

## مدلسازی توزیع اندازه حفرات و تخمین پارامتر تراوایی به وسیله نمودار NMR در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران

مهرداد قنبری زاده، محمد آبدیده\*، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه

### چکیده

کسب پارامترهای مخزنی از مراحل مهم برنامه ریزی جهت تولید از مخازن هیدروکربوری می باشد و تراوایی یکی از مهمترین خواص مخزنی محسوب می گردد. توزیع اندازه شعاع حفرات، دیگر پارامتری است که نقش تعیین کننده ای در تخمین تراوایی، افزایش بازیافت و نگه داشت تولید دارد. یکی از روش های اندازه گیری تراوایی با استفاده از ابزارهای چاه پیمایی، نمودارهای تشدید مغناطیسی هسته (NMR) می باشد. در این پژوهش ابتدا توسط نمودارهای مخزنی مرسوم، سازند کربناته در یکی از میادین نفتی جنوب ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و نواحی دارای پتانسیل مخزنی مشخص گردید. سپس تلاش گردید که دو پارامتر تراوایی و توزیع اندازه حفرات اندازه گیری گردد. دو شیوه به کار گرفته شده برای ارزیابی این پارامترها، روش نمودار تشدید مغناطیسی هسته (ابزار CMR-PLUS) و روش استفاده از ابزار MDT بود که نتایج تراوایی حاصل از تشدید مغناطیسی هسته با نتایج حاصل از MDT مورد مقایسه قرار گرفت. از سویی، به منظور مقایسه دقیق تر نتایج تراوایی حاصل از NMR و تراوایی MDT، تشدید مغناطیسی هسته با سه مدل تخمین تراوایی (Timur-Coates, Taper Timur-Coates, SDR) با استفاده از نرم افزار ژئولاگ محاسبه گردید. در انتها نتایج نشان داد که اندازه گیری تراوایی با استفاده از شیوه تشدید مغناطیسی هسته در مخزن کربناته داری دقت نسبتاً خوبی می باشد و استفاده از مدل Taper Timur-Coates از دقت بهتری نسبت به سایر مدل ها برخوردار است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۰/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۲/۰۸

### واژگان کلیدی:

تراوایی، تشدید مغناطیسی هسته، توزیع اندازه حفرات، نمودارگیری چاه، کربناته

### مقدمه

NMR، عبارتی مخفف و به معنی تشدید مغناطیسی هسته اتم می باشد. بسیاری از هسته ها دارای ممنت مغناطیسی هستند. آنها مانند آهنرباهای چرخنده عمل می کنند. این هسته مغناطیسی چرخنده می تواند با میدان مغناطیسی خارجی واکنش داده و سیگنال های قابل اندازه گیری تولید کند. برای بیشتر عناصر، سیگنال های تشخیص داده شده اندک هستند. اما هیدروژن دارای ممنت مغناطیسی نسبتاً بزرگی بوده و در آب و هیدروکربن های موجود در فضاهای متخلخل به وفور یافت می شود.

کمیت هایی که در نمودارنگار NMR اندازه گیری می شوند، شامل دامنه و زوال سیگنال است. دامنه سیگنال NMR متناسب با تعداد هیدروژن های موجود بوده و برای به دست آوردن تخلخل کالیبره می شود. این تخلخل از اثرات سرچشمه های رادیواکتیو و لیتولوژی میراست. با این حال زوال سیگنال NMR در طول هر چرخه اندازه گیری ( که به نام زمان آرامش خوانده می شود) جالب ترین و بهترین اطلاعات را درباره خواص پتروفیزیکی ارائه می کند. زمان آرامش به اندازه فضاهای متخلخل وابسته است. برای مثال فضاهای متخلخل کوچک زمان آرامش را کاهش می دهند و کوتاه ترین زمان آرامش مربوط به آب های چسبیده به رس ها و سطوح ماتریکس است. فضاهای متخلخل بزرگ دارای زمان آرامش طولانی بوده و حاوی سیالاتی هستند که به سهولت حرکت می کنند. بنابراین توزیع زمان آرامش یک اندازه گیری از توزیع اندازه های فضاهای

### پیشینه تحقیق

متخلخل است. زمان آرامش و توزیع آنها ممکن است برای به دست آوردن سایر پارامترهای پتروفیزیکی مانند تراوایی تخلخل مفید و اشباع شدگی کاهش نیافتنی، به کار رود. سایر کاربردهای ممکن شامل منحنی های فشار موینه، تشخیص هیدروکربن و نیز به عنوان وسیله ای در کمک به تشخیص رخساره هاست [۱].

بررسی مطالعات پیشین توسط Trevizan و همکارانش (۲۰۱۵) جهت ارائه شیوه کار اصلاح مدل NMR برای تخمین تراوایی در یک سنگ مخزن کربناتی نشان می دهد، با تلفیق اطلاعات حاصل از آنالیز آزمایشگاهی مغزه و داده های به دست آمده از لاگ NMR با استفاده از مدل Timur-Coates و Kenyon SDR، ضرائب دقیق تری جهت استفاده در معادلات حاصل می گردد. تراوایی NMR محاسبه شده در آزمایشگاه توسط معادلات Timur-Coates و Kenyon انطباق خوبی با تراوایی حاصل از تزریق نیتروژن نشان می دهد. با اعمال فاکتور تصحیح F<sup>+</sup> ضریب انطباق در رابطه Timur-Coates از ۰,۵۷۴۳، به ۰,۹۲۸ بهبود یافت. همچنین در رابطه Kenyon<sup>+</sup> ضریب انطباق از ۰,۷۵۰۱ به ۰,۹۵۳۴ بهبود یافت. [۵]

دهداری و علوی (۲۰۱۴)، در میدان گازی پارس جنوبی جهت تعیین

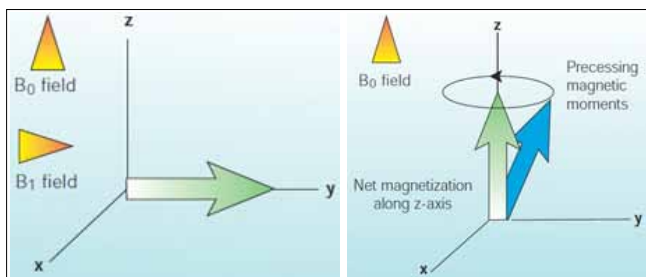
\* نویسنده ی عهده دار مکاتبات (m.abdideh@yahoo.com)

