

مدلسازی AVO برای مخازن ماسه‌ای گازدار

ژیلا نوبهاری کوزه کنان^۱ و دکتر عبدالرحیم جواهریان^۲

چکیده

تحلیل AVO یکی از روشهای مطالعه کمی داده‌های لرزه‌ای است که بر روی داده‌های پیش از برانبارش صورت می‌گیرد. امروزه در تفسیر AVO از برآورد نشانگرها و ترسیم مقاطع آنها که به مقایسه دو نشانگر بطور همزمان می‌پردازد به خوبی در تعیین سنگ شناسیها و محتوای سیالی مخازن استفاده می‌شود. در این راستا، در این مقاله، با بررسی یک مدل مصنوعی کلاس II که شامل ماسه آبدار و ماسه گازدار محصور در لایه‌های شیلی می‌باشد، دو نشانگر ضریب بازتاب پواسون (PR) و ضریب بازتاب نرمال (NI) به دو روش برای تشخیص و بررسی سنگ شناسیهای هیدرو کربوری و نوع محلول مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. ابتدا با استفاده از یک کدگذاری رنگی در ترسیم مقاطع NI-PR یک مقطع لرزه‌ای رنگی تولید شده است که در آن رنگها جایگزین اعداد شده‌اند و از این طریق می‌توان به خوبی مقطع را با استفاده از رنگها بررسی کرد و به نوع کلاس AVO در هر نمونه زمانی و در هر دورافت پی برد. این روش به مفسر در تشخیص کلاس آنومالیهای AVO بطور مستقیم در زمان و مکان خاص روی مقطع لرزه‌ای کمک می‌کند. همچنین از آنجا که آنومالیهای کلاس II را نمی‌توان با استفاده از روش لکه روشن یا لکه تاریک در مقطع NI یا NI*PR بررسی کرد، با استفاده از نشانگر ترکیبی $(PR^2 - NI^2)/2$ مقطعی تولید می‌شود که آنومالیهای کلاس II را به کلاس III که غالباً بصورت لکه‌های روشن قابل شناسایی هستند تبدیل می‌نماید. بنابراین استفاده از نشانگر PR در کنار نشانگر NI نه تنها می‌تواند به تشخیص کلاس آنومالیهای AVO کمک کند بلکه در تشخیص آنومالیهای کلاس II با تبدیل آن به کلاس III، بوسیله روش لکه روشن کمک می‌کند.

کلید واژه ها: نشانگر، ترسیم مقاطع، ضریب بازتاب نرمال، ضریب بازتاب پواسون، لکه روشن.

AVO modeling for gas sand reservoir

Zh. Nobahary-Koozehkonan and Dr. A. Javaherian

Abstract

AVO analysis is a technique for studying on pre-stack seismic data. Today, estimation and cross-plotting attributes can be used to identify lithologies and pore fluids. In this paper, we study the Poisson reflectivity (PR) and the normal incident reflectivity (NI) for identifying lithologies and pore fluids. Two models are considered as a class II AVO model. They are including water-saturated sand and gas-saturated sand fenced in shale layers. First, we generated a color-coded seismic section using color coding method in NI-PR cross-plot that colors replace the numbers. In this way, we can indicate that the AVO clustering in each time sample and each offset. This technique directly helps to commentator to distinct the AVO class anomalies in special time and location on a stack section. We noticed that the bright spot or the dim spot technique is not successful to infer the class II in NI or NI*PR section. But the $(PR^2 - NI^2)/2$ attribute generates a section that class II AVO anomalies is mapped as class III AVO anomalies and class III will be associated with the bright spot. Therefore, PR attribute besides NI attribute can be useful to indicate class II AVO anomalies by mapping in class III and the bright spot in a seismic section.

Keywords: groundwater Attributes, Cross-plots, Normal reflection coefficient, Poisson reflection coefficient, Bright spot.

^۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال gninbox@yahoo.com

^۲ - استاد گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران javaheri@ut.ac.ir

مقدمه

از سال ۱۹۳۰ اکتشاف هیدروکربورها بوسیله روش لرزه‌بازتابی حکمفرما بوده است. قدرت تفکیک بالای داده‌ها، نمونه‌گیری پیوسته و هزینه پایین نسبت به حفاری، این روش را یک قسمت ضروری از اکتشاف نفت و گاز ساخته است. به دلیل متفاوت بودن خاصیت موج تراکمی از موج برشی و اثرات متفاوتی که این دو موج بر خواص کشتان سنگ دارند و همچنین به منظور کاهش هزینه‌ها محققین کوشش خود را بر آن داشتند که با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری معمولی (لرزه‌نگاری ای که فقط موج تراکمی برداشت می‌شود) اطلاعات موج برشی را استخراج نمایند و آن را به صورت نشانگرهای جدید لرزه‌ای بکار گیرند.

