



نحوه شناسایی هیدرات‌های گازی بر روی نمودارهای پتروفیزیکی

خدیجه هاشمیان^۱، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه

ولی مهدی پور^۲، شرکت بین‌المللی نفت سینوپک

چکیده

هیدرات‌های گازی ترکیباتی بلورین با ظاهری شبیه یخ، ولی از لحاظ ساختاری، متفاوت با آن هستند. در حال حاضر، این ترکیبات به عنوان یکی از منابع تأمین سوخت جهان محسوب می‌شوند. هرچند داده‌های لرزه‌نگاری در اکتشاف و تشخیص هیدرات‌های گازی اهمیت به‌سزایی دارند، از اطلاعات پتروفیزیکی مربوط به چاه‌ها نیز می‌توان در تشخیص و ارزیابی آن‌ها استفاده کرد. در این مطالعه، تأثیر انواع نمودارهای پتروفیزیکی نظیر کالیپر، مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون، چگالی و نهایتاً NMR بر روی هیدرات‌های گازی به‌طور اجمالی مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، نمودار کالیپر قطر چاه را در منطقه حاوی هیدرات گاز معمولاً بزرگتر از حد معمول نشان می‌دهد. در مناطق حاوی هیدرات‌های گازی، نمودار SP انحراف نسبتاً کمتری (منفی کمتر) در مقایسه با منطقه حاوی گاز آزاد دارد. هیدرات‌های گازی می‌توانند تخلخل محاسبه شده از نمودار چگالی را نیز تحت تأثیر قرار دهد. در تخلخل‌های مخزنی بالا، تخلخل محاسبه شده با استفاده از نمودار نوترون بیش از حد تخمین زده می‌شود. این مناطق در مقایسه با افق‌های اشباع شده از آب، مقاومت بالایی نشان می‌دهند و زمان عبور امواج صوتی در مقایسه با منطقه‌ی اشباع شده با آب یا زون گازی کاهش می‌یابد. همچنین، تخلخل کل به‌دست آمده از نمودار NMR در این مناطق، کمتر از تخلخل واقعی است.

واژگان کلیدی: هیدرات‌های گازی، متان، نمودار پتروفیزیکی، مقاومت الکتریکی

مقدمه

بر روی نمودارهای پتروفیزیکی کالیپر، مقاومت الکتریکی، صوتی، نوترون، چگالی و نهایتاً NMR مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. با توجه به محدود بودن منابع موجود در این زمینه، نمودارهای پتروفیزیکی مربوط به میدان و منابع هیدرات‌های گازی که اخیراً اکتشاف و ارزیابی شده‌اند، مورد توجه و بررسی قرار گرفت.

۲- ساختار هیدرات‌های گازی

هیدرات‌های گازی ترکیباتی بلورین با ظاهری شبیه یخ، ولی از لحاظ ساختاری، متفاوت هستند. آن‌ها جزء خانواده کلاتریت‌ها محسوب می‌شوند. این کریستال‌ها در دمای بالاتر از نقطه انجماد آب و فشار بالا تشکیل می‌شوند. پیوند هیدروژنی مولکول‌های آب باعث به‌وجود آمدن حفره‌هایی می‌شود که مولکول‌های کوچک گاز می‌توانند وارد این حفره‌ها شوند و باعث پایداری آن‌ها گردند. این حفره‌ها در غیاب مولکول گاز میهمان، ناپایدارند اما وجود مولکول‌های گاز و پیوند فیزیکی آن با مولکول‌های آب، باعث پایداری حفره‌ها می‌گردد. بنابراین، نیروی نگهدارنده حفره‌ها

