات که در تحلیل AVO مطرح است روی مخزن ماسه‌سنگی غار اعمال شده است تا توانایی استفاده از روش AVO در تشخیص هیدروکربن‌های سبک در منطقه شمال غرب خلیج فارس بررسی شود. این تحقیق روی یک خط لرزه‌ای که روی یکی از چاه‌های میدان ابوذر قرار دارد، صورت می‌گیرد. نگارهای چاه‌پیمایی شامل نگار چگالی، سرعت موج S و سرعت موج P که برای مدل‌سازی مستقیم لازم هستند، در این چاه برداشت شده است.

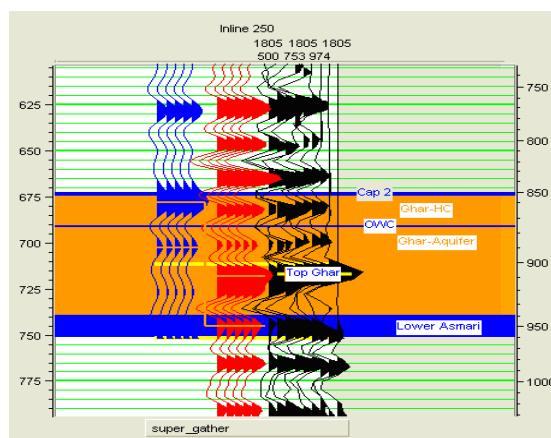
۱-۱۱ مدل‌سازی مستقیم

مدل‌سازی AVO به‌منظور مشخص ساختن چگونگی تغییرات دامنه با دورافت و مشخص کردن پارامترهای ایجادکننده این تغییرات صورت می‌گیرد. با کمک نگارهای موجود و با استفاده از معادله زوپریتس و ردیابی پرتو (Ray Tracing)، لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصل از چاه تولید می‌شود. به‌منظور از بین بردن اسپایک‌های شدید در نگارهای چاه‌پیمایی از یک فیلتر مدین (Median) ۳۰ استفاده شده است و همچنین نگارها در محدوده‌های ۵ متری بلوکه‌بندی می‌شوند. بعد از اینکه لرزه‌نگاشت مصنوعی اولیه ایجاد شد، بازتاب‌های مشخص روی داده لرزه‌ای واقعی و لرزه‌نگاشت مصنوعی چاه مقایسه می‌شود. بازتاب مربوط به مرز بالای ماسه‌سنگ غار که روی داده‌های لرزه‌ای به‌خاطر قطبیدگی منفی داده‌ها به‌صورت قله نمایان است، در مرز پایین‌تری نسبت به بازتاب مربوط، روی لرزه‌نگاشت مصنوعی چاه قرار دارد. برای بالا بردن ضریب همبستگی، بازتاب‌های مشخص روی لرزه‌نگاشت مصنوعی جابه‌جا می‌شود. (شکل ۳). بعد از این مرحله، موجک مناسب با روش همبستگی چاه و داده لرزه‌ای استخراج می‌شود که با استفاده از آن، لرزه‌نگاشت

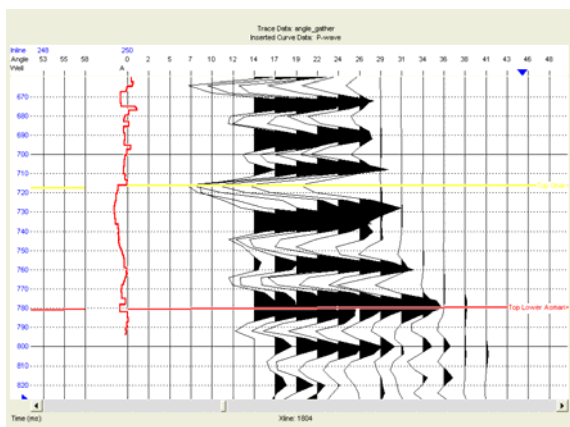
مصنوعی مجدد تولید می‌شود (شکل ۴). لرزه‌نگاشت مصنوعی در این مرحله تطابق بیشتری با داده لرزه‌ای واقعی دارد. ضریب تطابق در این مرحله به بیش از ۸۵ درصد می‌رسد (شکل ۵). با مدل‌سازی مستقیم منحنی زمان-عمق چاه تصحیح می‌شود و داده‌های لرزه‌ای و اسننجی (کالیبره) می‌شود. در ادامه، روی لرزه‌نگاشت مصنوعی ایجاد شده در مرز بالای ماسه‌سنگ غار، منحنی AVO که تغییرات ضریب بازتاب را نسبت به دورافت نشان می‌دهد، استخراج می‌شود. منحنی مربوط نشان می‌دهد که ناهنجاری AVO مرز بالای ماسه‌سنگ غار از نوع رده چهارم است؛ یعنی دارای گرادیان مثبت و تقاطع منفی است (شکل ۶). رده نوع چهارم متناظر با ماسه حاوی گاز با امپدانس صوتی کم است. دامنه‌ها در افق بالای مخزن با دورافت کم می‌شوند. شکل ۷ ناهنجاری AVO در مرز بالایی ماسه‌سنگ غار را روی CDP واقعی در محل چاه که به‌صورت تغییرات دامنه نسبت به زاویه مرتب شده است، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، روی CDP واقعی نیز دامنه‌ها با افزایش زاویه برخورد کاهش می‌یابند که این دلیلی بر ناهنجاری AVO رده نوع چهارم است. در این تصویر قطبیدگی CDP مربوط به داده لرزه‌ای واقعی در محل چاه معکوس شده است تا مرز بالای ماسه‌سنگ غار به‌صورت گودی مشخص شود. لازم به ذکر است که سرعت موج P در محدوده مخزن غار با استفاده از نگار چاه‌پیمایی حدود ۱۲۰۰ متر بر ثانیه است. همچنین بسامد غالب مربوط به موجک استخراج شده به روش همبستگی چاه و داده لرزه‌ای، حدود ۵۰ هرتز است. طول موج محاسبه شده برابر ۲۴ متر است که با توجه به ضخامت مخزن غار (حدود ۶۰ متر)، داده‌های لرزه‌ای قدرت تفکیک محدوده مخزنی را دارند.