$$f_1 = \gamma \cdot B_1 \quad (1)$$

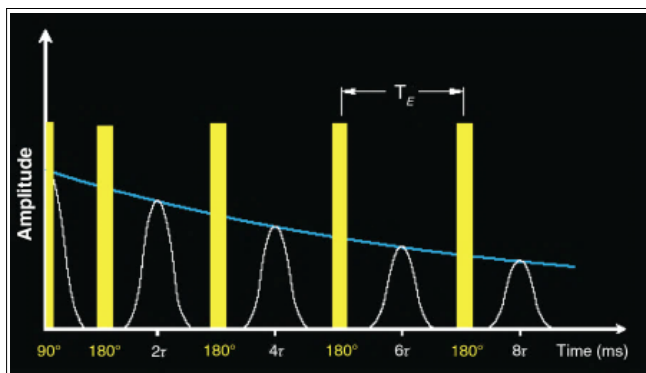
در این رابطه  $f_1$  فرکانس لارمور و  $\gamma$  نسبت ژیرومگنتیک هسته‌اند. برای مثال فرکانس لارمور برای هسته هیدروژن در میدانی به شدت ۵۵۰ گوس، در حدود ۲/۲ MHz است. زاویه‌ای که اسپین‌ها جهت داده می‌شوند به وسیله شدت میدان  $B_1$  و مدت‌زمان اعمال میدان، کنترل می‌شود. برای مثال برای جهت دادن اسپین‌ها به اندازه  $90^\circ$  (همانطوری که در بیشتر کارهای چاه‌پیمایی صورت می‌گیرد) میدان  $B_1$  به شدت چهار گوس و به مدت ۱۶ میکروثانیه فعال می‌شود. [۲]

### انحراف و خارج شدن از فاز

زمانی که پروتون‌ها به اندازه  $90^\circ$  درجه از میدان  $B_0$  منحرف می‌شوند شروع به تغییر محور چرخش در صفحه عمود بر  $B_0$  می‌کنند. در این حالت پروتون‌ها مانند ژيروسکوپ (فریره) در میدان گراوئته عمل می‌کنند. در ابتدا تمام پروتون‌ها با هم تغییر محور چرخش می‌دهند. در این زمان آنها تولید یک میدان مغناطیسی کوچک می‌کنند که فرکانس آن برابر با فرکانس لارمور بوده و توسط آنتن دریافت شده و پایه و اساس اندازه‌گیری‌های NMR را فراهم می‌کند. اما میدان مغناطیسی  $B_0$  کاملاً



شکل ۱ | راست- منظم‌شدگی پروتون. چپ- پروتون‌های جهت داده شده به وسیله یک پالس مغناطیسی که  $90^\circ$  با  $B_0$  زاویه دارد، منحرف می‌شوند. [۴]



شکل ۲ | برای تولید یک رشته اکوی چرخش، از توالی پالس CPMG استفاده می‌شود که شامل یک پالس  $90^\circ$  درجه‌ای میدان  $B_1$  و دنبال آن توالی پالس  $180^\circ$  درجه میدان  $B_1$  است. کاهش دامنه اکوی چرخش با ادامگی  $180^\circ$  درجه‌ای میدان  $B_1$  همراه است. [۵]

تراوایی و توزیع اندازه حفرات، پژوهش خود را به دو شیوه: الف: انجام آزمایش‌ها بر روی مغزه در آزمایشگاه. ب: با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ با استفاده از سه مدل FREE FLUID, SWANSON, AVERAGE-T2 انجام دادند که نتایج آن به قرار زیر می‌باشد:

■ نمودار NMR با سنگ مخزن ماسه‌سنگی سازگاری بهتری نسبت به کربناته‌ها دارد.

■ از میان سه مدل، نتایج تراوایی مدل سیال آزاد با نتایج حاصل از آزمایش‌های مغزه سازگاری بیشتری داشت.

■ مدل میانگین T2 در سازندهایی که تنها حاوی یک نوع سیال می‌باشند، عملکرد مناسب‌تری دارد. [۳]

### اصول اندازه‌گیری NMR

تشدید مغناطیسی هسته به یک اصل فیزیکی یعنی پاسخ هسته به میدان مغناطیسی منتسب است. بسیاری از هسته‌ها گشتاور مغناطیسی خالص و گشتاور یا چرخش زاویه‌ای دارند. در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی، محور هسته اتم حول جهت میدان خارجی تغییر جهت می‌دهد. این حالت بسیار شبیه به تغییر جهت محور ژيروسکوپ حول میدان گرانشی زمین است. هنگامی که این هسته‌های مغناطیسی چرخان تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرند، سیگنال‌های قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌شوند. روند اندازه‌گیری با منظم‌شدگی در پروتون‌ها آغاز می‌شود و سپس به ترتیب تغییر جهت اسپین‌ها، تغییر محور چرخش و ایجاد جهت‌دهی و بی‌نظمی مکرر در اسپین‌ها انجام می‌گیرند. آرامش طولی و عرضی مدت‌زمان اندازه‌گیری را تعیین می‌کنند. فقط زمانی می‌توان اندازه‌گیری را تکرار کرد که تمام این مراحل کامل شده باشند (ممکن است چند ثانیه طول بکشد).

### منظم‌شدگی پروتون‌ها

پروتون‌ها با اعمال یک میدان مغناطیسی بزرگ و ثابت  $B_0$  منظم می‌شوند. این کار چند ثانیه طول می‌کشد و تا زمانی که میدان مغناطیسی وجود داشته باشد در همان وضعیت می‌ماند. ابزارهای نوین از آهنرباهای دائمی که ۱۰۰۰ بار قوی‌تر از میدان مغناطیسی زمین است، استفاده می‌کنند (۵۵۰ گوس). (شکل ۱-راست)

### کج‌شدگی اسپین‌ها

مرحله بعد این است که به پروتون‌های منظم شده با استفاده از یک میدان مغناطیسی نوسانی  $B_1$  که عمود بر جهت  $B_0$  است، جهت دیگری داده می‌شود (شکل ۱-چپ). برای منظم‌شدگی موثر اسپین‌ها لازم است رابطه زیر برقرار شود:

که پروتون‌ها به حالت فاز بر می‌شوند، سیگنالی در آنتن تولید می‌کنند که به نام اسپین اکو خوانده می‌شود. البته اسپین اکو نیز به سرعت رو به زوال می‌رود، اما پالس‌های  $180^\circ$  را می‌توان به دفعات زیاد در یک اندازه‌گیری NMR تکرار کرد. روند مرسوم این است که پالس‌های  $180^\circ$  تاجایی که ممکن است به هم نزدیک‌تر باشند. سکانس کامل (شکل-۲) پالس شامل یک پالس  $90^\circ$  است که با سری طولانی پالس‌های  $180^\circ$  ادامه پیدا می‌کند. این سکانس به نام CPMG خوانده می‌شود و از نام مخترعان آن یعنی Carr، Purcell، Meiboom و Gill گرفته شده است. فاصله اکوها در ابزار CMR شلومبرژه ۳۲۰ میکروثانیه است.