هیدرات‌های گازی کانی‌های متبلوری هستند که از آب و برخی گازها تشکیل شده‌اند. هیدرات‌های گازی دارای انرژی بالا بوده و توزیع گسترده و اندازه‌ی بزرگ دارند. براساس تخمین‌ها، ۹۰ درصد حواشی قاره‌ها جهت تشکیل هیدرات‌های گازی مساعد است [۱]. طی دهه‌های اخیر، مقدار قابل توجهی هیدرات‌های گاز در نواحی قطبی شمال آلاسکا و ایالت‌های شمالی آمریکا کشف شده که به‌دلیل نقش آن‌ها در تأمین انرژی آینده، مورد توجه خاصی قرار گرفته است. هیدرات‌های گازی، یکی از منابع تأمین سوخت جهان در قرن جاری محسوب می‌شود [۲]. هیدرات‌های گازی از نظر وجود ذخایر قابل توجه هیدروکربنی، نقش آن‌ها در مسدود کردن خطوط انتقال گاز و چاه‌ها، وقوع برخی خطرات در حین حفاری، ناپایداری بستر دریا، اثر گلخانه‌ای گاز موجود در ساختار هیدرات و نقش آن‌ها در تغییرات آب و هوای کره زمین، اهمیت دارند.

۱- روش تحقیق

در این مطالعه روش‌های تشخیص و شناسایی هیدرات‌های گازی

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mehdipour.vali@gmail.com)

پتروفیزیکی نسبت به هیدرات‌های گازی به اجمال مورد بررسی قرار گیرد.

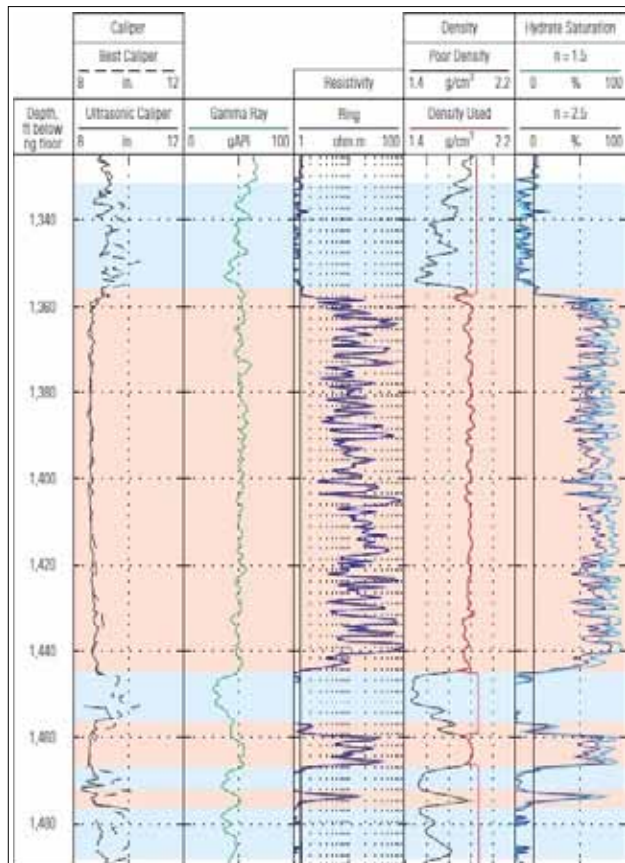
۳-۱- نمودار کالیبر

این نمودار یک تصویر اجمالی از شرایط چاه، جهت راندن سایر نمودارهای پتروفیزیکی ارائه می‌کند. از این نمودار برای اندازه‌گیری قطر چاه و وجود ریزش یا آماس^۴ در دیواره چاه، وجود مناطق شکستگی، بررسی کیفیت و پایداری دیواره چاه و همچنین برای محاسبه حجم چاه استفاده می‌شود.

این نمودار قطر چاه را در منطقه حاوی هیدرات‌های گازی معمولاً بزرگتر از حد معمول نشان می‌دهد که ناشی از تجزیه هیدرات‌های گازی است. مثال بسیار خوب این نمودار مربوط به حفاری هیدرات‌های گازی در سواحل اورگان کانادا بوده است [۶].

