

# محاسبه تخلخل و توزیع حفره‌های مخازن نفتی با استفاده از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای

پژوهش نفت

سال بیست و سوم  
شماره ۷۲

صفحه ۲۴-۱۴، ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۱۰

فاطمه خوش سیما\* و زهره کارگر  
بخش فیزیک دانشگاه شیراز  
ostadzadeh1@gmail.com

بر اساس اصول خود در تفسیر شرایط مخزن بسیار کارآمد می‌باشد. اساس روش NMR logging بر اندازه‌گیری‌های هندسه فضاهای خالی و نوع سیال پرکننده آن فضاها استوار است. ارتباط این دو باعث شده که NMR روشی منحصر به فرد در تفسیر یک مخزن باشد [۱ و ۳].

تخلخل یکی از پارامترهای مهم مخزنی است، که انواع مختلفی دارد و به روش‌های گوناگون اندازه‌گیری می‌شود. تزریق هلیوم به مغزه در آزمایشگاه و لاگ‌های پتروفیزیکی تخلخل که درون چاه رانده می‌شود، از روش‌های اندازه‌گیری تخلخل می‌باشد. روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای از روش‌های بسیار جدید در ارزیابی مخزن است که با تشدید هسته هیدروژن در میدان مغناطیس، مقدار تخلخل سنجیده می‌شود. چاه مورد بررسی در منطقه جنوب غرب واقع بوده و نوع سیال مخزن شامل آب و نفت می‌باشد. بررسی‌ها در عمق ایلام با نوع سازند کربناته انجام گرفته است.

## داده‌های خام نمودارگیری NMR

قبل از نمودارگیری از یک سازند توسط دستگاه NMR،

## چکیده

تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) پاسخ هسته‌های اتمی به میدان‌های مغناطیسی خارجی است. در این تحقیق به بررسی روش نوین MRIL (چاه پیمایی به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای) جهت تعیین پارامترهای پتروفیزیکی مورد نیاز از قبیل تخلخل و توزیع اندازه حفره‌ها که در تخمین هیدروکربن موجود در مخزن به کار گرفته می‌شود، می‌پردازیم. برای این منظور، ابتدا پارامتر تخلخل با پردازش داده‌های NMR محاسبه شده و سپس تخلخل حاصل با تخلخل نوترونی و تخلخل مغزه مقایسه می‌شود. نتایج بیان‌گر توافق خوب بین تخلخل NMR و تخلخل مغزه است. درحالی که یافته‌ها نشان می‌دهد تخلخل نوترونی بیش از اندازه واقعی است.

واژه‌های کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای، تخلخل، رشته پژواک اسپینی، توزیع حفره‌ها، بین (bin).

## مقدمه

از سال ۱۹۴۶ که NMR<sup>۱</sup> معرفی شد، تشدید مغناطیسی هسته‌ای یک ابزار با ارزش در فیزیک، شیمی، زیست و پزشکی به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، تشدید مغناطیسی هسته‌ای NMR و تصاویر حاصل از آن به عنوان روشی جدید در صنعت نفت معرفی شده است. این روش

1. Nuclear Magnetic Resonance

می‌توان برای تغییر محتوای اطلاعات از داده‌های به‌دست آمده، تنظیم نمود.

خواص سیالات حفره که بر رشته پژواک تأثیر می‌گذارند، عبارتند از شاخص هیدروژنی<sup>۵</sup> (HI)، زمان آسایش طولی<sup>۶</sup> (T<sub>۱</sub>)، زمان آسایش عرضی<sup>۷</sup> (T<sub>۲</sub>) و ضریب پخش<sup>۸</sup> (D). شاخص هیدروژنی معیاری از دانسیته اتم‌های هیدروژن درون سیال است. T<sub>۱</sub> نشان دهنده سرعت آسایش طولی پروتون‌های واژگون شده نسبت به محور میدان مغناطیسی پایا و T<sub>۲</sub> بیان‌گر سرعت آسایش عرضی پروتون‌های واژگون نسبت به محور میدان مغناطیسی پایا است. پخش شدگی (D) نشان می‌دهد که تا چه حد مولکول‌های درون سیال کاتوره‌ای حرکت می‌کنند [۱].

### تخلخل NMR

دامنه اولیه منحنی واپاشی حاصل از داده‌های خام به تعداد هسته‌های هیدروژن قطبیده شده درون سیال حفره بستگی دارد. بنابراین این دامنه را می‌توان برای به‌دست آوردن تخلخل کالیبره کرد. این تخلخل مستقل از سنگ‌شناسی است و می‌توان آن را از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی NMR بر روی مغزه و یا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی متداول، اعتبار بخشید [۱].

### واپاشی نمایی - چندتایی

معمولاً مخازن سنگی شامل توزیعی از اندازه حفره‌ها و همچنین محتوی بیش از یک نوع سیال می‌باشند. بنابراین رشته پژواک - اسپین ثبت شده توسط توالی CPMG با یک مقدار منفرد T<sub>۲</sub> واپاشی نمی‌کند، بلکه با توزیعی از مقادیر T<sub>۲</sub> واپاشی روی می‌دهد. دامنه واپاشی پژواک - اسپین را می‌توان با جمع واپاشی‌های نمایی، (هر کدام با یک ثابت واپاشی مشخص) به‌خوبی برازش نمود [۱، ۶]. این بیان در معادله ۱ نشان داده شده است.

$$M(t) = \sum M_i(0) e^{-\frac{t}{T_{2i}}} \quad (1)$$

1. Randomly
2. Spin-echo Train
3. Inter-Echo-Spacing
4. Polarization
5. Hydrogen Index
6. Logitudinal Relaxation Time
7. Transverse Relaxation Time
8. Diffusivity

