



مدل سازی عددی نمودارهای مقاومت القایی آرایه ای (AIT)

فرهاد خوشبخت

استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۷

نویسنده مسئول مکاتبات: khoshbakhtf@ripi.ir

چکیده

واژگان کلیدی

مهم ترین نمودار چاه پیمایی، نمودار مقاومت الکتریکی است؛ که برای تعیین نوع و مقدار هیدروکربن موجود در مخازن مورد استفاده قرار می گیرد. در روش های سنتی تفسیر نمودارهای مقاومت، از چارت بوک استفاده می شود. چارت بوک مدلی تئوری از رفتار ابزار نمودارگیر است؛ که با استفاده از مدل های یک بعدی کامپیوتری تهیه می شود. این کدهای کامپیوتری معادله ماکسول را در فضایی ساده سازی شده و با صرف نظر از شیب لایه ها، رخنه ناهمگن سیال حفاری، اثر لایه های مجاور و زاویه چاه حل می کنند؛ که در مخازن پیچیده از نظر خواص و هندسه با خطای زیگردابی همراه است. برای لحاظ کردن پیچیدگی های مخزن و افزایش دقت تفسیر، از روش های عددی نظیر روش های اجزاء محدود و تفاضل محدود برای مدل کردن دو و سه بعدی نمودارهای مقاومت استفاده می شود. هدف اصلی این مقاله، مدل سازی ابزار القایی آرایه ای AIT است؛ تا رفتار این ابزار در شرایط مختلف چاه و مخزن واکاوی و شناخته شود. کسب این آگاهی، امکان تفسیر دقیق تر داده های این نمودار را فراهم کرده و در کنار آن، با شناخت نقاط قوت و ضعف ابزار AIT، به کارگیری آن در چاه های ایران با روال منطقی و به صورت بهینه انجام شود. برای راستی آزمایی، نمودار مقاومت الکتریکی در یک مدل چند لایه بازسازی و با مقاومت واقعی مقایسه شد. در مدل چند لایه، ابزار AIT طراحی شده، مقاومت لایه های ضخیم را با دقت اندازه گیری کرده است؛ ولی برای لایه های نازک انطباق کامل وجود ندارد. برای شناخت بهتر رفتار ابزار AIT در طراحی و شرایط مختلف، آنالیز حساسیت بر روی ویژگی های اصلی آن شامل فرکانس، فاصله گیرنده-فرستنده و تغییرات مقاومت سیال درون چاه انجام شد؛ تا مشخص شود تغییر این پارامترها چه اثری در رفتار ابزار AIT دارد. در فرکانس های بالا به دلیل تشدید پدیده اثر پوسته ای، علی رغم وابستگی خطی مقاومت با فرکانس، ابزار توانایی اندازه گیری مقاومت سازند را از دست می دهد. با افزایش فاصله گیرنده-فرستنده، مقدار مقاومت برداشت شده تغییر چندانی نشان نمی دهد؛ حال آن که این افزایش، قدرت تفکیک عمودی را تا حد زیگردابی کاهش می دهد. به دلیل رفتار غیرخطی، ابزار AIT در چاه های با رسانندگی سیال حفاری بیش از ۱ زیمنس/متر قابل برداشت نیست.

مقاومت الکتریکی

ابزار نمودارگیری

مخزن

اشباع هیدروکربن

آنالیز حساسیت

اندازه‌گیری مقاومت لایه‌های مخزن است؛ که امروزه به گستردگی در صنعت نفت استفاده می‌شود. به دلیل انحصار شرکت تولیدکننده این ابزار، اطلاعات زیگردابی در مورد فیزیک و عملکرد این ابزار منتشر نشده است؛ به طوری که برای حفظ انحصار، تفسیر این نمودارها به وسیله نرم‌افزارهای داخلی شرکت نمودارگیر انجام می‌شود و مشتریان این شرکت‌ها، علی‌رغم صرف هزینه‌های زیاد نمودارگیری، قادر به استفاده بیشتر از این داده‌ها نیستند.

هدف اصلی این مقاله، مدل‌سازی ابزار القایی آرایه‌ای AIT است؛ تا رفتار این ابزار در شرایط مختلف چاه و مخزن واکاوی و شناخته شود. کسب این آگاهی، امکان تفسیر دقیق‌تر داده‌های این نمودار را فراهم کرده و در کنار آن، با شناخت نقاط قوت و ضعف ابزار AIT، به کارگیری آن در چاه‌های ایران با روال منطقی و به صورت بهینه انجام شود. همچنین مدل‌سازی ابزار AIT سبب می‌شود تا با بهبود روش‌های تفسیر، اشباع هیدروکربن با دقت بیشتری محاسبه شود. از طرف دیگر با مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده مخزن و چاه، تفسیر هندسی و پتروفیزیکی دقیقی از این نمودارها حاصل می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

Anderson and Chang در سال ۱۹۸۲ جزو نخستین افرگردابی بودند که با استفاده از روش اجزاء محدود، پاسخ نمودار القایی را در یک مدل یک‌بعدی شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه، شبیه‌سازی نمودارهای القایی در مدل با لایه‌های افقی و چاه قائم انجام شد. Anderson et al. (1986) نمودارهای القایی را در یک محیط آنیزوتروپ شبیه‌سازی کردند؛ که در این مدل لایه‌ها شیب‌دار فرض شده بود. برای این شبیه‌سازی تابع پاسخ بورن را برای نمودار القایی به دست آوردند. Anderson and Barber (1988) اثرات مختلف چاه از جمله نوع گل حفاری، رخنه سیال حفاری و قطر چاه را بر روی نمودارهای القایی مطالعه کردند. Hunka et al. (1990) فیزیک ابزار AIT را توضیح داده و روش پردازش داده‌های برداشت شده به وسیله این ابزار را تشریح کردند. در این روش پردازش، اثر ریختگی چاه کاملاً حذف شده و عمق رخنه سیال حفاری در عمق‌های مختلف تعیین می‌شود. Tabarovsky and Rabinovich (1996) شبیه‌سازی سریع نمودارهای القایی با استفاده از فاکتور هندسی دال پرداختند. این محققان با ترکیب بهینه‌سازی خطی برای تعیین مقاومت و بهینه‌سازی غیرخطی برای تعیین فاکتور هندسی، نمودارهای مقاومت را شبیه‌سازی کردند. شبیه‌سازی انجام شده برای داده‌های مصنوعی و واقعی راستی آزمایی شد. اولین شبیه‌سازی سه‌بعدی نمودارهای القایی توسط Anderson et al. (1995) انجام شد. این محققان به طور همزمان اثر لایه‌های شیب‌دار، چاه زاویه‌دار و رخنه ناموزون سیال حفاری را مدل کردند. Anderson et al. (2001) ابزار القایی با سیم‌پیچ‌های جهت‌دار را شبیه‌سازی کردند؛ تا

نمودارهای چاه پیمایی خصوصیات مختلف لایه‌های مخزنی از قبیل جنس، تخلخل و مقدار سیال موجود در فضاها متخلخل را اندازه‌گیری می‌کنند. نمودارهای مقاومت الکتریکی، مهم‌ترین انواع نمودارها هستند؛ که نوع و مقدار هیدروکربن موجود در مخازن را تعیین می‌کنند. از سال ۱۹۲۷ که اولین نمودار مقاومت الکتریکی توسط برادران شلومبرژه و هنری دال در آمریکا برداشت شد، محققان و شرکت‌های نمودارگیری به بهبود روش‌های تفسیر نمودارهای مقاومت پرداخته‌اند؛ به طوری که امروزه در کنار کارکرد اصلی این نمودارها، یعنی تعیین دقیق میزان هیدروکربن، تفسیر سه‌بعدی هندسی لایه‌های مخزن، تعیین خصوصیات شکاف‌ها، تعیین آنیزوتروپی سه‌بعدی و تعیین تراوایی با به کارگیری روش‌های تفسیر پیشرو و وارون قابل انجام است (Wu et al., 2004).