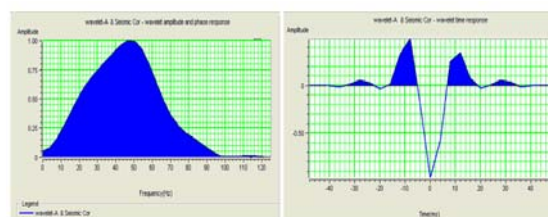
شکل ۶. منحنی AVO (Rp نسبت به دورافت) در مرز بالای سازند غار که ناهنجاری AVO رده نوع چهارم را نشان می‌دهد.



شکل ۳. جابه‌جا کردن افق‌های مشخص روی داده لرزه‌ای واقعی و لرزه‌نگاشت مصنوعی به منظور افزایش تطابق بین چاه و داده لرزه‌ای (لرزه‌نگاشت سرخ‌رنگ مربوط به داده لرزه‌ای واقعی و آبی‌رنگ مربوط به چاه است).



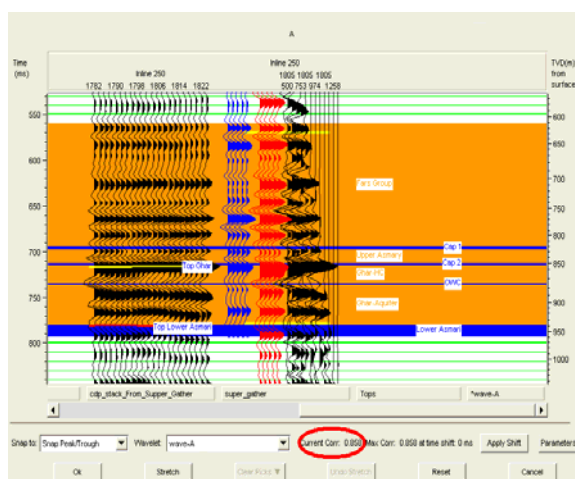
شکل ۷. نمایش داده‌های لرزه‌ای در حوزه زاویه که نشان می‌دهد، دامنه‌ها با افزایش زاویه در مرز بالای ماسه‌سنگ غار کاهش می‌یابند (ناهنجاری AVO رده نوع چهارم).



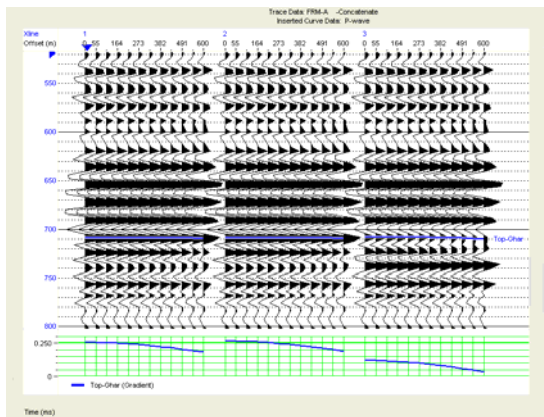
شکل ۴. موجک استخراج شده از تطابق بین چاه و داده لرزه‌ای واقعی (در حوزه زمان و بسامد).