امروزه استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای متنوعی در تخمین خواص مخزنی و تفسیر لرزه‌ای و بررسی تاریخ تولید و به تصویر کشیدن حرکت سیالات مخزنی متداول گشته‌است و استفاده همزمان چند نشانگر لرزه‌ای مناسب می‌تواند بسیار کارآمد باشد. نشانگرهای لرزه‌ای توانمند می‌تواند به طور مستقیم به پدیده‌های زمین‌شناسی و خواص میدان حساسیت نشان دهد و در بازسازی ساختمان محیط رسوبی یک میدان کمک نماید. نشانگرهای لرزه‌ای به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند: نشانگرهای پیش از برانبارش و نشانگرهای پس از برانبارش. یک دسته از نشانگرهای پیش از برانبارش آنهایی هستند که با توجه به تغییرات دامنه و فاز بازتابهای لرزه‌ای نسبت به فاصله فرستنده و گیرنده بدست می‌آیند. این روش که تحت عنوان تغییرات دامنه با دورافت معروف می‌باشد در ابتدا توسط استراندر (۱۹۸۴) ارائه شد. او نشان داد که حضور گاز در ماسه سنگ احاطه شده توسط شیل بدلیل تغییرات نسبت پواسون موجب تغییر قابل ملاحظه دامنه موج بازتابیده لرزه‌ای در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش می‌گردد. در این مقاله، به معرفی نشانگر *PR* (ضریب بازتاب پواسون) پرداخته می‌شود و از آن به عنوان یک نشانگر ترکیبی در کنار نشانگر

NI (ضریب بازتاب نرمال) جهت تشخیص سنگ‌شناسی‌ها و آنومالیهای AVO مخصوصاً نوع کلاس II پرداخته می‌شود.

کوفود (۱۹۶۲) اولین کسی بود که تغییرات ضرایب بازتاب با زاویه فرود را ناشی از تفاوت نسبت پواسون در عرض یک بازتابنده دانست. اگرچه کوفود پیش‌بینی نمود که تغییرات ضرایب بازتاب با زاویه فرود ممکن است برای پیشگویی سنگ‌شناسی بکار رود ولی او پیش‌بینی نمی‌کرد که کار او رهیافتی برای اکتشاف مستقیم هیدروکربور باشد. شاید بخاطر اینکه اندازه‌گیریهای سرعت سنگ که تغییر نسبت پواسون را برای سنگهای پرشده از گاز نشان داده‌اند، هنوز در دسترس نبود (دومینکو ۱۹۷۴، ۱۹۷۶، ۱۹۷۷ و گریگوری ۱۹۷۶). بیوت (۱۹۵۶) تئوری انتشار امواج کشتان در یک لایه متخلخل را بسط داد. با ترکیب این نتایج پیشگوییهای مقدار سرعتهای موج تراکمی و موج برشی سنگهای متخلخل در مقادیر مختلف اشباع گاز امکانپذیر شد. وجود درصد کمی گاز در یک سنگ متخلخل مثل ماسه سنگ، سرعت موج تراکمی سنگ را کاهش می‌دهد، در حالیکه سرعت موج برشی در اشباع گاز بیشتر کمی افزایش می‌یابد. پیشگوییهای نظری مقدار سرعت‌ها با کارهای آزمایشگاهی گریگوری (۱۹۷۶) و دومینکو (۱۹۷۴)، (۱۹۷۶، ۱۹۷۷) مطابقت داشت و نشان داد که سرعتهای موج تراکمی و موج برشی با تغییر در اشباع منفذی تأثیرات مختلفی می‌پذیرد.

نشانگر *PR*

محققان توانسته‌اند تقریبهای متعددی را برای نشان دادن رابطه ضریب بازتاب با زاویه تابش بدست آورند، از جمله تقریب شوی (۱۹۸۵) که مطابق رابطه (۱) می‌باشد.

(۱)

$\Delta\sigma$ مطابق رابطه (۵) تفاضل نسبت‌های پواسون دو محیط می باشد.

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \quad (۵)$$

که σ_1 و σ_2 به ترتیب ضریب پواسون محیط اول و دوم می باشد.

رابطه (۳) با جداسازی NI و $\Delta\sigma$ بصورت رابطه (۶) نوشته می شود.

$$RC(\theta) \cong NI \left[1 - 4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2(\theta) \right] + \left[\frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma_{avg})^2} \right] \sin^2(\theta) + \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{avg}} \right) \left[\tan^2(\theta) - 4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2(\theta) \right]. \quad (۶)$$

اگر نسبت سرعت موج برشی (V_s) به سرعت موج تراکمی (V_p) برابر ۰/۵ باشد، در زوایای کمتر از ۳۰ درجه، می توان از جمله آخر صرف نظر کرد و رابطه (۶) را بصورت رابطه (۷) نوشت.

$$RC(\theta) = NI \cos^2 \theta + PR \sin^2 \theta, \quad (۷)$$

که در این رابطه، نشانگر PR به عنوان ضریب بازتابندگی پواسون بصورت رابطه (۸) معرفی می شود.

$$PR = \frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma_{avg})^2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{(1 - \sigma_{avg})^2}. \quad (۸)$$

زون بندی نمودار $PR = NI$

با ترسیم مقاطع مقادیر ردلرزه های NI و PR برای نمونه های زمانی مختلف همانطور که در ترسیم مقاطع شیو و عرض از مبدأ انجام می شود، می توان کلاسهای مختلف AVO را که مربوط به

$$RC(\theta) = \frac{1}{2} \left[1 - 4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2} \sec^2 \theta \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta,$$

