

روش‌های تخمین حجم شیل در سازندهای مخزنی هیدروکربنی و بررسی نقاط قوت و ضعف آنها

رضا احمدی^{*}، نرگس شریعتی‌راد، مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اراک،

چکیده

شیل‌ها از جمله متداول‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده اغلب سازندها در مطالعات چاه‌پیمایی هستند که بر روی بیشتر اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی مخازن، همانند میزان تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی سازندها تاثیر گذار هستند. بنابراین همواره تعیین حجم شیل سازند، محل چالش بوده و تعیین دقیق میزان آنها امری ضروری است. در پژوهش حاضر، روش‌های مختلف تعیین حجم شیل سازندها به‌طور جامع بررسی شده و نقاط قوت و ضعف آنها همراه با تمامی روابط تعیین حجم شیل مربوط به آنها ارائه می‌شود. در این راستا نشان‌گرهای شیل همانند نگارهای پتانسیل خودزا (SP) و گامای طبیعی (NGR) و غیرنشانگرها همانند نگارهای مقاومت ویژه الکتریکی (Rt)، نوترونی (NPHI)، چگالی (RHOB)، صوتی (DT)، تصویرگرهای چاه و نمودارهای متقاطع، به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌است.

اصطلاحات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۷/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۱۰/۲۳

واژگان کلیدی:

نگارهای چاه‌پیمایی، نشان‌گرهای شیل، تعیین حجم شیل

مقدمه

در اغلب سنگ‌ها، رس‌ها از فراوان‌ترین و متداول‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده به شمار می‌روند. تاکنون انواع مختلفی از کانی‌های رسی و سنگ‌های متشکله از آنها شناخته شده است. شیل‌ها یکی از انواع متداول سنگ‌های رسوبی و از جنس رس‌ها هستند، اما در بحث‌های مرتبط با چاه‌پیمایی، پتروفیزیک و ذخایر هیدروکربوری (نفت و گاز) این اصطلاح شامل تمام طیف کانی‌ها و سنگ‌های رسی است. بنابراین در مباحث پتروفیزیکی منظور از حجم شیل، مجموع حجم تمام ذرات رس موجود در سازند است. وجود رس‌ها تاثیر مهمی بر روی خصوصیات پتروفیزیکی مخازن همانند میزان تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی سازندها دارد و به دلیل خواص الکتریکی ویژه، تاثیر مهمی بر روی ویژگی‌های الکتریکی سنگ‌ها دارد. به‌عنوان مثال وجود رس در مخازن موجب کاهش مقاومت ویژه حقیقی سازند (Rt) شده و در نتیجه مقدار اشباع‌شدگی آب سازند (Sw) بیش از مقدار واقعی محاسبه و در نتیجه پتانسیل هیدروکربوری مخزن کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌شود. همچنین حضور رس مشکل مشابهی را برای تخمین میزان تخلخل سازند ایجاد می‌کند [۱ و ۲]. به‌طور کلی حضور شیل در سازند بر عموم نگارهای چاه‌پیمایی تاثیر گذار است. بنابراین حجم شیل یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در کلیه مطالعات پتروفیزیکی و کیفیت مخزنی است که باید با دقت محاسبه شده و اثر آن از روی پارامترها حذف شود.

در مورد سازندهای متخلخل و تراوا، اگر وجود شیل نادیده گرفته شود، می‌تواند در رفتار بیشتر نگارهای ژئوفیزیکی تاثیر گذار باشد. به‌عنوان نمونه تخلخل یکی از پارامترهای مهم پتروفیزیکی است که به‌طور معمول با استفاده از نگارهای نوترون^۱ (NPHI)، چگالی^۲ (RHOB) و صوتی^۳ (DT) به‌دست می‌آید. اما نگارهای تخلخل به‌شدت متأثر از وجود شیل در سازند هستند. در روش‌های نوترون و چگالی حضور شیل به دلیل وجود هیدروژن بالا باعث می‌شود که تخمین تخلخل تنها تابع هیدروژن موجود در منافذ خالی سنگ نبوده و تخلخل محاسبه شده بیش از مقدار واقعی محاسبه شده باشد [۳]. بنابراین برای تعیین حجم شیل در سازندهای فاقد شیل، اشباع‌شدگی آب سازند با استفاده از این نگارها لازم است اثر شیل در محاسبات در نظر گرفته شود. در سازندهای فاقد شیل، اشباع‌شدگی آب سازند با استفاده از رابطه آرچی محاسبه می‌شود. اما در سازندهای شیلی استفاده از این مدل، میزان اشباع‌شدگی آب را بیش از میزان واقعی نشان می‌دهد [۴]. همچنین در نگار مقاومت ویژه بخاطر وجود شیل، تضاد مقاومت الکتریکی بین نفت و گاز و آب کاهش یافته و تعیین زون‌های هیدروکربنی دشوار می‌شود.

دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری خصوصیات پتروفیزیکی و تعیین حجم شیل، استفاده از مغزه است. اما این روش با محدودیت‌ها و مشکلاتی همراه است. زیرا مغزه‌گیری زمان‌بر و پرهزینه بوده و معمولاً بازبایی آن به‌طور کامل امکان‌پذیر نیست [۵]. اهمیت تعیین حجم شیل در زمین‌شناسی نفت و ارزیابی مخازن نفتی را می‌توان در سه بخش اکتشاف (سنگ منشأ، پوش سنگ و سنگ مخزن)، حفاری (گل حفاری، مشکلات حفارهای شیلی و غیره) و مخزن (تأثیر بر کیفیت مخزن و غیره) طبقه‌بندی کرد. در این مقاله مهم‌ترین روش‌های تعیین حجم شیل سازندها در مطالعات چاه‌نگاری و ارزیابی ذخایر هیدروکربوری، مورد مطالعه قرار داده، نقاط قوت و ضعف آنها را بررسی کرده و روابط مورد نیاز برای تعیین حجم شیل هر یک ارائه می‌شود.

۱- روش‌های تعیین حجم شیل

روش‌های مرسوم تعیین حجم شیل را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد [۶]. الف) روش‌های مبتنی بر نگارهایی که پاسخ آنها در درجه اول، تابع حجم شیل است و به عنوان نشان‌گرهای شیل شناخته می‌شوند [۳]. ب) روش‌های مبتنی بر نگارهایی که درصد شیل، اولین پارامتر موثر نیست ولی به صورت‌های مختلف بر روی پاسخ نگار، تاثیر گذار است. در یک طبقه‌بندی دیگر،

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Rezahmadi@gmail.com)

روش‌های محاسبه حجم شیل به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. تقریباً در بیشتر روش‌های غیرخطی، مقدار حجم شیل بسیار پایین‌تر از مقدار واقعی، تخمین زده می‌شود. پایین بودن حجم شیل به این دلیل است که تنها حجم سازنده‌های رسی و نه حجم کل شیل، محاسبه می‌شود. بعضی از روش‌های تعیین حجم شیل می‌تواند، مقدار واقعی یا مقداری بالاتر از مقدار واقعی را نشان دهد. بنابراین در این روش‌ها کمترین مقدار تخمین، به مقدار واقعی نزدیک‌تر بوده و باید در نظر گرفته شود. برای تعیین خط شیل و میزان شیل موجود در سازند می‌توان از نگارهای ژئوفیزیکی مجزا شامل نگارهای پتانسیل خودزا، گاما، مقاومت ویژه و یا به صورت تلفیقی همانند ترکیب نگار نوترون و چگالی استفاده کرد.

1-1- محاسبه حجم شیل با استفاده از نشان‌گرهای شیل

از جمله این نشان‌گرها، نگارهای پتانسیل خودزا و گامای طبیعی^۵ است که در ادامه نحوه تعیین حجم شیل با این روش‌ها بیان می‌شود.

1-1-1- تعیین حجم شیل با روش پتانسیل خودزا (SP)

روش پتانسیل خودزا که یک روش کیفی ژئوالکتریکی با چشمه طبیعی است، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های محاسبه حجم شیل است. میزان حجم شیل با استفاده از این روش به کمک معادله ۱- محاسبه می‌شود. در این رابطه PSP مقدار پتانسیل خودزای ظاهری و SSP پتانسیل خودزای ساکن است.

$$V_{sh} = 1 - \frac{PSP}{SSP} = 1 - a \quad (1)$$

مهم‌ترین مزیت تعیین حجم شیل در این روش، عدم تبادلات یونی زون‌های ناتراوا و شیلی است. در مقابل وجود سیال با درجه شوری زیاد در سازند، باعث عدم جدایش مناسب نگار SP شده و در نتیجه تعیین حجم شیل با استفاده از نگار پتانسیل خودزا با خطا همراه است. از جمله محدودیت‌های این روش، کاربرد آن فقط در چاه‌های دارای گل حفاری هادی و بدون لوله جداری است [۳].

1-1-2- تعیین حجم شیل با روش پرتو گاما

در گذشته برای محاسبه حجم شیل از نمودار SP استفاده می‌شد، اما به دلیل دقت کم و عدم استفاده در تمام چاه‌ها، استفاده از نمودار گامای طبیعی متداول شد. در ماسه‌سنگ‌های تمیز و آهک‌ها، عموماً تمرکز عناصر رادیواکتیو کم و میزان قرائت نمودار گاما پایین است. در مقابل لایه‌های شیلی و ماسه‌سنگ‌های فلدسپاتی، میزان قرائت گامای بالایی دارند [۷]. در روش گاما علاوه بر شیل، حضور مواد رادیواکتیو همانند اورانیوم (U) در سازند نیز می‌تواند باعث افزایش نگار گاما شود [۳]. تشعشع پرتو گاما از