۱۲ مدل‌سازی جانشینی شاره

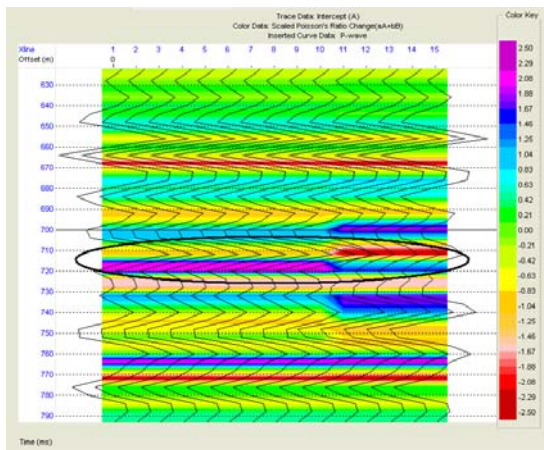
در این مرحله به منظور تأیید اینکه ناهنجاری AVO مربوط به سازند غار به خاطر شاره و بیشتر متأثر از گاز است، از مدل‌سازی جانشینی شاره در چاه مورد نظر استفاده می‌شود. به کمک مدل‌سازی جانشینی شاره بهترین نشانگرها برای تشخیص مرز بالای ماسه‌سنگ غار مشخص می‌شود. این نشانگرها تأحد زیادی به شاره درون منفذی وابسته هستند. اساس جانشینی شاره بر معادله گاسمن استوار است. برای این منظور در محدوده هیدروکربنی مخزن در محل چاه



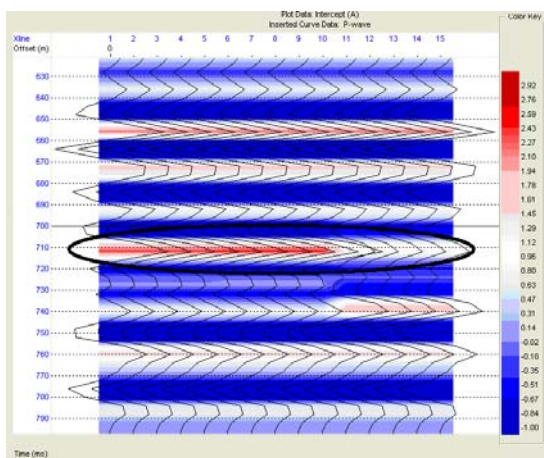
شکل ۵. تطابق ایجاد شده با ضریب تطابق بیش از ۸۵ درصد (بیضی سرخ‌رنگ) بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و داده لرزه‌ای بعد از جابه‌جایی افق‌ها و استخراج موجک مناسب از راه تطابق چاه با داده لرزه‌ای (لرزه‌نگاشت سرخ‌رنگ مربوط به داده لرزه‌ای واقعی و آبی‌رنگ مربوط به چاه است).



شکل ۸. لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی چاه در سه حالت متفاوت که بهترین از چپ به راست مربوط به حالت واقعی موجود، حالت اشباع ۸۰ درصد گاز و ۲۰ درصد آب و حالت اشباع ۱۰۰ درصد آب است. منحنی‌های زیر هر لرزه‌نگاشت تغییرات دامنه نسبت به دورافت را نشان می‌دهند.



شکل ۹. نشانگر تغییرات نسبت پواسون که نسبت به تغییر شاره حساسیت زیادی دارد.



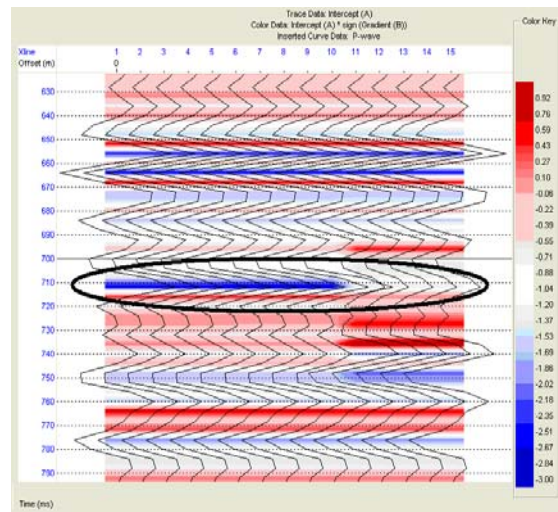
شکل ۱۰. نشانگر تقاطع که نسبت به تغییر شاره حساسیت زیادی دارد.

نگارهای سرعت موج P، سرعت موج S و چگالی در سه حالت متفاوت (حالت واقعی موجود، حالت اشباع ۱۰۰ درصد آب و حالت اشباع ۸۰ درصد گاز و ۲۰ درصد آب) محاسبه و لرزه‌نگاشت مصنوعی مربوط به سه حالت محاسبه شد. شکل ۸ CDPهای مصنوعی برای چاه را در سه حالت شاره متفاوت نشان می‌دهد. از چپ به راست به ترتیب مربوط به حالت واقعی موجود، حالت ۲۰ درصد آب و ۸۰ درصد گاز و حالت ۱۰۰ درصد آب است. منحنی‌های زیر هر CDP، تغییرات دامنه نسبت به دورافت را نشان می‌دهند. حالت واقعی موجود بسیار نزدیک به حالت ۲۰ درصد آب و ۸۰ درصد گاز است ولی با استفاده از تغییراتی که در نگار چگالی در حالت ۲۰ درصد آب و ۸۰ درصد گاز نسبت به حالت واقعی موجود ایجاد می‌شود (کاهش در چگالی)، می‌توان نتیجه گرفت که مرز بالای مخزن غار دارای گاز با درجه اشباع کمتر از ۸۰ درصد است. تغییراتی که در نگارها در حالت‌های متفاوت ایجاد می‌شود به شرح زیر است:

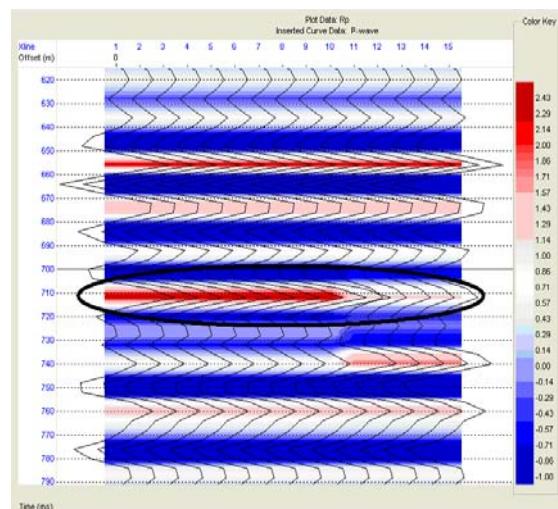
حالت ۱۰۰٪ اشباع آب: نگار موج S تغییر نکرده است، نگار موج P سرعت بیشتر و نگار چگالی نیز مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.

حالت ۲۰٪ اشباع آب و ۸۰٪ اشباع گاز: نگار موج S تغییر نکرده است، نگار موج P تغییر نکرده است و نگار چگالی مقدار کمتری را نشان می‌دهد. در ادامه نشانگرهای گوناگون روی لرزه‌نگاشت‌های حاصل از مدل‌سازی جانشینی شاره، استخراج شده است تا بهترین نشانگرها که متأثر از شاره بوده‌اند و قادر به تشخیص مرز بالایی مخزن غار هستند، مشخص شوند. از بین نشانگرهای استخراج شده، نشانگر تغییرات ضریب پواسون، نشانگر تقاطع، نشانگر حاصل ضرب تقاطع در علامت گرادیان (A*SignB) و نشانگر ضریب بازتاب موج P بیشتر متأثر از شاره بوده‌اند و مرز بالای مخزن غار را مشخص می‌کنند (شکل‌های ۹ تا ۱۲).

از بین نشانگرهای استخراج شده، نشانگر تقاطع و نشانگر تغییرات نسبت پواسون محدوده مخزن را به خوبی تشخیص می دهند. در شکل ۱۳ نشانگر تقاطع روی مقطع تقاطع نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه قطبیدگی داده های لرزه ای مورد استفاده معکوس است، نشانگرهای به دست آمده نیز دارای قطبش معکوس هستند و با اینکه مرز بالایی ماسه سنگ غار از نوع ناهنجاری AVO رده چهارم (تقاطع منفی و گرادیان مثبت) است، ولی روی مقطع تقاطع مقدار آن مثبت است که دلیل آن قطبش معکوس داده های لرزه ای است. همچنین در شکل ۱۴ مقطع تغییرات ضریب پواسون نشان داده شده که در مرز بالای مخزن غار بیشترین تغییرات را دارد و به خوبی قادر به تشخیص محدوده مخزن است. نشانگر گرادیان نیز در شکل ۱۵ نشان داده شده است که روی آن مرز بالای ماسه سنگ غار مقداری منفی است. به کمک نشانگرهای تقاطع و گرادیان می توان نوع ناهنجاری AVO را مشخص کرد. مرز بالای ماسه سنگ غار روی مقطع تقاطع، مقدار مثبت و روی مقطع گرادیان مقدار منفی دارد که با توجه به اینکه قطبیدگی داده های مورد استفاده معکوس است (موجک با قطبیدگی منفی)، روی مقاطع نرمال علامت آنها معکوس می شود (تقاطع منفی و گرادیان مثبت) که نشان دهنده ناهنجاری AVO رده چهارم است. به منظور تشخیص راحت تر ناهنجاری ها روی مقاطع نشانگرها بهتر است تا مقیاس رنگی تغییر داده شود و نقاط ناهنجار که دارای مقادیر بیشترین و یا کمترین هستند روی مقاطع بهتر نمایان شوند. شکل های ۱۶ و ۱۷ مقاطع تقاطع و گرادیان را با تغییر مقیاس رنگی نشان می دهند. روی این مقاطع مرز بالای مخزن غار راحت تر قابل تفکیک است.



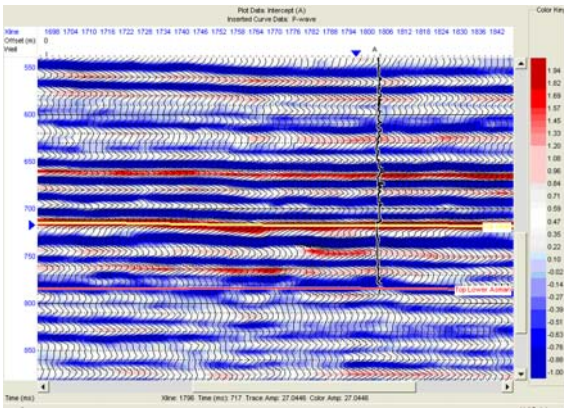
شکل ۱۱. نشانگر تقاطع در علامت گرادیان که نسبت به تغییر شاره حساسیت زیادی دارد.