که V_s و V_p به ترتیب میانگین سرعت موج تراکمی و میانگین سرعت موج برشی، θ زاویه تابش، ρ چگالی میانگین و $\Delta\rho$ تفاضل چگالیهای دو محیط طرفین سطح بازتابنده می باشد. تقریب شوی دارای این فایده است که یک رابطه ساده بین خواص سنگ مثل تغییرات نسبت پواسون و زاویه فرود و تغییرات ضرایب بازتاب را بدست می دهد و اهمیت نسبت پواسون به عنوان تعیین پاسخ AVO یک بازتاب را بیان می کند. این رابطه را با تعریف ضریب بازتاب نرمال به صورت رابطه (۲) می توان به صورت رابطه (۳) نوشت.

$$NI = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}}, \quad (۲)$$

ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی محیط اول و دوم، V_{p1} و V_{p2} به ترتیب سرعت موج تراکمی محیط اول و دوم هستند.

(۳)

$$RC(\theta) = NI + \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} \right) \left[1 - \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \right] - 4NI \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 + \frac{\Delta\sigma}{(1 - \sigma_{avg})^2} \right\} \sin^2(\theta) + \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{avg}} \right) (\tan^2(\theta) - \sin^2(\theta)),$$

σ_{avg} ضریب پواسون میانگین دو محیط می باشد و از رابطه (۴) محاسبه می شود.

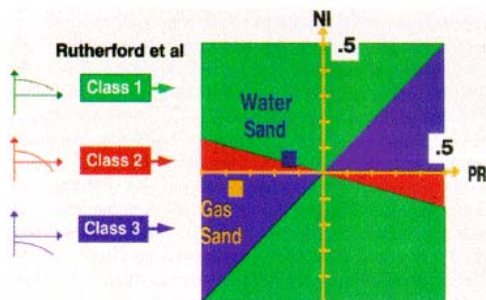
$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (۴)$$

با محاسبه ضریب بازتابندگی NI و PR برای هر یک از محیطها می‌توان نوشت:

$$\text{شیل / ماسه آبدار: } NI = +0.04 \text{ و } PR = -0.13$$

$$\text{شیل / ماسه گازدار: } NI = -0.04 \text{ و } PR = -0.37$$

با توجه به مقادیر این نقاط که در شکل ۱ به ترتیب بوسیله دو مربع کوچک به رنگ بنفش و زرد مشخص شده است، مشهود است که فاصله دامنه‌ای NI بین دو نقطه -0.08 می‌باشد، $(-0.04 - 0.04 = -0.08)$ ، ولی فاصله $NI - PR$ مربوط به دو نقطه فوق 0.25 است یعنی در حدود سه برابر فاصله عمودی آنها. بنابراین استفاده ترکیبی دو نشانگر می‌تواند به تفکیک بهتر مرزهای سنگ‌شناسی کمک کند. حال سوال این است که چطور می‌توان از این دو نشانگر برای تولید یک مقطع لرزه‌ای مجرد استفاده کرد؟ چطور می‌توان بوسیله این دو نشانگر کلاسه‌های مختلف را به راحتی در یک مقطع مجزا تعریف کرد؟ آیا هدف نهایی مقطع $PR * NI$ می‌باشد یا مقطع دیگری را می‌توان تولید کرد؟



شکل ۱. ترسیم متقاطع $NI - PR$ و زون بندی کلاسه‌های AVO بصورت محدوده‌های رنگی جداگانه مشخص شده است و نشان داده شده است که هر محدوده مربوط به کدام AVO کلاس می‌شود (ورم و هیلترمن، ۱۹۹۵).

ترسیم متقاطع نشانگرهای NI و PR

اصول استخراج نشانگرها از هر CDP توسط محققین زیادی بحث شده است. از جمله اسمیت و گیدلو (۱۹۸۷) که به بیان روش برانبارش وزنی که به معنی تبدیل اطلاعات پیش از برانبارش به ردلرزه نشانگرهای

سنگ‌شناسی‌های مختلف می‌شوند، بدست آورد. نمودار $NI - PR$ توسط هیلترمن (۱۹۸۷) برای کلاسه‌های مختلف آنومالیهای AVO زون بندی شده است. این نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل صفحه نمودار $NI - PR$ به سه منطقه تقسیم شده است که هر محدوده با یک رنگ خاص مشخص شده است. هر کدام از این سه محدوده مربوط به یک کلاس از آنومالیهای AVO می‌شود. در سمت چپ شکل ۱ تقسیم بندی راترفورد و ویلیام (۱۹۸۹) نشان داده شده است که نشان می‌دهد هر محدوده با کدام کلاس AVO مرتبط می‌باشد. خطوطی که محدوده کلاسه‌ها را در شکل ۱ از هم جدا می‌کند توسط هیلترمن (۱۹۸۷) بصورت زیر مشخص شده است.