اورانیوم، شاخص وجود شیل نیست. زیرا اورانیوم برخلاف پتاسیم (K) و توریم (Th)، عموماً در رسوبات مواد آلی متمرکز می‌شود. برای تخمین حجم شیل، به‌طور معمول از نمودارهای طیف‌سنجی گامای طبیعی^۶ (SGR) و نمودار گامای طبیعی جبرانی^۸ (CGR) استفاده می‌شود. نمودار SGR تابع حضور سه عنصر رادیواکتیو اورانیوم، توریم و پتاسیم است. اما CGR تابع دو عنصر توریم و پتاسیم بوده و از اورانیوم تأثیرپذیر نیست. اورانیوم یک عنصر رادیواکتیو مهاجرت‌پذیر است و ممکن است از شیل‌ها به درون سایر سنگ‌های متخلخل مانند ماسه‌سنگ‌ها، کربنات‌ها و... مهاجرت کند. در نتیجه استفاده از نمودار SGR (به دلیل تأثیرپذیری از اورانیوم) برای تعیین حجم شیل ممکن است با خطا همراه باشد [۵]. بنابراین بهتر است که برای اندازه‌گیری حجم شیل، مقدار گامای ساطع شده از پتاسیم و توریم استفاده شود. امروزه برای تعیین حجم شیل، بیشتر نمودار پرتو گامای طبیعی اصلاح شده یعنی CGR استفاده می‌شود [۸]. میزان حجم رس محاسبه شده از طریق نمودار GR مسلماً بیشتر از CGR است. چرا که نگار GR علاوه بر پتاسیم و توریم، کانی‌های غیررسی رادیواکتیو مانند اورانیوم و دولومیت را نیز ثبت می‌کند. در گذشته حجم شیل بر حسب نوع لیتولوژی سازند که به‌طور معمول از طریق رابطه مبتنی بر مقدار اندیس GR (معادله ۲) محاسبه می‌شد.

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (2)$$

در این رابطه GR_{log} مقدار GR قرائت شده از روی نگار در عمق مورد نظر، GR_{min} کمترین مقدار GR (بخش‌های تمیز سازند فاقد رس) و GR_{max} بیشترین مقدار GR (فواصل صددرصد رسی) است. معمولاً برای تعیین مقادیر بیشینه و کمینه نگار گاما، دو خط در زون تمیز و زون شیلی ترسیم می‌شود که خطوط شیل و ماسه نامیده می‌شود و انتخاب صحیح این خطوط از اهمیت خاصی برخوردار است و در صورت برداشت GR در چاه، خط مبنای عاری از رس معمولاً بین ۰ تا ۲۵ API و خط مبنای شیل بین ۶۰ تا API ۱۰۰ انتخاب می‌شود.

در این روش باید در زون مورد مطالعه دست کم یک زون کاملاً شیلی و یک زون کاملاً تمیز وجود داشته باشد و پاسخ شیل نیز در زون‌های مختلف یکسان باشد. در غیر این صورت در زونی که کمترین مقدار گاما را دارد، حجم شیل برابر با صفر و در زونی که بیشترین مقدار گاما را دارد، حجم شیل برابر با صد لحاظ می‌شود و حجم شیل در مقادیر اندک گاما، کمتر از واقعیت و در مقادیر بالای گاما، بیشتر از واقعیت به دست می‌آید. نکته مهم دیگر در این رابطه، تبعیت رادیواکتیویته سازند از چگالی اجزای متشکله سنگ و نه حجم آنها است [۶]. شیل از معادله به دست می‌آید:

$$V_{sh} = \frac{[\rho_{GR} + \rho_{sg} GR_{sg} (1 - \phi)]}{[\rho_{sh} GR_{sh} - \rho_{sg} GR_{sg}]} \quad (3)$$

در این رابطه sh، sg و f به ترتیب خصوصیات ماسه‌سنگ، شیل و سیال

استفاده می‌شود که از دقت بیشتری برخوردار است. با استفاده از نمودار CGR حجم شیل در معادله ۷ محاسبه می‌شود.

$$V_{sh} = \frac{(CGR - CGR_{min})}{(CGR_{max} - CGR_{min})} \quad (7)$$

پارامترهای این معادله مشابه معادله ۲ بوده و تنها تفاوت استفاده از نمودار CGR است. نگار GR علاوه بر پتاسیم (K) و تورنیوم (Th) (که توسط نگار CGR ثبت می‌شود) اورانیوم (U) کانی‌های غیررسی رادیواکتیو همانند دولومیت را نیز ثبت می‌کند [۹]. بنابراین میزان حجم شیل محاسبه شده از طریق GR بیشتر از CGR است. برای حذف این اثر باید اثر اورانیوم از نگار SGR حذف شود. در واقع نگار CGR نتیجه حذف اثر اورانیوم از نگار SGR است. در این نمودار نیز وجود فلدسپات در سنگ باعث برآورد بیشتر حجم شیل از مقدار واقعی می‌شود [۶].

۲-۱-۲- محاسبه حجم شیل با استفاده از غیر نشانگرها

از نمودارهای مقاومت ویژه الکتریکی، نوترونی، چگالی، صوتی، تصویری، روش استیبر^۱، روش کلاویر^۱ و نمودارهای متقاطع نیز می‌توان برای تعیین حجم شیل استفاده کرد. در ادامه نحوه تعیین حجم شیل با مهم‌ترین روش‌های بالا بیان می‌شود.