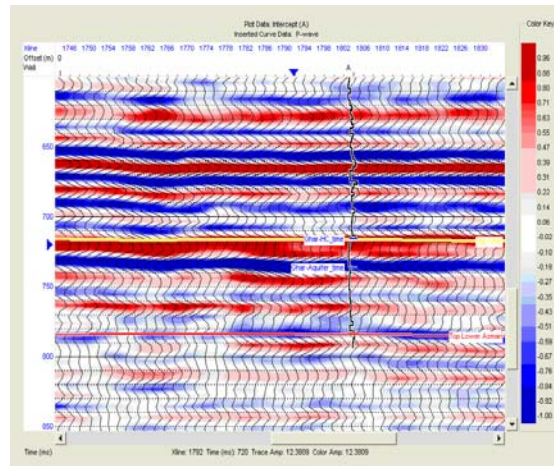
شکل ۱۲. نشانگر ضریب بازتاب موج P که نسبت به تغییر شاره حساسیت زیادی دارد.

۱۳ بررسی نشانگرهای AVO روی داده های لرزه ای

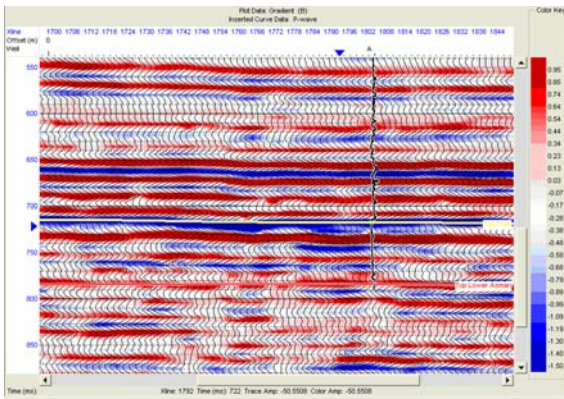
مقطع زمانی نشانگرهای AVO با استفاده از داده های لرزه ای واقعی استخراج شده است تا از آنها برای تشخیص بهتر ناهنجاری های AVO استفاده شود. از جمله این نشانگرها، گرادیان (A)، تقاطع (B)، ضریب بازتاب موج S (Rs)، ضریب بازتاب موج P (Rp) و تغییرات نسبت پواسون هستند.



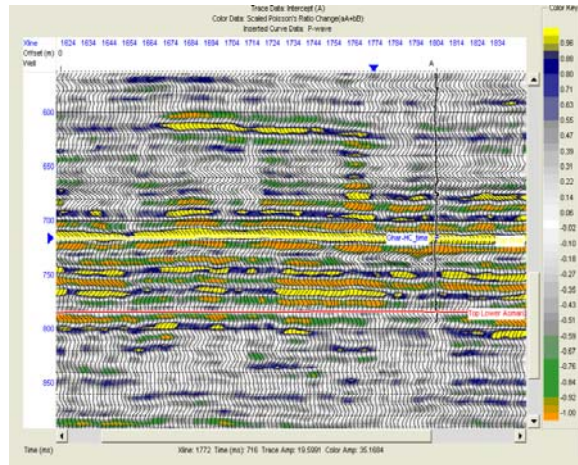
شکل ۱۶. نشانگر تقاطع در حالتی که مقیاس رنگی تغییر داده شده است.



شکل ۱۳. نشانگر تقاطع روی مقطع تقاطع.



شکل ۱۷. نشانگر گرادیان در حالتی که مقیاس رنگی تغییر داده شده است.

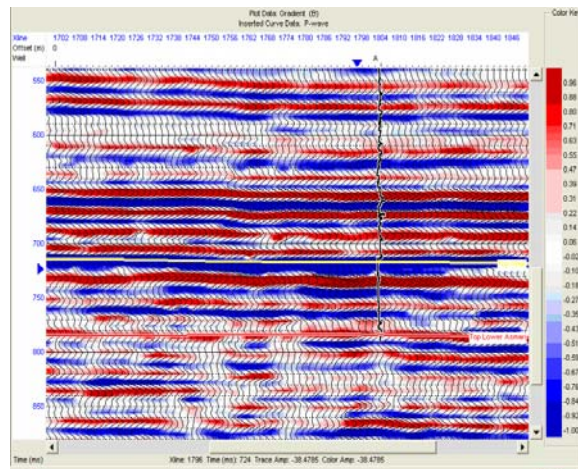


شکل ۱۴. نشانگر تغییرات نسبت پواسون روی مقطع تقاطع که محدوده مخزن و مرز بین آب و نفت را به خوبی تشخیص می‌دهد.

