

طراحی مگنت سیستم رزونانس مغناطیسی هسته‌ای برای کاربردهای چاه‌نگاری

بهنام اسدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

معصومه محمدیان*

مدرس، دانشکده فنی و حرفه‌ای دکتر شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

وحید اسماعیلی

دانش‌آموخته‌ی دکتری، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

حسین آفریده

استادیار، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

چکیده

ابزار اندازه‌گیری رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، در بررسی و تعیین مشخصات مخزن‌های نفتی اهمیت زیادی دارد و درباره‌ی نوع سیال داخل سازند اطلاعاتی در اختیار می‌گذارد. اساس آنالیز این ابزار، استفاده از اندازه‌گیری‌های آسایش و انتشار برای درک ساختار سنگ مخزن و نوع سیالات درون آن‌هاست که به برآورد قابلیت تراوایی مطلق مخازن حاوی هیدروکربن و نوع سیال منجر می‌شود. ساختارهای مختلفی از این ابزار با توجه به نوع مگنت قابل ارائه است که در تحقیق به‌اختصار به آن‌ها پرداخته و نمونه‌ای برای ایجاد میدان مغناطیسی عرضی موازی با سازند داخل چاه شبیه‌سازی شده است. آنتن پیچیده شده در اطراف مگنت، میدان مغناطیسی عمود بر میدان ایستای حاصل از مگنت ایجاد می‌کند. میدان مغناطیسی ایستای حاصل از مگنت، میدانی گرادیانی است که با افزایش فاصله از مگنت کاهش می‌یابد. در این تحقیق از نرم‌افزار CST برای طراحی مگنت دائمی دستگاه و شبیه‌سازی به‌ازای جنس‌ها و ابعاد مختلف مگنت استفاده شده است. پس از بررسی پارامترهای مختلف، مگنتی از جنس فرت پایه Y22H به شعاع ۳ و طول ۸۲/۸ اینچ به‌عنوان مگنت مناسب معرفی شد. بررسی اثرهای دمایی داخل چاه بر پاسخ مغناطیسی مگنت، نشان داد بزرگی میدان مغناطیسی در ناحیه‌ی حساس با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین محفظه‌ای از جنس آلپاژ بریلوم — مس یا استیل ضدزنگ سخت شده به‌عنوان محفظه‌ی نگهدارنده مگنت طراحی شد که ماده‌ای غیرمغناطیسی است و اثر آن بر میدان حاصل از مگنت بررسی شد. سپس تأثیرات دیواره‌ی سیمانی چاه بر میدان نیز بررسی شد. همچنین با توجه به اینکه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ماده‌ی فرت در گستره‌ی ۱/۶۵ — ۱/۴۵ است، تأثیرات تغییر این پارامتر بر میدان حاصل از مگنت بررسی شد. افزایش ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی، موجب کاهش مقدار میدان مغناطیسی تولیدی در عمق بررسی داخل سازند شد. تأثیرات شعاع مگنت بر میدان تولید شده نیز از دیگر موارد تحلیل شده است که دستگاه با قطر ۶ اینچ، عمق نفوذ بیشتری نسبت به ابزار مشابه با قطر ۴/۵ اینچ نشان داد و در نتیجه ابزار مناسبی برای بررسی عمق‌های بیشتر از سازند است.

واژه‌های کلیدی

ابزارهای چاه‌پیمایی، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، زمان آسایش، فرکانس لارمور، مگنت دائمی، میدان مغناطیسی ایستا.

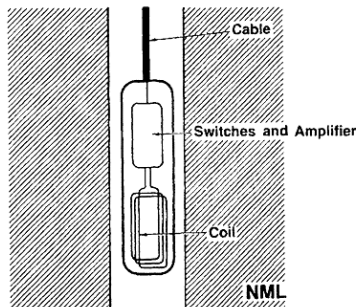
* نویسنده‌ی مسوول مکاتبات: mohamadian@aut.ac.ir

۱. مقدمه

رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR)^۱ به یک اصل فیزیکی یعنی پاسخ هسته به میدان مغناطیسی منتسب است. بسیاری از هسته‌ها دارای ممنتوم مغناطیسی هستند. آن‌ها مانند آهنرباهای چرخنده عمل می‌کنند. این هسته‌ی مغناطیسی چرخنده می‌تواند با میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان دهد و سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری تولید کند. برای بیشتر عناصر، سیگنال‌های تشخیص داده شده اندک هستند؛ اما هیدروژن دارای ممنتوم مغناطیسی به نسبت بزرگ است و در آب و هیدروکربن‌های موجود در فضاهای متخلخل به‌وفور یافت می‌شود. کمیت‌هایی که در نگاره‌برداری NMR اندازه‌گیری می‌شوند، شامل دامنه و زوال سیگنال است. دامنه‌ی سیگنال NMR متناسب با تعداد هیدروژن‌های موجود است و برای به‌دست آوردن تخلخل کالیبره می‌شود. این تخلخل از تأثیرات چشمه‌های رادیواکتیو و لیتولوژی میراست. با این حال زوال سیگنال NMR در طول هر چرخه‌ی اندازه‌گیری (که زمان آسایش نامیده می‌شود) بهترین اطلاعات را درباره‌ی خواص پتروفیزیکی فراهم می‌کند.

زمان آسایش به‌اندازه‌ی فضاهای متخلخل وابسته است. برای مثال فضاهای متخلخل کوچک زمان آسایش را کاهش می‌دهند و کوتاه‌ترین زمان آسایش، مربوط به آب‌های چسبیده به رس‌ها و سطوح ماتریکس است. فضاهای متخلخل بزرگ، زمان آسایش طولانی دارند و حاوی سیالاتی هستند که به سهولت حرکت می‌کنند. برخی از کاربردهای روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای عبارت‌اند از تشخیص زون‌های مخزنی با مقاومت کم، ارزیابی مخازن نفت و گاز با لیتولوژی پیچیده، تعیین حجم و تشخیص نفت‌های سنگین یا دارای گراندروی متوسط، مطالعه‌ی سازندهای با تخلخل یا تراوایی کم، تعیین اشباع نفت باقی‌مانده، به‌دست آوردن توزیع تخلخل و توزیع اندازه‌ی حفره‌ها، تعیین نوع هیدروکربن و تعیین تراوایی.