### کاربردهای NMR و ابزار نمودارگیری CMR-PLUS

ابزار CMR<sup>۲</sup> آخرین نسخه از ابزارهای NMR شلومبرژه است. اندازه‌گیری به‌طور کامل در سازند صورت می‌گیرد. در CMR از <sup>۱</sup>PNMR استفاده می‌شود، که اثرات غیرهم‌شکل بودن میدان‌های مغناطیسی استاتیک را حذف می‌کند و نیز شدت سیگنال دریافتی را افزایش می‌دهد. این ابزار ۱۴ فوت طول داشته و می‌توان آن را با بسیاری از ابزارهای دیگر تلفیق کرد. بسته حسگرها در یک سمت ابزار نصب شده اند و محتوی دو آهنربای دائمی و آنتن گیرنده - فرستنده می‌باشد. این ابزار قابلیت اندازه‌گیری پارامترهای پتروفیزیکی مانند تراوایی توزیع اندازه حفرات، تخلخل، اشباع‌شدگی کاهش نیافتنی، منحنی‌های فشار مویینه و تشخیص هیدروکربن را داشته و نیز به‌عنوان وسیله‌ای در کمک به تشخیص رخساره‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است در این پژوهش بر اندازه‌گیری سه پارامتر تراوایی، توزیع اندازه حفرات و تخلخل تمرکز می‌شود.

### توزیع اندازه فضاهای خالی

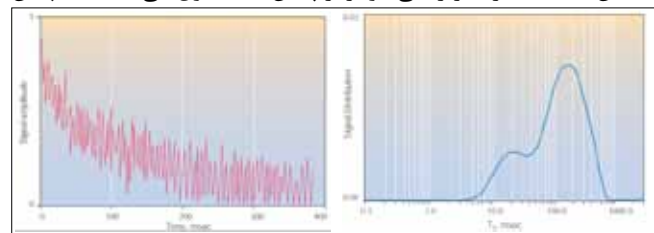
در مواد متخلخل، زمان آرامش  $T_2$  متناسب با اندازه فضاهای خالی است. ابزار CMR در هر عمقی از چاه قسمتی از سازند را تجسس می‌کند که دارای طیفی از اندازه فضاهای خالی است. زوال  $T_2$  مشاهده شده برابر مجموع سیگنال‌های حاصل از پروتون‌ها در فضاهای خالی متعدد است که هر کدام از این فضاها زمان آرامش متفاوتی دارند. توزیع  $T_2$  به صورت گرافیکی نشانگر حجم سیال فضاهای خالی همراه با هر مقدار  $T_2$  بوده و بنابراین، با حجم همراه با هر فضای خالی برابر است. از تکنیک‌های پردازش سیگنال‌ها برای تبدیل سیگنال‌های NMR به توزیع  $T_2$  (شکل-۳) استفاده می‌شود.

در نمودارهای NMR توزیع تخلخل محاسبه شده برای چند بازه‌ی مشخص به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. این بدان معنی است که سطح زیر نمودار  $T_2$  در هر بازه به‌طور مجزا اعلام شده است. با توجه به

همگن نیست و همین مطلب باعث می‌شود تا پروتون‌ها در فرکانس‌هایی متفاوت از هم تغییر محور چرخش دهند. به تدریج هم زمانی پروتون‌ها از بین رفته (از فاز خارج می‌شوند) و باعث می‌شود سیگنال در آنتن گیرنده رو به افول رود. سیگنالی که رو به زوال می‌رود به نام زوال القایی آزاد<sup>۲</sup> (FID) و زمان این زوال به نام  $T_2$  خوانده می‌شود. در ابزارهای چاه‌پیمایی  $T_2$  قابل مقایسه با فاصله پالس‌های متوالی یعنی حدود چند ده میکروثانیه است.

### تمرکز مجدد

خارج شدن از فاز که به وسیله ناهمگنی‌های موجود در میدان  $B_0$  حاصل می‌شود، عکس شدنی است. مسابقه‌ای را تصور کنید که با شلیک تفنگی آغاز می‌شود. این مسابقه قابل قیاس با پالس حاصل از میدان  $B_1$  است، که اسپین‌ها را  $90^\circ$  جهت می‌دهد. دوندگان با هم شروع به دویدن می‌کنند، ولی پس از اندکی شروع به پراکنده شدن و فاصله گرفتن از هم می‌کنند، زیرا سرعتشان متفاوت است. در این لحظه با شلیک تیری دیگر مسیر دونده‌ها  $180^\circ$  تغییر می‌کند. سریع‌ترین دونده بیشترین فاصله را باید طی کند. در این حالت اگر شرایط اولیه همچنان یکسان باشد (که هیچگاه این‌گونه نیست)، تمام دونده‌ها در یک زمان به نقطه شروع می‌رسند. به‌طور مشابه پروتون‌ها (که با فرکانس‌های لارمور اندکی متفاوت تغییر محور چرخش می‌دهند) می‌توانند زمانی که پالس  $180^\circ$  ساطع می‌شود دوباره متمرکز شوند. پالس  $180^\circ$  از نظر شدت با پالس  $90^\circ$  یکسان است، اما از نظر زمانی دو برابر پالس  $90^\circ$  طول می‌کشد. همچنان



شکل ۳ | پردازش سیگنال برای به‌دست آوردن توزیع  $T_2$ . ابزار CMR دامنه رو به زوال NMR را اندازه‌گیری می‌کند (چپ) که برابر مجموع تمام سیگنال‌های رو به زوال  $T_2$  است، (راست)، منحنی بیانگر توزیع اندازه فضاهای متخلخل است و سطح زیر آن نشانگر تخلخل CMR می‌باشد. [۵]



شکل ۴ | تخلخل CMR [۵]

مغزه‌گیری و تست چاه کاسته شود. برای این کار می‌توان از  $T_1$  یا  $T_2$  استفاده کرد.

