

محاسبه حجم سیالات مرزی و آزاد و تعیین نفوذپذیری مخازن هیدروکربنی به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای

پژوهش نفت

سال بیست و چهارم
شماره ۷۷

صفحه، ۴۳-۳۴ ۱۳۹۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۴/۲۶

حمیده مجرد* و زهره کارگر
بخش فیزیک، واحد بین الملل دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
h_moj66002@yahoo.com

چکیده

نمودارگیری به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای، روشی نوین برای دسترسی دقیق به پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی در صنعت نفت به شمار می‌آید. در این تحقیق با استفاده از حضور هسته هیدروژن در سیالات مخزن و با بهره‌گیری از مزیت روش NMR در تعیین اندازه حفره‌ها، در ابتدا به دو شیوه حجم آب ناحیه مرزی و حجم سیال آزاد چاهی کربناته در جنوب غربی کشورمان تعیین شده و سپس نفوذپذیری NMR با استفاده از دو مدل SDR و Coates توسط نرم‌افزار ژئولاگ محاسبه گردید. نتایج یکسان حاصل از دو شیوه NMR برای تعیین حجم سیالات مرزی، با ضریب همبستگی ۰/۹ نشان می‌دهد که روش CBFV برای چاه مورد بررسی معتبر است. ضریب همبستگی ۰/۷ که از مقایسه نتایج NMR و مغزه برای پارامتر نفوذپذیری حاصل شد، بیان‌گر این است که روش NMR می‌تواند مقادیر نفوذپذیری را به درستی پیش‌بینی نماید. به همین دلیل، این روش می‌تواند جایگزین روش‌های قدیمی و پرهزینه گردد.

واژه‌های کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای، نفوذپذیری، حجم آب ناحیه مرزی، حجم سیال آزاد، حجم آب ناحیه رسی

مقدمه

روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای از همان ابتدای ارائه در سال ۱۹۴۶، تبدیل به ابزاری قدرتمند و ارزشمند در فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی و پزشکی شده است. به طوری که امروزه در صنعت نفت از NMR^۱ برای تعیین ویژگی‌های پتروفیزیکی مخازن در آزمایشگاه و چاه‌های نفت و گاز استفاده می‌گردد. نگاربرداری تشدید مغناطیسی هسته‌ای در سال ۱۹۹۱ معرفی شد. نگار NMR برای اولین بار در سال ۲۰۰۳ میلادی در ایران رانده شد و از آن پس برای شناسایی ویژگی‌های مخازن در میدین جنوبی همچون سازند کنگان در میدان پارس جنوبی و... به کار رفته است. تخلخل مستقل از لیتولوژی، نفوذپذیری، توزیع

1. Nuclear Magnetic Resonance

توالی پالس CPMG^۴ (یک پالس ۹۰ درجه که به دنبال آن سری‌های طولانی از پالس‌های ۱۸۰ درجه می‌آیند)، برای ثبت رشته پژواک - اسپین (سیگنال) استفاده می‌شود. با این وجود ناهم‌فازی ناشی از برهم‌کنش‌های مولکولی و پخش باقی‌می‌مانند و باعث می‌شوند مغناطش عرضی^۵ با ثابت زمانی واپاشی T_2 ، که زمان آسایش عرضی^۴ نامیده می‌شود، واپاشی نماید [۳].

ثابت واپاشی T_2 هسته‌های درون سازند، بیشترین اطلاعات پتروفیزیکی را دربردارد لذا اندازه‌گیری T_2 اصلی‌ترین هدف نمودارگیری NMR است. در چرخه اندازه‌گیری فاصله اعمال پالس‌های ۱۸۰ درجه (TE)، تعداد پژواک‌ها (NE) و زمان قطبش (TW) سه پارامتر کلیدی هستند که با توجه به هدف از اندازه‌گیری و حساسیت دستگاه توسط مهندس عملیات تنظیم می‌شوند.

TW باید به اندازه کافی طولانی باشد تا هسته‌های هیدروژن درون سیال به قطبیدگی کامل برسند. TE نیز باید به اندازه کافی کوتاه باشد تا واپاشی مربوط به سیالات درون حفره‌های ریز رسی ثبت گردند. انتخاب نادرست این مقادیر باعث بروز خطا در تخلخل خام و در نتیجه سایر پارامترها می‌شود [۱].

سه مکانیزم آسایش توده‌ای، آسایش سطحی و آسایش پخش القایی به موازات هم برای سیالات درون حفره‌های سنگی رخ می‌دهد. چون ثابت واپاشی دامنه رشته پژواک به اندازه حفره و نوع سیال درون آن بستگی دارد و مخازن سنگی دارای توزیعی از اندازه حفرات بوده و حاوی بیش از یک نوع سیال هستند، دامنه رشته پژواک اسپین با توزیعی از مقادیر T_2 واپاشی می‌کند [۴ و ۵].

دامنه اولیه رشته پژواک اسپین با تعداد هسته‌های هیدروژن سیالات درون حفره داخل حجم حساس متناسب است. بنابراین دامنه را می‌توان برای دستیابی به تخلخل کالیبره کرد [۱].

اندازه حفرات، گرانروی سیال، حجم سیال آزاد و مرزی از پارامترهایی هستند که می‌توان مقادیر آنها را با استفاده از این نگار به دست آورد [۱]. اکثر سازندهای کربناته دارای تغییرات گسترده‌ای در خواص پتروفیزیکی از جمله ناهمگنی‌ها و اندازه حفرات هستند. به همین دلیل تخمین نفوذپذیری در این نوع مخازن کاری بسیار پیچیده و دشوار به حساب می‌آید. لذا برای آنکه زمین‌شناسان و مهندسين مخزن بتوانند مدل مناسبی از مخزن طراحی کنند، نیازمند داشتن ابزاری مستقل از لیتولوژی همچون NMR هستند تا با بهره‌گیری از آن، خواص سنگ‌های کربناته را با دقت بالایی ارزیابی نمایند.