۱-۲-۱- تعیین حجم شیل با روش مقاومت الکتریکی

مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها به میزان و شکل هندسی منافذ، مقاومت سیالات موجود در منافذ (درجه شوری)، میزان اشباع‌شدگی آب، نفت و گاز، درصد رس و دیگر کانی‌های رسانا بستگی دارد. شیل دار بودن سازند در میزان هدایت الکتریکی آن موثر است. قابلیت هدایت شیل با قابلیت هدایت الکترولیتی که در آن یون‌ها در محلول آزادانه حرکت می‌کنند، متفاوت است. در حقیقت در شیل‌ها، هدایت یک فرآیند معاوضه یونی است که به وسیله آن معمولاً یون‌های مثبت در محلول‌های مشخص روی سطح ذرات رس جابه‌جا می‌شوند و اثر آنها اغلب با کمیت شیل تناسبی ندارد. در نگار مقاومت ویژه در اثر وجود شیل، تضاد^۱ مقاومت الکتریکی بین نفت، گاز و آب کاهش یافته و تعیین زون‌های هیدروکربنی دشوار می‌شود [۱۰].

۲-۲-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای تخلخل

برای محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای تخلخل، لازم است که ابتدا نگارها از نظر هیدروکربن و لیتولوژی تصحیح شوند. در محاسبه حجم شیل با استفاده از این روش‌ها، ممکن است یکی از دو حالت زیر ایجاد شود.

۱- مقادیر ویژگی‌های فیزیکی خمیره سنگ شامل تخلخل نوترونی (ϕ_{nma})، زمان سیر موج (Δt_{am}) و چگالی (ρt_{ma}) کاملاً مشخص است. این شرایط ممکن است در یک فاصله عمقی مشخص رخ داده و می‌توان حجم

است. استفاده از معادله ۳ در شرایطی مناسب است که تاثیر رادیواکتیویته سازند فقط ناشی از شیل بوده و هیچ عامل دیگری در آن نقش نداشته باشد. به عنوان مثال در ماسه‌های آرکوزی، استفاده از این رابطه باعث خطا شده و حجم شیل بسیار بیشتر از واقعیت برآورد می‌شود.

۳-۱-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از تورنیوم

حجم شیل با استفاده از مقادیر تورنیوم در معادله ۴ محاسبه می‌شود.

$$V_{sh} = \frac{(Th - Th_{min})}{(Th_{max} - Th_{min})} \quad (4)$$

تورنیوم در بین تمام نشان‌گرهای شیل، بیشترین وابستگی به حجم شیل را دارد که به دلیل جذب تورنیوم توسط رس است. میزان جذب تورنیوم برای کانی‌های رسی مختلف، متفاوت است. برای نمونه میزان جذب در کائولینیت، اندک و در میکاها زیاد است. علاوه بر تورنیوم جذب شده توسط کانی‌های رسی، برخی از کانی‌های حاوی تورنیوم همانند زیرکن در شیل‌ها وجود دارند. بنابراین به‌طور کلی تورنیوم نشان دهنده حجم شیل است [۶].

۴-۱-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از پتاسیم

حجم شیل با استفاده از مقادیر پتاسیم در معادله ۵ محاسبه می‌شود.

$$V_{sh} = \frac{(k - k_{min})}{(k_{max} - k_{min})} \quad (5)$$

پتاسیم در ایلیت، فلدسپات‌ها و میکاها کسر بزرگی از ساختار بلوری را تشکیل می‌دهد. اما در کانی‌های رسی مانند کائولینیت، کلریت و مونت‌موریلونیت وجود ندارد. از این رو پتاسیم در درجه اول نشانگر فلدسپات و رس است و در صورت وجود فلدسپات در سنگ، حجم شیل محاسبه شده از پتاسیم، بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود.

۵-۱-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از اورانیوم

حجم شیل با استفاده از مقادیر اورانیوم در معادله ۶ محاسبه می‌شود.

$$V_{sh} = \frac{(U - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} \quad (6)$$

حجم شیل محاسبه شده در معادله ۶، تنها در صورتی صحیح است که هیچ منبع رادیواکتیوی غیر از شیل‌ها وجود نداشته باشد. معمولاً چنین شرایطی به ندرت رخ می‌دهد و اورانیوم علاوه بر شیل‌ها، در سایر اجزای سازنده سنگ نیز وجود دارد و مواد آلی موجود در سنگ، می‌توانند شامل مقادیر زیادی اورانیوم باشد. استفاده از این رابطه بدون در نظر گرفتن موارد ذکر شده پیشنهاد نمی‌شود.

۶-۱-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از CGR

امروزه برای محاسبه حجم شیل به جای نمودار GR بیشتر نمودار CGR

شیل را از نگارهای تخلخل به دست آورد.

شده از طریق نگار، V_{sh} حجم شیل، ϕ_D تخلخل محاسبه شده برای هر نقطه از فاصله عمقی مخزنی با استفاده از نگار چگالی و ϕ_{Dsh} تخلخل لایه شیلی با استفاده از نگار چگالی است.