ارتباط تراوایی و  $T_2$  با استفاده از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بر روی تراوایی و NMR صدها مغزه در آزمایشگاه به‌دست آمده است. در این پژوهش از مدل‌های زیر برای محاسبه تراوایی استفاده شده است:

#### ■ SDR

#### ■ Timur/Coates

#### ■ TAPER-Timur

■ مدل SDR با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

در این رابطه  $K$  تراوایی موردنیاز،  $\phi_{NMR}$  تخلخل به‌دست آمده از  $T_{2LM}$ ، میانگین هندسی توزیع  $T_2$  و  $C$  یک ثابت است. مقدار  $C_1$  و  $a_1$  و  $b_1$  ضرایب هستند که معمولاً به‌صورت زیر تنظیم می‌شوند:

$$a_1 = 4, c_1 = 4, b_1 = 2$$

■ مدل Timur/Coates با معادله زیر بیان می‌شود:

$$K = c_2 (10 \phi_{NMR})^{b_2} \left( \frac{FFI}{BVI} \right)^{a_2} \quad (3)$$

FFI حجم آب آزاد، BVI حجم غشای مویینه،  $\phi_{NMR}$  تخلخل NMR و  $c_2$  و  $a_2$  و  $b_2$  ضرایب هستند که معمولاً به‌صورت زیر تنظیم می‌شوند:

$$a_2 = 2, b_2 = 4, c_2 = 1$$

این ضرایب را همچنین می‌توان ضمن تطبیق با داده‌های تراوایی مغزه، تنظیم کرد. [۶] و [۸] و [۹]

در شیوه پردازش استاندارد تشدید مغناطیسی هسته، تخلخل به دو بخش سیال آزاد و سیال غشایی تقسیم‌بندی می‌شود که با توجه به نوع لیتولوژی، دامنه‌های توزیع  $T_2$  به بخش قبل از مقدار حد برش تحت عنوان سیال غشایی و بخش بعد از حد برش به‌عنوان سیال آزاد در نظر گرفته می‌شود. در این روش گاهی اوقات شاهد آن هستیم که هیچ‌گونه سیال غشایی را نشان نمی‌دهد در حالی که در حقیقت این چنین نمی‌باشد. طبق این روش سیال آزاد خلل و فرج بزرگ را اشباع کرده و سیالات غشایی خلل و فرج ریز را در بر گرفته‌اند و فرض بر این قرار داده شده است، زمانی که در روش آزمایشگاهی مغزه تحت سانتریفیوژ قرار می‌گیرد، بخش خلل و فرج بزرگ کامل تخلیه می‌گردد. اما این در حالی است که بعد از تخلیه، یک لایه از آب در سطح تمام خلل و فرج باقی مانده است که ضخامت این فیلم سیال به فشار موئینه بستگی دارد به شکلی که حفرات بزرگ‌تر به نسبت بیشتری آب را از دست خواهند داد. در الگوریتم توسعه داده شده جهت این پارامتر توسط شرکت شلمبرژر، آب باقی‌مانده درون حفرات بزرگ به‌عنوان سیال غشایی محاسبه می‌گردد که مبنای

رابطه موجود میان زمان  $T_2$  با اندازه حفرات می‌توان مقدار هر یک از این بازه‌ها را با میزان تخلخل‌های موجود در سازند که اندازه مشخصی دارند، متناسب دانست. لذا از کنار هم قرار دادن این مقادیر توزیع اندازه حفرات در سازند مورد نظر مشخص خواهد گردید.

#### تخلخل

نگارهای مرسوم برای محاسبه تخلخل، نگارهای نوترون و چگالی را شامل می‌گردند. هر دو اندازه‌گیری تحت تأثیر عوامل محیطی واقع شده و برای تعیین تخلخل باید چگالی سیالات و ماتریکس مشخص باشد. تخلخل به‌دست آمده از این نگارها تخلخل کل است که شامل سیالات متحرک، آب چسبیده به سطح ماتریکس و آب چسبیده به رس‌هاست (شکل-۴). در اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی NMR از چرخش‌های پروتون هیدروژن برای تولید سیگنال استفاده می‌شود. چون هیدروژن در سیالات فراوان است، بزرگی سیگنال NMR متناسب با حجم سیال سازندی است.

هنگامی که تمامی چرخش‌های پروتونی در جهت میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، سیگنال NMR متناسب با تخلخل سنگ است، در نتیجه در شروع آزمایش CMPG، در زمان صفر و قبل از آنکه آرامش چرخش‌های پروتونی اتفاق بیفتد، سیگنال متناسب با تخلخل است. بنابراین تخلخل را می‌توان با برون‌یابی داده اکوی CMPG به زمان صفر برآورد کرد. همچنین مجموع دامنه‌های توزیع  $T_2$  باید برابر با دامنه CPMG در زمان صفر باشد. لذا، مجموع دامنه‌های توزیع  $T_2$  نیز برابر با تخلخل است. شیوه موردنظر نرم‌افزار ژئولاگ تبدیل داده CPMG به تخلخل هنگام پردازش چرخش فاز است. داده خام ابزار CMR برحسب ولت اندازه‌گیری و سپس با استفاده از فاکتور تبدیل، به تخلخل تبدیل می‌شود.

ابزارهای نمودارگیری NMR با استفاده از منبعی با تخلخل ۱۰۰ درصد مانند یک سطل پر از آب کالیبره می‌شوند. بنابراین، در تعیین تخلخل فرض می‌شود که هسته‌های هیدروژن در سیال سازندی برابر با حجم معادلی از آب هستند به‌گونه‌ای که شاخص هیدروژن یک است و برآوردهای تخلخل را باید برای انعکاس تغییر در شاخص هیدروژن سیال سازندی تنظیم کرد. [۱] و [۵]

#### تراوایی

شاید مهمترین ویژگی نگار NMR توانایی ثبت پیوسته نگار تراوایی است. مزایای این کار برای شرکت‌های نفتی بسیار است. اندازه‌گیری تراوایی به‌صورت نگار، برآورد نرخ تولید را میسر ساخته و اجازه می‌دهد که تکمیل چاه به بهترین نحو انجام شود و در عین حال از هزینه

لازم به ذکر است در این چاه حفره به صورت عمودی و حداکثر انحراف ۳ درجه بوده است.

در این پژوهش کسب داده‌های لازم و آنالیزهای پتروفیزیکی در سازند کربناته مورد مطالعه از لحاظ قابلیت مخزنی مورد ارزیابی قرار گرفته به نحوی که نمودارهای گاما، نوترون، دانسیته، مقاومت الکتریکی به منظور محاسبه تخلخل، وضعیت اشباع آب و هیدروکربن و تعیین لیتولوژی سازند استفاده می‌گردد. در جدول ۱- پارامترها و تصحیحات اعمال شده جهت نمودارگیری ارائه گردیده است.

در ادامه، با مشخص شدن نواحی مخزنی با استفاده از ابزار CMR، در آن نواحی داده‌های خام اخذ و از پردازش داده‌ها توسط نرم‌افزار GEOLOG پارامترهای تراوایی، توزیع اندازه حفرات، تخلخل CMR، حجم سیالات آزاد و حجم سیالات غشایی محاسبه می‌گردد. در نتیجه، با ارزیابی کلی اطلاعات به دست آمده، بهترین ناحیه مخزنی تعیین می‌شود. در جدول ۲- پارامترها و تصحیحات اعمال شده بر داده‌ها جهت پردازش ارائه گردیده است. همچنین به منظور بررسی دقت اندازه‌گیری تراوایی ابزار CMR، محاسبه تراوایی با ابزار MDT انجام و نتایج هر دو ابزار با یکدیگر مقایسه می‌شود.