تخلخل به‌دست آمده از اندازه‌گیری NMR هیچ سهمی از ماتریکس ندارد، بنابراین به کالیبره کردن نتایج به‌دست آمده با لیتولوژی سازند نیازی نخواهد بود. در صورتی که تخلخل اندازه‌گیری شده توسط ابزارهای نگاره‌برداری مرسوم تحت تأثیر همه‌ی مؤلفه‌های سنگ مخزن که بخش اعظم آن را ماتریکس تشکیل می‌دهد، قرار می‌گیرند. بنابراین نمی‌توان آن‌ها را ابزارهای مناسبی برای نگاره‌برداری سیال در نظر گرفت.

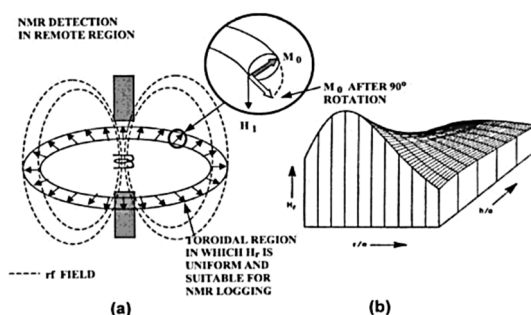


شکل ۱. طرح اولیه‌ی ابزار چاه‌نگاری^۲ مغناطیسی هسته‌ای

در سال ۱۹۴۶، پورشل و بلاخ^۲ NMR را کشف کردند. در سال ۱۹۴۸، روسل واریان^۳ حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین (فرکانس لارمور ۲ کیلوهرتز) را اثبات کرد و یک روش برای استفاده از آن به منظور اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین و گرادیان در این میدان را بیان داشت. این ابزار بر پایه‌ی مشاهده‌ی حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین در فرکانس حدود ۲ کیلوهرتز بود. در این سیستم سیم‌پیچ (شکل ۱) دارای طول ۱/۷۵ متر و عرض ۱۵ سانتی‌متر بود. در عمل سیم‌پیچ با یک جریان dc قوی برای تولید یک میدان به مدت چند ثانیه انرژی داده می‌شد تا یک مغناطش هسته‌ای ایجاد شود. سپس جریان ناگهان خاموش می‌شد و همان سیم‌پیچ برای دریافت سیگنال حاصل از حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌شد. زمان مرگ ابزار در حدود ۳۰ میلی‌ثانیه بود (بعدها به ۲۱ میلی‌ثانیه کاهش یافت) در نتیجه بخشی از آب در فضای منافذ بازمان آسایش کمتر از زمان مرگ قابل اندازه‌گیری نبود؛ از این رو این ابزار قادر به تشخیص آب و نفت در فضای منافذ و نیز اندازه‌گیری تخلخل کل نبود (Dunn et al., 2002).

برای غلبه بر مشکلات استفاده از میدان مغناطیسی زمین، دانشمندان، مگنت‌های دائمی را برای ایجاد یک میدان همگن در محیط خارج از مته به کار گرفتند. در طراحی جکسون، دو مگنت استوانه‌ای با قطب‌های مثبت در خلاف جهت یکدیگر در یک محفظه قرار گرفتند. این مگنت‌ها میدان پایایی را ایجاد می‌کردند که به صورت شعاعی متقارن بود. در صفحه‌ی افقی عمود بر محور مرکزی یک ناحیه‌ی چنبره‌ای وجود داشت که مؤلفه‌ی شعاعی میدان مغناطیسی H_r می‌توانست به هر درجه‌ای در طول نواحی تعیین شده همگن باشد. یک سیم‌پیچ نیز در وسط مگنت‌های مخالف قرار می‌گرفت و یک پالس ۹۰ درجه در ناحیه‌ی حساس تولید می‌کرد. جفت‌شدگی مغناطش حاصل از حرکت تقدیمی و سیم‌پیچ امکان آشکارسازی

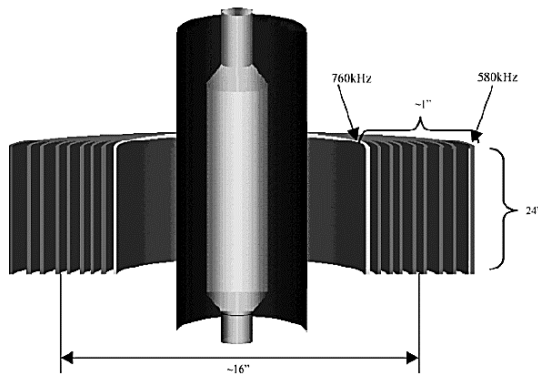
سیگنال NMR را فراهم می‌ساخت. مشکل اساسی طراحی جکسون آن بود که موقعیت و قدرت میدان ناحیه‌ی چنبره‌ای، تمایل به تغییر در طول زمان عملکرد داشت. دلایل آن، تغییر در میدان مغناطیسی محلی زمین، دمای سازند و پارامترهای مکانیکی مگنت‌های دائمی تولیدکننده‌ی میدان بود.



شکل ۲. (a) ناحیه‌ی چنبره‌ای میدان همگن حاصل از دو مگنت استوانه‌ای مخالف؛ (b) منحنی سه‌بعدی میدان شعاعی Hr برحسب تغییرات h/a و فاصله‌ی شعاعی r/a (همان)

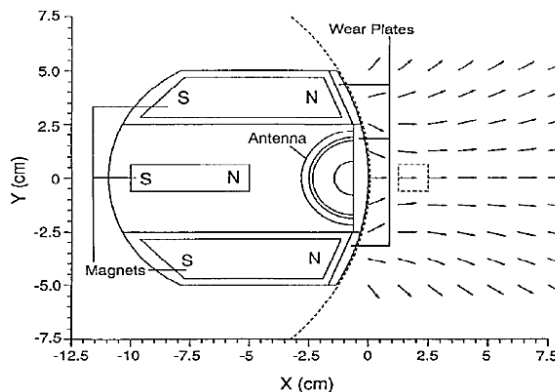
فناوری بعدی اختراع چاه پیمایی NMR با استفاده از آهنربای دائمی و فرکانس رادیویی پالسی (RF) در سال ۱۹۷۸ توسط لوس‌آلاموس پدید آمد. این فن از آهنربای دائمی برای تولید میدان B_0 در سازند^۴ احاطه‌کننده‌ی ابزار و از RF پالسی برای دست‌کاری سیستم اسپین هسته‌ی سیالات سازند استفاده می‌کرد. ابزار MRIL نومار که در سال ۱۹۹۱ برای واقع‌نگاری چاه‌های نفتی تجاری ساخته شد، از یک آهنربای استوانه‌ای بسیار طولی برای تولید میدان مغناطیسی عرضی موازی با سازند داخل چاه استفاده می‌کرد. سیم‌پیچ RF در اطراف مگنت پیچیده می‌شود و میدان B_1 عمود بر B_0 را فراهم می‌کند. در این حالت اگرچه یک میدان ایستا با گرادیان چشمگیری تولید می‌شود، SNR با افزایش قدرت میدان در طول حجم حساس افزایش می‌یابد. از آنجا که قدرت میدان ایستای B_0 به‌صورت $1/r^2$ تغییر می‌کند، حلقه‌های با شعاع مختلف را می‌توان با انتخاب فرکانس‌های برانگیزش منطبق بر شرایط رزونانسی انتخاب کرد (شکل ۳).^۳ محفظه‌ی این دستگاه باید از مواد غیرفلزی ساخته شود تا سیم‌پیچ RF و سازند داخل مته تداخل نداشته باشند.