در روش‌های سنتی، برای تفسیر نمودارهای مقاومت از چارت بوکها استفاده می‌شود. چارت بوک مدلی تئوری از رفتار ابزار نمودارگیر است که با استفاده از مدل‌های یک‌بعدی کامپیوتری تهیه می‌شود (Schlumberger, 2009). این کدهای کامپیوتری معادله ماکسول را در فضای ساده‌سازی شده حل می‌کنند. این ساده‌سازی‌ها برای قابل حل بودن معادله ماکسول انجام می‌شود و باعث می‌شود تا تأثیر برخی از خواص مخزن نظیر شیب لایه‌ها، رخنه ناهمگن سیال حفاری، اثر لایه‌های مجاور و زاویه چاه نگرادیده فرض شود. استفاده از این روش برای تفسیر نمودارهای مقاومت در مخازن ضخیم و چاه‌های قائم قابل قبول است؛ ولی در مخازن نازک لایه و یا چاه‌های افقی میزان خطای بالایی دارد (Anderson & Barber, 1997). این خطاها گاهاً سرنوشت‌ساز بوده به طوری که یک زون نفتی به اشتباه زون آبی و بالعکس تفسیر می‌شود؛ که منجر به خطاهای تصمیم‌گیری در تکمیل چاه و توسعه میدان شده و هزینه‌های گزافی را به شرکت‌ها تحمیل می‌کند.

امروزه برای افزایش دقت تفسیر نمودارهای مقاومت و لحاظ کردن پیچیدگی‌های مخزن، از روش‌های عددی نظیر اجزاء محدود و تفاضل محدود برای مدل‌سازی دو و سه‌بعدی استفاده می‌شود. به کارگیری این روش‌ها امکان مدل کردن هندسه پیچیده چاه و مخزن، رخنه ناهمگن سیال حفاری و اثر لایه‌های مجاور در مخازن نازک لایه را فراهم می‌کند. خروجی این کدها، مقدار دقیق مقاومت سازند و خصوصیات هندسی لایه‌هاست. در نهایت کدهای سه‌بعدی وارون سازی پارامتری، امکان تفسیر نمودارهای مقاومت در مخازن لایه‌ای آنیزوتروپ را فراهم می‌کند؛ که خروجی این مدل‌ها علاوه بر مقاومت واقعی سازند (R_t) و موقعیت مرزهای لایه‌بندی، مقاومت الکتریکی در راستای افقی (R_h) و در جهت قائم (R_v) است (Anderson et al., 1995).

ابزار القایی آرایه‌ای (AIT) از پیشرفته‌ترین ابزارهای

در طراحی ساده، ابزارهای الکتریکی القایی از یک سیم‌پیچ فرستنده و یک سیم‌پیچ گیرنده تشکیل شده‌اند. جریان الکتریکی سینوسی با دامنه ثابت و زمان متغیر ($e^{i\omega t}$) در سیم‌پیچ فرستنده، میدان مغناطیسی اولیه‌ای در اطراف ابزار تولید می‌کند؛ که این میدان، جریان گردابی در سازند القا می‌کند که هم محور چاه حرکت کرده و میدان مغناطیسی ثانویه‌ای را تولید می‌کند؛ که توسط سیم‌پیچ گیرنده دریافت می‌شود. سیگنال دریافتی از دو مؤلفه واقعی و مجازی تشکیل شده است؛ که عبارت‌اند از سیگنال R - و سیگنال X - که سیگنال R نماینده مقاومت الکتریکی سازند و سیگنال X - ترکیبی از سیگنال سازند و القا مستقیم فرستنده به گیرنده است. ابزارهای القایی، این دو مؤلفه را از هم تفکیک می‌کنند؛ تا امکان محاسبه مقاومت واقعی سازند فراهم شود (Ansys, 2012). برای محاسبه پاسخ ابزار نمودار گیری القایی در یک محیط فرضی، باید معادلات الکترومغناطیس برای این ابزار در آن محیط حل شود. روش‌های اصلی حل این معادلات در ادامه آمده است.

الف: روش‌های تحلیلی

این روش‌ها با حل معادلات مشتقات جزئی الکترومغناطیس، جواب دقیق را برای پاسخ ابزار نتیجه می‌دهند. روش‌های تحلیلی برای مسائل دوبعدی بسیار پیچیده است؛ لذا استفاده از این روش‌ها محدود به مدل‌های یک‌بعدی است؛ که در اوایل پیدایش نمودارهای مقاومت، برای مدل کردن آن‌ها در محیط‌های تک لایه با رخنه سیال حفاری استفاده می‌شد (Popovic & Popovic, 2000). مهم‌ترین مزیت روش‌های تحلیلی، سادگی و سرعت بالای حل آن‌هاست.

ب) روش‌های عددی

از اواخر ۱۹۷۰ و با پیدایش کامپیوتر، روش‌های عددی جایگزین روش‌های تحلیلی مدل‌سازی ابزارهای مقاومت گردید. در روش‌های عددی نظیر اجزاء محدود، مشتقات جزئی تبدیل به ماتریس‌هایی شده و با کامپیوتر حل می‌شوند. مزیت عمده این روش‌ها، امکان مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده در مدل‌های دو و سه‌بعدی است. به عنوان مثال امکان مدل‌سازی مدل ترکیبی از رخنه سیال حفاری در مخزن لایه لایه و چاه‌های زاویه‌دار فراهم می‌شود. روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود شناخته شده ترین روش‌های عددی مدل‌سازی نمودارهای مقاومت می‌باشند.