اصول فیزیکی و پتروفیزیکی MRIL^۱

تشدید مغناطیسی هسته‌ای به پاسخ هسته اتم به میدان‌های مغناطیسی اعمال شده اطلاق می‌شود، به طوری که خواص هسته‌های موجود داخل سیال از روی ویژگی‌های برهم‌کنش آنها با میدان مغناطیسی تعیین می‌گردد. اندازه‌گیری‌های NMR را می‌توان بر روی هسته‌هایی که دارای تعداد نوترون یا پروتون واحد یا هردو باشد، انجام داد. به عنوان مثال می‌توان به هسته‌های هیدروژن، کربن و سدیم اشاره نمود. از آن جایی که هیدروژن در آب و هیدروکربن‌ها فراوان بوده و سیگنالی نسبتاً قوی تولید می‌کند، تقریباً تمامی نگاربرداری‌ها و مطالعات NMR سنگ بر پایه پاسخ هسته اتم هیدروژن به میدان‌های مغناطیسی اعمال شده قرار گرفته است. فرآیند نگاربرداری بدین شکل است که در نبود میدان خارجی، ابتدا جهت‌گیری پروتون‌ها به صورت تصادفی است. سپس با اعمال میدان مغناطیسی ایستای B_0 ، پروتون‌ها با ثابت زمانی T_1 که زمان آسایش طولی^۲ نامیده می‌شود، در جهت میدان جهت‌گیری می‌کنند [۲].

این میدان ناشی از یک آهن‌ربای دائمی است که در مرکز دستگاه قرار دارد. سپس میدان نوسان‌کننده B_1 به گونه‌ای بر سیستم اعمال می‌شود که پروتون‌ها نسبت به جهت اولیه‌شان دچار انحراف گردند. با قطع میدان B_1 و ناهم‌فازی پروتون‌ها به علت ناهمگنی‌های میدان و فرآیندهای پخش مولکولی، واپاشی القای آزاد (FID)^۳ رخ می‌دهد و واپاشی نمایی بسیار سریعی ثبت می‌شود. برای رفع این مشکل از

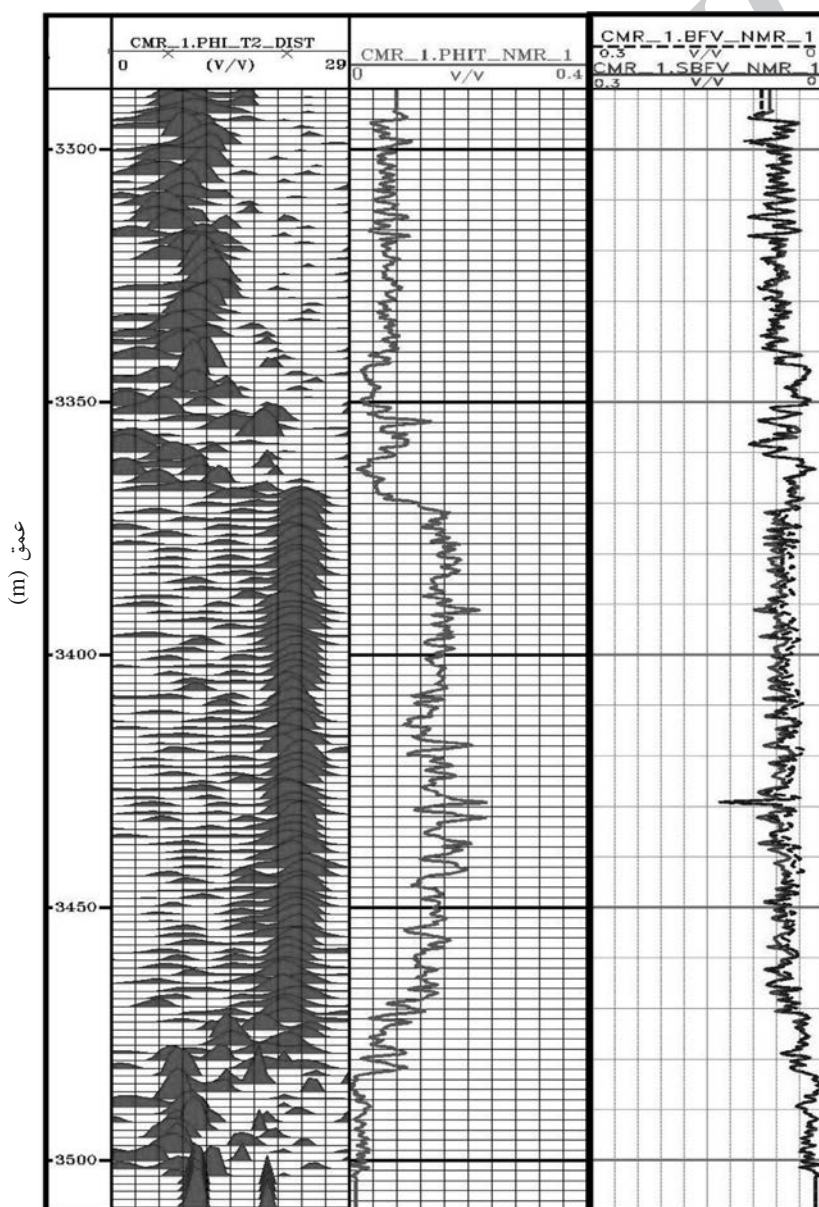
1. Magnetic Resonance Imaging Logging
2. Longitudinal Relaxation Time
3. Free Induction Decay
4. Carr, Purcell, Meiboom, Gill
5. Transverse Relaxation Time