با وجود این، نومار تا حد زیادی، حجم حساس و SNR را با به‌کارگیری گرادیان مغناطیسی دائمی افزایش می‌دهد. در سال ۱۹۹۲ گروه کلینبرگ (Kleinberg et al., 1992) دستگاه NMR چاه‌نگاری جدیدی را معرفی کردند که پایه و اساس $^5\text{PNMT}$ شرکت شلمبرژه را تشکیل داد. این دستگاه از مفهوم هندسه‌ی جکسون میدان‌های دافع تولیدکننده‌ی نواحی همگن استفاده می‌کرد (همان).



شکل ۳. لایه‌های هم‌مرکز حجم‌های حساس ایجاد شده با انتخاب فرکانس‌های برانگیزش متناسب با قدرت میدان متغیر

شکل ۴ طرح آهنربای دستگاه را نشان می‌دهد. دو آهنربای میله‌ای به صورت عرضی نسبت به چاه مغناطیده شده‌اند و یک ناحیه‌ی همگن ایجاد می‌کنند. سومین مگنت برای افزایش قدرت میدان به کار گرفته می‌شود. سیم‌پیچ RF نشان داده شده در این شکل به عنوان آنتن، بین دو آهنربای میله‌ای برانگیزنده قرار می‌گیرد.



شکل ۴. طرح کلی PNMT شلمبرژه

۲. فیزیک NMR

اولین گام برای اندازه‌گیری NMR، هم‌جهت کردن هسته‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی پایای B_0 است. وقتی B_0 بر هسته‌های مغناطیسی اعمال شود، B_0 گشتاوری را بر روی هسته‌ها اعمال می‌کند که سبب هم‌جهت شدن محورهای اسپین هسته با B_0 می‌شود. با اعمال گشتاور بر روی جسم در حال

چرخش، محور آن عمود بر گشتاور حرکت می‌کند. این حرکت، حرکت تقدیمی^۶ نامیده می‌شود. فرکانس حرکت تقدیمی، فرکانس لارمور ($f = \gamma B_0 / 2\pi$) نامیده می‌شود. γ نسبت ژيرومغناطیسی است که معیاری از قدرت مغناطیس شدن هسته‌ای است.

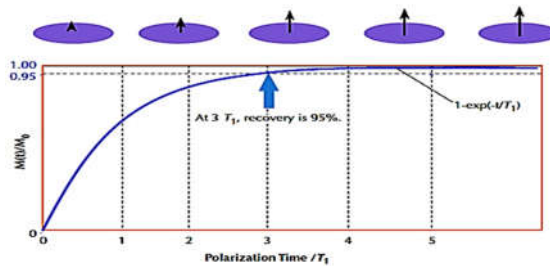
بعد از اعمال میدان، مکان‌هایی که در جهت میدان قرار می‌گیرند، بیشتر از آن‌هایی هستند که جهت‌گیری نمی‌کنند. این حالت، سبب ایجاد یک قطبش میکروسکوپی خالص در جهت میدان اعمالی می‌شود:

$$M_0 = N \frac{\gamma^2 h^2 I(I+1)}{3(4\pi)^2 KT} B_0 \quad (1)$$

K ثابت بولتزمن، T دمای مطلق (کلوین)، h ثابت پلانک و I عدد کوانتومی اسپین هسته است. بعد از اینکه پروتون‌ها در میدان مغناطیسی پایا به خط شدند، گفته می‌شود که قطبیده‌اند. این قطبیدگی بلافاصله حاصل نمی‌شود، بلکه با یک ثابت زمانی T_1 که زمان آسایش طولی^۷ نامیده می‌شود افزایش می‌یابد (Fukushima & Roeder, 1981):

$$M_z(t) = M_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_1}\right)} \right) \quad (2)$$

t مدت زمان قرار گرفتن پروتون‌ها در معرض میدان مغناطیسی B_0 ، T_1 مدت زمانی رسیدن مغناطیس به ۳۶ درصد مقدار نهایی خود و $3T_1$ مدت زمانی است که ۹۵ درصد قطبش حاصل می‌شود. در واقع، T_1 یکی از آسایش‌های قابل اندازه‌گیری زمان است که آهنگ برگشت اسپین‌های هسته و هم‌جهت شدن بردار M_0 با میدان خارجی را نشان می‌دهد. آسایش T_1 به دلیل اندرکنش و تبادل انرژی بین اسپین‌های همسایه است. برگشت مغناطیس M_0 به جهت میدان B_0 در طول محور z یک فرایند نمایی است که توسط رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود.

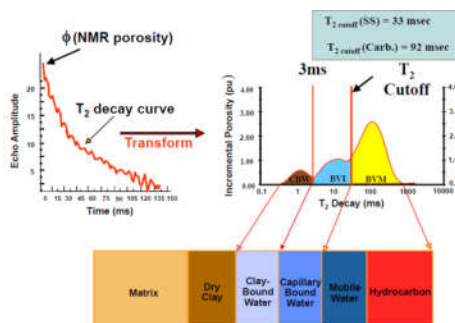


شکل ۵. منحنی آسایش T_1

دومین گام در چرخه‌ی اندازه‌گیری NMR واژگون‌سازی^۸ مغناطش از جهت طولی به صفحه‌ی عرضی است. این واژگون‌سازی توسط اعمال میدان مغناطیسی نوسانی B_1 که عمود بر میدان پایای B_0 است، انجام می‌گیرد. برای این کار، فرکانس B_1 باید با فرکانس لارمور پروتون‌ها در میدان B_0 برابر باشد. تغییر سطح انرژی پروتون‌ها در اثر جذب انرژی فراهم شده توسط B_1 را تشدید مغناطیسی هسته‌ای گویند. پس از اعمال پالس RF ۹۰ درجه که با اعمال قدرت کافی سبب خم شدن کامل M_0 در صفحه‌ی x-y عرضی می‌شود، هسته شروع به هم‌جهت شدن با میدان B_0 می‌کند. آسایش عرضی شامل از بین رفتن مغناطش در صفحه‌ی x-y است که با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2^*}} \quad (3)$$