لازم به ذکر است که برای کاهش پارازیت، داده‌های پارازیتی را می‌توان با استفاده از فیلترهای سیگنال استاندارد فیلتر کرد. در نرم‌افزار ژئولاگ دو فیلتر مختلف به نام میانگین متحرک<sup>۴</sup> و دی اسپایکینگ<sup>۵</sup> (حذف تغییرات شدید و ناگهانی) اعمال می‌شوند. در فیلتر میانگین متحرک، از داده‌ها در یک پنجره متحرک میانگین‌گیری می‌شود و در فیلتر حذف، ناهنجاری بخش‌های نامنظم و کاذب از داده‌های CPMG حذف می‌شوند. در این پژوهش نیز از فیلتر دی اسپایکینگ استفاده شده است.

DESPIKE: این فیلتر روی یک پنجره‌ی از پیش تعریف شده، با تنظیم مقادیری که انحراف استاندارد به مقدار میانگین را زیاد می‌کند، اسپایک‌های کاذب را از داده حذف می‌نماید. انحراف استاندارد متحرک با استفاده از پنجره متحرک از پیش تعریف شده محاسبه می‌شود.

اندازه پنجره با استفاده از پارامتر DESPIKE\_WIN درون نرم‌افزار، که در آن DESPIKE نیم پنجره است، تنظیم می‌شود. پنجره هموارسازی با نیم پنجره‌ای تعریف می‌شود که تعداد نمونه‌های واقع در هموارسازی برابر با نیم پنجره بالای نمونه، نیم پنجره پایین نمونه و خود نمونه است؛ بنابراین، اندازه واقعی پنجره هموارسازی برابر با (۲ نیم پنجره + ۱) است. برای مثال اگر نیم پنجره ۳ باشد، ۷ نمونه میانگین‌گیری می‌شوند. خطای مجاز انحراف، حد نهایی تنظیم مجدد میانگین پنجره را معین می‌کند. برای مثال اگر خطای مجاز انحراف بر روی مقدار ۱/۵ تنظیم شود، مقدار

محاسبات فشار موئینه حفرات است. لازم به ذکر است که اهمیت حد برش TAPERED زمانی مشخص می‌شود که دامنه‌های توزیع‌های  $T_2$  در روش استاندارد هیچ‌گونه سیال غشایی را نشان نمی‌دهد. با استفاده از این روش، حجم سیال غشایی ایجاد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسبات می‌گردد.

روابط تجربی به دست آمده جهت BFV-TAPERD به قرار زیر می‌باشد:

$$BFV = \sum_{T_{2i}=T_{2min}}^{T'} m(T_{2i}) + \sum_{T_{2i}=T'}^{T_{2max}} m(T_{2i}) \cdot \left( \frac{2T'}{T_{2i}} - \left( \frac{T'}{T_{2i}} \right)^2 \right) \quad (4)$$

BFV = حجم سیال غشایی ،

$m(T_{2i})$  = دامنه  $T_{2i}$  در توزیع  $T_2$ ،

$T'$  = پارامتر tapered cutoff وابسته به حد برش  $T_2$

$$\frac{r_w}{R} = \frac{\gamma}{2 \cdot \rho_2 \cdot P \cdot T_2} = \frac{T'}{T_2} \quad (5)$$

R = شعاع حفرات

P = فشار موئینه

$r_w$  = ضخامت سیال ترکننده در فضای دالیزی استوانه

$\gamma$  = کشش سطحی بین سیالات

پس محاسبه حجم سیال غشایی TAPERED با استفاده از معادله مدل Timur/Coates تراوایی محاسبه می‌گردد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که معمولاً محاسبه حجم سیال غشایی در روش استاندارد و استفاده از حد برش TAPERED نتیجه یکسانی دارد. اما در سازندهایی که دارای حفرات با قطر بزرگ می‌باشند، حد برش TAPERED وضعیت حجم سیالات غشایی را با دقت بیشتری نمایش می‌دهد. [۱۰] و [۱۱]

## روش کار

در چاه مورد مطالعه مجموعه نمودارهای مخزنی اخذ شده توسط ابزارهای  $MDT^3$ , CMR, Full suite log به دست آمده که در حفره ۸,۵ اینچ به کمک کابل چاه‌پیمایی، داده‌های مورد نیاز کسب گردیده است.

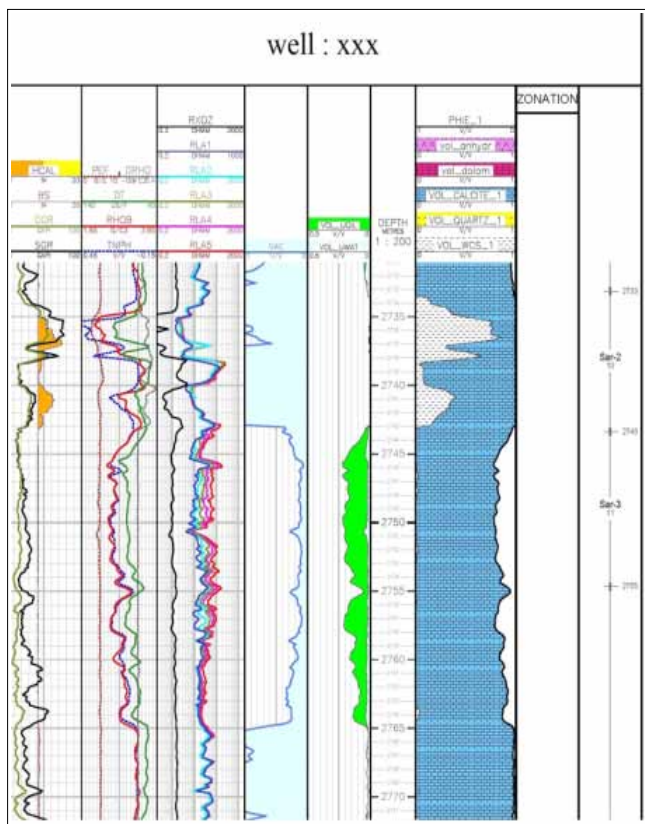
تصحیحات و پارامترهای محیطی بخش ۳ سازند مورد مطالعه	
۲۷۴۳-۲۷۵۵	بازه نمودارگیری (m)
پایه آبی-پلیمر	نوع گل حفاری
۰,۰۶۳	مقاومت الکتریکی گل حفاری ( $\Omega.m$ ) در دمای ته چاه ( $^{\circ}C$ )
۰,۰۴۷	مقاومت الکتریکی فیلتره گل حفاری ( $\Omega.m$ ) در دمای ته چاه ( $^{\circ}C$ )
۰,۱۳۳	مقاومت الکتریکی کیک گل حفاری ( $\Omega.m$ ) در دمای ته چاه ( $^{\circ}C$ )
۸۴,۵	دانسیته گل حفاری ( $lb/ft^3$ )
۵٪	درصد KCL گل (%)
بدون باریت	باریت گل حفاری
۲۶۱	غلظت نمک کل حفاری (ppk NaCl)
۱۱۳	دمای ته چاه