۳-۲- نمودار مقاومت SP

این نمودار اختلاف پتانسیل خودزا^۵ موجود مابین سطح زمین و



۱ | شناسایی هیدرات‌های گازی با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی (به مقاومت بالای این زون‌ها توجه شود) [۵]

نیروی واندروالسی است. هنگامی که حفره‌ها به میزان کافی توسط گاز پر شدند و حفره به اندازه بُحرانی خود برای رشد رسید، رشد کریستال‌ها شروع می‌شود [۳]. هیدرات‌های گازی می‌توانند تحت شرایط مناسب دمایی و فشاری به یکی از سه ساختار مکعبی I و II و نوع H کریستالیزه شوند. هر کدام از شبکه هیدرات‌ها شامل تعدادی حفره‌های کوچک و بزرگ است. در یک هیدرات پایدار، تعدادی از حفره‌های میزبان (آب) توسط ترکیبات گازی که مولکول‌های مهمان نامیده می‌شوند، اشغال می‌گردند. تنها گازهایی که دارای قطر مولکولی کوچکتر از حفره‌ها و شکل هندسی مناسب هستند، می‌توانند وارد حفره‌ها شوند. متان ترموژنیک و بایوژنیک بخش عمده گازهای موجود در هیدرات‌های گازی را تشکیل می‌دهد. در شرایط دما و فشار استاندارد (STP)، یک حجم از هیدرات اشباع شده‌ی متان (ساختار I) دارای بیش از ۱۶۴ حجم از گاز متان است. به علت این ظرفیت عظیم ذخیره‌سازی گاز، این هیدرات‌ها، منابع مهمی از گاز طبیعی محسوب می‌شوند. در سطح ماکروسکوپی، بسیاری از خواص مکانیکی هیدرات‌های گازی مثل یخ است. هیدرات‌ها دارای حداقل ۸۵ درصد آب بر یک پایه ملکولی هستند. برای شناسایی نوع ساختار هیدرات‌ها تشکیل شده، از روش‌های H-NMR، C13-NMR، X-Ray Diffraction و Raman Spectrum استفاده می‌شود [۴].

۳-نحوه شناسایی هیدرات‌های گازی

روش‌های لرزه‌ای اهمیت ویژه‌ای در اکتشاف و پی‌جویی هیدرات‌های گازی دارند، زیرا حضور هیدرات‌های گازی در داخل رسوبات و گاز آزاد موجود در زیر آن، باعث بازتاب غیرعادی لرزه‌ای شده و شناسایی آن‌ها را با روش‌های لرزه‌ای ممکن می‌سازد. این بازتاب‌ها عمدتاً به نام بازتاب تحریکی انتهایی یا BSR خوانده می‌شوند که نشانگر مرز پایین زون پایدار هیدرات‌های گازی است. البته نبود آن حاکی از نبود هیدرات‌های گازی در منطقه نیست و باید تحقیقات کامل‌تری در این راستا صورت پذیرد. وجود شرایط ترمودینامیکی مناسب، حضور گاز و آب به میزان کافی و وجود مسیرهای مهاجرت گاز از اعماق به رسوبات سطحی برای تشکیل هیدرات‌های گازی ضروری است. از مهم‌ترین نشانه‌های لرزه‌ای هیدرات‌های گازی می‌توان به بازتاب‌کننده شبیه‌ساز بستر، لکه تخت^۲ و لکه روشن^۳ اشاره کرد.