ج) روش‌های هیبرید

در روش‌های هیبریدی مسئله به دو بخش تقسیم می‌شود؛ که یک بخش آن با روش تحلیلی و بخش دیگر با روش عددی حل می‌شود. استفاده از این روش‌ها امکان مدل‌سازی پاسخ نمودارها در هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌کند. به عنوان مثال برای مدل کردن دوبعدی یک ابزار مقاومت در یک مخزن لایه لایه به همراه رخنه سیال حفاری، معادلات مشتقات جزئی پاسخ ابزار به دو مدل یک‌بعدی (یکی در صفحه شعاعی و دیگری در صفحه قائم) تبدیل می‌شود؛ که در صفحه شعاعی میدان مغناطیسی با روش عددی به

مقاومت سازندها را در جهات مختلف اندازه‌گیری کند. این ابزار توانایی تعیین خصوصیات لایه‌بندی مقاطع از جمله شیب و جهت لایه را دارد. Jin Nam et al. (2009) نمودارهای لیتولوگ دوگانه را در یک محیط با لایه‌بندی شیب‌دار، رخنه ناهمگن و سازند آنیزوتروپ شبیه‌سازی کردند. این شبیه‌ساز سه‌بعدی با ترکیب بسط فوری و اجزاء محدود خودسازمانده^۲ روشی کارآمد برای شبیه‌سازی نمودارهای مقاومت ارائه کرده است. در این شبیه‌ساز روش نوین آنالیز سیگنال ارائه شده است؛ تا با متمرکز کردن جریان، اثر لایه‌های مجاور را در برداشت مقاومت حداقل سازد. Liu et al. (2014) نمودارهای مقاومت برداشت شده به وسیله دستگاه‌های LWD را شبیه‌سازی کردند. با توجه به این‌که این روش نمودار گیری حین حفاری انجام می‌شود؛ لذا حرکت رشته لوله حفاری داده‌های برداشت شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این محققین برای شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود hp استفاده کرده و اثر تغییرات فرکانس و طراحی دستگاه نمودارگیر را بر روی مگنترابیر برداشت شده بررسی کردند. Basu and Sharma (2014) روشی برای تعیین شکاف‌ها از روی نمودار گیری القایی با فرکانس پایین ارائه کردند. شبیه‌سازی این افراد منجر به روش‌شناسی جدیدی برای تخمین طول، بازشدگی و جهت‌گیری شکاف‌ها شد. Khoshbakht et al. (2016) با شبیه‌سازی نمودارهای مقاومت القایی، تأثیر تغییرات خصوصیات شکستگی‌ها بر روی این نمودارها را بررسی کردند. در این مطالعه تأثیر خصوصیات شکستگی‌ها نظیر شیب، بازشدگی، طول و نوع ماده پرکننده بر روی نمودارهای مقاومت القایی بررسی شد. همچنین نتایج به دست آمده با نمودارهای واقعی و داده‌های شکستگی در یک میدان کربناته بررسی شد.

۳- ابزار نمودار گیری القایی

در چاه‌های حفاری شده با سیال حفاری پایه روغنی، امکان ارسال مستقیم جریان وجود ندارد؛ لذا برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازند، از ابزارهای القایی استفاده می‌شود (Semmelbeck and Holditch, 1988). این ابزارها با فرکانس چند ده کیلوهرتز میدان الکترومغناطیسی متغیر با زمانی را تولید می‌کنند؛ که امکان اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ماورای محیط چاه با مقاومت الکتریکی بسیار بالا را فراهم می‌کند. بدین صورت که مقدار جریان القا شده متناسب با رسانندگی سازند است.

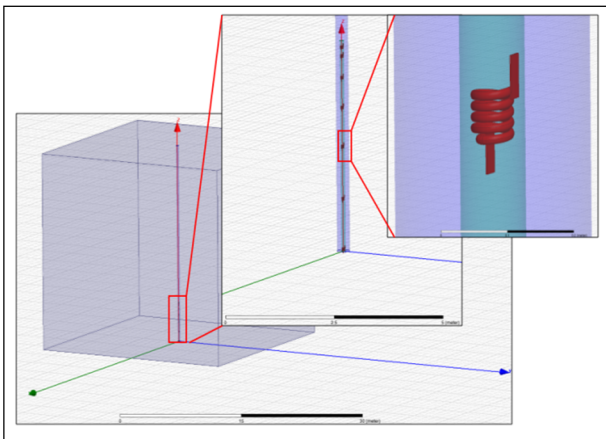
هر ابزار الکتریکی القایی از تعدگرابی سیم‌پیچ تشکیل شده است؛ که نقش گیرنده، فرستنده و متمرکز کننده میدان مغناطیسی را دارند. خصوصیات این سیم‌پیچ‌ها نظیر فاصله و تعداد دور مربوط به طراحی هر ابزار است؛ که برای بهینه‌سازی قدرت تفکیک قائم و عمق نفوذ ابزار می‌باشند.

خوبیخت، مدل سازی عددی نمودارهای مقاومت القایی آرایه ای (AIT)، صفحات ۳۶۵-۳۷۵.

دست آمده و میدان در صفحه قائم با حل تحلیلی تعیین می شود. مزیت اصلی این روش ها سرعت بالای حل آن نسبت به روش های تفاضل محدود و اجزاء محدود است.

جدول ۱: فاصله و تعداد دور سیم پیچ ها در ابزار AIT-H.

سیم پیچ	فاصله (متر)	تعداد دور
Before A1	0.21	-32.5
A1	0.37	20
A2	0.51	25
A3	0.72	33
A4	0.93	20
A5	1.24	49
A6	1.59	35
A7	2.33	20
Before A8	3.19	-42
A8	4.24	54



شکل ۲: ابزار AIT طراحی شده در نرم افزار Ansys-Maxwell.

۵- مدل سازی ابزار AIT

به منظور مدل سازی ابزار و سازند از نرم افزار شبیه ساز Ansys-Maxwell استفاده شد. این نرم افزار که در مهندسی برق بسیار شناخته شده است و از آن در طراحی موتورها و ابزارهای الکترومکانیکی و الکترونیکی استفاده می شود؛ محصول شرکت Ansoft است. این نرم افزار از روش اجزاء محدود استفاده کرده و مسائل الکترواستاتیک، مگنتواستاتیک و جریان گردابی را حل می کند. جواب اولیه به دست آمده برای مسائل مختلف، پتانسیل مغناطیسی و الکتریکی است.

مدل سازی ابزار AIT به صورت میدان مغناطیسی جریان گردابی انجام می شود؛ که در آن بردار میدان مغناطیسی (A) و پتانسیل الکتریکی (φ) از حل دو معادله زیر به دست می آید.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = (\sigma + j\omega\epsilon) (-j\omega A - \nabla\varphi) \quad (1)$$

$$I_T = \int_{\Omega} (\sigma + j\omega\epsilon) (-j\omega A - \nabla\varphi) d\Omega \quad (2)$$

که در آن، μ : نفوذپذیری مغناطیسی، ω : فرکانس زاویه ای، σ :

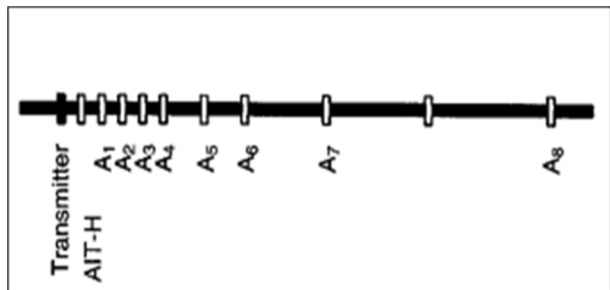
۴- مشخصات ابزار و طراحی ابزار AIT

ابزار مقاومت مدل سازی شده در این مطالعه از نوع AIT است؛ که نسل جدید ابزارهای القایی دوگانه^۳ است. ابزار AIT از جدیدترین ابزارهای اندازه گیری الکتریکی القایی است؛ که به وسیله شرکت شلومیرزه مورد استفاده قرار می گیرد. این ابزار دارای پنج عمق برداشت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ اینچ است؛ که مقاومت بخش های نزدیک چاه توسط آرایه (AO 10) تا اعماق زیاد سازند که به وسیله آرایه (AO 90) برداشت می شود (Serra & Serra, 2004). طول این ابزار ۴/۹ متر است و شامل آرایه ای از سیم پیچ ها است؛ که نقش گیرنده، فرستنده و سیم پیچ های متمرکز کننده را دارند (شکل ۱).