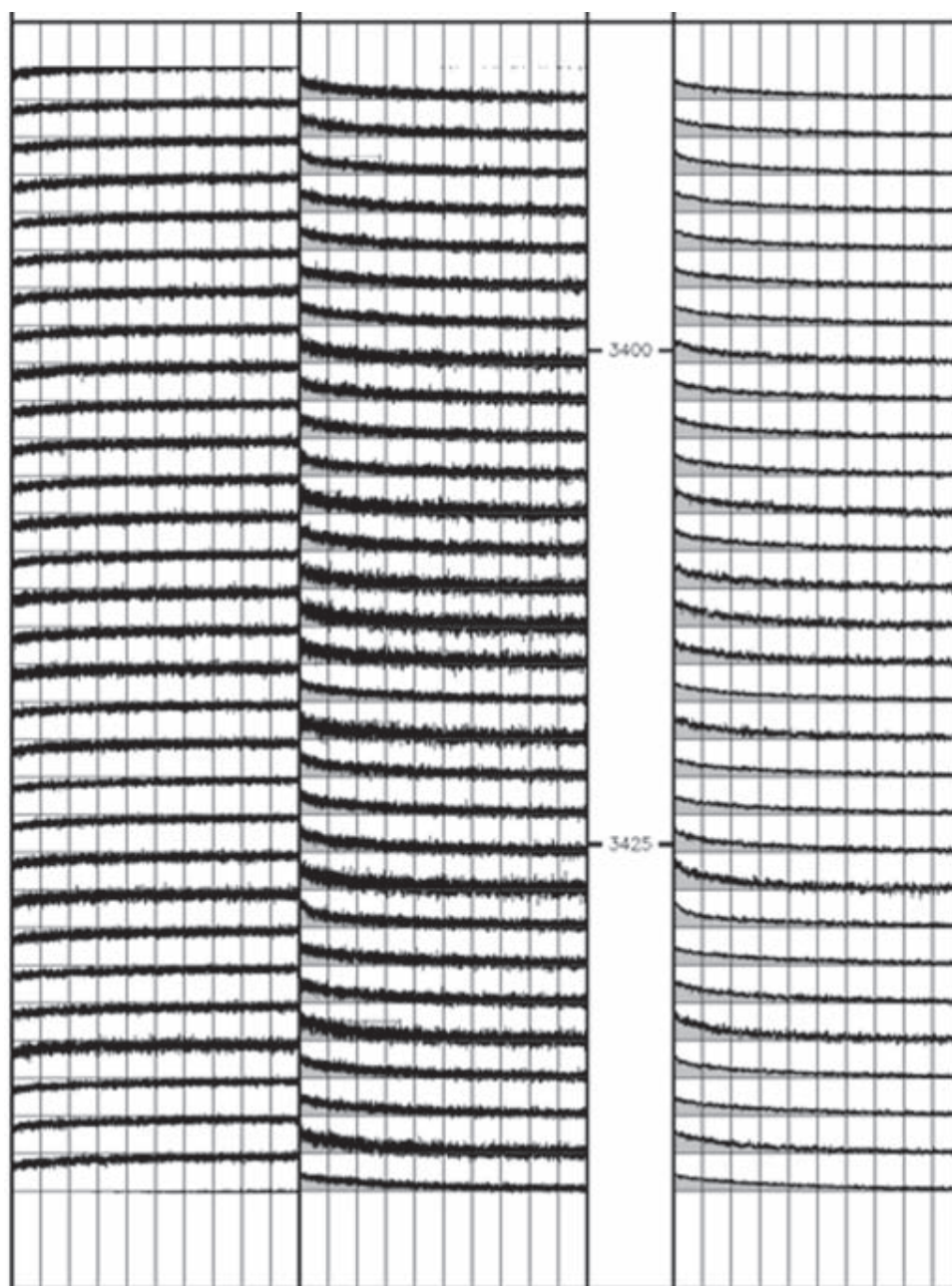
پروتون‌های درون سیال سازند به‌طور کاتوره‌ای<sup>۲</sup> سمت‌گیری کرده‌اند. با عبور دستگاه از میان سازند، دستگاه با تولید میدان‌های مغناطیسی پروتون‌های سازند را فعال می‌کند. ابتدا میدان مغناطیسی دائمی دستگاه، محور اسپین پروتون‌ها را در جهت خاصی به‌خط یا قطبیده می‌کند. متعاقباً وقتی که میدان نوسانی حذف گردد، پروتون‌ها شروع به برگشت یا آسایش به جهت اولیه خودشان که در میدان مغناطیسی یکنواخت هم جهت شده بودند، می‌نمایند.

پالس‌های متوالی معینی (توالی CPMG) برای تولید سری‌هایی که پژواک‌های اسپین<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند، به کار می‌روند. این پژواک‌ها توسط دستگاه‌های نمودارگیری NMR اندازه‌گیری می‌شوند و بر روی نمودارهایی به صورت رشته‌های پژواک - اسپینی نمایش داده می‌شوند (تراک یک، شکل ۱ را ببینید). این رشته‌های پژواک - اسپین، داده‌های خام NMR را تشکیل می‌دهند.

برای تولید رشته پژواک - اسپین که در شکل ۱ رسم شده، دستگاه NMR دامنه پژواک اسپین را برحسب تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌کند. چون پژواک‌های اسپینی در زمان کوتاهی اندازه‌گیری می‌شوند، بنابراین هنگام ثبت رشته پژواک - اسپین دستگاه NMR تنها می‌تواند چند اینچ درون دیواره چاه (حجم حساس) را بررسی کند. در نهایت رشته‌های پژواک - اسپین را می‌توان بر روی نمودار بر حسب تابعی از عمق نشان داد.

دامنه اولیه رشته پژواک اسپینی با تعداد هسته‌های هیدروژن سیالات درون حفره داخل حجم حساس متناسب است. بنابراین این دامنه را می‌توان برای به‌دست آوردن تخلخل کالیبره کرد.

رشته پژواک مشاهده شده به پارامترهای برداشت داده و تخلخل حفره‌های حاوی سیال که در حجم حساس قرار دارند، مربوط است. پارامترهای برداشت داده‌ها شامل فاصله داخلی بین پژواک‌ها<sup>۳</sup> (TE) و زمان قطبش<sup>۴</sup> (TW) می‌باشند. TE زمان بین پژواک‌ها در یک رشته پژواک است. TW زمان بین پایان اندازه‌گیری یک رشته پژواک و شروع اندازه‌گیری رشته پژواک بعدی است. TE و TW را



شکل ۱- نمایش دامنه قطبیدگی قبل از دسته شدن (تراک ۱)، بعد از دسته شدن (تراک ۲)، عمق (تراک ۳) و بعد از فیلتر شدن (تراک ۴)