۱-۲-۴- محاسبه حجم شیل با استفاده از نگار صوتی

حجم شیل از پاسخ نگار صوتی با فرض خطی بودن پاسخ (فرمول وایلی^{۱۴}) در شرایطی که تخلخل خمیره (ϕ_{ma}) مشخص باشد، در معادله ۱۵- محاسبه می شود.

$$V_{sh} = \frac{[\Delta t - [\Delta t_f \phi_{ma} + (1 - \phi_{ma}) \Delta t_{ma}]]}{[\Delta t_{sh} - [\Delta t_f \phi_{ma} + (1 - \phi_{ma}) \Delta t_{ma}]]} \quad (15)$$

در غیر این صورت می توان از روابط زیر استفاده کرد [۶].

$$V_{sh} = \frac{(\Delta t - \Delta t_{ma})}{(\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma})} \quad (16)$$

$$V_{sh} = \frac{(\Delta t - \Delta t_{min})}{(\Delta t_{sh} - \Delta t_{min})} \quad (17)$$

$$V_{sh} = \frac{\phi_s}{\phi_{sh}} \quad (18)$$

در این روابط V_{sh} حجم شیل، Δt ، Δt_f ، Δt_{ma} و Δt_{sh} زمان سیر موج قرائت شده از نگار، در سیال، خمیره و شیل، ϕ_s تخلخل صوتی و ϕ_{sh} تخلخل شیل است.

۱-۲-۵- محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای تخلخل دوتایی

- محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای نوترون - چگالی

حجم شیل براساس تلفیق نگارهای نوترون و چگالی با استفاده از روابط زیر به دست می آید.

$$V_{sh} = \frac{(\phi_N - \phi_D)}{(\phi_{Nsh} - \phi_{Dsh})} \quad (19)$$

$$V_{sh} = \frac{[A \phi_N - \rho_b + \rho_{b0N}]}{[A \phi_{Nsh} - \rho_{sh} + \rho_{b0N}]} \quad (20)$$

$$A = \frac{(\rho_{b20N} - \rho_{b0N})}{0.2} \quad (21)$$

$$V_{sh} = \frac{[\rho_b (\phi_{Nma} - 1.0) - \phi_N (\rho_{ma} - \rho_f) - \rho_f \phi_{Nma} + \rho_{ma}]}{[(\rho_{sh} - \rho_f)(\phi_{Nma} - 1.0) - (\phi_{Nsh} - 1.0)(\rho_{ma} - \rho_f)]} \quad (22)$$

در این روابط ϕ_D تخلخل محاسبه شده برای هر نقطه از فاصله عمقی مخزن با استفاده از نگار چگالی، ϕ_N تخلخل نوترونی، ϕ_{Nsh} تخلخل نگار نوترونی با تصحیح اثر شیل، ϕ_{Dsh} تخلخل لایه شیلی با استفاده از نگار چگالی، ϕ_{Nam} تخلخل نوترونی خمیره سنگ، ρ_b ، ρ_f ، ρ_{sh} ، ρ_{ma} چگالی خمیره، شیل، سیال و چگالی خوانده شده بر روی نگار و V_{sh} حجم شیل است. ρ_{b20N} و ρ_{don} نیز قرائت نگار چگالی در اعماقی است که مقدار ϕ_N برابر با صفر درصد

۲- مقادیر خمیره مشخص نبوده و در اعماق مختلف تغییر می کند که معمولاً در عمل چنین شرایطی حاکم است. در این صورت نمی توان از نگارهای تخلخل به تنهایی برای محاسبه حجم شیل استفاده کرد و لازم است که دست کم یک نگار نشان گر شیل نیز موجود باشد. در صورتی که مقادیر خمیره سنگ به صورت قطعی مشخص نباشد، می توان از روابط ۸، ۹ و ۱۰ استفاده کرد.

$$\rho_{ma} = \frac{(\rho_{sh-c} - \phi_f \rho_f)}{(1 - \phi_f)} \quad (8)$$

$$\Delta t_{ma} = \frac{(\Delta t_{sh-c} - \phi_f \Delta t_f)}{(1 - \phi_f)} \quad (9)$$

$$\phi_{Nma} = \frac{(\phi_{Nsh-c} - \phi_f \phi_{Nf})}{(1 - \phi_f)} \quad (10)$$

در این روابط ρ_{ma} چگالی ظاهری خمیره سنگ، ρ_{sh-c} چگالی با تصحیح اثر شیل، ϕ_f تخلخل کل، ρ_f چگالی سیال، Δt_{ma} زمان سیر ظاهری موج از خمیره سنگ، Δt_{sh-c} زمان سیر موج با تصحیح اثر شیل، Δt_f زمان سیر موج از سیال، ϕ_{Nma} تخلخل نوترونی خمیره سنگ، ϕ_{Nf} تخلخل نوترونی سیال و تخلخل نوترونی با تصحیح اثر شیل است.