روش کار

محاسبه توزیع T_2 و تخلخل

بعد از تصحیح داده‌های خام CPMG و جداسازی نویز از سیگنال، باید قسمت حقیقی رشته پژواک برای بررسی توزیع T_2 معکوس شود. روش L_1/L_2 [۶] برای به دست آوردن توزیع T_2 انتخاب و مقادیر پارامترهای لازم برای این محاسبات $TE=0.2$ ms، $TW=3/675$ s و $NE=5000$ در نظر گرفته شد. یکی از قیود معکوس‌سازی داده‌های CPMG به توزیع T_2 این است که جمع دامنه‌های توزیع T_2 ، با دامنه CPMG در زمان T_0 برابر باشد. این دامنه متناسب با

تخلخل است بنابراین جمع دامنه‌های توزیع T_2 با تخلخل برابر می‌باشد. نتایج این محاسبات در شکل ۱ آمده است، تراک ۱ عمق مورد بررسی و تراک ۲ توزیع T_2 حاصل از معکوس‌سازی داده‌های پژواک اسپین را نشان می‌دهد، T_2 های کوتاه‌تر نشان‌گر حفره‌های کوچک‌تر و T_2 های طولانی‌تر نشان‌گر حفره‌های بزرگ‌تر هستند، تراک ۳ تخلخل مربوط به حفره‌ها را نشان می‌دهد. کاملاً مشخص است که در عمق‌هایی با اندازه حفره‌های بزرگ‌تر تخلخل متناظر نیز بیشتر است.



شکل ۱- تراک ۱ عمق مورد بررسی، تراک ۲ توزیع T_2 حاصل از معکوس‌سازی داده‌های خام، و تراک ۳ تخلخل کل متناظر حفره‌ها و تراک ۴ نتایج محاسبات روش CBFV و SBFV برای اعتبار سنجی روش CBFV

مرزی به حساب آید، اما روش CBFV آن را به عنوان یک حفره بزرگ حاوی سیالات آزاد در نظر بگیرد. لذا فرض بر این است که هر حفره با هر بزرگی شامل مقداری سیال مرزی است که این مقدار توسط تابع وزنی برای هر گروه حفره به صورت $W(T_{2,i})$ تعریف می‌شود. مدل فیلم نازک^۵، تابع وزنی و نهایتاً حجم آب مرزی را به صورت زیر ارائه می‌دهد [۹]:

$$\frac{1}{W_i} = mT_{2,i} + b \quad \text{SBFV} = \sum_{i=1}^n W_i \phi_i \quad (2)$$

و b و m ضرایبی هستند که بهترین روش محاسبه آنها اندازه‌گیری‌هایی است که روی مغزه خارج شده از زون تحت نمودارگیری انجام می‌شود. با این وجود Coates، با بررسی مجموعه ۳۴۰ نمونه ماسه سنگ و ۷۱ نمونه کربنات، مقادیر جامعی را تعیین نموده است [۸]. با توجه به کربناته بودن سازند تحت بررسی مقادیری که برای m و b در این محاسبات استفاده شده، به ترتیب عبارتند از: $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ و 0.1 . نتایج حاصل از دو روش در تراک ۴ شکل ۱ نشان داده شده است. تطابق لاگ‌ها و ضریب همبستگی 0.9 بین نتایج دو روش، بیان‌گر کارآمدی روش CBFV در این چاه و عدم نیاز به سایر روش‌ها و تابع وزنی اختصاصی است.

محاسبه حجم آب ناحیه رسی و تخلخل مؤثر

برای جدا کردن ناحیه رسی، $T_{2 \text{ cutoff}}$ برابر با 3 ms در نظر گرفته شد. به این ترتیب می‌توان با تقسیم‌بندی توزیع T_2 ، حجم آب ناحیه رسی، حجم آب غیرقابل کاهش و تخلخل مؤثر را به طور جداگانه توسط روابط زیر به دست آورد.

$$\begin{cases} BVI = BFV - CBW \\ PHIE = PHIT - CBW \end{cases} \quad (3)$$

BVI آب ناحیه مویی و $PHIE$ تخلخل مؤثر^۶ است که به صورت مجموع سیال آزاد و سیال ناحیه مویی (BVI) یا تخلخل کل^۷ منهای آب ناحیه رسی (CBW) تعریف می‌شود. تخلخل مؤثر در روابط تعیین نفوذپذیری به کار می‌رود، لذا تخلخل مؤثر نیز محاسبه گردید. نتایج حاصل در تراک ۲ و ۳ شکل ۲ نشان داده شده است.