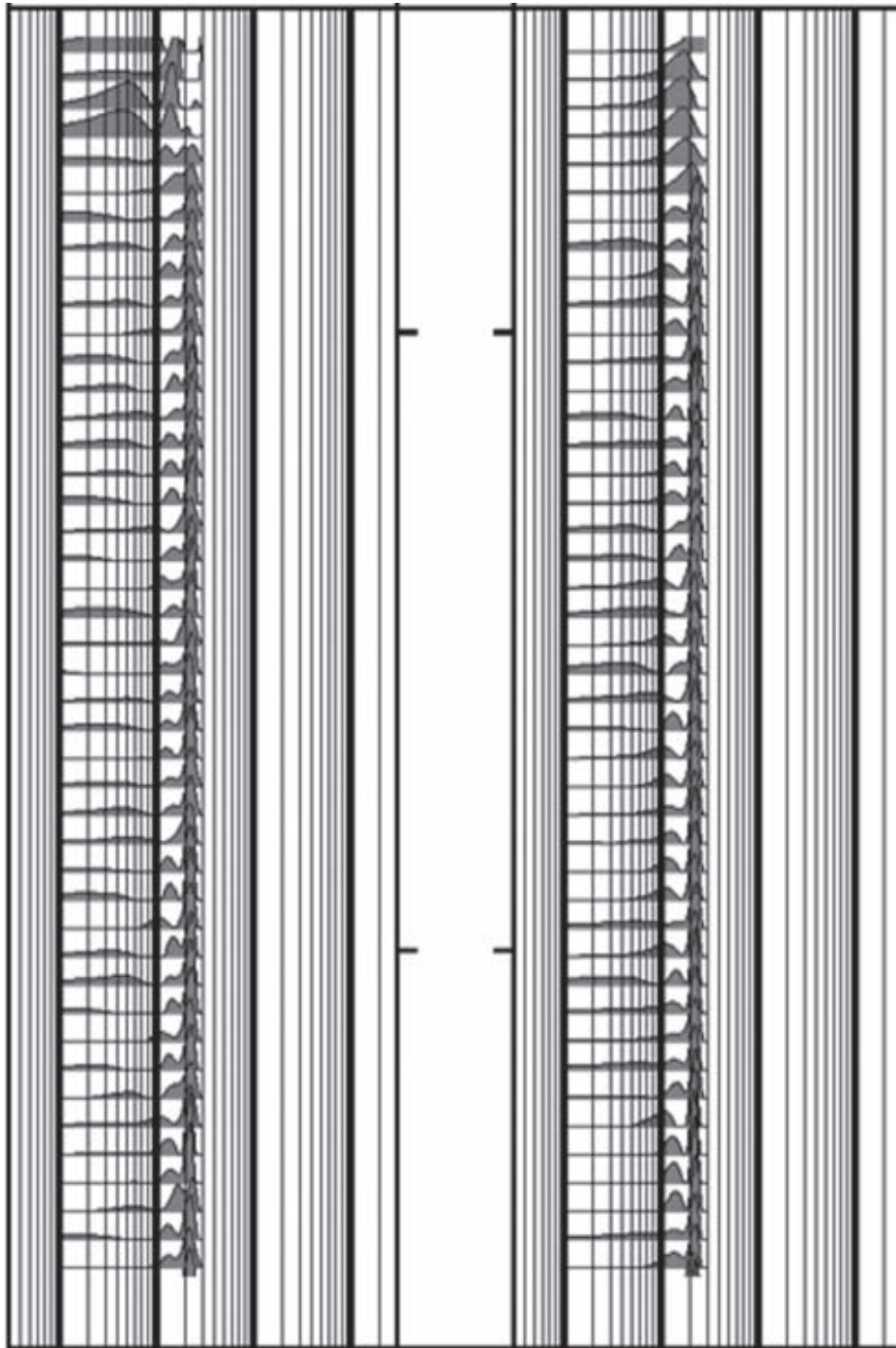
### توزیع $T_p$ و توزیع اندازه حفره

به زبان ریاضی می توان ثابت کرد که در سنگ های اشباع شده با آب، واپاشی متناظر با یک حفره منفرد، یک منحنی نمایی با ثابت واپاشی متناسب با اندازه حفره است، به این معنی که حفره های ریز دارای مقدار  $T_p$  کوچک و حفره های بزرگ دارای مقادیر  $T_p$  بزرگ تر هستند [۴، ۵]. در هر عمقی درون چاه نمونه های سنگ که

$M(t)$  مغناطش اندازه گیری شده در زمان،  $M_p(0)$  مغناطش اولیه مربوط به مولفه  $I_m$  آسایش،  $T_p$  ثابت واپاشی مولفه  $I_m$  آسایش عرضی و سیگما مجموع همه نمونه ها (تمام حفره ها و تمام انواع گوناگون سیالات) می باشد. اگر هسته هیدروژن را همانند یک قطب نما در نظر بگیریم، در این صورت بردار مغناطش هسته معادل عقربه قطب نما است که در راستای میدان مغناطیسی جهت گیری می کند.

شلمبرژر (تراک ۱) نشان داده شده است. نرم افزار شلمبرژر به طور انحصاری در اختیار شرکت مربوطه است. در این مقاله از طریق مقایسه توزیع  $T_p$  که با استفاده از نرم افزار ژئولاگ به دست آمده با توزیع  $T_p$  محاسبه شده توسط شرکت شلمبرژر، صحت نتایج ژئولاگ اثبات می شود.

توسط دستگاه MRIL مورد بررسی قرار می گیرند دارای توزیعی از اندازه حفرات می باشند. بنابراین واپاشی چندتایی نمایی، نشان دهنده توزیع اندازه های حفره ها در آن عمق است. در شکل ۲، توزیع  $T_p$  استخراج شده از رشته پژواک - اسپین با استفاده از دو نرم افزار ژئولاگ (تراک ۳) و



شکل ۲- مقایسه توزیع  $T_p$  حاصل از نرم افزار شلمبرژر از سمت چپ (تراک ۱)، عمق (تراک ۲) و ژئولاگ (تراک ۳)

را قبل و بعد از انجام تصحیحات، نشان می‌دهد. بعد از انجام تصحیحات نوبت به انجام مرحله معکوس سازی و تعیین توزیع  $T_p$  می‌رسد. اساسی‌ترین مرحله در پردازش داده‌های NMR تعیین توزیع  $T_p$  است زیرا تنها با داشتن آن، امکان تعیین پارامترهای پتروفیزیکی از قبیل توزیع حفره‌ها، تخلخل، نفوذپذیری، اشباع آب و آنالیز هیدروکربن (تعیین تخلخل پر شده با نفت و گاز) وجود دارد. روش‌های ریاضی متعددی برای معکوس سازی و حل دستگاه معادله بالا وجود دارد. ما در این مقاله روش SVD<sup>۴</sup> به کار برده‌ایم و کار آن تبدیل ماتریس ( $n \times m$   $m \ll n$ ) به ماتریس مربعی  $m \times m$  است. با اعمال روش معکوس سازی SVD، توزیع  $T_p$  به دست می‌آید [۸، ۱۰]

### تعیین تخلخل NMR و توزیع بین‌ها

ابتدا مفهوم بین‌بندی<sup>۵</sup> را به طور مختصر توضیح می‌دهیم. اگر ماهفت مقدار ثابت  $T_p$  به صورت: ۱۰۰، ۵۱۲، ۱۶، ۳۲، ۸، ۳، ۱، تعریف کنیم، می‌توانیم توزیع  $T_p$  را به ۸ قسمت مساوی تقسیم کرده و هر قسمت را یک بین بنامیم که نشان دهنده یک گروه حفره با اندازه مشخص می‌باشد، به این عمل بین‌بندی کردن توزیع تخلخل گفته می‌شود. به عبارت دیگر بین عبارت است از سطح مخزنی که نشان دهنده مجموع مقادیر کالیبره شده بین دو نقطه قطع در ماتریس توزیع  $T_p$  می‌باشد. ماتریس توزیع دامنه  $T_p$  به طور مستقیم به اندازه دهانه حفره درون سازند مربوط است. از بین‌بندی تخلخل می‌توان برای تعیین اندازه حفره‌های درون سازند استفاده کرد. توزیع حفره‌های حاصله را می‌توان در قسمت سمت چپ شکل ۳ مشاهده کرد. سطح زیر منحنی توزیع  $T_p$  نشان دهنده تخلخل می‌باشد. مقایسه بین نمودار تخلخل نوترونی و NMR در شکل ۴ دیده می‌شود [۹].