فاصله بین فرستنده (T) با هر یک از الکترودها در جدول ۱ آمده است. ابزار AIT بر اساس عمق نفوذ زیاد-متوسط-کم به ترتیب با فرکانس های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز برداشت می کند. مقدار جریان ۱ آمپر و ولتاژ آن ۳۰۰ ولت است.

در این ابزار فرآیند متمرکز کردن جریان توسط سیم پیچ های بالا و پایین سیم پیچ گیرنده انجام می شود. در الکترودهای متمرکز کننده جهت سیم پیچ برعکس بقیه بوده و یا جهت جریان در آن ها برعکس است. این الکترودها همزمان باعث متمرکز شدن خطوط میدان مغناطیسی و حذف اثر ناخواسته مستقیم (نوفه) فرستنده روی گیرنده را انجام می دهند. از خصوصیات دیگر سیم پیچ ها، تعداد دور آن ها است که برای هر یک از سیم پیچ ها متفاوت است.

مدل ابزار AIT در نرم افزار Ansys-Maxwell ساخته شد؛ که شمایی از آن در شکل ۲ قابل مشاهده است. طراحی AIT در سه حالت انجام شد؛ تا بتواند معادل آرایه های AO 10، AO 30 و AO 90 باشد. جنس الکترودها مس فرض شد.



شکل ۱: آرایش سیم پیچ های ابزار AIT (Serra & Serra, 2004).

3- Dual Inducion Tool

روی داده‌ها برای تبدیل پاسخ ابزار به رسانندگی واقعی سازند تبدیل می‌شود).

۵-۱- محاسبه فاکتور هندسی

برای تبدیل قرائت ابزار به مقاومت واقعی سازند، فاکتور هندسی هر یک از آرایه‌های آن باید تعیین شود. فضای تأثیر هر ابزار نمودار گیری تابعی از طراحی آن ابزار و خصوصیات سازند مورد اندازه‌گیری است. منظور از فضای تأثیر، شکل و اندازه حجمی از سازند است؛ که تحت تأثیر سیگنال‌های ارسالی به وسیله ابزار نمودار گیری قرار دارد (Doveton, 2014). اگر این فضا سلول بندی شود؛ هر سلول مشارکت مشخصی در کل سیگنال برداشتی به وسیله ابزار نمودار گیری دارد؛ که این مشارکت به عنوان فاکتور هندسی معرفی می‌شود.

برای تعیین فاکتور هندسی، مدلی از سازند ساخته شد که از قطعاتی تشکیل شده که به صورت شعاعی مقاومت آن‌ها تغییر می‌کند. در شکل ۵، برشی دوبعدی از قطعات شعاعی به همراه وضعیت چاه و طراحی ابزار نشان داده شده است. هندسه جریان در داخل این مدل در شکل ۶ آمده است. در این دو شکل رنگ نماینده مقدار مقاومت الکتریکی آن است.

$$RT = \sum_{i=1}^{10} [G_i] * [R_i] \quad (3)$$

در این مدل پس از ۱۰ تکرار که در هر تکرار مقاومت قطعات ۱ تا ۱۰ در هر یک از تکرارها تغییر داده شد، مقاومت کلی توسط ابزار قرائت شد. با جایگزینی دو مقدار قرائت شده به همراه مقاومت‌های هر کدام از قطعات در رابطه ۱، پارامتر هندسی ابزار در محل هر یک از قطعات (G_i) محاسبه شد. هر یک از G_i ها به نقطه میانی آن قطعات منتسب شد. منحنی فاکتور هندسی برای هر یک از نمودارهای القایی در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵-۲- مدل چند لایه‌ای

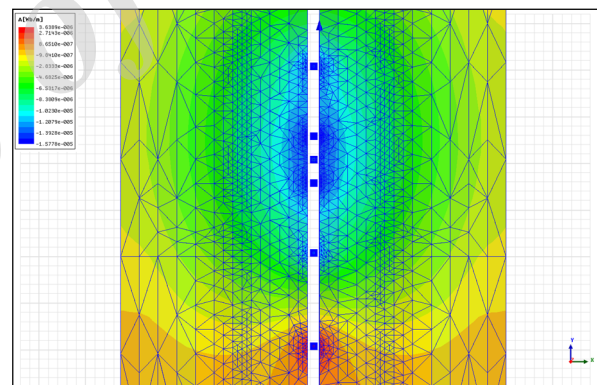
برای تأیید طراحی انجام شده برای ابزار القایی آرایه‌ای، مدل ۸ لایه‌ای از سازند ساخته شد؛ که هر یک از لایه‌ها مقدار رسانندگی متفاوتی دارند و ابزار در امتداد محور قائم جابجا می‌شود. (شکل ۸). ضخامت لایه‌ها از ۱/۵ متر ($L7$) تا ۱۰۰ متر ($L9$) تغییر می‌کند. همچنین دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی در این لایه‌ها از ۰/۰۰۱ تا ۱۰/۰۰۰ اهم متر است. نمودار مقاومت عمیق که به وسیله آرایه AO 90 اندازه‌گیری شده است؛ در سمت چپ شکل نشان داده شده است.

بر این اساس در لایه‌های ضخیم، نظیر $L3$ و $L9$ ، مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده به وسیله ابزار AIT، کاملاً برابر با مقدار مقاومت الکتریکی آن لایه‌هاست. هر چند در لایه‌های نازک نظیر $L6$ ، $L7$ و $L8$ مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده تفاوت زیگدادی با مقاومت واقعی این لایه‌ها دارد؛ که حاکی از تأثیر لایه‌های مجاور در قرائت ابزار AIT در این لایه‌هاست.

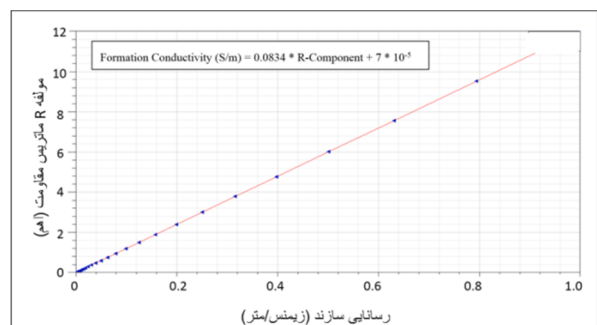
رسانندگی الکتریکی، ϵ : تراوایی الکتریکی^۴ و I_T : جریان الکتریکی فرستنده است.