در واقع اثر شیل در مقادیر خمیره به دست آمده از روابط ۸، ۹ و ۱۰ نهفته است. بنابراین نمی توان از این مقادیر در محاسبه حجم شیل استفاده کرد و باید از مقادیر تصحیح شده استفاده کرد که برای آن وجود یک نشان گر شیل لازم است. در صورت استفاده از این مقادیر به جای مقادیر واقعی خمیره، حجم شیل از صفر تجاوز نمی کند. [۸].

۱-۲-۳- محاسبه حجم شیل با استفاده از نگار چگالی

چگالی سازند براساس خاصیت اثر کامپتون^{۱۳}، تراکم الکترون ها در سازند و میزان اشعه گامای ضعیف شده در اثر برخورد با الکترون ها محاسبه می شود. حجم شیل با استفاده از پاسخ نگار چگالی در صورتی که دقیقاً مشخص باشد، از معادله ۱۱- محاسبه می شود.

$$V_{sh} = \frac{[\rho_b - [\rho_f \phi_{ma} + (1 - \phi_{ma}) \rho_{ma}]]}{[\rho_{sh} - [\rho_f \phi_{ma} + (1 - \phi_{ma}) \rho_{ma}]]} \quad (11)$$

در غیر این صورت می توان از روابط ساده شده ۱۲، ۱۳ و ۱۴ استفاده کرد [۸].

$$V_{sh} = \frac{(\rho_b - \rho_{ma})}{(\rho_{sh} - \rho_{ma})} \quad (12)$$

$$V_{sh} = \frac{(\rho_b - \rho_{max})}{(\rho_{sh} - \rho_{max})} \quad (13)$$

$$V_{sh} = \frac{\phi_D}{\phi_{Dsh}} \quad (14)$$

در این روابط ρ_b ، ρ_f ، ρ_{sh} ، ρ_{ma} چگالی خمیره، شیل، سیال و چگالی قرائت

در روابط فوق ϕ_s تخلخل صوتی، ϕ_D تخلخل محاسبه شده برای هر نقطه از فواصل عمقی مخزن با استفاده از نگار چگالی، ϕ_{Dsh} تخلخل شیل با استفاده از نگار صوتی، ϕ_{Dsh} تخلخل شیل با استفاده از نگار چگالی، Δt_{sh} زمان سیر موج در شیل، $\rho_b, \rho_f, \rho_{sh}, \rho_{ma}$ چگالی خمیره، شیل، سیال و چگالی قرائت شده از روی نگار است. Δt_{ma} زمان سیر موج در خمیره، Δt_f زمان سیر موج در سیال و Δt_{sh} زمان سیر موج در شیل است. $\rho_{b80\Delta t}$ و $\rho_{b40\Delta t}$ نیز قرائت نگار چگالی در اعماقی است که مقدار Δt برابر با ۴۰ و ۸۰ است [۶].

۲-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از نمودار متقاطع نوترون- گاما ($GR-\phi_N$)
نمودار متقاطع روش مناسبی است که با آن می‌توان فواصل مخزنی را از فواصل حاوی شیل تفکیک کرد. در فواصل دارای شیل، GR و ϕ_N هر کدام به حضور شیل پاسخ داده و در نتیجه در این فواصل، نقاط پلات شده به صورت یک نمودار خطی، است. با در نظر گرفتن این نکته که GR تنها به شیل پاسخ می‌دهد و ϕ_N علاوه بر حضور شیل، به سیال اشباع شده نیز پاسخ می‌دهد، در لایه‌هایی که درصد رس کم است، نقاط پلات شده از روند نمودار خطی خارج می‌شوند. در صورت وجود شیل فراوان، نقاط پلات شده یک روند خطی را با افزایش ϕ_N و CGR نشان می‌دهند و در واقع موید فواصل غیرمخزنی است [۱۱].

۲-۲-۱- محاسبه حجم شیل با استفاده از نمودارهای تصویری چاه

نمودارهای تصویری از جمله نمودارهای جدیدی است که برای شناسایی پدیده‌های متقاطع با دیواره چاه در مخازن استفاده می‌شود. ابزارهای تصویر گرا الکتریکی همانند FMI^{15} با استفاده از اختلاف ویژگی‌های الکتریکی سنگ‌ها، پدیده‌های زمین-شناسی و تصویری الکتریکی از چاه ایجاد می‌کنند [۱۲]. تصویر الکتریکی FMI مطابق شکل-۱ از یک طیف رنگی شامل ۱۲۸ رنگ (۰ تا ۱۲۷) از سفید تا سیاه تشکیل شده که با افزایش عدد، تصویر تیره‌تر می‌شود.