### مقایسه داده‌های پردازش شده NMR با داده‌های مغزه و داده‌های مرسوم

برای انجام این کار، نمودار تخلخل NMR و تخلخل

مساحت زیر منحنی توزیع  $T_p$  برابر با دامنه اولیه رشته پژواک - اسپین تعریف شده است. بنابراین توزیع  $T_p$  را می‌توان بر حسب تخلخل کالیبره کرد [۱].

یکی از مهم‌ترین گام‌ها در پردازش داده‌های NMR، تعیین توزیع  $T_p$  است که قطبیدگی قابل مشاهده را ایجاد می‌کند. این گام برازش پژواک یا نگاشت نامیده می‌شود که یک رویه معکوس ریاضی است. برای ساده کردن برازش، از مدل نمایی چندتایی استفاده شده است. در این مدل فرض می‌شود که توزیع  $T_p$  از  $m$  زمان مجزای  $T_{p,i}$  تشکیل شده که هر یک از آنها متناظر با مولفه تخلخل  $\phi_i$  است. مقادیر  $T_{p,i}$  از پیش انتخاب می‌شوند (برای مثال ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۲۵۶، ۵۱۲، ۱۰۲۴ میلی ثانیه) و فرآیند برازش بر تعیین مؤلفه‌های تخلخل هر توزیع تمرکز می‌کند. رابطه زیر توضیحات فوق را نشان می‌دهد:

$$\text{echo}(1) = \phi_1 e^{-[t(1)/T_{2,1}]} + \phi_2 e^{-[t(1)/T_{2,2}]} + \phi_3 e^{-[t(1)/T_{2,3}]} + \dots + \phi_m e^{-[t(1)/T_{2,m}]} + \text{noise} \quad (2)$$

$$\text{echo}(2) = \phi_1 e^{-[t(2)/T_{2,1}]} + \phi_2 e^{-[t(2)/T_{2,2}]} + \phi_3 e^{-[t(2)/T_{2,3}]} + \dots + \phi_m e^{-[t(2)/T_{2,m}]} + \text{noise}$$

$$\text{echo}(n) = \phi_1 e^{-[t(n)/T_{2,1}]} + \phi_2 e^{-[t(n)/T_{2,2}]} + \phi_3 e^{-[t(n)/T_{2,3}]} + \dots + \phi_m e^{-[t(n)/T_{2,m}]} + \text{noise}$$

که  $t = (i)$  و  $i = 1, \dots, n$  زمانی است که  $i$  امین پژواک حاصل می‌شود. معادله ۲ دستگاه  $n$  معادله خطی با  $m$  مجهول،  $\phi_1, \dots, \phi_m$  می‌باشد که  $n$  خیلی بزرگ‌تر از  $m$  است [۷].

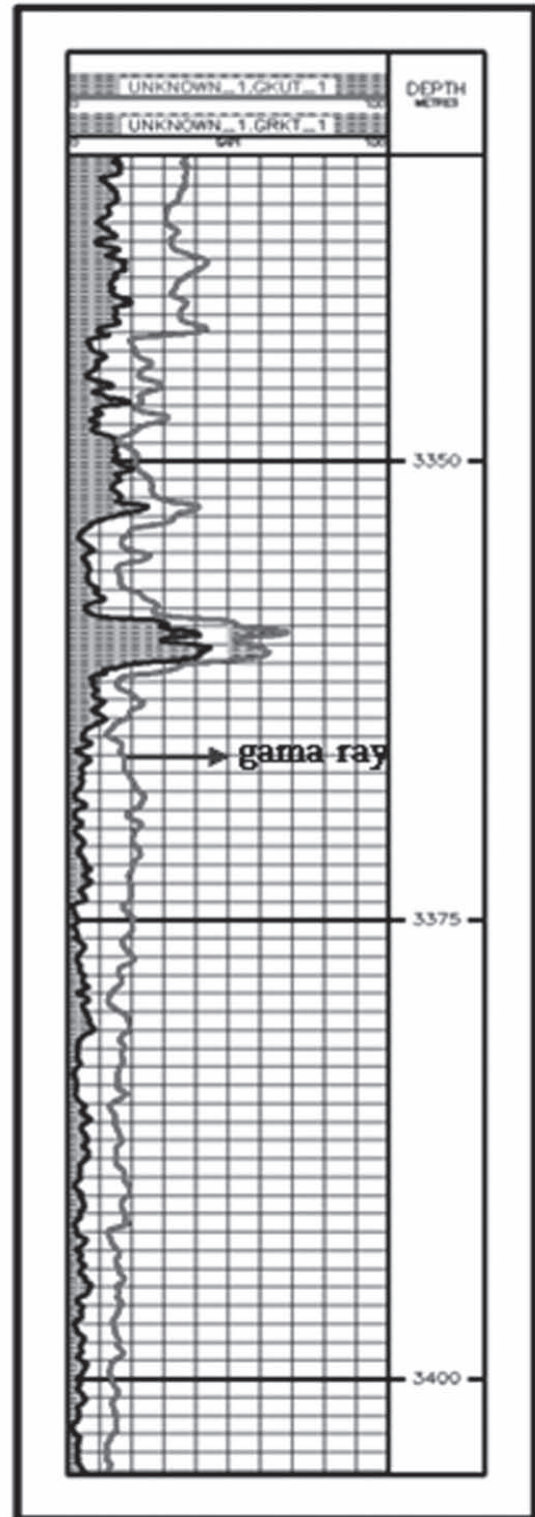
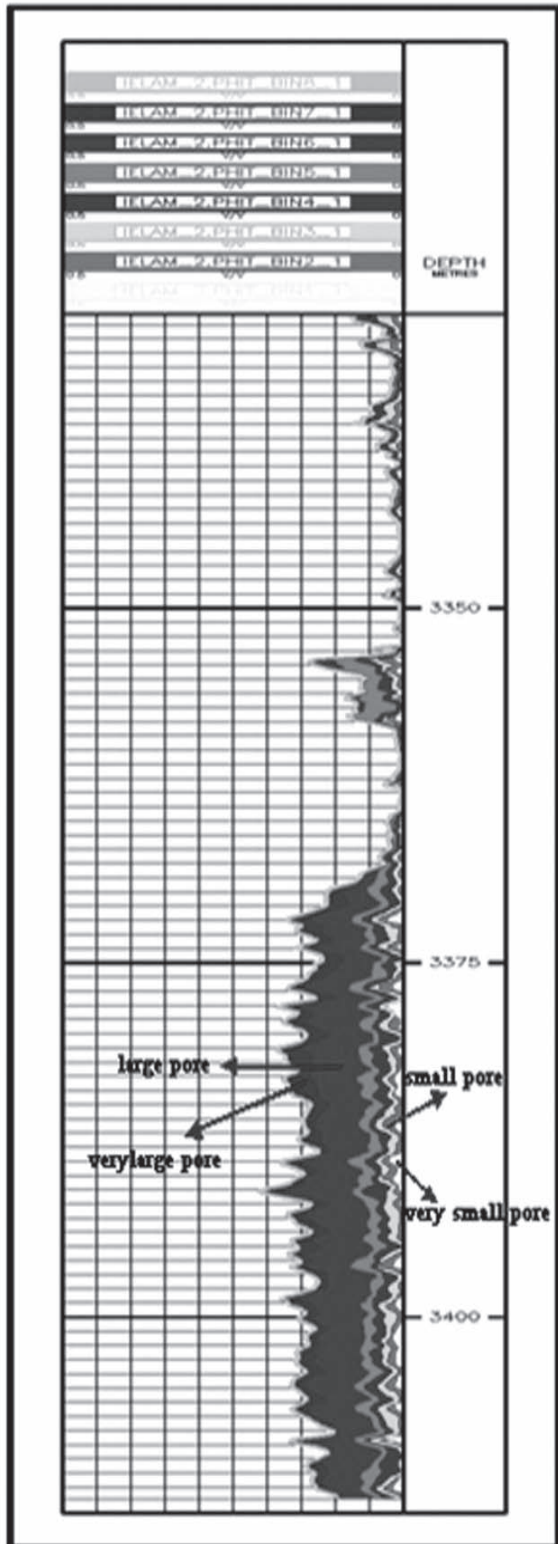
### روش تحقیق