گرافیکی آنها در تراک ۵ و ۷، تخلخل در محدوده ۲۰ تا ۲۵ درصد در سازند کربناته موردنظر قرار می‌گیرد که این مخزن را به لحاظ تخلخل در طبقه‌بندی خیلی خوب قرار می‌دهد. در ادامه، جهت بررسی وضعیت سیالات مخزن و وجود هیدروکربن، با مراجعه به نمودارهای مقاومت الکتریکی در تراک ۳، افزایش مقاومت الکتریکی نمودارها در بازه مخزنی مشاهده می‌شود که این موضوع نشان‌دهنده حضور هیدروکربن می‌باشد. همچنین جدایش مناسب بین نمودارها حکایت از تراوایی مناسب در این بخش دارد. از سوی، تراک ۴ نشان‌دهنده وضعیت اشباع آب مخزن می‌باشد که مقادیر پایینی در محدوده ۵ درصد از اشباع آب را نشان می‌دهد. این مورد نیز از لحاظ طبقه‌بندی کیفیت مخزنی، خیلی خوب قلمداد می‌گردد. در مجموع این بخش سازند مورد بررسی را می‌توان به‌عنوان یک مخزن با شرایط خیلی خوب در نظر گرفت.

### نتایج پردازش داده‌های MDT

در این پژوهش آزمایش با استفاده از ماژول قدرت هیدرولیکی ابزار MDT صورت گرفته و توسط آنالیز داده‌های افت فشار، تراوایی تخمین زده شده است. [۱۰]



شکل ۵ | نمودارهای مخزنی (Full Suite) بخش ۳ سازند کربناته مورد مطالعه

متوسط تنها اگر بیش از ۱/۵ برابر انحراف استاندارد باشد دوباره تنظیم می‌شود.

چون بخش عمده‌ای از سیگنال در قسمت ابتدایی منحنی تباهی رشته اکوی CPMG قرار دارد و دامنه چند اکوی ابتدایی متناسب با تخلخل است، چند اکوی اولیه باید کمتر در معرض فیلترینگ باشند. لازم به ذکر است که فیلترینگ را باید با احتیاط استفاده کرد چون هنگام فیلترینگ احتمال حذف داده‌های واقعی وجود دارد. [۱]

### نتایج و بحث

شکل ۵- نمودارهای Full Suite سازند بخش ۳ سازند کربناته مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

### تفسیر کیفی نمودارهای Full Suite

همانطور که در شکل ۵- مشاهده می‌شود، بخش ۳ سازند مورد مطالعه از عمق ۲۷۴۳ تا ۲۷۵۵ تفکیک گردیده است. در این بخش از سازند با توجه به نمودار GR در تراک اول و تفسیر گرافیکی لیتولوژی در تراک ۷، مقادیر، کمتر از حد برش تعیین شده (۴۰ API) می‌باشند که حکایت از مقادیر بسیار کم رس در این محدوده دارد. با توجه به نمودارهای نوترون و چگالی در تراک ۲ و تفسیر

۲   تصحیحات و پارامترهای اعمال شده بر داده‌های CMR.			
Estimated Polarization Time (s)	۸۵۵۹	Depth of investigation:	۱,۱ اینچ
Acquisition Idle Time (s):	۱,۷۹۲۴۲	Vertical Resolution (3 levels):	۱۹۰ میلی متر
Echo Spacing (us):	320	Mud resistivity:	۰.063 اهم. متر
Number of Echoes:	1800		
Porosity Algorithm:	Total CMR Porosity	Polarization Correction:	خاموش
Starting Echo:	Second	EPM Processing:	خاموش
Raw Echo Despiking:	روشن	Short EPM Time Sequence:	-
Offset Filter:	خاموش	Averaging Option:	Equal Weights
T2 Speed Correction:	روشن	Averaging Levels:	۳
Logging Speed (Ft/Hr):	۹۵۰		
T2 Minimum (ms):		T2 Maximum (ms):	۵۰۰۰
Number of Components:	۳۰	T2 Cutoff(ms):	۱۰۰
Timur/Coates PHIT Exponent:	۴	SDR PHIT Exponent:	۴
Timur/Coates PHI Ratio Exponent:	۲	SDR T2Log Exponent:	۲
Bound Fluid Minimum (m3/m3):	۰,۰۲		
T1/T2 Ratio Minimum:	۱	Porosity Threshold (m3/m3):	۰,۳
T1/T2 Ratio Maximum:	۳	T2 Threshold (ms):	۲۰
Bin Porosity Cutoffs (ms):	۰۵ ۱ ۳ ۳۳ ۱۰۰ ۳۰۰ ۷۰۰ ۲۰۰۰ ۵۰۰۰		

نتایج پردازش نمودار CMR

در شکل-۶ خروجی نمودارهای ابزار CMR مربوط به سازند مورد مطالعه نشان داده شده است.

پس از ارزیابی و تفسیر نمودارهای Full Suite در سازند مورد مطالعه، از عمق ۲۷۴۳ تا ۲۷۵۵ متری مربوط به لایه مورد بررسی مشخص گردید که این بخش از سازند دارای تخلخلی در محدوده ۲۰ تا ۲۵ درصد می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای مقاومت الکتریکی، حضور هیدروکربن بسیار خوبی در این ناحیه تخمین زده شده است. از این رو به‌منظور کسب اطلاعات بیشتر از این بخش، نمودار CMR اخذ گردیده که نتایج آن در شکل-۶ ارائه گردیده است. در ادامه به تفسیر آن پرداخته خواهد شد.

در نگاه اول با توجه به تراک ۱ مشاهده می‌شود چاه از لحاظ شسته شدن دیواره چاه و کیفیت داده‌ها (عدم وجود پارازیت خارج از محدوده HiNoise و Moderate) در شرایط بسیار خوبی قرار داشته است.