نرم‌افزار Ansys-Maxwell نخست هندسه مسئله را چندضلعی‌هایی تقسیم کرده تا معادلات ماکسول را تبدیل به ماتریس معادلات جبری قابل حل کند. به این مرحله تولید اولیه مش^۵ گفته می‌شود. سپس بردار میدان مغناطیسی در هر یک از مش‌های اولیه محاسبه می‌شود. در ادامه مش بندی بر اساس پیچیدگی هندسه مسئله، میزان تغییرات میدان اولیه و میزان خطای انرژی محاسبه شده ریزسازی^۶ می‌شود؛ که به این فرآیند مش بندی بهینه شده^۷ گفته می‌شود. شکل ۳ نمایشی از مش بندی مدل دوبعدی را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار شبیه‌ساز Ansys-Maxwell مدل سازند به صورت مکعب در نظر گرفته شد؛ که در وسط آن چاهی به قطر ۱۵ سانتیمتر و پر از آب شیرین طراحی شد.

پس از ساخت مدل، کالیبراسیون آن انجام شد. برای این منظور رسانندگی الکتریکی مدل سازند تغییر داده شد و مؤلفه R ماتریس مقاومت اندازه‌گیری شد. نمودار تغییرات این دو پارامتر رابطه خطی آن‌ها را تأیید کرده و معادله تبدیل مؤلفه R به رسانندگی از آن استخراج شد (شکل ۴).



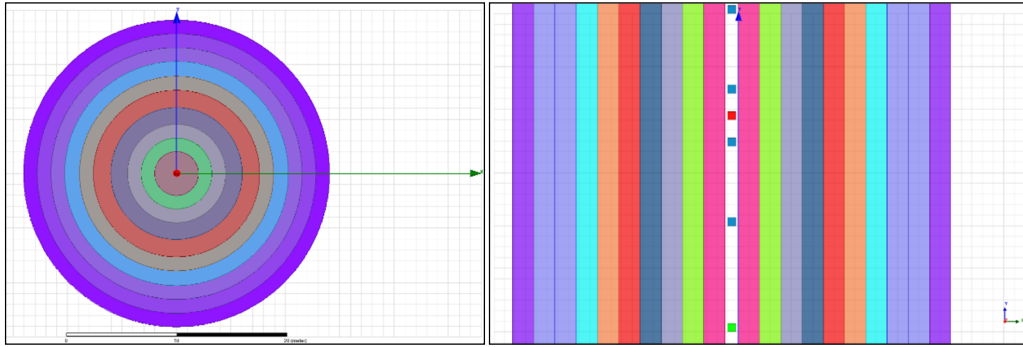
شکل ۳: مش بندی دوبعدی مدل و محل قرارگیری ابزار.



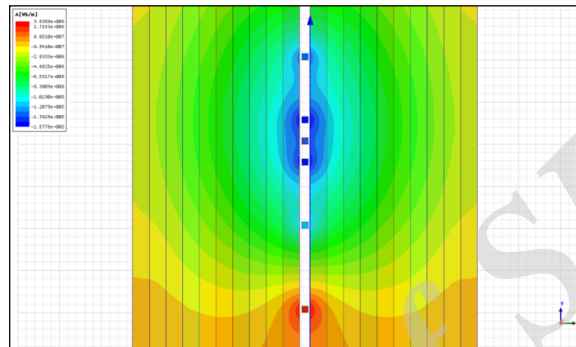
شکل ۴: کالیبراسیون ابزار AIT طراحی شده (معادله برازش شده بر

- 4- Permittivity
- 5- Initial Mesh Generation
- 6- Refinement
- 7- Adaptive Meshing

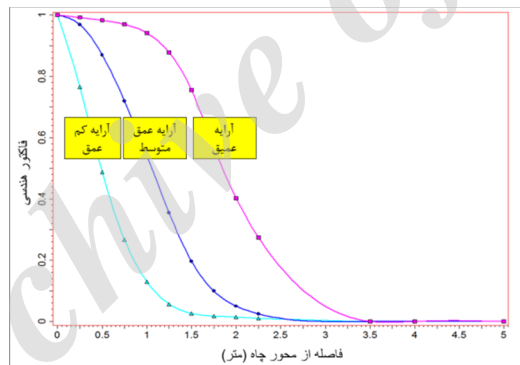
خوشبخت، مدل سازی عددی نمودارهای مقاومت القایی آرایه ای (AIT)، صفحات ۳۶۵-۳۷۵.



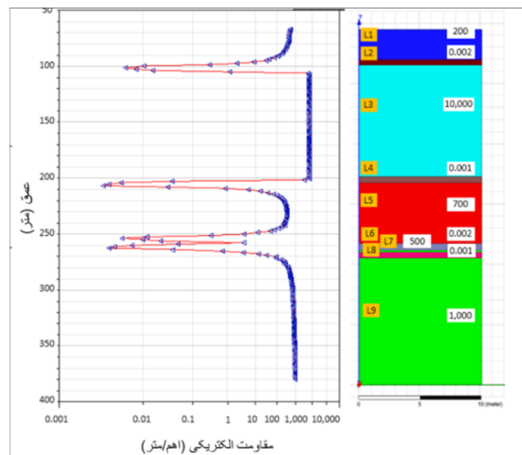
شکل ۵: نمایی از پلان مدل (بالا) و برش قائم از مدل (پایین) که برای تعیین فاکتور هندسی ابزار AIT استفاده شد.



شکل ۶: مدل دوبعدی همراه خطوط جریان الکتریکی.



شکل ۷: فاکتور هندسی آرایش های کم عمق (ILS)، عمق متوسط (ILM) و عمیق (ILD) ابزار AIT.



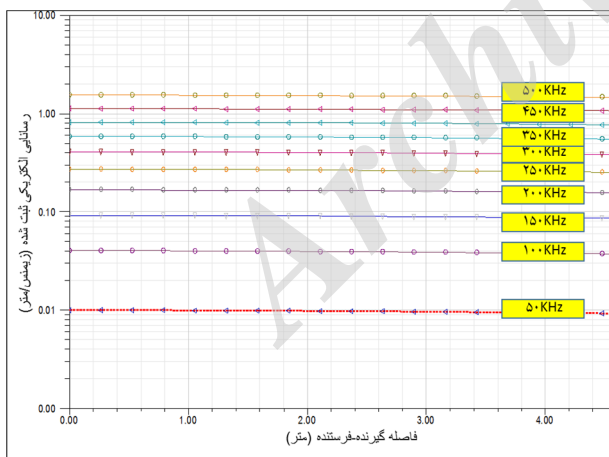
شکل ۸: مدل چندلایه ای برای راستی آزمایشی ابزار AIT طراحی شده.

۶-۲- فاصله گیرنده-فرستنده

با تغییر فاصله بین سیم‌پیچ‌های گیرنده و فرستنده، عمق نفوذ سیگنال‌ها و قدرت تفکیک عمودی ابزار تغییر می‌کند و تغییر این دو پارامتر رابطه عکس با یکدیگر دارند؛ به این صورت که با افزایش عمق نفوذ، قدرت تفکیک عمودی کاهش می‌یابد و این دو با افزایش فاصله گیرنده و فرستنده اتفاق می‌افتد. در این بخش با ثابت نگه داشتن رسانندگی مدل (۰/۱٪ زمینس بر متر) فاصله گیرنده-فرستنده در فرکانس‌های مختلف تغییر داده شد و اثر آن بر روی رسانندگی اندازه‌گیری شده با ابزار بررسی شد (شکل ۱۰).