برای پردازش داده‌های خام NMR از نرم‌افزارهای شلمبرژر، هالیبرتون و نرم‌افزار اطلس استفاده می‌شود. در این مقاله برای پردازش داده‌های NMR از نرم‌افزار ژئولاگ استفاده شده است. قبل از انجام معکوس سازی و محاسبه تخلخل، لازم است برای رسیدن به نتایج مطلوب یک سری تصحیحات بر روی داده‌های خام NMR اعمال گردد. مهم‌ترین آنها میانگین رانده شدگی<sup>۱</sup>، دسته کردن<sup>۲</sup> و تصحیحات فازی<sup>۳</sup> است شکل ۱ داده‌های خام

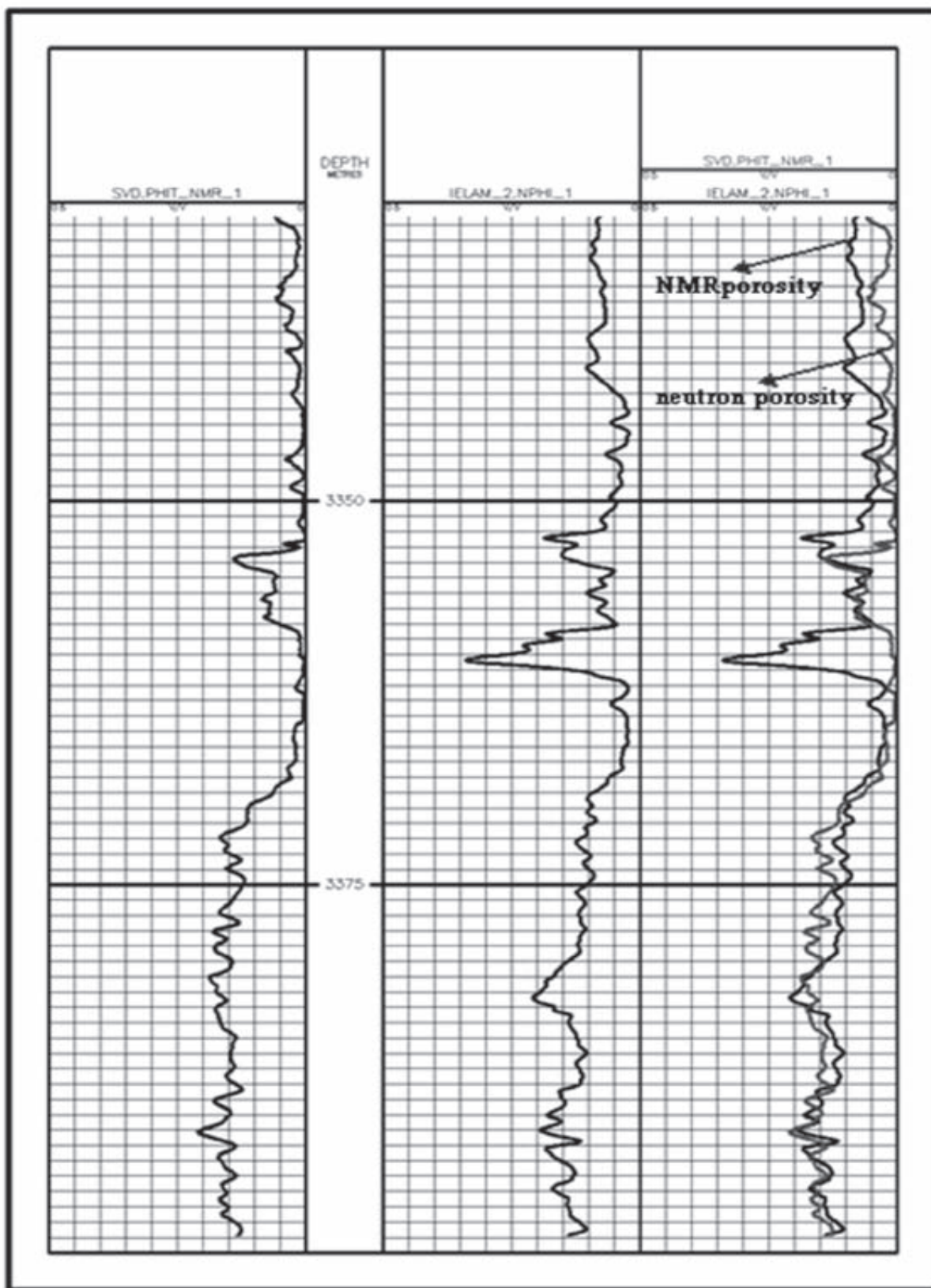
1. Running Average
2. Stacking
3. Phase Correction
4. Singular Value Decomposition
5. bin

آخر میزان سازگاری هر کدام از تخلخل‌ها را با مغزه تعیین می‌نمایم. این مقایسه‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده است.