AVO Condition	Equation	Line
Constant amplitude with offset	$RC(0^\circ) = RC(30^\circ)$	$NI = PR$
Far trace changes phase	$RC(30^\circ) = 0$	$NI = -PR/3$
Magnitude increases with offset if $PR \neq 0$	$NI = 0$	PR axis

غالباً آنومالیهای کلاس I مربوط به لکه‌های تاریک و آنومالیهای کلاس III مربوط به لکه‌های روشن می‌شود. همانطور که مشهود است با نفوذ گاز در فضاها تخلخل ضریب بازتاب NI کاهش می‌یابد و بطور همزمان ضریب بازتاب PR هم کاهش می‌یابد. سمت راست شکل ۱ مربوط به توالیهای معکوس نسبت به سمت چپ نمودار می‌باشند. از مزایای این ترسیم، تفکیک بیشتر نقاط می‌باشد. برای روشن شدن مطلب دو ساختار سنگ‌شناسی که یکی شامل شیل / ماسه آبدار و دیگری شامل شیل / ماسه گازدار می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. اگر سرعت موج تراکمی و چگالی و نسبت پواسون برای هر یک از محیطها به ترتیب بصورت زیر باشد،

$$\text{شیل: } (0.36, 2.33 \text{ gr/cm}^3, 2940 \text{ m/s})$$

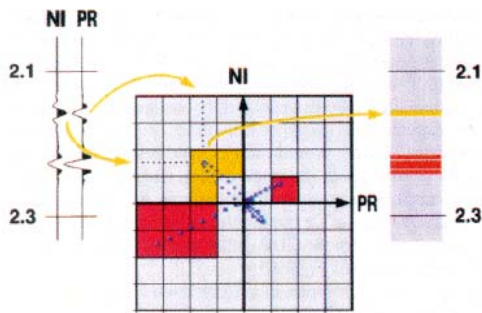
$$\text{ماسه آبدار: } (0.3, 2.26 \text{ gr/cm}^3, 3030 \text{ m/s})$$

$$\text{ماسه گازدار: } (0.12, 2.96 \text{ gr/cm}^3, 2960 \text{ m/s})$$

(۰/۱۶)

PR در این نمودار مشخص می‌شوند بطوریکه زون مربوط به هر نقطه نشانگر نوع کلاس آن آنومالی خواهد بود. سپس با استفاده از یک الگوریتم برگشتی کد رنگ مربوط به آن زونی که هر نقطه در آن قرار گرفته به زمان و مکان آن نقطه روی مقطع برگردانده می‌شود و آن نقطه به رنگ زون مربوطه رنگ می‌شود. بنابراین در انتها یک مقطع

تمام رنگی بوجود خواهد آمد که به خوبی مرزهای سنگ‌شناسی و کلاس مربوط به آن را بر حسب زمان و مکان نشان می‌دهد و بر مدل سنگ‌شناسی منطبق می‌باشد. از این روش برای شناسایی داده‌های لرزه‌ای از هر کلاسی می‌توان استفاده کرد.



شکل ۲. ترسیم مقاطع مقادیر نشانگرهای NI و PR که بوسیله یک کلید رنگ که نشان دهنده زمان مربوط به هر نمونه زمانی می‌باشد مشخص شده است (ورم و هیلترمن، ۱۹۹۵).

این مقاله روی یک مدل مصنوعی سه لایه‌ای انجام شده است که در ادامه به توضیح تفصیلی آن پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که کلیه مراحل کار، بوسیله نرم افزار *Matlab* کدنویسی شده است. مدل مصنوعی‌ای که برای بررسی این روش در نظر گرفته شده است یک مدل سه لایه افقی مطابق شکل ۳ می‌باشد. لایه بالایی و لایه پایینی از شیل و لایه میانی از ماسه آبدار و ماسه گازدار تشکیل شده است بطوریکه لایه گازدار میان لایه آبدار قرار گرفته است. از آنجا که شکل ۳ بر اساس زمان نشان داده شده است یک افتادگی در مرز پایینی ماسه گازدار دیده می‌شود که به علت کمتر بودن سرعت موج

AVO بر حسب زمان می‌باشد پرداخته است. بعد از اینکه ردلرزه NI و PR به ازای هر CDP بدست آمد، می‌توان با محاسبه دامنه این ردلرزه‌ها به ازای نمونه‌های زمانی مختلف، نقاط NI - PR مربوط به هر CDP را بدست آورد و در نمودار ترسیم مقاطع NI - PR مشخص کرد.

برای تشخیص زمانی نقاط در ترسیم مقاطع می‌بایست از روش مکملی برای تفکیک زمانی نقاط استفاده کرد، بهترین روش، استفاده از یک کلید رنگ در کنار نمودار می‌باشد، بطوریکه برای زمان، یک طیف رنگی اختصاص داده شود تا نقاط مربوط به هر زمان خاص با یک رنگ مجزا نمایش داده شوند. برای مثال در شکل ۲ نقطه اوج موجک NI، مقداری مثبت و نقطه اوج موجک PR، مقداری منفی دارد، بنابراین در ربع دوم نمودار علامت زده می‌شود. رنگی که هر نقطه با آن نمایش داده شده است نشانگر نمونه زمانی مربوط به آن نقطه می‌باشد. نقطه مرکز شکل ۲ مربوط به ضرایب بازتابندگی صفر یعنی نقاطی که در آن خصوصیات سنگ‌شناسی تغییر نمی‌کند می‌باشد. با ترسیم مقاطع نشانگرهای مربوط به هر CDP می‌توان به ازای هر کدام یک نمودار ترسیم مقاطع داشت که اگر این نمودارها روی بعد سوم که دورافت می‌باشد روی هم سوار شوند مکعبی بدست می‌آید که هر برش عرضی آن مربوط به یک دورافت خاص می‌باشد.