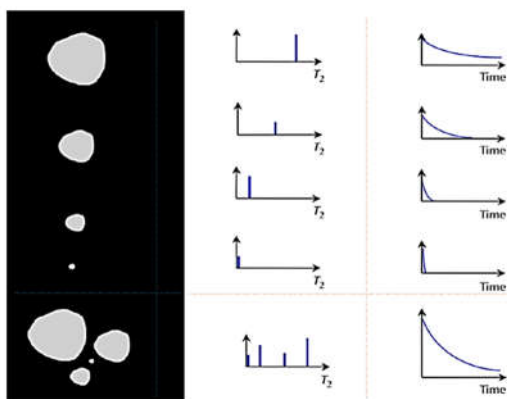
این واپاشی به‌طور معمول نمایی است و واپاشی القای آزاد (FID)^۹ نامیده می‌شود. ثابت زمانی واپاشی القای آزاد (T_2^*) بسیار کوتاه (کمتر از چند ده میکروثانیه) است. FID از ناهمگنی‌های میدان ناشی از گرادیان میدان مغناطیسی و از فرایندهای مولکولی معین در ماده ناشی می‌شود. ناهمگنایی ایجاد شده توسط ناهمگنی‌های میدان پایای B_0 برگشت‌پذیر است. در صورتی که پالس B_1 ۱۸۰ درجه اعمال شود، بردارهای مغناطش پروتون در صفحات عرضی می‌توانند مجدداً هم‌فاز شوند. اگر بردار مغناطش عرضی دارای زاویه‌ی فاز α باشد، اعمال پالس B_1 ۱۸۰ درجه زاویه‌ی فاز را به $-\alpha$ تغییر خواهد داد. در واقع، ترتیب فاز بردارهای مغناطش عرضی معکوس می‌شوند، به‌طوری که بردارهای آهسته‌تر جلوی بردارهای سریع‌تر قرار می‌گیرند. بردارهای سریع‌تر از بردارهای آهسته‌تر سبقت می‌گیرند و مجدداً هم‌فازی رخ می‌دهد و سیگنالی تولید می‌شود که در سیم‌پیچ گیرنده قابل ثبت است. این سیگنال پژواک اسپین نامیده می‌شود (Cowan, 2005).



شکل ۶. توزیع T_2 سیگنال NMR برای شناسایی مؤلفه‌های سیالات در مخازن ماسه‌سنگی (Romero et al., 2009)

۲-۱. تفسیر نتایج حاصل از NMR

منحنی‌های آسایش نشان داده شده در شکل ۷، تأثیر اندازه‌ی حفره‌ها بر زمان‌های آسایش و پیچیدگی منحنی آسایش حاصل را نشان می‌دهد. سیالات قرار گرفته در مجاورت سطوح جامد انرژی‌شان را به سرعت انتقال می‌دهند و از سهم آن‌ها در سیگنال اندازه‌گیری شده می‌توان چشم پوشید. با افزایش اندازه‌ی حفره‌ها، پاسخ سیگنال‌های NMR حاصل از سازند سنگی را می‌توان اندازه‌گیری کرد.



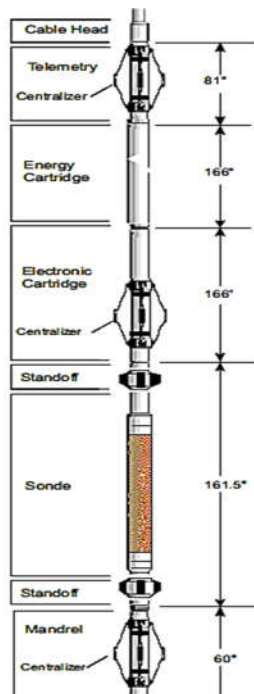
شکل ۷. زمان آسایش برای اندازه‌های مختلف حفره (Tyshko, 2016)

با تغییر پارامترهای آزمایش نظیر زمان قطبش TW و زمان بین پالس‌های ۱۸۰ درجه TE ابزار NMR می‌تواند برای تشخیص انواع سیالات سازند براساس زمان‌های آسایش آن‌ها تنظیم شود (شکل ۶). با بررسی مشخصه‌های NMR سیالات توده‌ای از قبیل آب‌شور، نفت و گاز در شرایط مخزن، تفاوت‌ها در T_1 و T_2 و D این سیالات، اساس طبقه‌بندی NMR را تشکیل می‌دهد (Prammer, 1995).

۳. مقایسه‌ی دو نوع ابزار متداول

دو نوع ابزار NMR که بسیار مورد توجه شرکت‌های نفتی است، ابزارهای متعلق به شرکت‌های هالی برتون (MRIL) و شلمبرژه (CMR) است. در ابزار CMR متعلق به شرکت شلمبرژه، شدت میدان مغناطیسی در حدود ۴۷۰ G و فرکانس رزونانسی ۲ کیلوهرتز است. همچنین دارای رزولوشن عمودی ۱۵ سانتی‌متر، با حجم حساس بسیار کوچک نسبت به ابزار MRIL است. مقدار SNR در آن کمتر است و میدان مغناطیسی

همگنی با یک فرکانس معلوم دارد. این دستگاه تحت تأثیر چین و چروک دیواره‌ی چاه‌ها قرار می‌گیرد (Codd & Seymour, 2008).



شکل ۸. ساختار دستگاه NMR نوعی

در مقابل در ابزار MRIL متعلق به شرکت هالی برتون، شدت میدان مغناطیسی گرادیانی در حدود ۱۷ گاوس بر سانتی‌متر در محدوده‌ی ۲۰۰-۱۵۰ گاوس است. این ابزار در مرکز چاه قرار می‌گیرد. رزولوشن عمودی برابر با ۶۰ سانتی‌متر است و ضخامت حجم حساس ۱ میلی‌متر به قطر ۳۵-۴۳ سانتی‌متر از مرکز دستگاه است. ابزار می‌تواند در فرکانس‌ها و عمق‌های مختلف کار کند، SNR بهتری نسبت به ابزار CMR دارد و تحت تأثیر دیواره‌ی چاه قرار نمی‌گیرد. ناحیه‌ی تحت بررسی در این ابزار، استوانه‌های هم‌مرکز به شعاع‌های ثابت هستند؛ بنابراین می‌توان هر دو طرف ابزار داخل سازند را بررسی کرد. عمق بررسی این ابزار، از ابزار شلمبرژه بیشتر است (همان). با توجه به این تفاوت‌ها، معایب و مزیت‌ها، در این تحقیق، مگنتی دائمی طراحی شده است که به‌عنوان قلب دستگاه واقعه‌نگاری رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، وظیفه‌ی ایجاد میدان مغناطیسی ایستای B_0 در سازند داخل چاه را بر مبنای مدل دوم اشاره شده دارد.