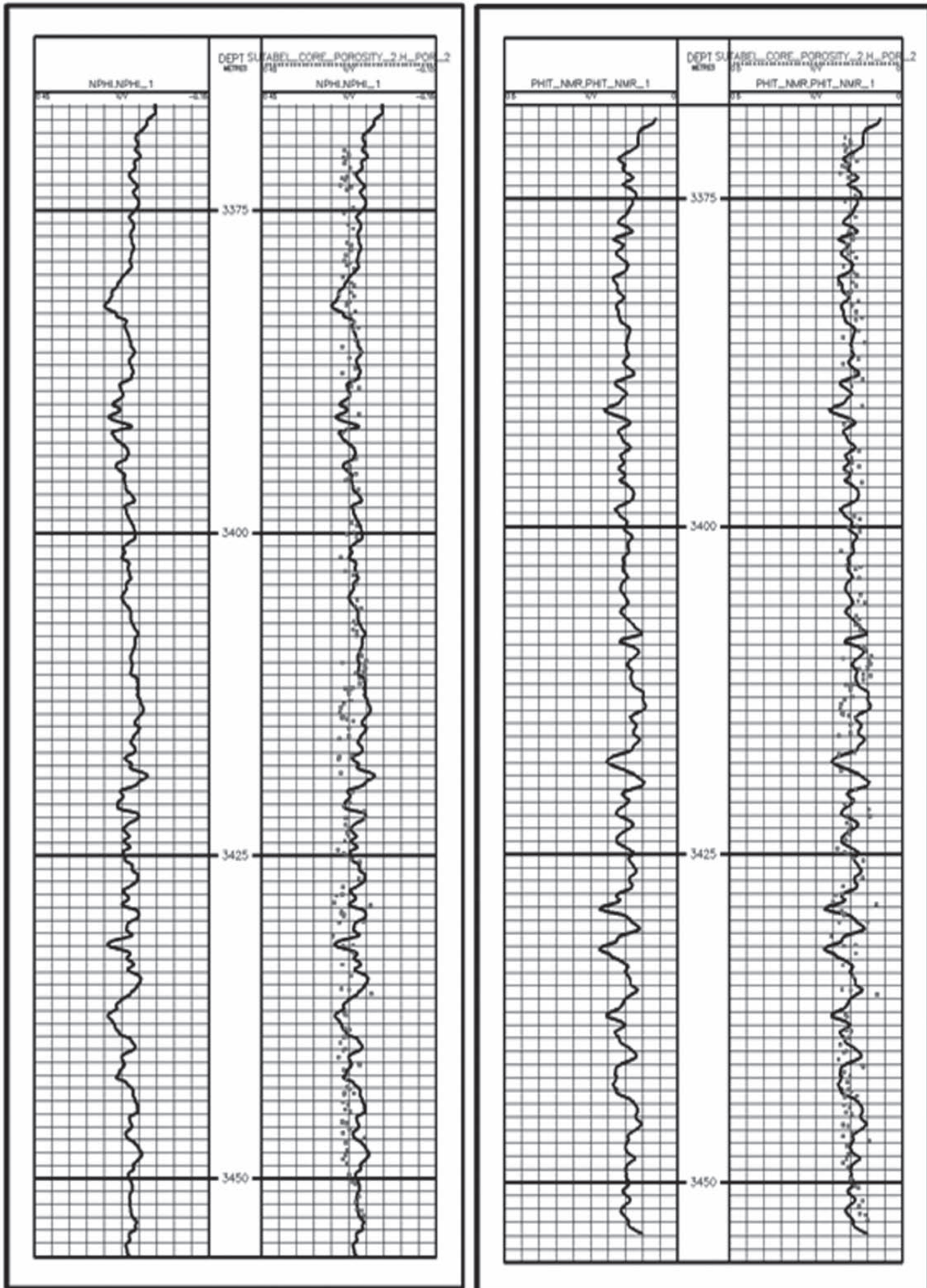
نوترونی را بر حسب عمق رسم کرده و با نمودار داده‌های مغزه بر حسب عمق مقایسه می‌کنیم همچنین کراس پلات هر کدام از داده‌ها را بر حسب داده‌های مغزه رسم و در



شکل ۳- نمودار سمت چپ توزیع حفره‌ها را به ازای هشت بین مختلف بارنگ‌های متفاوت نمایش می‌دهد. در این شکل به ترتیب از سمت راست به چپ ابتدا حفره‌های خیلی ریز رسی با رنگ روشن و حفره‌های بزرگتر به ترتیب با رنگ‌های دیگر مشخص گردیده که در شکل تعدادی از آنها به عنوان نمونه با فلش مشخص شده‌اند، نمودار سمت راست منحنی کم‌رنگ‌تر که با فلش مشخص شده نشان دهنده نمودار گاما و منحنی خاکستری نشان دهنده حجم شیل است.