تراک ۵ مربوط به نمایش توزیع‌های  $T_2$  می‌باشد (تقسیم‌بندی لگاریتمی) که با تحلیل آن، اطلاعات کلی از نحوه توزیع اندازه حفرات سازند به‌دست خواهد آمد. همانطور که قبلاً نیز بیان گردید، برای سازندهای کربناتی حد برش  $T_2$  معادل ۱۰۰ میلی‌ثانیه می‌باشد که در تراک ۵ با خط قرمز ترسیم گردیده است و مشاهده می‌شود عمده توزیع‌های  $T_2$  در محدوده بیشتر از حد برش ۱۰۰ میلی‌ثانیه قرار دارند که نشان‌دهنده وجود حفرات با قطر بزرگ می‌باشد و سیالات موجود در این حفرات در محدوده سیال آزاد قرار می‌گیرند.

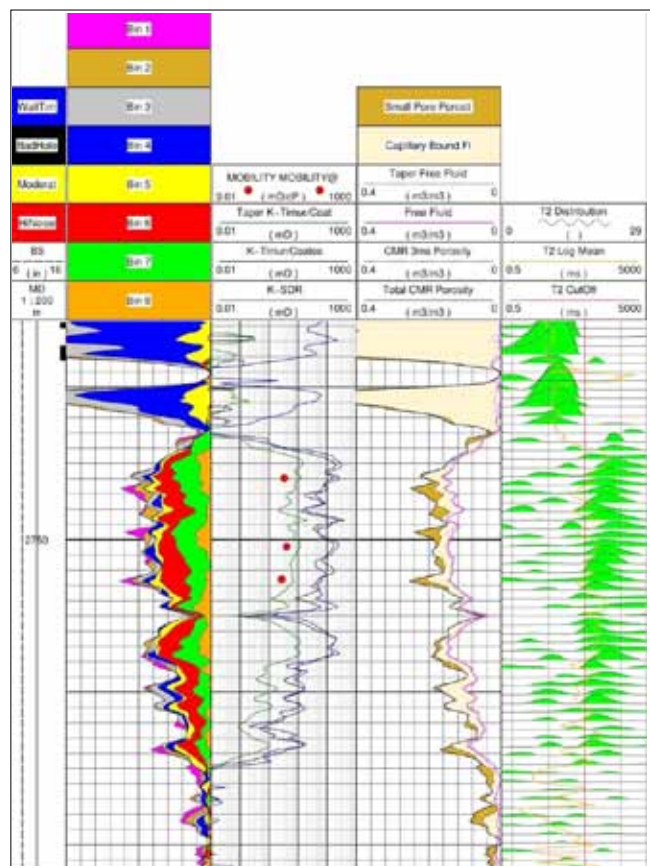
بررسی وضعیت سیالات موجود در سازند، در تراک ۴ نمایش داده شده است. توزیع‌های  $T_2$  کمتر از ۳ میلی‌ثانیه در محدوده سیال غشایی رس بوده و به بیان دیگر نشان‌دهنده تخلخل‌های ریز درون‌دانه‌ای رس می‌باشند که حجم مربوط به آن به‌صورت گرافیکی با رنگ قهوه‌ای (Small Pore Porosity) نشان داده شده است. توزیع‌های  $T_2$  در محدوده ۳ تا ۱۰۰ میلی‌ثانیه نیز تحت عنوان سیال موئینه شامل سیالاتی هستند که قابلیت تولید ندارند و به دیواره خلل و فرج چسبیده‌اند و به صورت گرافیکی با رنگ کرم (Capillary Bound FI) نشان داده شده است. در عمق ۲۷۴۳ تا ۲۷۵۵ سیال آزاد نیز با رنگ سفید مشخص است. در عمق ۲۷۴۳ تا ۲۷۵۵ که بازه مورد مطالعه می‌باشد، نشان می‌دهد که وضعیت سیالات سازند عمدتاً در محدوده سیال آزاد قرار دارند و قابل تولید می‌باشند.

در ادامه جزئیات تفسیر نمودار CMR، تراک ۲ نشان‌دهنده تخلخل حاصل از CMR می‌باشد که به‌صورت گرافیکی و با رنگ‌های مختلف در ۸ انبارک (۵۰۰، ۲۰۰، ۷۰۰، ۳۰۰، ۱۰۰، ۳۳، ۱، ۰/۵) نشان داده شده است. توزیع‌های  $T_2$  بزرگ‌تر نشان‌دهنده اندازه حفرات بزرگ‌تر می‌باشند. به‌عنوان مثال انبارک صورتی مربوط به توزیع‌های در محدوده ۲۰۰ تا ۵۰۰، حفرات با قطر زیاد را شامل می‌شود. با بررسی تمام انبارک‌ها می‌توان حفرات موجود در سازند را تقسیم‌بندی کرد و مشخص نمود عمده حفرات در کدام محدوده قرار دارند.

در تراک ۳ مهمترین قابلیت ابزار CMR یعنی تخمین تراوایی توسط مدل K-TIMUR، K-SDR و TAPER K-TIMUR محاسبه گردیده است. همچنین، تراوایی حاصل از ابزار MDT به‌منظور مقایسه با نتایج حاصل از ابزار CMR با نقاط قرمز رنگ جانمایی گردیده است. نمودارهای K-TIMUR و K-SDR تقریباً در طول بازه مورد مطالعه، بر یکدیگر منطبق هستند و به‌طور میانگین حدوداً تراوایی معادل ۱۰۰ میلی‌داری را نشان می‌دهند. در ادامه، نتایج تراوایی حاصل از ابزار MDT که در ۳

تراوایی محاسبه شده ابزار MDT در سازند مورد مطالعه دما

ترتیب مراحل	عمق (متر) MD	فشار هیدرواستاتیک اولیه (psia)	فشار کوارتز (psia)	فشار نهایی (psia)	تراوایی (md/cp)	دما (درجه فارنهایت)
۱	۲۷۴۶	۵۴۳۵٫۸	۴۰۷۷٫۹۰	۵۴۳۵٫۹	۵٫۷۰	۱۹۱٫۵
۲	۲۷۵۰٫۵	۵۴۴۴٫۶	۴۰۸۳٫۳۵	۵۴۴۴٫۷	۵٫۹۰	۱۹۱٫۷
۳	۲۷۵۲٫۶	۵۴۴۸٫۵	۴۰۸۹٫۰۲	۵۴۴۸٫۸	۳٫۱۰	۱۹۱٫۸



شکل ۶ | خروجی نمودارهای ابزار CMR، سازند مورد مطالعه تفسیر کیفی نمودار CMR

همین مقادیر استفاده شده و در ارزیابی، نتایج پاسخ‌های منطقی و قابل استنادی دریافت گردیده است.