کدگذاری رنگی در ترسیم مقاطع

با استفاده از ترسیم مقاطع نشانگرهای NI و PR می‌توان به یک مقطع رنگی دست یافت، که در آن رنگها معرف مرزهای سنگ‌شناسی می‌باشد. در این روش، ابتدا با استفاده از داده‌های چاه‌های موجود در منطقه، یک زون بندی بر اساس کلاسه‌های آنومالی‌های موجود در منطقه انجام می‌شود و به هر زون منحصرأ یک رنگ اختصاص داده می‌شود. در مرحله بعد مطابق آنچه که قبلاً توضیح داده شد نقاط حاصل از ترسیم مقاطع نشانگرهای NI و

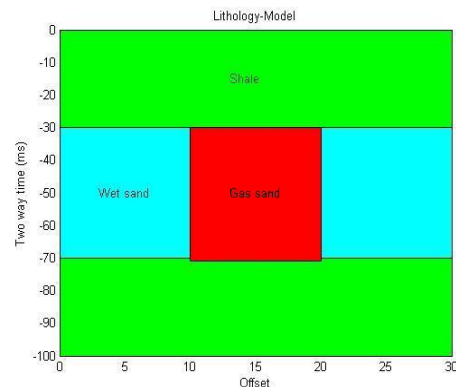
هیدروکربورها بسیار کمک کند و تشخیص را برای مفسر آسان سازد. ترسیم متقاطع $NI - PR$ مربوط به این مقطع، مطابق شکل ۵ می‌باشد. این ترسیم روی زون بندی هیلترن انجام شده است. در این زون بندی کلاس I آنومالیهای AVO که مربوط به لکه های تاریک می شود با رنگ آبی مشخص شده است. کلاس III آنومالیهای AVO که غالباً مربوط به لکه های روشن می باشد با رنگ زرد مشخص شده است و کلاس II آنومالیهای AVO با رنگ قرمز و صورتی مشخص شده است، که رنگ صورتی مربوط به ساختارهای معکوس یعنی ماسه گازدار/ شیل می باشد، در حالیکه رنگ قرمز مربوط به ساختارهای شیل/ ماسه گازدار می باشد. در نهایت مقطع رنگی شکل ۶ بدست آمده است.

نکته مهم در این است که در این مقطع رنگها مبین ضرایب بازتابندگی می‌باشد و همانطور که قابل مشاهده می‌باشد زمانها و مکانهایی که تغییر سنگ‌شناسی یا به عبارتی مرز بین محیطها وجود ندارد به رنگ سبز درآمده که مربوط به ضریب بازتاب نرمال صفر و ضریب بازتاب پواسون صفر می‌شود. با مقایسه شکل ۶ و مدل شکل ۳ و زون بندی شکل ۵ پیداست که مقطع رنگی کدگذاری شده کاملاً بر هم منطبق‌اند و رنگ قرمز وجود آنومالی کلاس II را در دورافت ۱۰ تا ۲۰ و نمونه زمانی ۳۰ و ۷۱ به خوبی نشان می‌دهد. همچنین رنگ آبی وجود آنومالی کلاس I را در نمونه زمانی ۳۰ و ۷۰ در دور افتهای صفر تا ۱۰ و ۲۰ تا ۳۰ نشان می‌دهد.

نشانهگر $(PR^2 - NI^2)/2$

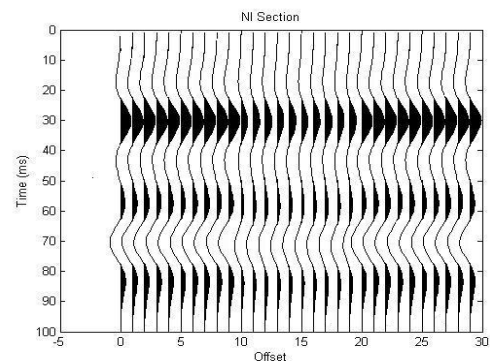
مطابق آنچه که قبلاً گفته شد شاخصه تشخیص کلاس II این است که افزایش دامنه قابل تشخیص نیست و نیز در مقاطع برانبارش با

تراکمی در لایه‌های گازدار نسبت به لایه‌های آبدار می‌باشد.



شکل ۳. مدل مصنوعی سه لایه مورد بررسی در این مقاله (نویهاری کوزه کنان، ۱۳۸۸).