محاسبه حجم سیالات مرزی

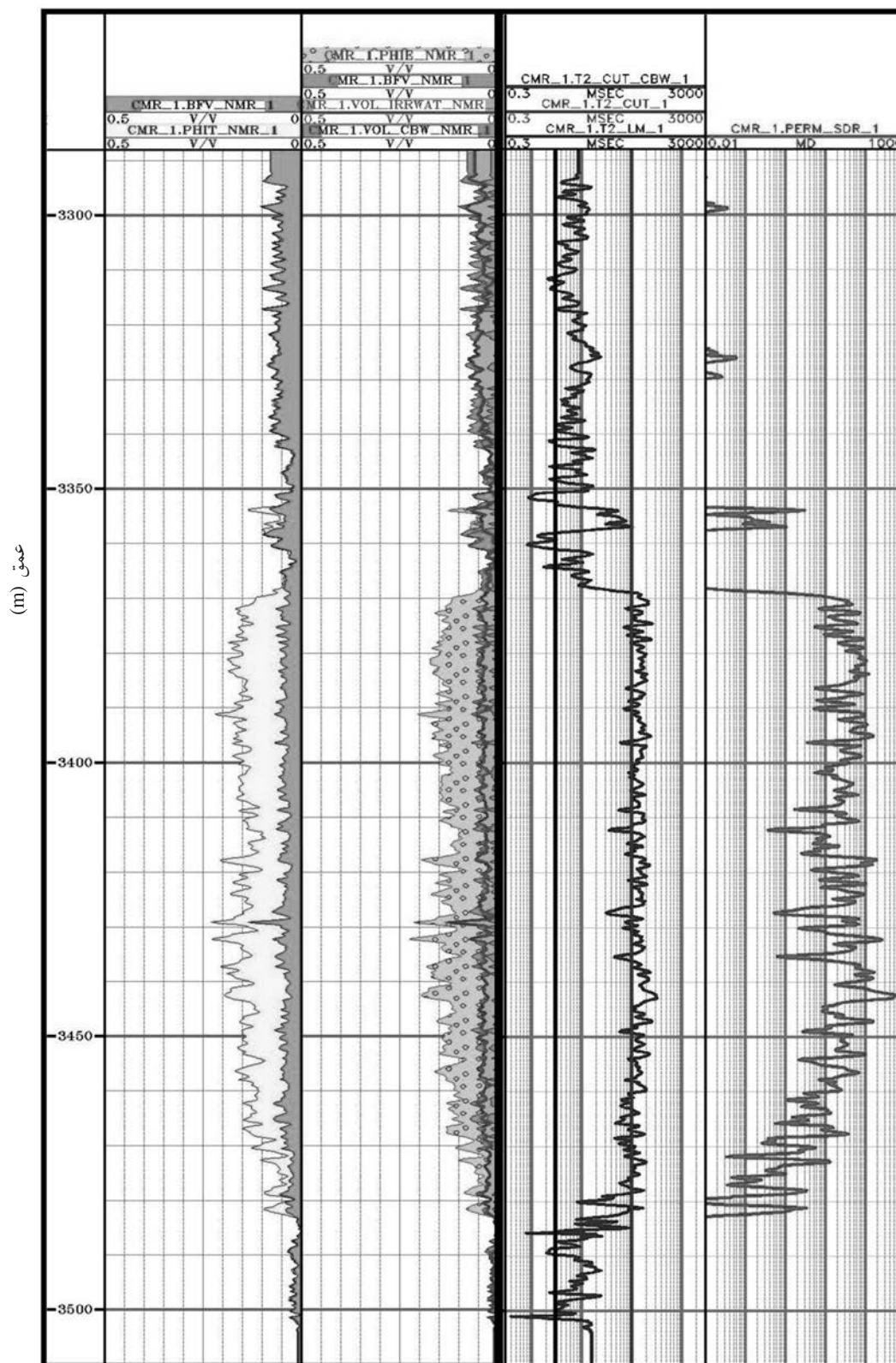
دو روش برای تعیین حجم سیال مرزی (BFV)^۱، توسط اندازه‌گیری‌های NMR در دسترس است. اولین روش ($CBFV$)^۲ بر این فرض استوار است که سیالات مرزی در حفره‌های کوچک و سیالات قابل تولید در حفره‌های بزرگ ساکن هستند. چون مقادیر T_2 به اندازه حفره مربوط است، می‌توان مقداری از T_2 را انتخاب نمود که در کمتر از آن انتظار می‌رود سیالات متناظر در حفره‌های کوچک ساکن بوده و بی حرکت باشند و در مقادیر بیشتر از آن انتظار می‌رود سیالات متناظر در حفره‌های بزرگ ساکن بوده و در نتیجه قادرند آزادانه حرکت کنند، این مقدار T_2 اصطلاحاً $T_{2 \text{ cutoff}}$ نامیده می‌شود. مقادیر $T_{2 \text{ cutoff}}$ به نوع سازند (کربناته یا ماسه سنگی) بستگی دارد و معمولاً در آزمایشگاه با اشباع و وا اشباعی مغزه و نمودارهای مربوطه تعیین می‌گردد. مقادیر پیش فرض برای کربنات‌ها 100 ms و برای ماسه سنگ‌ها 33 ms می‌باشد. با جا به جا کردن مقدار $T_{2 \text{ cutoff}}$ ممکن است مقداری از حجم سیال مرزی به حساب آید یا بالعکس. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، مؤلفه‌های T_2 کمتر از 3 ms به آب ناحیه رسی، مؤلفه‌های T_2 بین 3 و 100 ms به عنوان آب ناحیه مویی و بیشتر از 100 ms به حجم سیال آزاد اتلاق می‌گردد. محدوده 0 تا 3 ms متناظر حجم رس‌هاست و امکان تعیین دقیق‌تر آن برای انواع رس‌ها تحت شرایط مختلف در آزمایشگاه وجود دارد [۷]. با این تقسیم‌بندی توزیع T_2 ، $T_{2 \text{ cutoff}}$ تخلخل را به بخش BFV و FFV (سیال آزاد) تقسیم می‌کند [۸]. زمان‌های آسایش کوچک‌تر متناظر با حفره‌های کوچک‌تر است که شامل آب ناحیه مویی و آب ناحیه رسی شده و به عنوان حجم سیال مرزی (BFV)، شناخته می‌شوند. BFV آب ناحیه مویی و آب ناحیه رسی را دربردارد:

$$BFV = BVI + CBW \quad (1)$$

همان‌طور که بیان شد، CBW با اعمال $T_{2 \text{ cutoff}}$ حدوداً در 3 ms مشخص می‌شود.