با افزایش فاصله گیرنده و فرستنده از ۱ به ۲ متر، افت ناچیزی در رسانندگی اندازه‌گیری شده در فرکانس پایه (۵۰ کیلوهرتز) مشاهده شد. این افت در فرکانس‌های بالاتر کمی بیشتر شده؛ ولی همچنان در محدوده قابل قبولی است.

نکته قابل توجه در این بخش که ممکن است باعث سوء تعبیر شود، در نظر گرفتن قدرت تفکیک قائم است. اگرچه طبق این شکل می‌توان با افزایش فاصله گیرنده و فرستنده به مقادیر بزرگ، اثر پوسته‌ای و سایر نوفه‌ها را حذف کرد؛ ولی در این شرایط قدرت تفکیک قائم به شدت کاهش می‌یابد؛ که طبیعتاً اتفاق نامطلوبی است و کیفیت تفسیر نمودارهای مقاومت را به ویژه در مخازن نازک لایه کاهش می‌دهد. با افزایش بیشتر فاصله گیرنده-فرستنده به مقادیر خیلی بیشتر (بیش از ۶ متر) روند کاهش سیگنال برداشت شده تشدید می‌شود. لذا از پارامترهای مهم ابزار که با مدل‌سازی بهینه می‌شود، فاصله گیرنده و فرستنده است.



شکل ۱۰: آنالیز حساسیت پاسخ ابزار AIT به فاصله سیم‌پیچ‌های فرستنده-گیرنده و تغییرات فرکانس سیم‌پیچ فرستنده (آرایش عمیق).

۶-۳- مقاومت سیال حفاری

مهم‌ترین معیار انتخاب نوع ابزار مقاومت الکتریکی (مقاومت یا القایی)، مقاومت الکتریکی سیال درون چاه است؛ چرا که این ابزارها

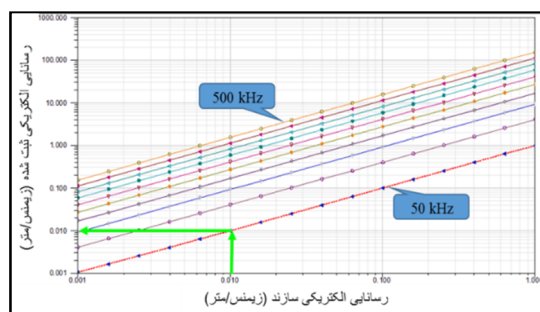
۶- آنالیز حساسیت

برای شناخت بهتر رفتار ابزار AIT در طراحی‌ها و شرایط مختلف، آنالیز حساسیت بر روی ویژگی‌های اصلی آن شامل فرکانس، فاصله گیرنده-فرستنده و تغییرات مقاومت سیال درون چاه انجام شد؛ تا مشخص شود تغییر این پارامترها چه اثری در رفتار ابزار AIT دارد.

۶-۱- فرکانس

از مشخصه‌های ابزارهای نمودار گیری مقاومتی، فرکانس فرستنده‌های آن‌هاست. در ابزارهای الکتریکی القایی که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، محدوده فرکانس ۲۵ تا ۲۰۰ کیلوهرتز است. فرکانس جریان متناوب در سیم‌پیچ‌های فرستنده بر روی عمق نفوذ، قدرت تفکیک عمودی و اثر پوسته‌ای اثر گذاشته و در محدوده‌های خاص از فرکانس، اثر پوسته‌ای به سیگنال دریافتی از سازند غلبه کرده و اثر آن را حذف می‌کند. طبق تعریف اثر پوسته‌ای، افت دامنه و تغییر فاز سیگنال دریافتی است. این پدیده در محیط‌های رسانا و در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد؛ که پدیده‌ای رایج در ابزارهای القایی است. حین رخداد این پدیده، جریان الکتریکی تمایل دارد در ضخامت نازکی از سطح جسم که رسانندگی بالایی دارد متمرکز شود. مقدار فرکانس از ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز تغییر داده شد تا پاسخ ابزار بررسی شود (شکل ۹). ابزار طراحی شده در این بخش با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز کالیبره شده است؛ لذا در این فرکانس مقدار رسانندگی اندازه‌گیری شده برابر با مقدار مقاومت واقعی مدل است (در شکل با پیکان نشان داده شده است). با افزایش فرکانس، مقدار رسانندگی اندازه‌گیری شده به تدریج با نرخ کاهشی افزایش می‌یابد؛ به طوری که رسانندگی ۰/۱٪ زمینس بر متر در فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز به ۱/۵٪ زمینس بر متر می‌رسد.

در فرکانس‌های بالا و در رسانندگی بالا پدیده اثر پوسته‌ای تشدید می‌شود و ابزار القایی امکان اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی را از دست می‌دهد. نکته دیگری که در شکل ۹ قابل توجه است رفتار خطی رسانندگی اندازه‌گیری شده در یک فرکانس مشخص است. این ویژگی ذاتی ابزارهای الکتریکی القایی، امکان اندازه‌گیری دقیق رسانندگی الکتریکی سازندها را در محدوده وسیعی از رسانندگی فراهم می‌کند.



شکل ۹: آنالیز حساسیت پاسخ ابزار AIT به تغییرات فرکانس سیم‌پیچ‌های فرستنده.

خوشبخت، مدل‌سازی عددی نمودارهای مقاومت القایی آرایه‌ای (AIT)، صفحات ۳۷۵-۳۶۵.

عددی انتخاب شد. فراوانی کاربرد، به کارگیری تکنولوژی ساخت‌افزایی و نرم‌افزاری نوین، ناشناخته بودن جزئیات طراحی، پاسخ غیرقابل پیش‌بینی در شرایط خاص مخازن ایران (نظیر سیال حفاری دو فاز شده و یا وجود شکاف)، امکان‌سنجی استفاده از مهندسی معکوس در طراحی نسخه بومی ابزار گران قیمت AIT، به کارگیری مدل برای طراحی برنامه نمودارگیری از دلایل اصلی انتخاب ابزار AIT برای مدل‌سازی عددی است.

استفاده از مدل عددی این امکان را در اختیار پتروفیزیت‌ها قرار می‌دهد؛ تا با پیش‌بینی رفتار ابزار نمودارگیر در شرایط پیچیده مخزن، برنامه‌های نمودارگیری را بهینه کرده تا از یک طرف داده‌های دقیق‌تری از مخزن برداشت و از طرف دیگر در زمان نمودارگیری صرفه‌جویی کنند. همچنین مدل محققین را قادر می‌سازد تا با پیاده‌سازی ایده‌های جدید با صرف زمان و هزینه منطقی، ابزارهای نمودارگیری کارآتر و دقیق‌تری طراحی کنند.