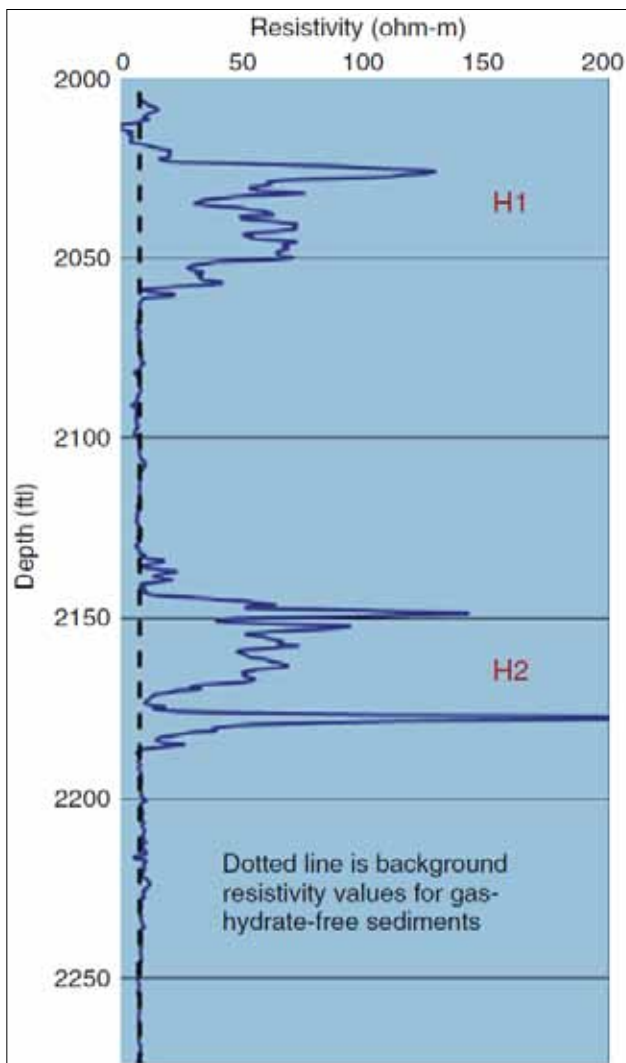
علاوه بر داده‌های لرزه‌نگاری، از اطلاعات پتروفیزیکی مربوط به چاه‌ها نیز می‌توان در تشخیص و ارزیابی هیدرات‌های گازی استفاده کرد (شکل-۱). در این مقاله سعی گردیده تا پاسخ انواع نمودارهای



نوترون که برای آب خالص کالیبره شده، تأثیر چندانی از حضور هیدرات‌های گاز نمی‌پذیرد. با این حال، در تخلخل‌های مخزنی بالا، تخلخل محاسبه شده با استفاده از نمودار نوترون می‌تواند بیش از حد تخمین زده شود [۸]. به‌طور کلی، این نمودار در مناطق حاوی هیدرات گازی اندکی افزایش در میزان تخلخل (برخلاف کاهش تخلخل ظاهری در منطقه حاوی گاز آزاد) نشان می‌دهد. مثال بسیار خوبی از این مورد مربوط به چاه ۲- شمال غربی ایالت آیلین است [۹].

۳-۵- نمودار مقاومت الکتریکی

آب منفذی^۶ و شوری^۷ آب موجود در خلل و فرج سنگ‌ها مهم‌ترین عوامل کنترل مقاومت الکتریکی به حساب می‌آیند. سایر عوامل مؤثر بر مقاومت یک سازند شامل غلظت مواد معدنی



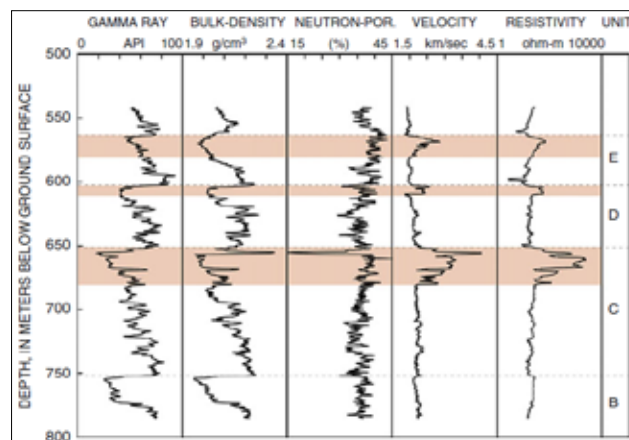
چاه مورد آزمایش را در غیاب هرگونه جریان مصنوعی اندازه‌گیری می‌کند. نمودار پتانسیل خودزا بسیار ساده بوده و تنها نیاز به یک الکتروود در چاه و یک الکتروود مرجع در سطح دارد. در مناطق حاوی هیدرات گازی، این نمودار انحراف نسبتاً کمتری (منفی کمتر) در مقایسه با منطقه حاوی گاز آزاد نشان می‌دهد [۶].