با در نظر گرفتن یک سری مقادیر اولیه برای سرعت موج تراکمی و چگالی و ضریب پواسون برای سه محیط فوق که می‌تواند مربوط به هر کلاسی باشد یک مقطع لرزه ای مطابق آنچه که در شکل ۴ دیده می شود بدست آمده است. در اینجا سرعت موج تراکمی و چگالی و ضریب پواسون برای محیط شیل به ترتیب 2550 m/s ، 2.33 gr/cm^3 ، و 0.35 و برای ماسه آبدار به ترتیب 3030 m/s ، 2.14 gr/cm^3 ، و 0.32 و برای ماسه گازدار به ترتیب 2960 m/s ، 2.12 gr/cm^3 ، و 0.19 در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. مقطع لرزه ای مربوط به ضریب بازتاب نرمال مدل مصنوعی مورد نظر.

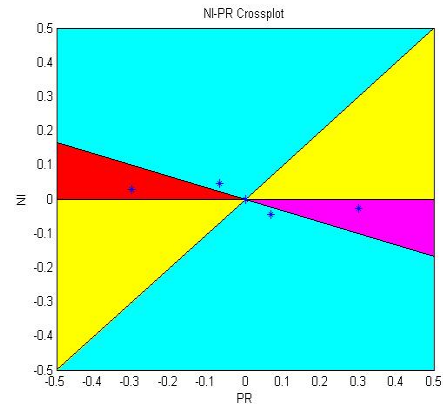
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود دامنه بازتاب در مرز ماسه گازدار کمی کاهش می‌یابد اما این کاهش دامنه بسیار ناچیز می‌باشد و در مدل‌های واقعی به دلیل ازدیاد نمونه‌های زمانی چندان قابل تشخیص نیست، به همین دلیل استفاده از رنگ می‌تواند به تشخیص مرزهای

می شود. مقطع ضریب بازتاب نرمال مربوط به این مدل، در شکل ۳ نشان داده شد. در برنامه نویسی مربوط به این مقطع ورودی‌های چگالی و سرعت موج تراکمی و نسبت پواسون به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که آنومالی حاصله در کلاس II می‌گنجد. همانطور که در مقطع پیداست تغییرات دامنه مرز شیل / ماسه آبدار و شیل / ماسه گازدار چندان مشهود نیست و مرز نه به صورت لکه تاریک و نه بصورت لکه روشن قابل توجه نیست.

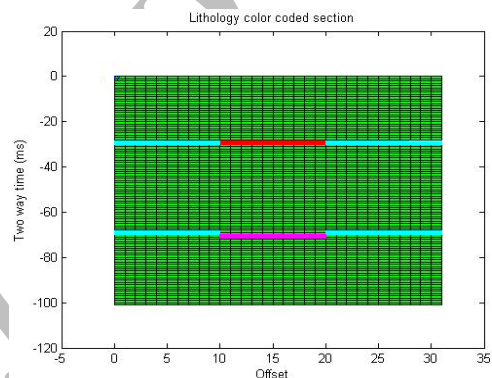
غالباً روش معمول برای نشان دادن بازتابندگی‌ها، استفاده از نشانگر ترکیبی حاصلضرب دو نشانگر می‌باشد. کاستاگنا و اسمیت (۱۹۹۴) نشان داد که چطور می‌توان با استفاده از نشانگر ترکیبی $PR * NI$ ، کلاس II و کلاس I آنومالیهای AVO را از هم تفکیک کرد.

مقطع $PR * NI$ مربوط به این مدل مصنوعی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این مقطع هم نمی‌توان مرزهای سنگ‌شناسی هیدروکربوری کلاس II را به خوبی از هم تشخیص داد. دامنه بسیار ضعیف می‌باشد و چیزی به نفع لکه روشن یا لکه تاریک دیده نمی‌شود.

اما آنچه که مورد سوال قرار می‌گیرد، علت ناکارآمدی نشانگر $PR * NI$ برای تشخیص آنومالیهای کلاس II می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شود. غالباً اگر مقادیر معمول NI و PR مربوط به شیل، ماسه آبدار و ماسه گازدار بوسیله داده‌های چاههای موجود در میدان بصورت ترسیم مقاطع رسم شود، زونهای این ساختارهای سنگ‌شناسی بصورت شکل ۸، قسمت سمت چپ، بدست می‌آید (ورم و هیلترمن، ۱۹۹۵). در سمت راست شکل ۸ زونهای شیل، ماسه آبدار و ماسه گازدار نشان داده شده است بطوریکه به اندازه ۴۵ درجه نسبت به سمت چپ شکل ۸ که موقعیت زونها را بطور رایج نشان می‌دهد دوران داده شده است. در شکل ۸ منحنی های $PR * NI$ به ازای مقادیر مختلف رسم شده است. همانطور که مشهود است که هر یک از این منحنی‌ها که منحصراً مقدار ثابتی دارند از هر سه زون شیل، ماسه آبدار



شکل ۵. ترسیم مقاطع ضرایب بازتاب NI و PR مدل مصنوعی مورد نظر در زون بندی ورم و هیلترمن (۱۹۹۵).