در مطالعه حاضر با به کارگیری مدل مصنوعی از مخزن، فاکتور هندسی برای آرایش‌های مختلف ابزار AIT محاسبه شد. فاکتور هندسی مبنای تبدیل مقاومت ظاهری برداشت شده به وسیله ابزار نمودارگیری به مقاومت واقعی بخش رخنه (Rx0) و بخش دست نخورده (Rt) مخزن است. مقایسه فاکتور هندسی به دست آمده از این مدل‌سازی با فاکتور هندسی ارائه شده برای این ابزار در کاتالوگ شرکت سازنده ابزار برای آرایش عمیق و عمق متوسط، همخوانی قابل قبولی را نشان می‌دهد؛ اما فاکتور هندسی آرایش کم عمق متفاوت است؛ که ناشی از حساسیت بالای این آرایش به خصوصیات رخنه است که در مدل به کار گرفته شده در این مطالعه به صورت پیوستونی فرض شده است.

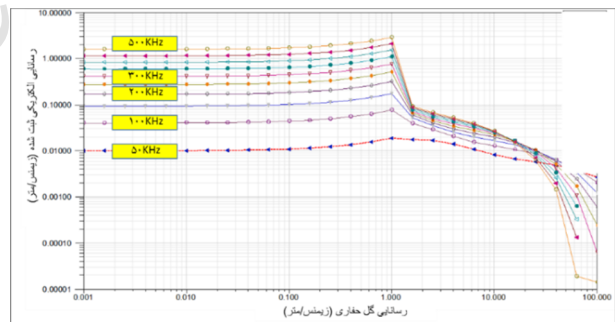
در مدل چند لایه، ابزار AIT طراحی شده مقاومت لایه‌های ضخیم را با دقت اندازه‌گیری کرده ولی برای لایه‌های نازک انطباق کامل وجود ندارد. از طرف دیگر مرز لایه‌های نازک (به ویژه لایه‌های با مقاومت بالا) به درستی قابل تعیین نیست. لذا در مخازن کربناته نازک لایه نمودارهای حاصل از ابزار AIT باید با احتیاط به کار گرفته شود.

آنالیز حساسیت خصوصیات اصلی ابزار AIT شامل فرکانس، فاصله گیرنده-فرستنده و مقاومت سیال درون چاهی، جزئیات رفتار این ابزار را نمایان کرد. در فرکانس‌های بالا به دلیل تشدید پدیده اثر پوسته‌ای، علیرغم وابستگی خطی مقاومت با فرکانس، ابزار توانایی اندازه‌گیری مقاومت سازند را از دست می‌دهد. با افزایش فاصله گیرنده-فرستنده، مقدار مقاومت برداشت شده تغییر چندانی نشان نمی‌دهد؛ حال آن‌که این افزایش قدرت تفکیک عمودی را تا حد چشم‌گیری کاهش می‌دهد. رسانندگی سیال درون چاهی اثر فاحشی در پاسخ ابزار AIT دارد. به طوری که در رسانندگی بیش از ۱ زیمنس/متر، ابزار رفتار کاملاً غیرخطی پیدا می‌کند؛ که به وضوح نشان می‌دهد که زمانی که رسانندگی سیال حفاری بیش از ۱

حساس به سیال درون چاه هستند. بر این اساس اگر نسبت مقاومت سازند به مقاومت سیال حفاری (Rt/Rm) از یک بیشتر باشد، ابزارهای القایی قابل استفاده نیستند.

در شکل ۱۱ رسانندگی سیال حفاری در محدوده ۰/۰۰۱ الی ۱۰۰۰ زیمنس بر متر تغییر داده شد و برای فرکانس‌های مختلف، مقاومت اندازه‌گیری شده به وسیله ابزار به دست آمد. در رسانندگی‌های پایین سیال حفاری، عملکرد ابزار قابل اعتماد و پایدار است؛ در حالی که در رسانندگی بالای ۱ زیمنس بر متر روند غیرخطی پیدا کرده و در بخش اول با فرکانس رابطه مستقیم و در بخش دوم رابطه عکس دارد. لذا به دلیل اثر مخرب رسانندگی سیال حفاری در عملکرد ابزارهای نمودارگیری القایی، در چاه‌های حفاری شده با سیال حفاری رسانا (آب شور) به هیچ وجه نمی‌توان از این ابزار استفاده کرد. لازم به ذکر است که نسبت مقاومت سازند به مقاومت سیال نیز در عملکرد ابزار القایی اثرگذار است. لذا در سازندهای مخزنی با تخلخل کم که مقاومت الکتریکی بسیار بالا است، مقاومت سیال حفاری نیز می‌بایست بسیار بالا باشد؛ تا ابزار مقاومت الکتریکی عملکرد مطلوبی داشته باشد.

در آنالیز حساسیت، پارامترهای دیگری نظیر خصوصیات گیرنده و فرستنده نظیر جنس، تعداد دور سیم‌پیچ‌ها، فاز جریان رسانی، قطر چاه، زاویه چاه، زاویه لایه‌ها، اثر دمای محیط و ... نیز قابل توجه هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.



شکل ۱۱: آنالیز حساسیت پاسخ ابزار AIT به رسانندگی سیال حفاری و تغییرات فرکانس سیم‌پیچ‌های فرستنده.

۷- بحث

نمودارهای مقاومت به دلیل تأثیر مستقیم بر محاسبه اشباع هیدروکربن مخازن مربوطه از جایگاه ویژه‌ای در حوزه نمودارگیری و پتروفیزیک برخوردارند. هرگونه خطای برداشت داده یا خطای تفسیر این داده‌ها مستقیماً تصمیمات مرتبط با تکمیل زون‌های تولیدی و محاسبات اقتصادی ذخیره هیدروکربن درجا را متأثر ساخته و منجر به زیان اقتصادی می‌شود.

در این راستا، یکی از ابزارهای نمودارگیری القایی به نام AIT که در صنعت نفت ایران به فراوانی استفاده می‌شود برای مدل‌سازی

Ansys Theory Reference, 2012, release 5.6. 001242. Eleventh Edition. SAS IP, Inc.®

Basu, S. and Sharma, M.M., 2014, A New Method for Fracture Diagnostics Using Low Frequency Electromagnetic Induction, SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference in Texas, SPE 168606.

Doveton, J., 2014, Principles of Mathematical Petrophysics, Oxford University Press, 288 P.

Hunka, J., Barber, T.D., Rosthal, R.A., Minerbo, G.N., Head, E.A., Howard, A.Q., Hazen, G.A. and Chandler, R.N., 1990, A new resistivity measurement system for deep formation imaging and high-resolution formation evaluation. Paper SPE 20559.

Jin Nam, M., Pardo, D. and Torres-Verdín, C., 2009, Simulation of DC dual-laterolog measurements in complex formations: A Fourier-series approach with nonorthogonal coordinates and self-adapting finite elements, Geophysics, 74 (1), E31-E43.

Kaufman, A. and Dashevsky, Y.A., 2003, Principles of Induction Logging, 1st Edition, Elsevier Science, 656 P.

Khoshbakht, F., Rasaie, M.R. and Shekarifard, A., 2016, Investigating Induction Log Response in the Presence of Natural Fractures, Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, 357-369.

Liu, D., Li, H., Zhang, Y., Zhu, G. and Ai, Q., 2014, A Study on Directional Resistivity Logging-While-Drilling Based on Self-Adaptive hp-FEM, Acta Geophysica, Acta Geophysica, 62 (6), 1328-1351.