۳-۳- نمودار چگالی

نمودارهای چگالی در درجه اول جهت ارزیابی تخلخل رسوبات استفاده می‌شود. چگالی هیدرات متان با ساختار I در حدود 0.9 g/cm^3 است [۷]. هیدرات گازی می‌تواند اثر کوچک اما قابل اندازه‌گیری بر روی تخلخل محاسبه شده از نمودار چگالی داشته باشد. در تخلخل نسبتاً بالا (بیش از ۴۰ درصد) و اشباع هیدرات بالا (بیش از ۵۰ درصد)، تخلخل محاسبه شده از نمودار چگالی به دلیل حضور هیدرات گازی نیاز به اصلاح دارد [۸]. به‌طور کلی، در منطقه هیدرات گازی اندکی کاهش در چگالی در مقایسه با واحدهای اشباع از آب دیده می‌شود. یک مثال بسیار خوب مربوط به چاه ۲- شمال غربی ایالت آیلین می‌باشد (شکل-۲).

۳-۴- نمودار نوترون

نمودار نوترون به اندازه‌گیری مداوم اشعه‌ی تولید شده ناشی از بمباران سازند با یک منبع نوترون موجود در ابزار نمودارگیری می‌پردازد. از نمودار نوترون نیز برای تعیین تخلخل رسوبات استفاده می‌شود. با توجه به اینکه ساختار هیدرات متان I و آب خالص دارای غلظت هیدروژن مشابه هستند، فرض بر این است که نمودار



نمودارهای پتروفیزیکی مربوط به چاه-۲ در شمال غرب ایالت آیلین. این نمودار نشان‌دهنده تأثیر هیدرات گازی بر روی نمودارهای پرتو گاما طبیعی، چگالی، نوترون، سرعت امواج صوتی و مقاومت الکتریکی است [۹].

شکل ۳ | نحوه شناسایی مناطق حاوی هیدرات گازی (H1 و H2) بر اساس نمودار مقاومت [۱۲]

با اندازه‌گیری سرعت این امواج در فواصل عمقی مشخص، تعیین گردد [۱۳]. مثال بسیار خوبی از این مورد، در کوه آلبرت توسط کومار و همکاران نشان داده شده است [۱۲] (شکل-۴).

۳-۷- نمودار تشدید مغناطیس هسته‌ای (NMR)

نمودار NMR با استفاده از خصوصیات الکترومغناطیسی مولکول‌های هیدروژن به تجزیه و تحلیل ماهیت پیوندهای شیمیایی سیالات منفذی می‌پردازد. هیدرات‌های گازی نسبت به دیگر ترکیبات موجود در منافذ سنگ‌ها، ساختار شیمیایی و تراکم هیدروژن منحصر به فرد دارند. بنابراین، از نظر تئوری، توسعه تکنیک‌های ارزیابی نمودار NMR جهت ارزیابی میزان تخلخل و اشباع آب دقیق مخزنی در رسوبات حاوی هیدرات‌های گاز میسر است. به دلیل محدودیت‌های طراحی ابزار، هیدرات‌های گازی را نمی‌توان به‌طور مستقیم با فناوری امروزی NMR تشخیص داد. با این حال، استفاده از این نمودارها در تعیین میزان دقیق اشباع‌شدگی هیدرات‌های گاز بسیار مفید است.

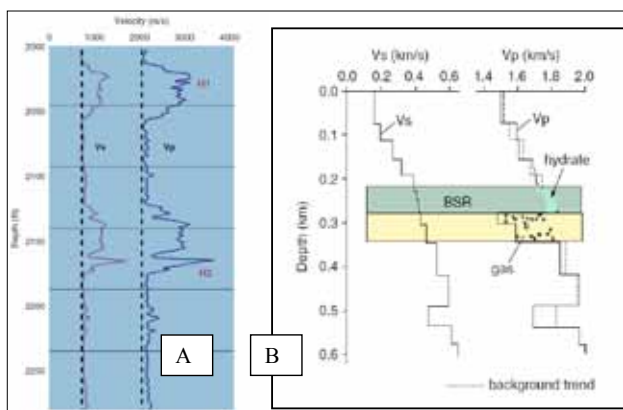
با توجه به مدت‌زمان کوتاه استراحت مغناطیس عرضی (T2)، مولکول‌های آب در کلاترات‌ها، هیدرات‌های گازی با ابزار NMR قابل مشاهده نیستند. لذا، ممکن است تصور شود آن‌ها بخشی از چارچوب جامد سنگ هستند. بنابراین، تخلخل کل محاسبه شده براساس NMR در رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی باید کمتر از تخلخل واقعی باشد. با استفاده از نمودارهای تخلخل دیگر مانند نمودارهای چگالی و یا نوترون، تخمین دقیق اشباع‌شدگی