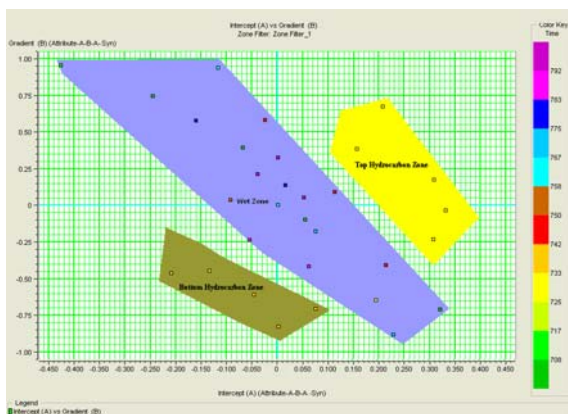
۱۴ روش کراس پلات

الف) کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان با استفاده از لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصل از چاه

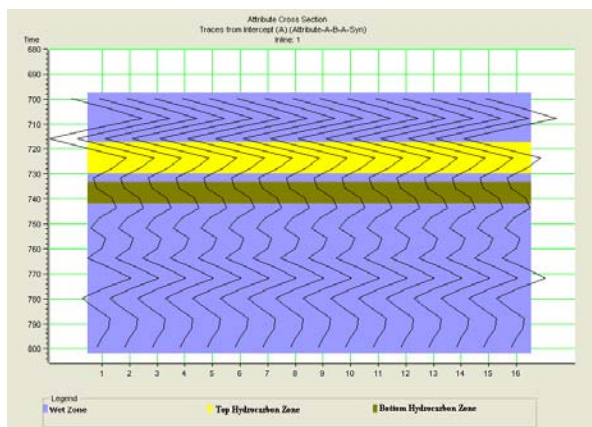
کراس پلات ناشی از داده‌های تقاطع نسبت به داده‌های گرادیان را می‌توان در تفسیر ناهنجاری‌های AVO به کار برد. این روش، ابزاری تشخیصی برای دسته‌بندی پاسخ‌های AVO و تشخیص رسوبات هیدروکربوری است. با مرتبط کردن پارامترهای فیزیک سنگ، مدل‌سازی AVO و رسم کراس پلات، می‌توان قطبیدگی ناهنجاری‌های AVO را تحلیل کرد. کراس پلات در اواخر ۱۹۹۰، بر مبنای طرح رادفورد و ویلیامز (۱۹۸۹) توسعه یافت. تحت شرایط گوناگون زمین‌شناسی، مقادیر گرادیان و تقاطع در ماسه‌های آبدار و شیل از روند مشخص زمینه‌ای پیروی



شکل ۱۵. نشانگر گرادیان روی مقطع گرادیان.



شکل ۱۸. کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان به دست آمده از لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از چاه. محدوده زرد رنگ مربوط به زون هیدروکربوری بالای مخزن، محدوده قهوه‌ای رنگ مربوط به زون هیدروکربوری پایین مخزن و بالای زون آبدسته و محدوده آبی رنگ مربوط به زون آبدار است.



شکل ۱۹: تفکیک زون‌های آبدار (رنگ آبی) و هیدروکربن دار براساس کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان به دست آمده از لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از چاه که محدوده زرد مربوط به زون هیدروکربنی بالای مخزن و محدوده قهوه‌ای مربوط به زون هیدروکربنی پایین مخزن و بالای زون آبدسته است. محدوده بین دو زون هیدروکربن دار، درحکم زون شیلی در نظر گرفته می‌شود.

ب) کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای واقعی

کراس پلات‌ها ابزار قدرتمندی برای تفکیک زون‌های گوناگون از لحاظ شاره و سنگ شناسی‌اند. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و شناسایی

می‌کند. بی‌هنجاری AVO به صورت انحراف از این روند زمینه مشخص می‌شود که ممکن است مربوط به فاکتورهای سنگ شناسی یا حضور هیدروکربن باشد.