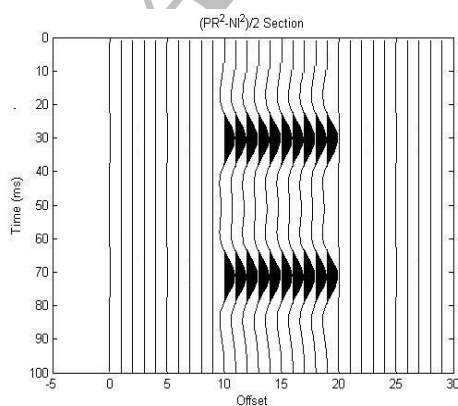
شکل ۶. مقطع کدگذاری شده رنگی مدل مصنوعی مورد نظر. هر رنگ در هر نمونه زمانی و دورافت مربوط به آن نشان دهنده این است که ضریب بازتاب NI و PR مربوط به آن نقطه در کدام کلاس در زون بندی هیلترمن قرار گرفته است.

دامنه بازتاب پایین دیده می‌شود. کلاس II شامل دو زیر مجموعه می‌باشد. یک دسته شامل آنهایی می‌شود که دچار تغییر فاز می‌شوند، بطوریکه ابتدا با افزایش دورافت، دامنه بازتاب کاهش می‌یابد تا اینکه بعد از تغییر فاز دوباره مقادیر دامنه با پلاریته منفی افزایش می‌یابد و دسته دیگر مربوط به ضرایب بازتاب نرمال کوچک و منفی است که دامنه با افزایش دورافت بیشتر می‌شود.

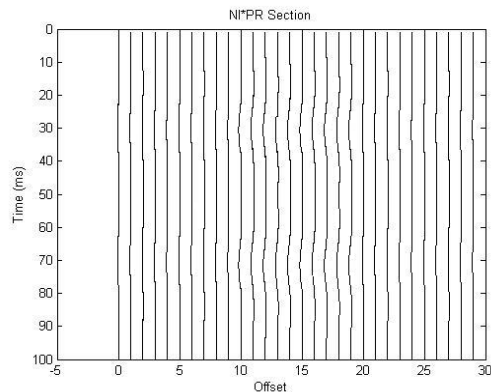
لرزه نگاشت‌های مصنوعی با فرود نرمال برای توصیف پاسخهای کلاس II در مقطع برانبارش مناسب نیستند چراکه اگر دورافت مناسبی وجود داشته باشد ممکن است در مقاطع برانبارش تغییرات غیر معمول کوچک دامنه دیده شود که با لکه روشن یا تاریک قابل توجه نباشند. برای نشان دادن این مطلب، یک مدل مصنوعی سه لایه ای نظیر آنچه که در شکل ۳ نشان داده شد، در نظر گرفته

ماسه آبدار را کوچک و دامنه مربوط به مرز ماسه گازدار را به شکلی تقویت می‌کند که بصورت لکه روشن دیده می‌شود. به عبارتی این نشانگر توانسته است آنومالی کلاس II را به کلاس III تبدیل کند و نشانگر بسیار مناسبی برای تشخیص سنگ‌شناسی‌های هیدروکربوری کلاس II باشد. همچنین مرز پایینی یعنی مرز ماسه گازدار/ شیل نیز به خوبی مشخص و تفکیک شده است. در زیر به آنچه که موجب رهیافتی به این نشانگر می‌شود توضیح داده می‌شود.

با رسم منحنی‌های مربوط به مقادیر ثابتی از PR' و NI' می‌توان دید که هر یک از منحنی‌ها از یک زون بخصوص عبور می‌کند، به عبارتی زونهای شیل، ماسه آبدار و ماسه گازدار مقادیر مشترک NI' و PR' ندارند، و البته باز می‌توان مشاهده کرد که منحنی‌ای از NI' و PR' که مربوط به مقدار بیشتری از حاصلضرب NI' و PR' می‌شود، از زون ماسه گازدار عبور می‌کند. بنابراین در مقطع NI' و PR' دامنه مرز ماسه گازدار بزرگتر دیده می‌شود و در نتیجه این مقطع می‌تواند نشانگر ماسه گازدار بصورت لکه روشن باشد. اما آنچه که در اینجا سوال است این است که رابطه مقطع NI' و PR' با مقطع NI' چگونه است؟ با استفاده از روابط مثلثاتی به خوبی می‌توان اثبات کرد که مقطع NI' و PR' ، همان مقطع $(PR^2 - NI^2)/2$ می‌باشد.

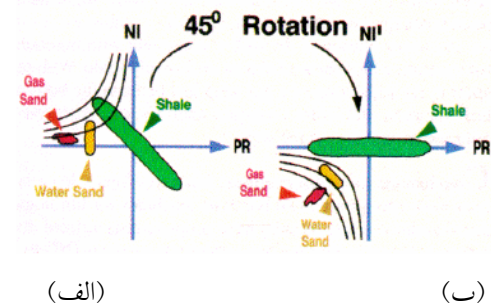


و ماسه گازدار عبور می‌کند. بنابراین این مطلب می‌تواند نشان دهنده این مهم باشد که هر سه ساختار می‌توانند مقادیر مشترک $PR * NI$ داشته باشند و به همین دلیل است که مقطع نشانگر $PR * NI$ نمی‌تواند به خوبی در تشخیص آنومالیهای کلاس II موثر باشد.