روش دوم برای تعیین BFV ، BFV طیفی ($SBFV$)^۴ نامیده می‌شود و برپایه این تشخیص استوار است که هر حفره معلوم می‌تواند هم شامل سیالات مرزی و هم سیالات آزاد باشد. چون حفره‌ها دارای شکل‌های ساده هندسی از قبیل استوانه و کره نیستند، امکان دارد حفره شامل نامنظمی‌های کوچک زیادی باشد که سیال در آن به دام افتاده باشد و به عنوان سیال

1. Bound Fluid Volume
2. Cutoff BFV
3. Free Fluid Volume
4. Spectral BFV
5. Thin-Film Model
6. Effective Porosity
7. Total Porosity



شکل ۲- تراک ۱ عمق مورد بررسی، تراک ۲ حجم سیال مرزی به همراه تخلخل کل، تراک ۳ آب ناحیه رسی در تراک ۴ مقادیر $T_{2\text{cutoff}}$ به کار رفته و متوسط لگاریتمی توزیع T_2 و تراک ۵ نفوذپذیری حاصل از مدل SDR

نفوذپذیری

توانایی عبور سیال از میان حفره‌های سنگی، نفوذپذیری نامیده می‌شود و ارتباط مستقیمی با اندازه حفره و تخلخل دارد. هر چند در اندازه‌گیری‌های NMR اندازه حفره به دست می‌آید و نه اندازه دهانه آن، اما ارتباط منحنی‌های فشار مویی و نفوذپذیری تأیید می‌کند که اندازه حفره متناسب با اندازه دهانه آن است. لذا در محاسبات نفوذپذیری مدل‌های معرفی شده، علاوه بر اندازه حفره، یک ضریب اضافی نیز در نظر گرفته می‌شود.

مدل T_2 میانگین (SDR)

در این مدل پارامتر اندازه حفره از طریق T_{2LM} (متوسط لگاریتمی طیف آسایش) وارد می‌شود. تجربه نشان داده که مدل T_2 میانگین در زون‌هایی که تنها شامل آب باشند، جواب خوبی می‌دهد. مدل T_2 میانگین برای سازندهای هیدروکربنی ناموفق است، زیرا اثر هیدروکربن روی T_{2LM} غیرقابل تصحیح است. در این حالت T_{2LM} منحصرأ بیان‌گر اندازه حفره نیست از آنجا که T_2 آب و نفت مقادیر متفاوتی دارند، حضور هیدروکربن یا تراویده گل نفتی باعث تغییر T_{2LM} و تمایل آن به سمت مایعات توده‌ای و تخمین کم نفوذپذیری می‌شود. در حالت کلی، نفوذپذیری حاصل از این مدل از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$K = c_1 T_{2LM}^{a_1} \cdot \phi_{NMR}^{b_1} \quad (4)$$

T_{2LM} متوسط لگاریتمی توزیع T_2 ، ϕ_{NMR} تخلخل مؤثر NMR و c_1 ، a_1 و b_1 ضرایبی هستند که به نوع سازند و نحوه شکل‌گیری آن وابسته‌اند. در محاسبات ضرایب c_1 ، a_1 و b_1 برای سازند تحت بررسی به ترتیب مقادیر پیش فرض ۴ md و ۲ و ۴ در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل در شکل ۲ نمایش داده شده است. تراک ۴ لاگ متوسط لگاریتمی T_2 و مقادیر $T_{2cutoff}$ به کاررفته و تراک ۵ لاگ نفوذپذیری حاصل از مدل SDR را نشان می‌دهد. در این نمودار نفوذپذیری بین ۰/۱ تا ۵۴۵/۵۸ md تغییر می‌کند.

مدل سیال آزاد (Timur/Coates)

یکی از اصلی‌ترین اندازه‌گیری‌های NMR، اندازه‌گیری FFV است. FFV حجمی از سیال است که به صورت

الکتریکی یا شیمیایی به شبکه رس‌ها، سطح ماتریکس و یا شبکه سایر کانی‌ها متصل نیست. FFV حجم سیالی است که در داخل فضای خالی قدرت حرکت دارد. حجم این سیال می‌تواند شامل نفت و آب باشد، اما آب کاهش نیافتنی را شامل نمی‌شود. مدل سیال آزاد از برش‌های مخزنی تجربی برای جدایش سیال غیر قابل کاهش (BFV) از سیال قابل تولید (FFV) استفاده می‌کند. تا زمانی که BFV هیچ نوع هیدروکربنی را شامل نشود، BFV توسط فاز اضافی سیال از قبیل نفت یا تراویده گل نفتی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد که این عامل مزیتی نسبت به مدل SDR به شمار می‌رود. در مدل سیال آزاد (Coates) کلی‌ترین شکل نفوذپذیری k از رابطه زیر به دست می‌آید [۸]:

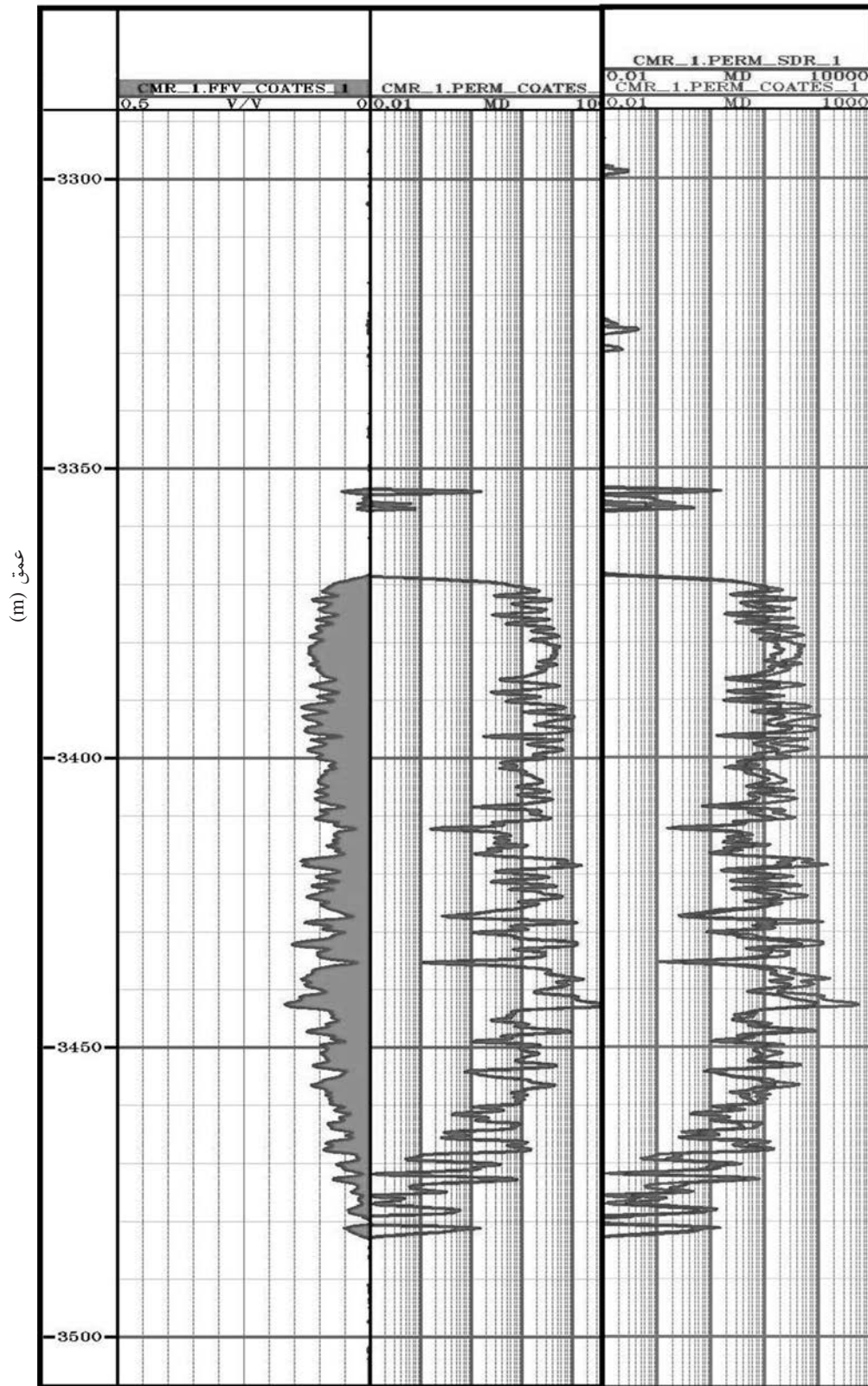
$$K = c_2 \left(\frac{FFV}{BFV} \right)^{a_2} \cdot \phi_{NMR}^{b_2} \quad (5)$$

در این مدل پارامتر اندازه به طور ضمنی توسط نسبت FFV/BFV وارد می‌شود. ضرایب a_2 ، b_2 و c_2 به فرآیندهای ایجاد کننده سازند وابسته‌اند و برای هر سازند متفاوت می‌باشند که از روش تطابق با داده‌های مغزه به دست می‌آیند. در محاسبات ضرایب c_2 ، a_2 و b_2 برای سازند تحت بررسی به ترتیب برابر ۱ md، ۲ و ۴ در نظر گرفته شده‌اند. حجم سیال آزاد (FFV) نیز در این مرحله از محاسبات تعیین می‌گردد. نتایج حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است. تراک ۱ عمق مورد بررسی، تراک ۲ حجم سیال آزاد و تراک ۳ لاگ نفوذپذیری حاصل از مدل Coates را نشان می‌دهد. در این نمودار نفوذپذیری بین ۰/۱ تا ۵۴۳/۰۲ md تغییر می‌کند.

در نواحی حاوی هیدروکربن می‌توان از مدل سیال آزاد استفاده نمود یا نفوذپذیری را با استفاده از روابط تخلخل و اشباع آب غیرقابل کاهش NMR، $S_{wir} = 1 - \frac{FFV}{\phi}$ ، (به عنوان مثال رابطه ریلی و رز) محاسبه نمود.