هرچه رسانایی الکتریکی پدیده‌های مختلف موجود در چاه، بیشتر باشد، در تصویر تیره‌تر دیده می‌شود. لایه‌های شیلی در صورتی که فاقد ماده آلی بلوغ یافته باشند، به دلیل رسانایی الکتریکی بالا به صورت تیره در نمودار ظاهر می‌شوند. معمولاً عدد پیکسل‌های لایه‌های شیلی در تصویر، بالاتر از ۱۲۰ است که با قرار دادن این عدد به عنوان یک حد آستانه برای تصویر، پیکسل‌هایی از تصویر که عدد آنها بزرگ‌تر یا مساوی ۱۲۰ است، با عدد ۱ و پیکسل‌هایی که عدد آنها کوچک‌تر از ۱۲۰ است، با عدد ۰ نشان داده می‌شوند. بدین ترتیب تصویر دودویی^{۱۶} می‌شود. برای رسم نمودار حجم شیل تصویر، مساحت پیکسل‌های دارای عدد ۱ در مقابل مساحت کل تصویر، در یک پنجره متحرک ترسیم می‌شود. شکستگی باز، تخلخل حفره‌ای و ریزش دیواره چاه به دلیل نفوذ گل

و ۲۰ درصد است. در زون‌های گازی و شرایط نامساعد چاه و یا در صورتی که حجم شیل اندک باشد، از این روابط نمی‌توان استفاده کرد.

محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای نوترون- صوتی

حجم شیل براساس تلفیق نگارهای نوترون و صوتی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید.

$$V_{sh} = \frac{(\phi_N - \phi_s)}{(\phi_{Nsh} - \phi_{Ssh})} \quad (23)$$

$$V_{sh} = \frac{[B\phi_N - \Delta t + \Delta t_{0N}]}{[B\phi_{Nsh} - \Delta t_{sh} + \Delta t_{0N}]} \quad (24)$$

$$B = \frac{(\Delta t_{20N} - \Delta t_{0N})}{0.2} \quad (25)$$

$$V_{sh} = \frac{[\phi_N (\Delta t_{ma} - \Delta t_f) - \Delta t (\phi_{Nma} - 1.0) + \Delta t_f \phi_{Nma} - \Delta t_{ma}]}{[(\phi_{Nsh} - 1.0)(\Delta t_{ma} - \Delta t_f) - (\Delta t_{sh} - \Delta t_f)(\phi_{Nma} - 1.0)]} \quad (26)$$

در روابط فوق Δt_{0N} و Δt_{20N} قرائت نگار صوتی در اعماقی است که مقدار ϕ_N برابر با صفر درصد و ۲۰ درصد است.

محاسبه حجم شیل با استفاده از نگارهای چگالی- صوتی

حجم شیل براساس تلفیق نگارهای چگالی و صوتی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید.

$$V_{sh} = \frac{(\phi - \phi_D)}{(\phi_{Sh} - \phi_{Dsh})} \quad (27)$$

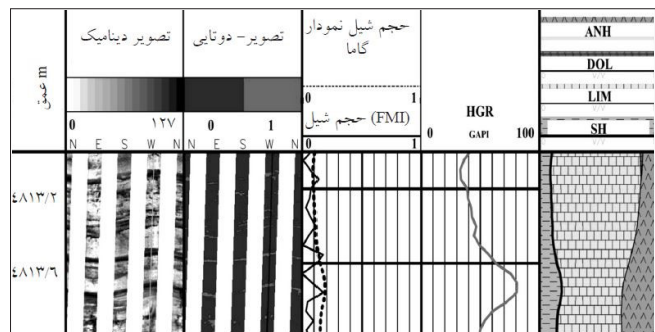
$$V_{sh} = \frac{[C(\Delta t - 40) - \rho_b + \rho_{b40\Delta t}]}{[C(\Delta t_{sh} - 40) - \rho_{sh} + \rho_{b40\Delta t}]} \quad (28)$$

$$C = \frac{(\rho_{b80\Delta t} - \rho_{b40\Delta t})}{40} \quad (29)$$

$$V_{sh} = \frac{[\rho_b (\Delta t_{ma} - \Delta t_f) - \Delta t (\rho_{ma} - \rho_f + \Delta t_f \Delta t_{ma} \rho_f)]}{[(\rho_{sh} - \rho_f)(\Delta t_{ma} - \Delta t_f) - (\Delta t_{sh} - \Delta t_f)(\rho_{ma} - \rho_f)]} \quad (30)$$



شکل ۱ | طیف رنگی یک تصویر FMI



شکل ۲ | نمایش به ترتیب از چپ به راست، ستون عمق، تصویر دینامیک، تصویر دودویی شده، ستون حجم شیل، نمودار پرتو گاما و ستون لیتولوژی