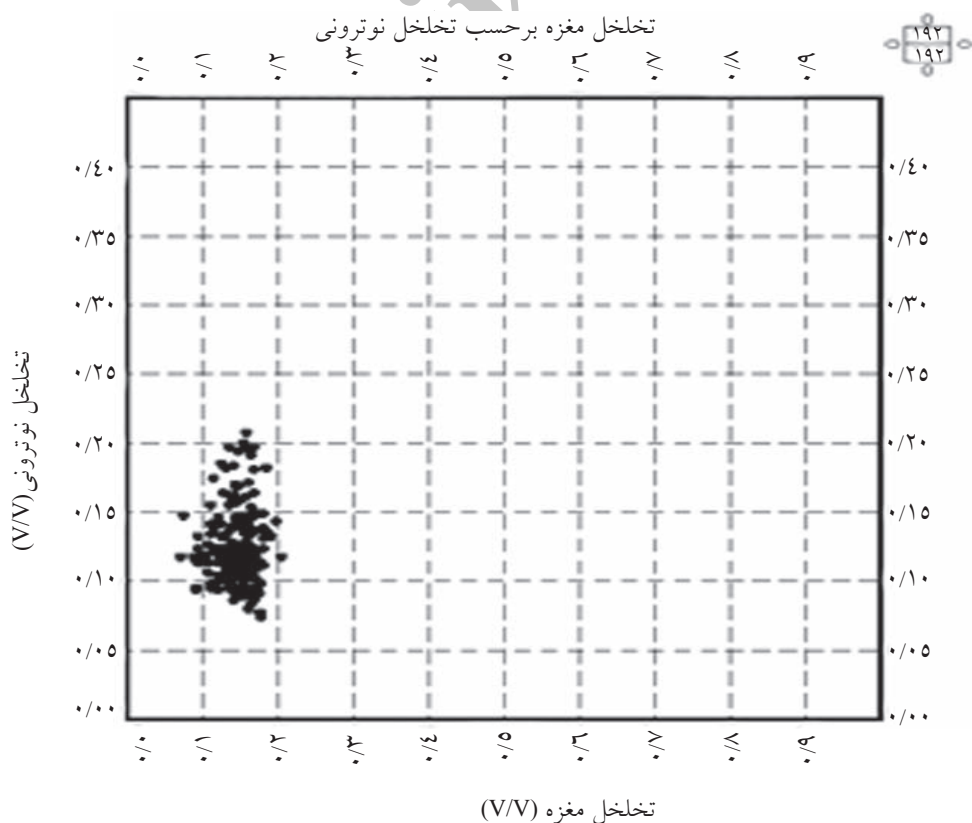
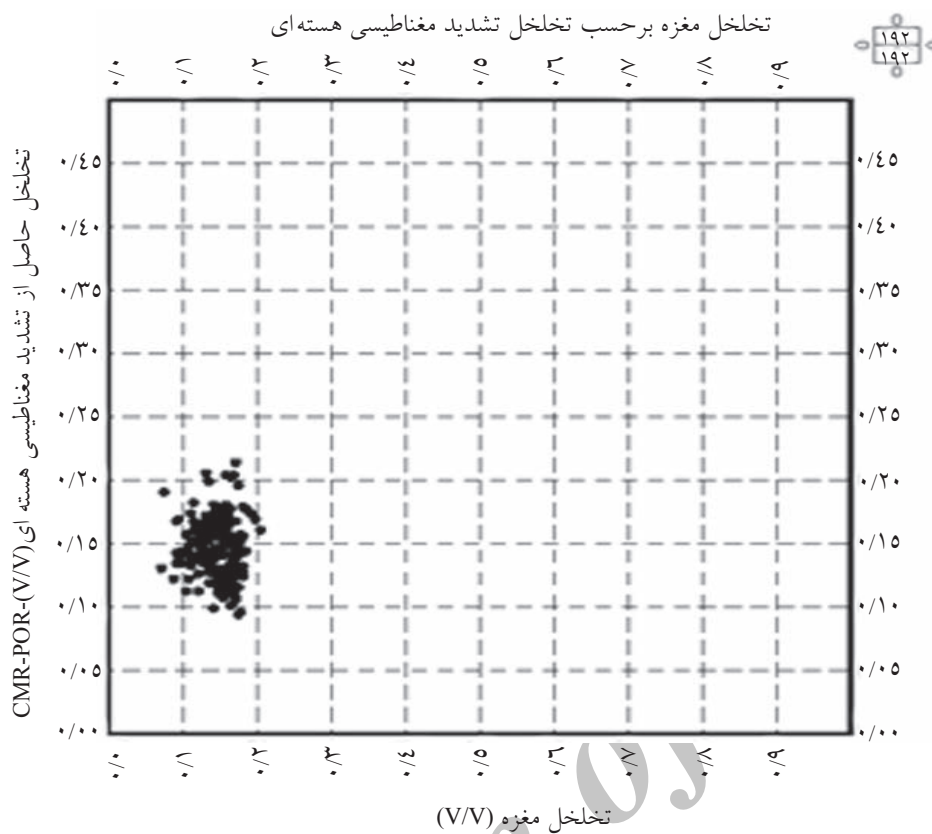


شکل ۴- تراک ۱ تخلخل NMR، تراک ۲ عمق، تراک ۳ تخلخل نوترونی و تراک ۴ منحنی کم‌رنگ‌تر تخلخل NMR، (neutron porosity) و منحنی تیره‌تر تخلخل نوترونی را نشان می‌دهد که با فلش روی نمودار مشخص گردیده‌اند.



شکل ۵- در منحنی سمت چپ تراک ۱ تخلخل نوترونی، تراک ۲ عمق و تراک ۳ منحنی سیاه تخلخل نوترونی و نقاط نمایانگر تخلخل مغزه می باشد که نشان دهنده توافق کمتر تخلخل نوترونی و مغزه است، و در منحنی سمت راست تراک ۱ تخلخل NMR، تراک ۲ عمق و تراک ۳ منحنی سیاه تخلخل NMR و نقاط نمایانگر تخلخل مغزه می باشد که نشان دهنده توافق خوب بین تخلخل NMR و مغزه است





شکل ۶- کراس پلات بالا مربوط به تخلخل مغزه و تخلخل NMR و کراس پلات پایین مربوط به تخلخل مغزه و تخلخل نوترونی است

## نتیجه گیری

بستگی دارد و در نتیجه تخلخل بیش تر از حد واقعی به دست می آید. البته در چاه مورد بررسی ما علت توافق کمتر تخلخل مغزه و نوترونی وجود ژپس نیست [۱۰]. شیل ها دارای آب چسپیده به ذرات هستند. لذا دستگاه CNL (دستگاه اندازه گیری تخلخل نوترونی) با واکنش نسبت به آن، تخلخل بسیار زیادی را نشان خواهد داد. در واقع در سازندهای شیلی، تخلخل به دست آمده از بازتاب نوترون، بسیار بیشتر از تخلخل مؤثر واقعی سنگ است. علت اصلی توافق کمتر تخلخل مغزه و نوترونی در بعضی از نقاط در چاه مورد بررسی در این مقاله، وجود شیل است بنابراین نمودار نوترونی نیاز به تصحیح شیل دارد [۱۰].

- در اندازه گیری های NMR بر خلاف اندازه گیری های مرسوم، توزیع اندازه حفره ها نیز تعیین می شود. به عبارت دیگر مشخص می شود که چه درصدی از تخلخل مربوط به حفره های ریز، حفره های متوسط و یا حفره های بزرگ می باشد. بنابراین تا حدودی می توان در مورد قابل برداشت بودن یا نبودن هیدروکربن نظر داد، ولی برای تعیین دقیق این موضوع باید به نفوذپذیری به دست آمده از NMR مراجعه نمود.

۳- در ارزیابی های معمول سازندها، عموماً از لاگ های مقاومت ویژه، جرم مخصوص، نوترون، صوتی و نشان گری های رس از قبیل گاما، و... استفاده می شود. محدودیت هر کدام از این اطلاعات باعث می شود که استفاده از آنها به تنهایی قابل اعتماد نباشد. در حالی که NMR شامل مجموعه ای از اطلاعات مانند تخلخل، توزیع اندازه حفره، نفوذپذیری، آب ناحیه رسی، آب ناحیه مویی، حجم سیال آزاد که با شاخص FFI مشخص می شود و حجم هیدروکربن و آب قابل جابه جایی است.

۱- کراس پلات بالایی شکل ۶ و نمودار سمت راست شکل ۵ بیانگر توافق بیشتر بین تخلخل مغزه و تخلخل NMR است. بنابراین می توان تخلخل حاصل از پردازش داده های NMR را برای محاسبه سایر پارامترها به کار برد. داده های جدول شماره ۱ بیانگر این موضوع می باشد.