۴. پیکربندی دستگاه NMR

دستگاه تحت بررسی در این تحقیق، شامل یک آهنربای استوانه‌ای به قطر ۴/۵ یا ۶ اینچ، یک آنتن، یک کارتریج الکترونیکی و یک یا دو کارتریج ذخیره‌ی انرژی (همچون شکل ۸) است. بیرون نگهدار سیال^{۱۰}، تمرکزگرها^{۱۱} و نگه‌دارنده‌ها^{۱۲} قسمت‌های اختیاری هستند، اما همیشه توصیه می‌شوند باید براساس اندازه‌ی چاه انتخاب شوند. استفاده از بیرون نگهدار سیال اثر بارگذاری گل را کاهش و نسبت سیگنال به نویز را افزایش می‌دهد. تمرکز گرها و نگه‌دارنده‌ها، هر دو به قرارگیری دستگاه در مرکز چاه کمک می‌کنند. نگه‌دارنده‌ها همچنین با دورنگه داشتن بدنه‌ی فایبرگلاس دستگاه از دیواره‌ی چاه از آن محافظت می‌کنند (Halliburton, 2008 & Coates et al., 1999).

طول آنتن دستگاه ۲۴ اینچ بوده و در اطراف مگنت پیچیده شده است و وظیفه‌ی آن، ارسال توالی و همچنین دریافت سیگنال پژواک اسپین است. مهم‌ترین نکته‌ای که باید در این ابزارها لحاظ شود، همخوانی فرکانس پالس ارسالی توسط آنتن و فرکانس لارمور پروتون‌های مواد داخل چاه است؛ زیرا تنها در این صورت است که پدیده‌ی رزونانس اتفاق خواهد افتاد و می‌توان سیگنال حاصل را توسط آنتن دریافت و آنالیز کرد. دستگاه‌های متداول NMR در گستره‌ی فرکانسی ۹۰۰-۶۰۰ کیلوهرتز عمل می‌کنند. در حالت دو فرکانسی، لایه‌هایی برانگیخته می‌شوند که چند میلی‌متر از هم فاصله دارند و با محور چاه هم‌مرکزند. لایه‌ها در فرکانس‌های $f_c + \Delta f$ و $f_c - \Delta f$ کیلوهرتز برانگیخته می‌شوند که f_c از ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلوهرتز بوده و Δf از مرتبه‌ی چند کیلوهرتز است. به‌طور معمول دستگاه‌ها با قطر ۶ اینچی و ۴/۵ اینچی در فرکانس رادیویی در محدوده‌ی فرکانس استاندارد (۷۰۰ تا بیش از ۷۵۰ کیلوهرتز) و فرکانس پایین (۶۰۰ تا ۶۵۰ کیلوهرتز) کار می‌کنند. قطر ناحیه‌ی مورد بررسی توسط ابزار ۶ اینچی، در فرکانس‌های ۷۵۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز و در دمای اتاق در رابطه‌ی ۴ از جدول ۱ ذکر شده است. بر این اساس، میدان مغناطیسی متناسب با این فرکانس‌ها نیز با رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

جدول ۱. میدان و عمق بررسی دستگاه ۶ اینچی در دو فرکانس ۶۰۰ و ۷۵۰ کیلوهرتز

	f_c (kHz)		
	۷۵۰	۶۰۰	
$d_e = \frac{430}{\sqrt{f_c}}$ (Akkurt, 1996)	اینچ ۱۵/۷	اینچ ۱۷/۵۶	(۴)
$f = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \rightarrow B_0 = \frac{2\pi f}{\gamma}$ (Gauss)	۱۷۶	۱۴۰	(۵)

با توجه به مقادیر محاسبه شده، مگنت مورد نظر باید توانایی تولید این میدان‌های مغناطیسی را در فاصله‌های داده شده داشته باشد.

۴-۱. انتخاب جنس مگنت

با توجه به موضوعات مطرح شده و همچنین با در نظر گرفتن اینکه میدان مورد نیاز برای استفاده در برنامه‌های چاه‌پیمایی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای در حد چند صد گاوس است، مگنت‌های دائمی گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در محیط‌های داخل چاه هستند (Mitchell, 2014). مگنت‌های دائمی، مگنت‌هایی هستند که میدان مغناطیسی آن‌ها در شرایط عادی از بین نمی‌رود. آن‌ها از مواد فرومغناطیسی سخت ساخته می‌شوند و با قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی قوی، خصوصیات آن میدان را به ارث می‌برند. سرامیک (فریت)، آلنیکو، ساماریوم کبالت و نئودیمیوم آهن از مهم‌ترین مگنت‌های دائمی به شمار می‌روند و امروزه، به‌ویژه در بخش صنعت کاربرد گسترده‌ای دارند.

مگنت‌های دائمی با میدان مغناطیسی پایین می‌توانند مصالحه‌ی مناسبی بین قدرت میدان مغناطیسی و شواهد تجربی برای استفاده در صنعت و بررسی مواد غیرهمگن ایجاد کنند. مزایای متعددی از ابزارهای با میدان مغناطیسی پایین در مقایسه با همتایان ابررسانای با میدان مغناطیسی بالا وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از استفاده نشدن از ماده‌ی خنک‌کننده، قیمت کم، ملاحظات ایمنی کمتر (از میدان سرگردان می‌توان چشم پوشید) و تنوع طراحی از جمله دسترسی راحت به آرایه‌های مختلف مگنت. از این رو مگنت‌های فریت گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در ابزار NMR هستند. این آهنرباها از لحاظ اقتصادی نیز از آهنرباهای دیگر ارزان‌ترند و در محیط‌های مرطوب فوق‌العاده‌اند و فاقد خوردگی هستند.