حجم شیل ضروری است. زیرا شیل‌ها تقریباً بر تمام اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی تاثیرگذار هستند. از آنجایی که شیل‌ها در میان سایر انواع لیتولوژی دارای ویژگی‌های فیزیکی شاخصی هستند، با استفاده از روش‌های چاه‌نگاری مختلفی قابل آشکارسازی و شناسایی بوده و میزان حجم شیل سازند، تعیین می‌شود. براساس نوع ویژگی فیزیکی شیل‌ها، کارآیی روش‌های مختلف چاه‌نگاری جهت ارزیابی آنها متفاوت است. نشان‌گرهای شیل همانند روش گامای طبیعی و پتانسیل خودزا همچنان مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های تعیین حجم شیل سازندها است و البته غیرنشانگرها همانند روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، نوترونی، چگالی، صوتی، تصویری و نمودارهای متقاطع، در صورت عدم وجود نشانگرها و یا همراه با آنها روش‌های مناسبی برای تعیین حجم شیل سازندها هستند. در مقاله حاضر تمامی این روش‌ها به طور جامع و کامل بررسی شده و کلیه روابط مورد استفاده برای این منظور ارائه شد. بدیهی است که دقت محاسبه میزان حجم شیل سازند، به روش مورد استفاده و نوع و دقت تجهیزات بکار رفته بستگی دارد. در صورت استفاده از روش‌های دقیق‌تر و بکارگیری تجهیزات پیشرفته‌تر، همواره نتایج از دقت بیشتر و درجه اعتماد بالاتری برخوردار خواهند بود. استفاده از دو یا چند روش مختلف به صورت همزمان، علاوه بر امکان انجام مقایسه، بر اطمینان نتایج به دست آمده می‌افزاید. ■

حفراری، باعث تیره شدن تصویر FMI می‌شوند. این حفرات دارای قرائت گامای کمتری نسبت به لایه‌های شیلی هستند و با اعمال فیلتر گاما می‌توان اثر این حفرات و شکستگی‌ها را از تصویر FMI حذف کرد. در شکل ۲- نحوه شناسایی لایه‌های شیلی با استفاده از نمودار FMI نشان داده شده است. در این شکل ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست شامل عمق، تصویر دینامیک، تصویر دودویی شده، حجم شیل، نمودار گاما و لیتولوژی است. ستون سوم از طریق اعمال روش دودویی کردن بر روی تصویر، به منظور شناسایی لایه شیلی ایجاد شده است. در ستون چهارم با محاسبه درصد حضور نقاط شناسایی شده به عنوان شیل، حجم شیل محاسبه شده است که منحنی خط‌چین حجم شیل محاسبه شده از نمودار گاما و منحنی خط پر، حجم شیل محاسبه شده از نمودار تصویری FMI است. قدرت تفکیک FMI به فاصله حسگرهای آن بستگی دارد که با توجه به فاصله ۵ میلیمتری آنها از یکدیگر، قدرت تفکیک عمودی نمودارهای چاه‌پیمایی (گاما، صوتی، چگالی و غیره) کمتر از FMI است و غالباً میزان آن بیش از ۱۵ سانتی‌متر است [۱۳].

نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی خصوصیات پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری همانند میزان تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی سازندها، تعیین میزان

پانویس‌ها

1. Neutron
2. Density
3. Sonic
4. Spontaneous Potential
5. Gamma
6. Natural Gamma
7. Spectrometry Gamma Ray
8. Compensated Gamma Ray

9. American Petroleum Institute
10. Steiber
11. Clavier
12. Contrast
13. Compton effect
14. Wyllie
15. Full-bore Formation Micro Imager
16. Binary

منابع

- [1] Darling, T., 2005, Well Logging and formation evaluation, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 326 pages.
- [2] Tiab, D. and Donaldson, C.E., 2004, Petrophysics, theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties, Gulf professional publishing, Elsevier, Second edition, 926 pages.
- [3] اسعدی، علی و کدخدایی، علی، ۱۳۹۰، تعیین حجم شیل با استفاده از تلفیق سه نگار تخلخل و مقایسه نتایج آن با روش استفاده از نگار گاما، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- [4] عیوضی نژاد، اکرم و زارع، مهدی، ۱۳۹۰، مقایسه مدل‌های پتروفیزیکی اشباع آب در نواحی شیلی مخزن قلعه نار، سومین کنفرانس ملی مهندسی نفت.
- [5] عزتی، محسن و سلیمانی، بهمن، ۱۳۹۲، تخمین شیل با استفاده از نمودار تصویری FMI [۶] رضایی، محمدرضا و جهرازی، علی، ۱۳۸۹، اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۶۹۹ صفحه.
- [7] Asquith, G. and krygowski, D., 2004, Basic Well Log Analysis, The American Association of petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma.
- [8] بهلولی، بهمن، حق زاده، روح الله و حسینی، علی، ۱۳۸۵، تعیین پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن در میدان سراجیه قم.
- [9] Rider, M.H., 1986, The geological interpretation of well logs, Blackie, Technology & Engineering, 175 pages.
- [10] Kearey, P., 2013, An introduction to Geophysical Exploration, Michael Brooks, Ian hill, John Wiley & Sons, 272 pages.
- [11] زمان نژاد، اکبر و موحد، بهرام، ۱۳۸۶، ارزیابی پتروفیزیکی و مقایسه تغییرات خصوصیات مخزن سازندهای سروک و کزدمی در چاه A میدان نفتی آزادگان واقع در جنوب غرب ایران.
- [12] خوشبخت، فرهاد، ۱۳۹۱، مدل‌سازی تخلخل سه‌گانه در یک مخزن کربناته با استفاده از نگار تصویرگر و نگارهای چاه‌پیمایی، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن، تهران.
- [13] Ellis, D.V., and Singer, M.J., 2007, Well logging for Earth Scientists. Published by Springer, pp.531568-.