شکل ۷. مقطع مربوط به نشانگر ترکیبی $PR * NI$ مدل

مصنوعی مورد نظر. همانطور که مشهود است دامنه بازتاب بسیار ضعیف می‌باشد و چیزی به نفع لکه روشن یا لکه تاریک در این مقطع قابل مشاهده نیست.



شکل ۸. (الف) زونهای مربوط به شیل و ماسه آبدار و ماسه گازدار نسبت به هم تقریباً اینگونه قرار می‌گیرد. (ب) زونهای مربوط به شیل و ماسه آبدار و ماسه گازدار بعد از دوران ۴۵ درجه را نشان می‌دهد (ورم و هیلترمن، ۱۹۹۵).

اما آنچه که در ادامه این مقاله پیشنهاد می‌شود استفاده از نشانگر $(PR^2 - NI^2)/2$ به جای نشانگر $PR * NI$ برای تشخیص آنومالیهای کلاس II می‌باشد. مقطع نشانگر ترکیبی $(PR^2 - NI^2)/2$ در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل فوق دیده می‌شود در مرز شیل/ ماسه گازدار یک لکه روشن دیده می‌شود بطوریکه کاملاً بر مدل سنگ‌شناسی شکل ۳ منطبق می‌شود. این نشانگر توانسته دامنه مربوط به مرز

- and II: J. Acoust. Soc. Am., **28**, 168-191.
- Castagna, J. P., and Smith, S.W., 1994, Comparison of AVO indicators: A modeling study: Geophysics, **59**, 1849-1855.
 - Domenico, S. N., 1974, Effect of water saturation on seismic reflectivity of sand reservoirs encased in shale: Geophysics, **39**, 759-769.
 - Domenico, S. N., 1976, Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir: Geophysics, **41**, 882-894.
 - Domenico, S. N., 1977, Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs: Geophysics, **42**, 1339-1368.
 - Gregory, A. R., 1976, Fluid saturation effects on dynamic elastic properties of sedimentary rocks: Geophysics, **41**, 895-921.
 - Hiltebert, F., 1987, Seismic lithology: Unpublished course notes: Soc. Expl. Geophys.
 - Koefoed, O., 1962, Reflection and transmission coefficients for plane longitudinal incident waves: Geophys. Prosp., **10**, 304-351.
 - Ostrander, W. J., 1984, Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incident: Geophysics, **49**, 1637-1648.
 - Rutherford, S. R., and Williams, R. H., 1989, Amplitude versus offset variation in gas sands: Geophysics, **54**, 680-688.
 - Shuey, R. T., 1985, A simplification of the Zoeppritz equations: Geophysics, **50**, 609-614.
 - Smith, ZG. C., and Gidlow, P. M., 1987, Weighted stacking from rock property estimation and detection of gas: Geophys. Prosp., **35**, 993-1014.
 - Verm, R. y Hiltebert, F., 1995, Lithology color-coded seismic sections the calibration of AVO crossplotting to rock properties, The Leading Edge, **14**, 8, 847-853..

شکل ۹. مقطع مربوط به نشانگر ترکیبی $(PR^2 - NI^2)/2$ مدل مصنوعی مورد نظر. در این مقطع، به خوبی مرز محدوده گازدار بصورت یک لکه روشن نمایان است.

نتیجه گیری

آنچه که از این بررسی حاصل می شود این است که با استفاده همزمان نشانگرهای NI و PR بصورت ترسیم متقاطع، می توان به یک مقطع رنگی دست یافت که در آن رنگها جایگزین اعداد شده اند. رنگها در مقطع رنگی حاصله، نشان دهنده ضرایب بازتاب نرمال و پواسون می باشند. از این طریق به خوبی می توان مقطع را با استفاده از رنگها بررسی کرد و با دیدن رنگها به نوع آنومالی در هر نمونه زمانی و در هر دورافت پی برد. این روش به مفسر در تشخیص نوع آنومالیهای AVO بطور مستقیم در زمان و مکان خاص روی مقطع، بسیار کمک می کند. همچنین از آنجاکه عموماً آنومالیهای کلاس I با استفاده از لکه تاریک و آنومالیهای کلاس III با استفاده از لکه روشن در مقاطع قابل شناسایی هستند ولی آنومالیهای کلاس II را نمی توان با استفاده از لکه روشن یا لکه تاریک در مقطع بررسی کرد می توان از نشانگر ترکیبی $(PR^2 - NI^2)/2$ حاصل از نشانگرهای NI و PR جهت تشخیص و بررسی آنومالیهای کلاس II استفاده کرد. این نشانگر می تواند آنومالیهای کلاس II را به کلاس III تبدیل کند بطوریکه در مقطع بصورت لکه روشن قابل مشاهده باشند.

منابع

- نوبهاری کوزه کنان، ژ، ۱۳۸۸، مدلسازی AVO برای مخازن ماسه‌ای گازدار، پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (گرایش لرزه شناسی)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.
- Biot, M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid, Parts I