۲- کراس پلات پایینی شکل ۶ و نمودار سمت چپ شکل ۵ بیانگر توافق کمتر تخلخل مغزه و تخلخل نوترونی است. این تفاوت به علت تمیز بودن سازند (میزان کم شیل سازند)، زیاد نیست. این مساله در منحنی سمت راست ۳ نشان داده شده است. همان گونه که در این نمودار مشاهده می شود، بجز در بعضی نقاط، در بیشتر اعماق، میزان شیل کم است. از این رو تخلخل نوترونی با تخلخل مغزه اختلاف فاحشی ندارد. در حالت کلی به دلایل عمومی زیر تخلخل نوترونی می تواند بیش از حد واقعی شده و منجر به کاهش سازگاری آن با داده های مغزه گردد.

- دستگاه CNL (دستگاه اندازه گیری تخلخل نوترونی) بیشتر منعکس کننده مقدار هیدروژن موجود در حفره های سازند است. از آنجایی که نفت و آب عملاً غلظت هیدروژنی یکسانی دارند (تعداد هسته های هیدروژن درون نفت با تعداد آن درون همان حجم از آب مساوی است)، لذا در یک سازند تمیز، بازتابها انعکاس تخلخل پر شده با مایع می باشد. ولی باید در نظر داشت که تمام اتم های هیدروژن موجود در سازند، حتی اتم هایی که به طور شیمیایی در ساختمان بلورهای ماتریکس سازند وجود دارند (مثل ژپس)، نیز در این اندازه گیری شرکت می نمایند. بنابراین مقادیر تخلخل نوترونی بیشتر به شاخص هیدروژنی سازند

جدول شماره ۱

نمودار	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	عمق بالایی	عمق پایینی
NPHI <sup>۲</sup>	V/V	۰/۰۰۴۲۶۵	۰/۳۳۸۶۸۴	۰/۰۸۷۵۸۲	۳۲۸۸/۲۲۱	۳۵۰۹/۷۷۲
PHIT_NMR	V/V	۰,۰۰۱۱	۰/۲۲۵۴	۰,۰۸۲۱	۳۲۸۸/۲۲۱	۳۵۰۹/۷۷۲
Core_Por	V/V	۰/۰۷۱۲	۰/۲۰۴۲۵	۰/۰۹۸۱۶۸	۳۳۷۰/۳	۳۴۵۲/۸۳

1. Capillary Bound Water, (BWI)
2. Free Fluid Index, (FFI)
3. Notron Porosity

تاثیر اجزای سنگ مخزن هستند. همان گونه که می دانیم، دستگاه CNL بر اساس واحدهای تخلخل سنگ آهک مقیاس بندی می شود. بنابراین اگر ماتریکس سنگ آهک باشد، هیچ تصحیح ماتریکس سنگ وجود ندارد. ولی اگر ماتریکس ماسه سنگ یا دولومیت باشد، لازم است که بر اساس نمودار Por-۱۳ تصحیح گردد. از طرفی وجود شیل در سازند و وجود ژپس در ماتریکس سنگ، اندازه گیری تخلخل نوترونی را تحت تاثیر قرار می دهد و نیاز به تصحیح دارد. بنابراین، چون سنگ های مخزن بدنه سنگی بیشتری نسبت به فضاهای پر شده از سیال دارند، دستگاه های مرسوم به مواد ماتریکسی بسیار حساس تر از سیالات حفره می باشند [۱۰].

### تشکر و قدردانی

با سپاس از آقای مهندس باقری عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت و مهندس حافظی از شرکت شلمبرژر و آقایان مهندس جوکار و مهندس سینایی از شرکت نفت و گاز زاگرس جنوبی.

حجم هیدروکربن قابل برداشت تنها با استفاده از یک دستگاه MRIL مشخص می شود، در صورتی که بعضی از این اطلاعات از قبیل آب ناحیه رسی، آب ناحیه مویی و حجم سیال آزاد، توسط دستگاه های مرسوم، اندازه گیری نمی شود. در دستگاه MRIL برای محاسبه حجم هیدروکربن نیازی به اندازه گیری اشباع آب کل نیست. در اینجا برای تعیین اشباع آب کل از مدل MRIL استفاده می شود. در این مدل از ترکیب داده های دستگاه MRIL شامل تخلخل کل و اشباع آب ناحیه رسی، با داده دستگاه مقاومت عمیق شامل  $R_p$ ، اشباع آب کل به دست می آید. البته ما در این مقاله تنها به بررسی محاسبه تخلخل توسط دستگاه MRIL پرداخته ایم ۴- باید در نظر داشت که تنها سیالات با MRI مشاهده می شوند، لذا تخلخل اندازه گیری شده توسط دستگاه MRIL، مواد ماتریکسی را در نظر نمی گیرند. بنابراین نیازی به دانش سنگ شناسی سازند نیست. این مشخصه پاسخ، دستگاه MRIL را اساساً از دستگاه های نمودارگیری مرسوم متفاوت می سازد. دستگاه های مرسوم نمودارگیری نوترونی، جرم مخصوص توده ای و صوتی، همگی تحت

### مراجع

- [۱] کارگر ز، خوش سیما ف. و مجرد ح.، چاه نگاری به روش تشدید مغناطیس هسته ای، نویسندگان: Manfred, G. Lizhi, Xio, Coates. GORGE, R. ۱۹۹۹.
- [2]. Granweher J., Phys, Lett a5, 075503., 2005.
- [3]. Kenyon W. E., "Three-part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones", SPE Formation Evaluation., Vol. 3, No. 3, pp. 622-636, 1988.
- [4]. Brownstein K. R., "Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells", Physical Review., Series A, Vol. 19, pp. 2446-2453, Tarr, C.E, 1979.
- [5]. Kenyon W.E., "Nuclear magnetic resonance as a petrophysical Measurement", Nuclear Geophysics., Vol. 6, No. 2, pp. 153-171, 1992.
- [6]. Golub G. H. and Van Loan C.F., *Matrix computation*, The Johns Hopkins University Press., 1983.
- [7]. Elsberg., "R, Singular Value Decomposition and Principal Component Analysis", IEE Computer Society., Vol. 2, 2004.
- [8]. Baker M., *Singular Value Decomposition Tutrial*, 2005.
- [9]. Ferrer F., Vielma M., Baker Atlas, And Lezama A., "Permeability Model Calibration and Pore Throat Radius Determination Using Core Analysis and NMR Data in Mixed-Lithology Reservoirs", Society of Petroleum Engineers. Petroleum Engineering Conference in Buenos Aires., SPE 108078, 2007.

[۱۰] موحد ب.، مبانی چاهپیمایی، چاپ اول، تهران: انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۸.