■ نتایج حاصل از تفسیر نمودارهای CMR در مقایسه با نتایج حاصل از ابزار MDT نشان داد که این نتایج در مخزن کربناته از دقت متوسطی برخوردار بوده، به شکلی که مقادیر اندازه‌گیری شده با CMR در مقایسه با نتایج تراوایی MDT از لحاظ کمی اختلاف داشته، اما در طول بازه اندازه‌گیری شده، روند اختلاف ثابت بوده است.

■ در سازند مورد بررسی، تراوایی به‌دست آمده از دو مدل K-SDR و K-TIMUR در طول بازه‌ی اندازه‌گیری شده بر هم منطبق بوده و از لحاظ کمی اختلاف زیادی با نتایج تراوایی حاصل از MDT دارد. در حالی که تراوایی حاصل از مدل TAPER K-TIMUR از لحاظ مقدار کمی و انطباق با نتایج MDT تناسب خوبی دارد. از این رو در این سازند کربناته استناد به این مدل دقیق‌تر می‌باشد.

■ قابلیت تفکیک سیالات مخزن به سه بخش سیالات غشایی، سیالات مویینه و سیالات آزاد، باعث می‌شود تا تصمیم‌گیری به‌منظور تعیین ناحیه تولیدی با دقت بالاتری انجام گیرد.

■ از آنجایی که تراوایی یکی از مهمترین پارامترهای امکان تزریق سیال درون مخازن می‌باشد، با استفاده از ابزار CMR و تعیین بهترین ناحیه از لحاظ تراوایی، می‌توان به هرچه موفقیت‌آمیزتر شدن مجموعه عملیات ازدیاد برداشت کمک کرد.

نقطه کسب شده، مقادیر ۵/۷ و ۵/۹ و ۳/۱ را نشان می‌دهد.

تخمین تراوایی با مدل TAPER K-TIMUR با توجه به رابطه نحوه محاسبه حجم سیال غشایی در این روش، در توزیع های  $T_2$  بالاتر از حد برش ۱۰۰ میلی‌ثانیه در سنگ‌های کربناته، بر خلاف حالت استاندارد تمام حجم سیال را به‌عنوان سیال آزاد در نظر نمی‌گیرد، بلکه فیلمی نازک از سیال را در حجم سیال غشایی اندازه‌گیری می‌کند که با توجه به اینکه حجم سیال آزاد کمتر شده، به طبع آن، با توجه به پارامترهای رابطه محاسبه تراوایی، مقدار تراوایی کمتر می‌شود. در تراک ۳ مشاهده می‌شود نمودار TAPER K-TIMUR به‌طور میانگین در محدوده ۸ تا ۱۰ میلی‌داری تراوایی را تخمین زده که نتایج حاصل از MDT به نتایج حاصل از مدل TAPER K-TIMUR نزدیک‌تر است [۱۳].

### نتیجه‌گیری

■ از مهمترین پارامترهای خروجی ابزار CMR می‌باید به توزیع اندازه حفرات، تفکیک حجم سیالات مخزن به سه دسته سیالات غشایی، سیالات مویینه و سیال آزاد اشاره کرد. همچنین مهمترین قابلیت این ابزار تخمین مقدار کمی تراوایی می‌باشد.

■ طبق مطالعات انجام شده‌ی پیشین و روابط تجربی موجود، حد برش توزیع  $T_2$  در ماسه‌سنگ‌ها معادل ۳۳ میلی‌ثانیه و برای سنگ‌های کربناته معادل ۱۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش نیز از

### پانویس‌ها

1. Nuclear Magnetic Resonance
2. Free Induction Decay
3. Combinable Magnetic Resonance
4. Pulsed NMR

5. Modular Dynamic Tester
6. Moving Average
7. Despiking

### منابع

- [۱] پورصیامی ح.، رحیمی بهار ع.، لاگ NMR، مبنای، کاربرد و پردازش با نرم‌افزار ژنولاگ. تهران: پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۹۵
- [۲] رضایی م.، چهارازی ع.، اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی. چاپ دوم. موسسه انتشارات دانشگاه تهران. ۴۲۹-۴۶۱. ۱۳۸۹
- [3] Dehdari, M, And S.Alavi. 2014. Estimation of Permeability and Pore Size Distribution Using Core Data and NMR Log Data in One of Heavy Oil Reservoirs in Iran, International Journal of Basic Sciences & Applied Research. Vol., 3 (SP), 4351-
- [4] Kenyon B., et al., "Nuclear Magnetic Resonance Imaging – Technology For The 21st Century", Oilfield Review 7, No. 3, pp. 191995, 33-
- [۵] احمدری نقدعلی ر.، فاسم العسکری م.، کاظمی م.، "تحلیل نگار NMR برای تعیین تخلخل و توزیع اندازه منافذ در یکی از مخازن کربناته ایران"، پردیس بین الملل توسعه هزاره، شیراز، ۱۳۹۵
- [6] Trevizan W., Coutinho P., Rios E., et al., "Magnetic Resonance (NMR) Approach for Permeability Estimation in Carbonate Rocks", Offshore Technology Conference, OTC Brasil, 2729- October, Rio de Janeiro, Brazil, OTC-26338-MS, 2015
- [7] Petrowiki, Nuclear magnetic resonance (NMR) logging. [http://petrowiki.org/Permeability\\_estimation\\_with\\_NMR\\_logging,162016/09/](http://petrowiki.org/Permeability_estimation_with_NMR_logging,162016/09/)
- [8] Nikitin A., Dolan S., Reiderman A., Grover R., "The Application of the Combination of NMR Logging and NMR Measurements at RSWC Samples at the Well Site To Identify Producing Oil in Tight Rocks", Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, SPWLA-2017-P, 2017
- [9] Salimifard B., Ruth D. W., Green D., "Developing a Model to Estimate Permeability from Other Petrophysical Data", SCA20142014, 063-
- [10] Kleinberg R.L., Boyd A., SPE, Schlumberger, "Tapered Cutoffs for Magnetic Resonance Bound Water Volume", SPE 38737, 1997
- [11] Glorioso J.C., Aguirre O., Mengual J. F., "Deriving Capillary Pressure and water saturation from NMR Transversal Relaxation Time", SPE 81057, 2003
- [۱۲] اسماعیل زاده ش.، ملکی ب.، بیدهندی م.، خوشبخت ف.، "ابزار MDT، اهمیت و کاربردها: مطالعه موردی در یکی از چاه‌های نفتی جنوب ایران"، دومین همایش ملی نفت و گاز ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۳.
- [۱۳] گزارش‌های داخلی شرکت‌های تابعه شرکت ملی نفت ایران، شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۶