نتایج و بحث

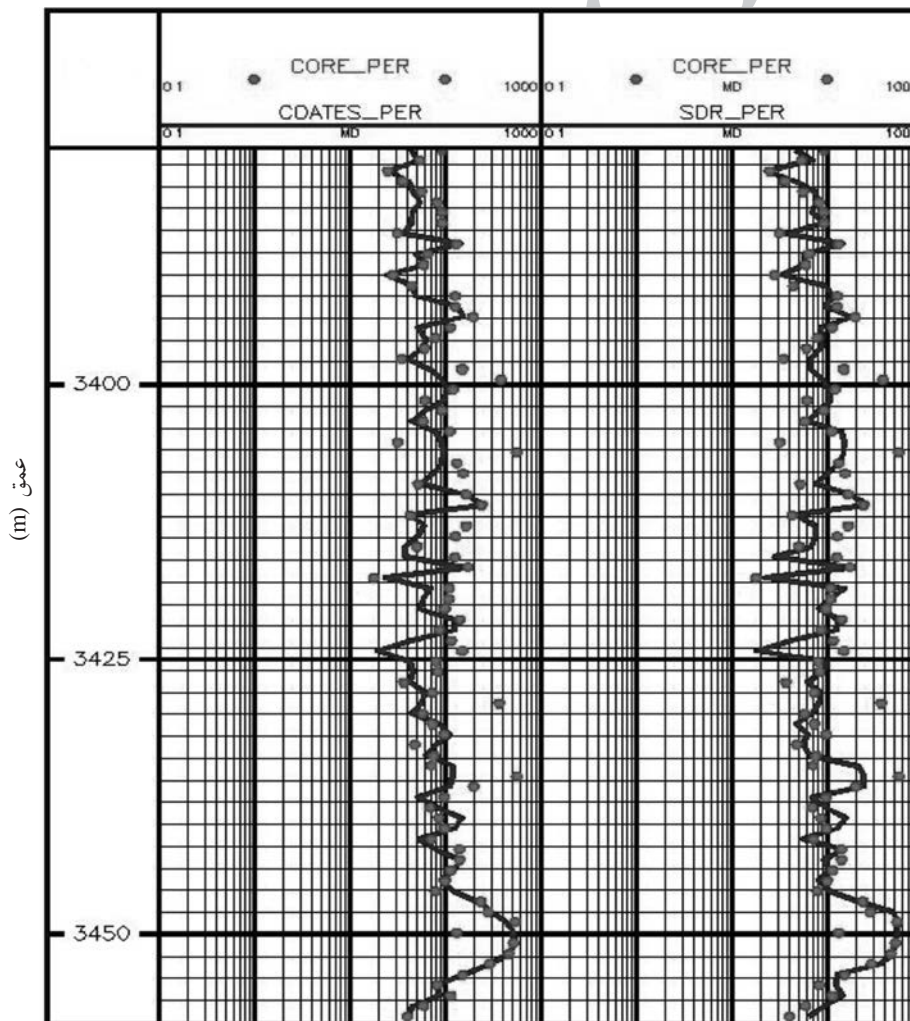
مقایسه نتایج دو شیوه معرفی شده برای تعیین حجم سیال مرزی توافق خوبی (ضریب همبستگی ۰/۹) را نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان برای سازند تحت بررسی از روش معمول CBFV استفاده نمود.



شکل ۳- تراک ۱ عمق مورد بررسی، تراک ۲ حجم سیال آزاد و تراک ۳ لاگ نفوذپذیری حاصل از مدل Coates و تراک ۴ مقایسه نتایج به دست آمده از دو مدل نفوذپذیری SDR و Coates

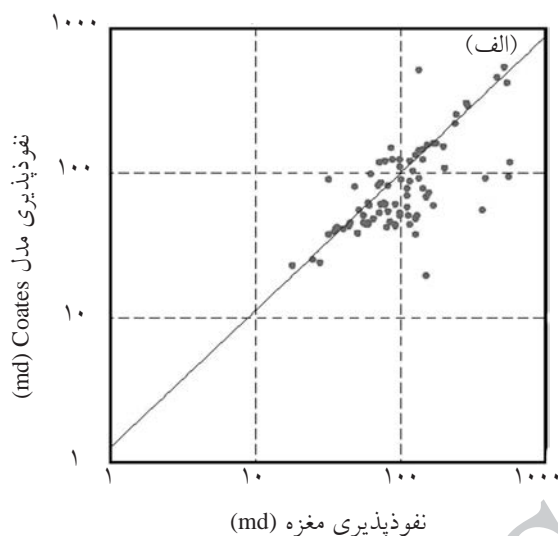
قسمت‌های الف و ب شکل ۵ رسم شده است. لیتولوژی سازند مورد بررسی از نوع سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) است که لایه‌های نازکی از شیل به همراه انیدریت دارد. مغزه از نوع پلاگ می‌باشد که تراوایی آن با تزریق گاز هلیوم اندازه‌گیری شده است. در این روش اثر کلینکریگ^۱ یا لرزش گاز باعث می‌شود نفوذپذیری مغزه بیشتر تخمین زده شود که بیشتر بودن نفوذپذیری مغزه نسبت به نفوذپذیری NMR، شکل ۴، مشاهده می‌گردد. ضریب همبستگی ۰/۷ بین داده‌های مغزه و NMR بیان‌گر اعتبار نتایج NMR است. در حالت کلی برای در نظر گرفتن ویژگی‌های مختص یک سازند خاص و دستیابی به نتایج و اطلاعات دقیق‌تر لازم است ضرایب c که در روابط دو مدل Coates و SDR به کار می‌روند را بسته به نوع سازند مورد مطالعه کالیبره نمود.

ممکن است این شیوه در مورد سازندهای دیگر مناسب نباشد و استفاده از روش SBFV و انتخاب تابع وزنی مناسب براساس هندسه حفره‌ها و منطبق بر نیاز موجود قابل اطمینان‌تر باشد. نتایج حاصل از دو مدل نفوذپذیری هر دو لاگ در تراک ۴ شکل ۳ رسم شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در عمق مورد بررسی از سازند، هر دو مدل نتایج تقریباً مشابهی دارند (ضریب همبستگی ۰/۹). اما به دلیل تحت تأثیر قرار گرفتن مدل SDR نسبت به هیدروکربن‌های موجود در حفرات، مدل Coates قابل اطمینان‌تر است. برای اعتبار سنجی نفوذپذیری NMR، داده‌های مغزه عمق مورد بررسی تهیه و با نتایج به دست آمده مقایسه شد. با حذف شکستگی‌ها، لاگ نفوذپذیری NMR برای دو مدل Coates و SDR و نفوذپذیری مغزه در تراک‌های ۲ و ۳ شکل ۴ مقایسه شده‌اند. همچنین کراس پلات‌های متناظر در