۵. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش به شبیه‌سازی مگنت ابزار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار CST Studio پرداخته شده است. همان‌طور که اشاره شد، دستگاه‌های مرسوم در این کاربرد، به‌صورت استوانه‌ای با قطرهای مناسب برای چاه‌های حفاری با اندازه‌های ۶ اینچی یا ۴/۵ اینچی در فرکانس رادیویی در محدوده‌ی فرکانس استاندارد (۷۰۰ تا بیشتر از ۷۵۰ کیلوهرتز) و فرکانس پایین (۶۰۰ تا ۶۵۰ کیلوهرتز) طراحی می‌شوند. این انتخاب با استفاده از روبش^{۱۳} فرکانس انجام می‌گیرد تا فرکانس دارای بیشترین بهره‌ی تقویت حاصل شود. آنتن استفاده شده در این ابزار در این محدوده‌ی فرکانس، بیشینه‌ی بهره‌ی تقویت را ایجاد می‌کند. از طرفی عمق مورد بررسی نیز بر توان آنتن مؤثر است؛ زیرا افزایش عمق بررسی سبب

تضعیف توان آنتن می‌شود و در نتیجه باید عمق بهینه به‌دست آید. با توجه به مقادیر محاسبه شده، مگنت مورد نظر باید توانایی تولید این میدان‌های مغناطیسی را در فاصله‌های داده شده، داشته باشد.

۵-۱. هندسه‌ی آهنربا

دستگاه NMR دارای یک آهنربای دائمی بزرگ استوانه‌ای به قطر ۴/۵ یا ۶ اینچ است که میدان مغناطیسی پایا تولید می‌کند. یک آنتن که آهنربای دستگاه را احاطه کرده است، به‌عنوان فرستنده‌ی میدان نوسانی و گیرنده‌ی پژواک - اسپین به‌کار می‌رود. چون طول آنتن تعیین‌کننده‌ی حجم تحت بررسی است، آنتن بلندتر در ازای تفکیک قائل کمتر نمودارگیری را سریع‌تر می‌کند.

قبل از شروع شبیه‌سازی، ابتدا باید شعاع مگنت مورد نظر معین شود. با توجه به اندازه‌ی نوعی چاه‌ها (حفاری شده با مته‌ی ۸/۵ اینچی)، از بین دو نوع ابزار معرفی شده‌ی متداول، ابزار ۶ اینچی در اینجا مینا قرار گرفته است. دلیل دیگر این انتخاب، عمق بررسی است. با توجه به محاسبات انجام گرفته، در فرکانس مشابه، ابزار با قطر بزرگ‌تر، عمق بررسی بیشتری از دیگری دارد و بنابراین می‌توان ناحیه‌های عمیق‌تری از سازند را بررسی کرد.

پس از تعریف هندسه‌ی ابزار، نوع ماده و جنس مگنت در نرم‌افزار تعریف می‌شود. پس از آن خاصیت مغناطیسی در هندسه‌ی تعریف شده و مقدار مغناطیس باقی‌مانده^{۱۴} برابر مقدار Br پایه‌ی فریت انتخاب‌شده قرار می‌گیرد. برای سهولت تهیه‌ی مگنت شبیه‌سازی شده از استانداردهای موجود در ساخت این فریت‌ها استفاده شده است که تهیه‌ی مگنت‌های با این استاندارد، راحت‌تر و از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است.

۵-۲. انتخاب محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی مگنت

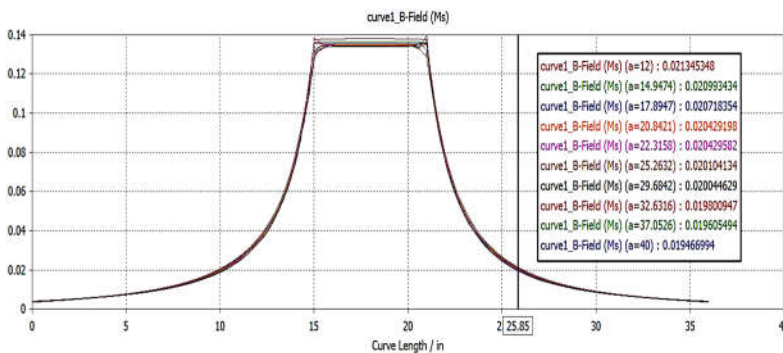
برای جلوگیری از وارد شدن ضربه به سیستم مگنت، باید آن را داخل یک محفظه‌ی مناسب قرار دهیم. محفظه‌ی مگنت باید از یک ماده‌ی غیرفرومغناطیسی انتخاب شود تا پاسخ بسیار ضعیف و قابل چشم‌پوشی به میدان‌های الکترومغناطیسی داشته باشد. برای این منظور استیل ضدزنگ نوع سخت شده^{۱۵} و آلیاژ بریلیم - مس^{۱۶} بهترین انتخاب‌ها هستند؛ هر دو مقاومت زیادی دارند و غیرفرومغناطیسی هستند.

۵-۳. شبیه‌سازی میدان B₀

با مشخص شدن جنس کلی مگنت و محفظه‌ی نگه‌دارنده و همچنین شعاع مگنت، می‌توان میدان مغناطیسی در اطراف یک مگنت را شبیه‌سازی کرد. قبل از شروع شبیه‌سازی میدان، استوانه‌ای در اطراف

مگنت به‌عنوان محیط داخل چاه و از جنس نفت تعریف می‌کنیم؛ بنابراین باید تغییرات میدان را داخل چنین محیطی بررسی کنیم. هندسه‌ی تعریف شده‌ی نهایی، شامل یک مگنت به شعاع ۳ اینچ و یک محفظه بریلیوم - مس به ضخامت ۳ میلی‌متر است و استوانه‌ی بزرگی نیز به‌عنوان محیط داخل چاه - که همان سازند نفتی است - در نظر گرفته شده است. با داشتن این اطلاعات، هدف از این تحقیق به‌دست آوردن ابعاد دقیق مگنت و نوع فریت مناسب است. شبیه‌سازی را به‌ازای طول‌های مختلف از پایه‌های مختلف فریت، انجام خواهیم داد و در پی یک طول اپتیمم خواهیم بود که بتواند میدان مدنظر را در فاصله‌ی مورد نظر تولید کند. نتایج در شکل‌های زیر آمده است.

پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی مگنت با ابعاد و مگنت‌های مختلف، مطابق با شکل ۹، مشاهده می‌شود که میدان مغناطیسی حاصل از مگنت تعریف شده به‌ازای طول ۸۰ اینچ به مقدار ۱۷۷/۴G مطلوب رسیده است؛ بنابراین فریت پایه Y22H با $B_r=0.311T$ تسلا بهترین گزینه برای استفاده در طراحی مگنت مورد نظر است. حال با تغییر طول مگنت با گام‌های کوچک‌تر حول مقدار $a=40$ در پی طول اپتیمم مگنت برای ایجاد میدان مدنظر خواهیم بود. با شبیه‌سازی به‌ازای طول‌های مختلف در نهایت طول ۸۲/۸ اینچ به‌عنوان طول اپتیمم مگنت برای تولید میدان مورد نظر به‌دست آمد. (شکل ۹)



شکل ۹. منحنی تغییرات میدان مغناطیسی برحسب فاصله از مرکز مگنت به ازای مقدار $B_r=0.34T$ و طول مگنت از ۲۴ تا ۸۰ اینچ از فریت پایه Y22H

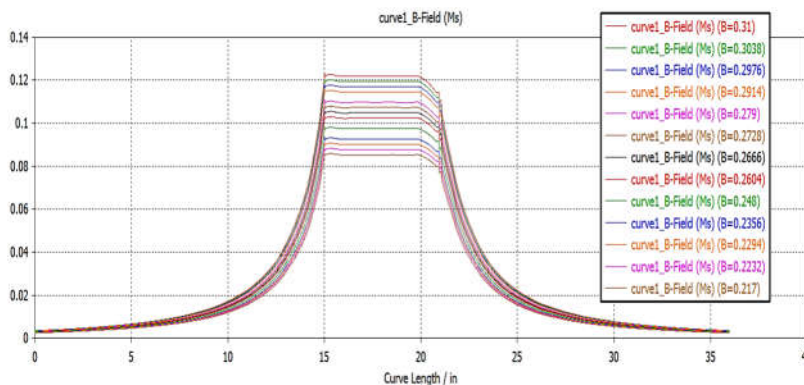
یکی از مزیت‌های مهم ابزار طراحی شده در این پروژه، کارکرد دو فرکانسی آن است؛ یعنی ابزار می‌تواند در دو فرکانس ۷۵۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز استفاده شود. برای روشن شدن موضوع، منحنی تغییرات میدان برحسب فاصله در فرکانس ۶۰۰ کیلوهرتز در شکل ۹ آورده شده است که نشان می‌دهد میدان در فاصله‌ی ۸/۷۸ اینچ

از مرکز مگنت برابر ۱۴۲ گاوس است که در حدود ۲ گاوس با میدان لازم برای ایجاد فرکانس تشدید پروتون‌ها تفاوت دارد. دلیل این اختلاف هم تأثیر مش بندی و روش حل نرم‌افزار CST است.

۴-۵. بررسی اثر تغییرات دما

با توجه به اینکه مقدار مغناطیس پس‌ماند آهنربا وابسته به دماست، شبیه‌سازی میدان مغناطیسی B_0 حاصل از آهنربا در داخل سازند باید در دماهای مختلف صورت گیرد تا پاسخ دمایی آهنربا مشخص شود. با توجه به جدول‌های مربوط (Magnetics Global Standards Eclipse, 2015) مقدار B_r برای فریت پایه Y22H در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس برابر ۰/۳۱ بوده و ضریب دمایی B_r برای فریت برابر ۰/۲ درصد بر کلین است؛ و از طرفی چون در شبیه‌سازی به مقدار مغناطیس مانده‌ی B_r نیاز داریم، مقدار B_r در دماهای مختلف باید محاسبه شود.

شبیه‌سازی در دماهای مختلف، از دماهای اتاق تا بیشترین دمای ممکن داخل چاه انجام گرفت. با توجه به شکل ۱۰ (که تغییرات میدان مغناطیسی حاصل از مگنت به ازای طول ۸۲/۸ اینچ و شعاع ۳ اینچ را نشان می‌دهد) مشاهده می‌شود که افزایش دما سبب کاهش خاصیت مغناطیسی مگنت می‌شود. با افزایش دما، میدان مغناطیسی تولیدی در نقطه‌ی موردنظر کاهش می‌یابد، به طوری که در دمای ۱۷۵ درجه‌ی سلسیوس، اندازه‌ی میدان در ناحیه‌ی حساس به فاصله‌ی ۷/۸۵ اینچ از مرکز مگنت به مقدار ۱۲۳/۳ گاوس رسیده است. بنابراین با اینکه افزایش دما سبب کاهش خاصیت مغناطیسی مگنت شده است، با معلوم بودن پاسخ دمایی مگنت مورد نظر می‌توان دستگاه را در دماهای مختلف داخل چاه به کار بست.

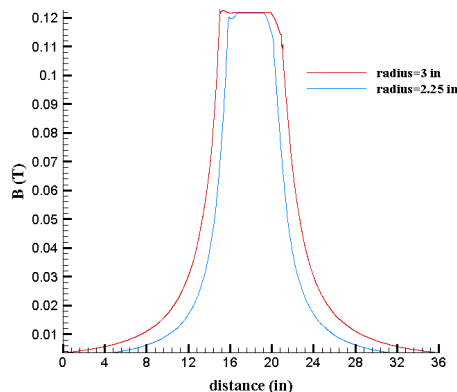


شکل ۱۰. اثر تغییرات دما بر تغییرات میدان مغناطیسی مگنت فریت

بنابراین میدان مغناطیسی پایای دستگاه که توسط مگنت طراحی شده تولید می‌شود، وابسته به دماست. در نتیجه، قدرت میدان مغناطیسی و گرادیان میدان - همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده - وابسته به دما خواهد بود. با داغ شدن مگنت، B_0 کاهش و برای فرکانس معلوم B_1 ، عمق بررسی نیز کاهش می‌یابد. چون وابستگی دمایی مگنت مشخص است، آگاهی از دمای مگنت و فرکانس B_1 منحصراً عمق بررسی دستگاه را تعیین می‌کند. با استفاده از اندازه‌ی میدان مغناطیسی حاصل از مگنت در دماهای مختلف، می‌توان تغییرات قطر بررسی دستگاه را برحسب تغییرات دما و فرکانس کاری به دست آورد. شکل ۱۰ منحنی تغییرات عمق بررسی دستگاه برحسب فرکانس را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما به‌ازای فرکانس ثابت، عمق بررسی کاهش می‌یابد.

۵-۵. بررسی اثر شعاع مگنت

برای مشاهده‌ی اثر تغییرات شعاع مگنت بر میدان مغناطیسی حاصل، بار دیگر مگنتی با همان جنس و مشخصات را این بار با قطر $4/5$ اینچ بررسی می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاهش شعاع مگنت، سبب کاهش میدان مغناطیسی پایای B_0 در نقطه‌ی تحت بررسی خواهد شد؛ بنابراین برای یک فرکانس کاری مشخص، کاهش شعاع مگنت سبب کاهش عمق تحت بررسی می‌شود. برای مگنتی به قطر $4/5$ اینچ، بزرگی میدان مغناطیسی در عمق بررسی متناسب با فرکانس 750 کیلوهرتز (شعاع $7/85$ اینچی از مرکز مگنت) به 100 گاوس کاهش یافته است.