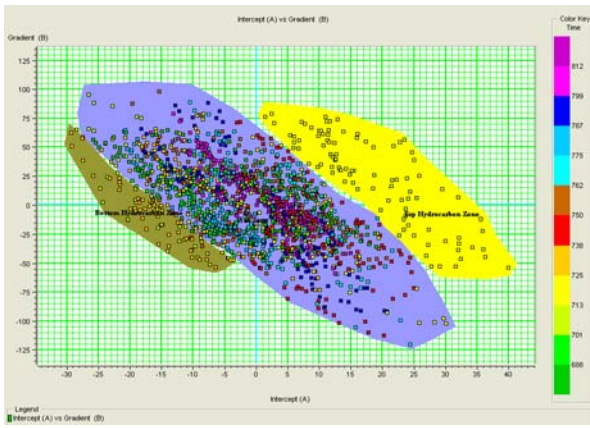
روش کراس پلات برای تفکیک شاره‌های محدوده مخزن روی داده‌های واقعی و لرزه نگاشت حاصل از چاه عملی می‌شود. روی لرزه نگاشت مصنوعی در محدوده مخزن غار، یک پنجره زمانی به ضخامت ۱۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته می‌شود تا از نقاط مربوط به این محدوده برای رسم کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان استفاده شود. شکل ۱۸ کراس پلات به دست آمده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، اکثر نقاط به دست آمده، روندی آبدار را نشان می‌دهند (در جهت ربع دوم و چهارم) و برخی نیز در ربع اول و سوم قرار گرفته‌اند که مربوط به نواحی هیدروکربنی هستند. روی کراس پلات به دست آمده محدوده آبی رنگ مربوط به نقاط آبدار، محدوده زرد رنگ مربوط به نقاط بالای مخزن که دارای هیدروکربن سبک (احتمالاً گاز) هستند و محدوده قهوه‌ای رنگ مربوط به نقاط پایین مخزن در محدوده هیدروکربوری‌اند که به احتمال زیاد مربوط به محدوده نفت‌دار هستند. قابل ذکر است که با تغییر قطبیدگی لرزه نگاشت مصنوعی، نواحی زرد رنگ و قهوه‌ای رنگ با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. با جدا کردن زون‌های متفاوت بر روی کراس پلات، می‌توان روی لرزه نگاشت مصنوعی نیز محدوده‌های تفکیک شده را نمایش داد. شکل ۱۹ زون‌های تفکیک شده را روی لرزه نگاشت مصنوعی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، بین زون‌های هیدروکربوری تفکیک شده، یک زون جداگانه وجود دارد که نقاط آن روی کراس پلات در محدوده آبی رنگ قرار گرفته است و با توجه به اینکه این زون (به علت قرارگیری بین هیدروکربور) نمی‌تواند زون آبدار باشد، درحکم زون شیلی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به لایه‌های حفاری شده در محدوده مخزن در چاه مورد بررسی (شرکت ان آی او اوسی، ۲۰۰۲).

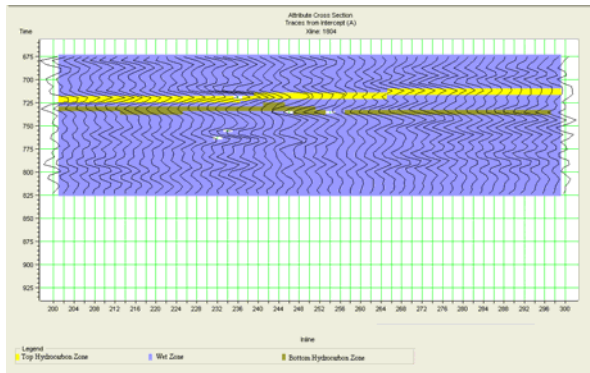
چشم	عمق از سطح دریا (متر)	ضخامت (متر)	لایه
	۶۱۲	۲۰۹	سازند گچساران
	۸۲۱	۶	پوش سنگ اول
سازند آسماری	۸۲۷	۲۴	بخش A (آسماری فوقانی)
	۸۵۱	۵	بخش B (پوش سنگ غار)
	۸۵۶	۸۴	بخش C (ماسه سنگ غار)
	۹۴۰	۲۱	بخش E (آسماری تحتانی)
			بخش D (پوش سنگ غار)

محدوده دقیق مخزنی، رسم کردن کراس پلات‌ها روی خط لزره‌ای در محدوده کراس لاین موردنظر در یک پنجره زمانی ۱۵۰ میلی ثانیه‌ای که نسبت به زمان ۷۵۰ میلی ثانیه (محدوده زمانی مرز بالای ماسه‌سنگ غار) حالت تقارن دارد، ترسیم شده است.

این کراس پلات توانایی زیادی در تفکیک محدوده مخزنی دارد. با توجه به نقاط به دست آمده، سه زون روی کراس پلات مشخص شده است که این زون‌ها روی مقطع لزره‌ای نیز تفکیک شده‌اند (شکل‌های ۲۰ و ۲۱). این زون‌ها شامل زون آبدارند روندشان در جهت نیم‌ساز ربع اول و سوم قرار دارد (ناحیه با رنگ آبی)، زون هیدروکربن دار اول که در قسمت بالای مخزن قرار دارد (ناحیه با رنگ زرد) و زون هیدروکربن دار دوم که در قسمت پایین مخزن و بالای زون آبدار قرار دارد (ناحیه با رنگ قهوه‌ای). نتایج به دست آمده از این کراس پلات کاملاً با نتایج به دست آمده از کراس پلات مربوط به لزره‌نگاشت چاه همخوانی دارد.



شکل ۲۰. کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان و تفکیک سه زون متفاوت روی آن. محدوده آبی مربوط به زون آبدار، محدوده زرد مربوط به زون هیدروکربن دار بالای مخزن و محدوده قهوه‌ای مربوط به زون هیدروکربن دار پایین مخزن است.