آب‌دار و فلزی، حجم هیدروکربن‌ها و هیدرات‌های گازی و نیز هندسه‌ی ساختار منافذ است. رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی مقاومت الکتریکی نسبتاً بالایی در مقایسه با واحدهای اشباع شده از آب نشان می‌دهند. از این رو، می‌توان از این نمودارها در شناسایی و ارزیابی میزان هیدرات‌های گازی در بخش‌های رسوبی استفاده کرد [۶]. رابطه‌ی بین انواع سنگ‌ها و مقاومت سیالات منفذی در موارد متعدد آزمایشگاهی و میدانی مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس این مطالعات، روابط ما بین تخلخل، مقاومت سیالات منفذی و مقاومت سنگ‌ها تعیین شده است. از بین این مطالعات، رابطه تجربی بسط داده شده توسط آرچی [۱۰] کاربردی بوده و به‌منظور تخمین میزان اشباع آب در سیستم‌های گاز و نفت و آب و ماتریس مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان داده است که رابطه‌ی آرچی در تعیین اشباع داده‌ی هیدرات‌های گازی نیز مفید است [۸].

به‌طور کلی، هیدرات‌های گازی همانند یخ، به‌عنوان یک عایق الکتریکی عمل می‌کنند. وجود هیدرات‌های گازی (یا گاز آزاد) مقاومت سنگ را افزایش می‌دهد. مناطق حاوی هیدرات‌های گاز در مقایسه با افق‌های اشباع شده از آب، مقاومت بالایی نشان می‌دهند که مبین وجود هیدرات‌های گاز در منطقه است. مثال بسیار خوبی از نمودار مقاومت در هیدرات‌های گازی توسط کومار و همکاران نشان داده شده است (شکل-۳). این مثال مربوط به آزمایش چاه توسط کنسرسیوم BP-DOE-USA بوده که در آن، به مطالعه‌ی امکان‌سنجی اکتشاف هیدرات‌ها و بهره‌برداری در منطقه آلاسکا پرداخته شده است [۱۱].

۳-۶- نمودار سرعت امواج صوتی

این نمودار زمان عبور یک موج الاستیک را در درون سازند اندازه می‌گیرد. این اطلاعات همچنین می‌تواند برای به‌دست آوردن سرعت امواج الاستیک در سازند نیز مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این نمودار جهت کالیبره کردن داده‌های لرزه‌ای برای به‌دست آوردن تخلخل سازند ضروری است. سرعت امواج صوتی فشاری و برشی در محیط جامد، مانند رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی معمولاً چندین بار بزرگتر از سرعت امواج صوتی فشاری و برشی در آب و رسوبات حاوی گاز است. از این رو، در منطقه‌ی حاوی هیدرات‌های گازی، زمان عبور امواج صوتی در مقایسه با منطقه اشباع شده با آب یا زون گازی کاهش می‌یابد. مطالعات داده‌های درون‌چاهی نمودار سرعت امواج صوتی در نهشته‌های هیدرات‌های گازی نشان داده است که حجم هیدرات‌های گازی موجود در رسوبات نیز می‌تواند



شکل ۴: A: شناسایی هیدرات‌های گازی بر اساس سرعت امواج طولی و عرضی تک‌بندی در منطقه کوه آلبرت. منطقه حاوی هیدرات‌های گازی با (H₂) و (H₁) نشان داده شده است [۱۲].
B: مقطع عرضی سرعت امواج طولی و عرضی تک‌بندی. منطقه حاوی هیدرات‌های گازی (سبز روشن) و گاز آزاد (زرد روشن) بصورت جداگانه نشان داده شده است [۶].