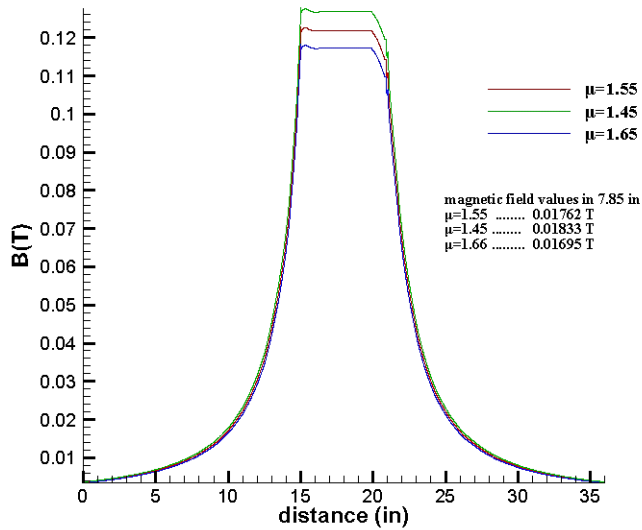
شکل ۱۱. منحنی تغییرات میدان مغناطیسی برحسب فاصله از مرکز مگنت برای مگنت $4/5$ اینچی و 6 اینچی

۵-۶. بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فریت

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی فریت سخت در گستره‌ی $1/45-1/65$ است. در همه‌ی بخش‌های ارائه شده در این تحقیق از مقدار متوسط این بازه یعنی $1/55$ به‌عنوان ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی، برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی حاصل از فریت استفاده شد. با وجود این، در این بخش شبیه‌سازی میدان حاصل از مگنت به‌ازای دو مقدار $1/45$ و $1/65$ نیز انجام گرفت تا خطای شبیه‌سازی‌های صورت گرفته مشخص شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش ضریب نفوذپذیری نسبی، موجب کاهش بزرگی میدان، و کاهش و ضریب نفوذپذیری، سبب افزایش بزرگی میدان در نقطه‌ی تحت بررسی داخل حجم حساس شده است. آگاهی از تغییرات پاسخ مغناطیسی مگنت برحسب ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی سبب افزایش دقت در ساخت مگنت و همخوانی بیشتر نتایج شبیه‌سازی و تجربی خواهد شد.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای طراحی مگنت سیستم رزونانس مغناطیس هسته‌ای، همه‌ی عوامل اثرگذار در هنگام استفاده‌ی میدانی این سیستم در چاه‌پیمایی بررسی شد. در این زمینه، با توجه به نمونه‌های صنعتی موجود که در انحصار دو شرکت نفتی بزرگ است، اطلاعات علمی از طراحی این دستگاه‌ها ارائه نشده و صرفاً می‌توان مشخصات این دستگاه‌ها را مشاهده کرد. طراحی و بهینه‌سازی این دستگاه و بررسی پارامترهای اساسی آن از جمله اثر دما که از چالش‌های این دسته از ابزارهاست، اقدام شده است. مورد مهم دیگر، در نظر گرفتن مشخصات مگنت‌های صنعتی موجود در بازار است تا طراحی انجام گرفته قابلیت اجرای عملی داشته باشد. نتایج به‌دست آمده، به‌خوبی تطابق خروجی‌های مورد نظر را با مشخصات دستگاه‌های تجاری موجود نشان داد. از این رو با استناد به نتایج به‌دست آمده و بهینه‌سازی‌های انجام گرفته، می‌توان در قدم بعدی به ساخت سیستم رزونانس هسته‌ای بومی پرداخت.



شکل ۱۲. اثر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مگنت بر بزرگی میدان مغناطیسی تولید شده در حجم حساس

پی‌نوشت‌ها

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1. Nuclear magnetic resonance | 10. Free induction decay |
| 2. Logging | 11. Fluid excluder |
| 3. Bloch and Purcell | 12. Centralizer |
| 4. Russell Varian | 13. Standoff |
| 5. Formation | 14. Frequency sweep |
| 6. Pulse nuclear magnetism tool | 15. Remnant magnetization |
| 7. Spin precession | 16. Stainless steel |
| 8. Lonitudinal relaxation time | 17. Beryllium copper |
| 9. Tipping | |

منابع

1. Akkurt, R. (1996), "Selection of optimal acquisition parameters for MRIL logs", the log analyst, Vol. 37, No. 6.
2. Codd, S.L. & Seymour, J.D. (2008), "Magnetic resonance microscopy", John-Wiley & Sons.
3. Cowan, B. (2005), "Nuclear magnetic resonance and relaxation", Cambridge University Press, UK.
4. Coates, G.R.; Xiao L. & Prammer, M.G. (1999), "NMR logging: principles and applications", Haliburton energy services Houston.
5. Dunn, K.J.; Bergman, D.J. & LaTorraca, G.A. (2002), "Nuclear magnetic resonance: Petro physical and logging applications", Elsevier Science Ltd., UK.
6. Eclipse magnetics global standards, www.eclipsemagnetics.com
7. Fukushima, E. & Roeder, S.B. (1981), "Experimental pulse NMR: A nuts and bolts approach", Addison-Wesley Press, MA.
8. Halliburton (2008), "Wireline and perforating services", MRIL-Prime catalogue.
9. Kleinberg, R.L; Sezginer, A.; Griffin, D.D. & Fukuhara, M. (1992), "Novel NMR apparatus for investigating an external sample", Journal of magnetic resonance, Vol. 97, No. 3, pp. 466-485.
10. Kleinberg, R.L. (2001), "NMR well logging at Schlumberger, concepts in magnetic resonance part A", Vol. 13, No. 6, pp. 396-403.
11. Mitchell, J. (2014), "Low-field permanent magnets for industrial process and quality control", Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy, Vol. 76, pp. 1-60.
12. Prammer, M. (1995), "Lithology-independent gas detection by gradient-NMR logging", SPE annual technical conference, Society of petroleum engineers, Dallas, TX, p. 12.
13. Romero, P.; Gladkikh, M. & Azpiroz, G. (2009), "Applications of 2D-NMR maps and geometric pore scale modeling for petrophysical evaluation of a gas well", Computational geosciences, Vol. 13, No. 2, pp. 171-180.
14. Tyshko, A.A. (2016), "Development of nuclear magnetic resonance downhole logging tool for hydrocarbon search", PhD thesis, Vilnius gediminas technical university.