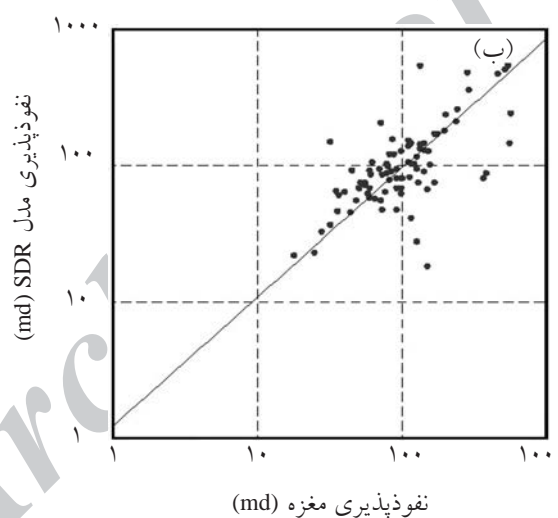


شکل ۴- تراک ۱ عمق مورد بررسی، تراک ۲ مقایسه نفوذپذیری مغزه و نفوذپذیری مدل Coates و تراک ۳ مقایسه نفوذپذیری مغزه و نفوذپذیری SDR پس از حذف شکستگی‌ها برای داده‌های مغزه

1. Klinkenberg Effect



رگرسیون نمودارهای نفوذپذیری مغزه و نفوذپذیری مدل Coates
 $COATES=10^{**}(-0.03910053+1.01955+\log_{10}(COR))$



نمودارگرسیون نمودارهای نفوذپذیری مغزه و نفوذپذیری مدل SDR
 $SDR=10^{**}(0.089603+0.946488*\log_{10}(COR))$

شکل ۵- مقایسه نتایج نفوذپذیری حاصل از الف) مدل Coates و داده‌های مغزه ب) مدل SDR و داده‌های مغزه در یک بازه از عمق

نتیجه‌گیری

به دست می‌آید. ضریب همبستگی ۰/۷ که بین داده‌های نفوذپذیری NMR و نفوذپذیری مغزه وجود دارد، صحت و دقت روش NMR را نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

با سپاس از پژوهشگاه صنعت نفت، شرکت نفت و گاز زاگرس جنوبی و شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب که طی انجام این مطالعه همواره ما را یاری نمودند.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، تنها با استفاده از ابزار چاه‌پیمایی NMR می‌توان اکثر پارامترهای پتروفیزیکی با ارزش را محاسبه نمود. نتایج یکسان دو روش CBFV و SBFV با ضریب همبستگی ۰/۹ برای محاسبه حجم سیال مرزی قابل اطمینان بودن روش CBFV را برای سازند کربناته تحت بررسی، تأیید می‌نماید. همچنین دو مدل برای محاسبه نفوذپذیری ارائه گردید که نمودار پیوسته‌ای از آن

علائم و نشانه‌ها	PHIT: تخلخل کل (V/V)
B_0 : میدان مغناطیسی پایا (Tesla)	S_{wir} : اشباع آب غیر قابل کاهش
B_1 : میدان مغناطیسی نوسانی (kHz)	T_1 : زمان آسایش طولی (ms)
BFV : حجم سیال مرزی (V/V)	T_2 : زمان آسایش عرضی (ms)
FFV : حجم سیال آزاد (V/V)	$T_{2cutoff}$: T_2 قطع (ms)
K : نفوذپذیری (md)	T_{2LM} : متوسط لگاریتمی توزیع T_2 (ms)
$PHIE$: تخلخل مؤثر (V/V)	ϕ : تخلخل (V/V)

مراجع

- [۱]. کارگر ز.، مجرد ح. و خوش سیما ف.، چاه‌نگاری به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای اصول و کاربردها، نویسندگان Coates, G.R., Xiao, L. و Parmmer, M.G.، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۹۹۹.
- [۲]. رضایی م.، چهارازی ع.، اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۰۰۶.
- [3]. Cowan B., *Nuclear magnetic resonance and relaxation*, Cambridge: Cambridge University Press. 1997.
- [4]. Kenyon W. E., "Petrophysical principles of applications of NMR logging", *The Log Analyst*, Vol. 38, No. 2, pp. 21-43, 1997.
- [5]. Sørland G. H., Djurhus K. and Skauge A., "Absolute pore size distributions from NMR", University of Bergen, Norway, *Diffusion Fundamentals* 5, 4.1-4.15, 2007.
- [6]. Bube K. P and Langan R. T., "Hybrid L1/L2 minimization with applications to tomography", *Geophysics*, Vol. 62, No. 4, pp. 1183-1195, 1997.
- [7]. Dunn K. J. and Bergman D. J., "LaTorraca, nuclear magnetic resonance: petrophysical and logging applications", Vol. 32, pp. 89-90, 2002.
- [8]. Coates G., Marschall D., Mardonl D., and Galford J., "A new characterization of bulk-volume irreducible using magnetic resonance *The Log Analyst*", Vol. 39, No. 1, pp. 51-63., 1997.
- [9]. Chen S., Arro R., Minetto C., Gorgi D. and Liu C., *Methods for computing Swi and BVI from NMR logs*, HI, 39th SPWLA Annual Logging Symposium, 1998.
- [10]. Kenyon W., Day P., Straley C., and Willemsen J., "A tree part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones", *SPE Formation Evaluation*, Vol. 3, No. 3, pp. 622-636, 1988.