شکل ۲۱. تفکیک زون‌های آبدار (رنگ آبی) و هیدروکربن دار براساس کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان که مربوط به زون هیدروکربنی بالای مخزن و محدوده قهوه‌ای مربوط به زون هیدروکربنی پایین مخزن و بالای زون آبدار است. محدوده بین دو زون هیدروکربن دار، درحکم زون شیلی در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۲۱، زون‌های تفکیک شده را روی مقطع لزره‌ای نشان می‌دهد. در اینجا نیز همانند کراس پلات مربوط به چاه، بین دو زون هیدروکربن دار روی مقطع لزره‌ای، محدوده‌ای قرار گرفته است که نقاط آن روی کراس پلات در قسمت آبی‌رنگ واقع شده‌اند. از این رو این زون درحکم زون شیلی در محدوده مخزن در نظر گرفته می‌شود. این نتیجه‌گیری با اطلاعات حاصل از سنگ‌شناسی ردیف‌های حفاری شده در چاه مورد بررسی نیز مطابقت دارد (جدول ۱) (شرکت ان آی او اوسی، ۲۰۰۲).

۱۵ نتیجه گیری

هدف از تدوین این مقاله ارزیابی توانایی‌های روش AVO در ارزیابی منابع هیدروکربن در منطقه شمال غرب خلیج فارس با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از انبارش است. نتایج این تحقیق به خوبی توانایی روش AVO را در توصیف منابع هیدروکربوری آشکار می‌سازد.

بدین منظور در میدان ابوزر، با استفاده از نگاره‌های چاه، مدل‌سازی مستقیم صورت گرفت و لرزه‌نگاشت مصنوعی ایجاد گردید. با تطابق لرزه‌نگاشت ایجاد شده با داده‌های لرزه‌ای واقعی، منحنی‌های زمان-عمق چاه تصحیح و داده‌های لرزه‌ای واسنجی شد. در ادامه با تولید منحنی AVO، مشخص شد که ناهنجاری مربوط به بالای مخزن غار، از رده چهارم است.

در مرحله مدل‌سازی مستقیم، نگاره‌های چاه‌پیمایی به صورت مصنوعی با استفاده از مدل‌سازی جانیشینی شاره تولید شد و به کمک لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی و استخراج نشانگرهای متفاوت در سه حالت متفاوت شاره‌ها (حالت واقعی موجود، حالت ۲۰ درصد آب و ۸۰ درصد گاز و حالت ۱۰۰ درصد آب)، بهترین نشانگرها که متأثر از شاره و قادر به تشخیص مرز بالای مخزن غار هستند، مشخص شدند. این نشانگرها شامل: نشانگر تقاطع، نشانگر تغییرات ضریب پواسون، نشانگر ضریب بازتاب موج P و نشانگر حاصل ضرب تقاطع در علامت گرادیان هستند.

در تحقیق حاضر نشانگرهای AVO روی داده لرزه‌ای واقعی به کمک روش‌های گوناگون، بهترین نشانگرهایی که قادر به تشخیص محدوده مخزنی بودند، مشخص شدند که با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مستقیم نیز همخوانی خوبی داشتند. با کمک نشانگرهای متفاوت، کراس پلات‌های تقاطع نسبت به گرادیان در محدوده مخزن رسم شد و به کمک آنها، دو محدوده هیدروکربنی در بالا و پایین مخزن تفکیک شد که با نتایج به دست آمده

از کراس پلات گرادیان نسبت به تقاطع حاصل از لرزه‌نگاشت مصنوعی چاه در محدوده مخزن، مطابقت داشتند.

تشکر و قدردانی

با تشکر از مدیریت طرح‌های اکتشافی شرکت نفت فلات قاره ایران و به خصوص بخش پژوهش و توسعه آن شرکت که با اجرای این طرح موافقت کردند و داده‌های مورد نیاز را در اختیار قرار دادند.

منابع

- Castagna, J. P., Batzle, M. L. and Kan, T. K., 1993, Rock Physics: The Link Between Rock Properties and AVO Response, SEG. Geophysics, 135- 171.
- Castagna, J. P. and Swan, H. W., 1997, Principles of AVO Crossplotting, The Leading Edge 16(4), 337-342.
- Coulombe, C. A., 1993, Amplitude-Versus-Offset Analysis Using Vertical Seismic Profiling and Well Log Data, University of Calgary, Department of Geology and Geophysics, M.Sc. Thesis.
- Jason Geosystems (UK) Ltd. 2003, Aboozar Field 3D Seismic Interpretation, Fugro Geoscience Division.
- Russell, B. H., Hedlin, K., Hilterman, F. G. and Lines, L. R., 2001, Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective, CREWES Research Report, 13, 403-419.
- Russell, B., 2003, AVO Seismic Technology, Petroleum Technology Transfer Council (PTTC).
- Rutherford, S. R. and Williams, R. H., 1989, Amplitude Versus Offset Variation in Gas Sands, Geophysics, 54, 686-688.
- NIOOC Company, 2002, Drilling Report-Well A.