Popovic, Z. and Popovic, B.D., 2000, Introductory Electromagnetics, Prentice Hall, 556 P.

Schlumberger, 2009, Log Interpretation Charts, 2009 Edition, 310 P.

Semmelbeck, M.E. and Holditch, S.A., 1988, The effects of mud-filtrate invasion on the interpretation of induction logs: SPE Formation Evaluation

Serra, O. and Serra, L., 2004, Well Logging Data Acquisition and Applications, Serralog, 688 P.

Tabarovsky, L. and Rabinovich, M., 1996, High-speed 2D inversion of induction logging data. In SPWLA 37th Annual Logging Symposium Transactions.

Wu, J., Torres-Verdin, C., Sepehrnoori, K. and Delshad, M., 2001, Numerical Simulation of Mud-Filtrate Invasion in Deviated Wells, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, SPE-87919.

۸- نتیجه‌گیری

به کارگیری مدل‌های عددی دقیق ابزار AIT امکان تفسیر پتروفیزیکی و هندسی با دقت بالا را در مخازن پیچیده فراهم می‌کند. از طرف دیگر با تلفیق مهندسی معکوس و مدل‌های عددی، می‌توان نسخه بومی ابزار AIT را طراحی و تولید کرد. از محصولات این مطالعه، محاسبه فاکتور هندسی برای ابزار مقاومت AIT است؛ که این فاکتور برای آرایش عمیق و عمق متوسط با مگگردابیر گزارش شده توسط شرکت سازنده ابزار همخوانی دارد؛ ولی برای آرایش کم عمق همخوانی خوبی نشان نمی‌دهد.

آنالیز حساسیت مدل نشان داد که فرکانس فرستنده ابزار با مقاومت اندازه‌گیری شده رابطه کاملاً خطی دارد. با افزایش فاصله گیرنده-فرستنده مقدار مقاومت اندازه‌گیری شده افت کمی دارد؛ در حالی که قدرت تفکیک قائم کاهش می‌یابد و نهایتاً برای سیال حفاری با رسانندگی کمتر از ۱ زیمنس/متر ابزار AIT قابل برداشت نیست.

۹- منابع

Anderson, B. and Barber, T., 1988, Strange Induction Logs- A Catalog of Environmental Effects, The Log Analyst, 29, 229-243.

Anderson, B. and Barber, T., 1997, Induction Logging, Schlumberger Wireline & Testing Document.

Anderson, B. and Chang, S.K., 1982, Synthetic Induction Logs by the Finite Element Method, Transactions of the SPWLA 23rd Annual Logging Symposium, Corpus Christi, Texas, USA, paper M, The Log Analyst 23.

Anderson, B., Barber, T. and Lüling, M., 1995, The Response of Induction Tools to Dipping Anisotropic Formations, Transactions of the SPWLA 36th Annual Logging Symposium, Paris, France.

Anderson, B., Barber, T., Druskin, V., Lee, P., Dussan, E., Knizhnerman, L. and Davydycheva, S., 1999, The response of multiarray induction tools in highly dipping formations with invasion and in arbitrary 3D geometries. The Log Analyst, 40 (5), 327-344.

Anderson, B., Barber, T.D. and Gianzero, S.C., 2001, the effect of crossbedding anisotropy on induction tool response. Petrophysics, 42 (2), 137-149.

Anderson, B., Safinya, K.A. and Habashy, T., 1986, Effects of dipping beds on the response of induction tools. In Proceedings SPE Annual



Numerical modeling of array induction log or tool (AIT)

Farhad Khoshbakht

Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

Received: 25 May 2017; Accepted: 8 July 2018

Corresponding author: khoshbakhtf@ripi.ir

Keywords

Resistivity
Logging Tool
Reservoir
Hydrocarbon Saturation
Sensitivity Analysis

Extended Abstract

Summary

Resistivity logs are among the most important logs since their measurements are directly related to hydrocarbon saturation. Conventionally, Chartbooks as theoretical response of logs are used for interpretation of electrical logs. One dimensional (1D) computer codes are the cornerstones of chartbooks. These codes solve Maxwell's equations by ignoring layer inclination, non-uniform mud invasion, shoulder bed effect and well deviation. Simplifying the

geometry of the model introduces significant amount of error in the interpretation of resistivity logs. Consequently, it is necessary to utilize complex numerical models for interpretation of the logs.

The main objective of this paper is to present numerical modeling of array induction log or tool (AIT). The numerical modeling enables us to understand the response of the tool in different well and reservoir situations. Proper understanding of the response of the tool improves the accuracy of interpretation of the logs and reduces the risk of logging jobs in the harsh conditions.

For verification of the model, the resistivity logs were constructed in a multi-layer model. The modeled resistivity logs were in good agreement with the true formation resistivity values in thick layers but conversely, in the thin layers, the performance of the model was not acceptable.

Sensitivity analysis was performed on the frequency, the transducer-receiver spacing of AIT and the resistivity of mud. In higher frequencies, due to skin effect, the tool is not able to measure the true resistivity of the layer. Increasing the transducer-receiver spacing does not affect the accuracy of the AIT while it decreases the vertical resolution of the tool. In wells where the conductivity of mud is below 1 S/m, the AIT tool cannot be run.

Introduction

Wireline logs indirectly measure the petrophysical properties of hydrocarbon reservoirs. The most important logs are electrical logs because they determine the amount of hydrocarbon in the pore space of the study reservoir. Since the invention of electrical logs in 1927, many researchers have investigated new methods to improve the accuracy and precision of the interpretation of electrical logs. Chartbooks, forward modeling, inversion and three dimensional (3D) numerical modeling are the main approaches for the interpretation of resistivity logs. In this paper, AIT, as a modern resistivity log, which is frequently used in oil industry, was numerically modeled to understand its behavior in hydrocarbon reservoirs. The results of the paper improve interpretation methods and give geometrical properties of reservoirs, and also, optimize the log acquisition plans.

Methodology and Approaches

Ansys-Maxwell electromagnetic simulator has been used to numerically model AIT. It numerically solves the Maxwell's equations in a specific geometry and calculates the vectors of magnetic field. All details of the tool including number of coils, distance of transmitter and receivers, materials of coils, frequencies and electrical current have been identical to the real tool.

The modeled AIT tool has also been calibrated in a multi-layers formation model. The calibrated model has been utilized to calculate the geometrical factor of shallow, medium and deep arrays. Moreover, sensitivity analysis has been performed on the frequency, transmitter-receiver distance of the tool and the resistivity of borehole mud.

Results and Conclusions

Numerical modeling of AIT enables us to analyze and predict the behavior of AIT in different logging conditions,

JRAG, 2018, VOL. 4, NO. 2.

formation properties and geometry. In this research, it has shown that the AIT accurately measures the resistivity of thick layers but it lost its accuracy in measuring the resistivity of thin beds. The sensitivity analysis, made in this study, has demonstrated that the measured resistivity linearly depends on the frequency of transmitter. Skin effect masks the response of AIT in high frequencies and leads to improper measuring of resistivity. Precise modeling of AIT helps us to design a domestic version of the array induction tool, which is customized to the characteristics of Iranian reservoirs and borehole conditions.

Archive of SID