اندکی کاهش در چگالی در مقایسه با واحدهای اشباع از آب نشان می‌دهد، در حالی که در نمودار نوترون، اندکی افزایش در میزان تخلخل (برخلاف کاهش تخلخل ظاهری) در منطقه حاوی گاز آزاد دیده می‌شود.

مناطق حاوی هیدرات‌های گازی در مقایسه با افق‌های اشباع شده از آب، مقاومت بالایی دارند. در این مناطق، زمان عبور امواج صوتی در مقایسه با منطقه اشباع شده با آب یا زون گازی، کاهش می‌یابد. در نهایت، تخلخل کل محاسبه شده براساس NMR در رسوبات حاوی هیدرات‌های گازی کمتر از تخلخل واقعی است. ■

هیدرات‌های گازی با مقایسه میزان تخلخل ظاهری حاصل از NMR با تخلخل به دست آمده از نمودارهای چگالی و نوترون قابل محاسبه است.

نتیجه‌گیری

نمودار کالیپر، قطر چاه را در منطقه حاوی هیدرات‌های گازی معمولاً بزرگ‌تر از حد معمول نشان می‌دهد. در این مناطق، نمودار پتانسیل خودزا انحراف نسبتاً کمتری (منفی کمتر) در مقایسه با منطقه حاوی گاز آزاد دارد. نمودار چگالی در منطقه هیدرات‌های گازی،

پانویس‌ها

- ¹ Bottom Simulating Reflector
- ² Flat Spot
- ³ Bright Spots
- ⁴ swelling

- ⁵ Spontaneous Potential
- ⁶ Pore water
- ⁷ Salinity

منابع

- [1] Kvenvolden, K. A., 1993, Gas hydrates as a potential energy resource - a review of their methane content, in D. G. Howell, ed., The Future of Energy Gases - U.S. Geological Survey Professional Paper 1570: Washington, United States Government Printing Office, p. 555561-.
- [2] Max, M.D., Johnson, A.H., and Dillon, W.P., 2006, Economic geology of natural gas hydrate: Springer, Dordrecht.
- [3] Vysniaukas, P. R. Bishnoi, " Kinetic of Ethane Hydrate Formation ", Chem. Eng. Sci., 40, 2991985 ,303- Archie, G.E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Journal of Petroleum Technology, v. 5, p. 11942 ,8-.
- [4] E. D. Sloan, " Clathrate Hydrate of Natural Gases 2) " (2nd ed.), New York, Marcel Dekker Inc., 1997.
- [5] www.slb.com (schlumberger)
- [6] Thakur, N.K., and Rajput, S., Exploration of Gas Hydrates, Geophysical Techniques, Springer, 2011.
- [7] Sloan, E.D., 1998. Clathrate hydrates of natural gases. Marcel Dekker Inc. Pub., New York, pp. 641
- [8] Collett, T.S., Well log characterization of sediment porosities in gas-hydrate-bearing reservoirs. Proceedings of the 1998 Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, September 27-1998 ,30, New Orleans, Louisiana, USA, 12 p. (CD-ROM), 1998b.
- [9] Collett, T. S., et al., 2010, Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope: Marine and Petroleum Geology, doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.12.001.
- [10] Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers 146: 5462-.
- [11] Boswell, R., Hunter, R., Collett, T., Digert, S., Hancock, S., Weeks, M., and Mount Elbert Science Team, 2008, Investigation of gas hydrate-bearing sandstone reservoirs at the "Mount Elbert" Stratigraphic test well, Milne Point, Alaska: Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, BC, Canada, July 6–10.
- [12] Kumar, D., Dash, R., and Dewangan, P., 2009, Methods of gas hydrate concentration estimation with field examples: Geohorizons, 76–86.
- [13] Guerin, G., and D. Goldberg, Sonic attenuation measurements in the Mallik 2L-38 gas hydrates research well, MacKenzie Delta, NWT Canada, Journal of Geophysical Research, v. 107, 2002.
- Kvenvolden, K. A., 1993, Gas hydrates – geological perspective and global change. Review of Geophysics, 31, 173–187.