

ارائه الگوریتمی برای بهبود مدل سازی رخنه گل حفاری با استفاده از وارون سازی نمودارهای مقاومت الکتریکی

فرهاد خوشبخت*، علی شکاری فرد و محمدرضا رسایی

انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۳۱

چکیده

رخنه گل حفاری به دلیل اختلاف فشار گل موجود در حفره چاه و فشار سازند رخ داده و طی آن بخش مایع گل حفاری در مخزن رخنه کرده و ذرات جامد آن در دیواره چاه تشکیل کیک گل را می‌دهد. مقدار و هندسه رخنه توسط خصوصیات گل حفاری، ویژگی‌های سازند و اختلاف فشار بین گل و مخزن کنترل می‌شود. رخنه گل حفاری باعث آسیب دیدگی مخزن، کاهش کیفیت مخزنی و کاهش توان تولید بخشی از سازند که تحت تاثیر این فرآیند قرار گرفته، می‌شود. همچنین رخنه گل حفاری، داده‌های برداشت شده از مخازن، نظیر نمودارهای چاه پیمایی، داده‌های لایه آزمایشی، نمونه‌های سنگ و سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی متعددی برای شبیه‌سازی رخنه گل حفاری وجود دارد که هر یک به ابعاد خاصی از این فرآیند می‌پردازند. استفاده از این مدل‌ها در مخازن واقعی نتایج رضایت بخشی نداشته و نیازمند بهینه‌سازی هستند. در این مطالعه الگوریتمی بر پایه وارون سازی نمودارهای مقاومت ارائه شده است تا عوامل اصلی تعیین کننده رخنه گل حفاری از جمله تراوایی کیک گل بهینه شده و مدل سازی توزیع گل حفاری در مخزن بهبود یابد. نتایج این مطالعه در تفسیر داده‌های لایه آزمایشی و نمودارهای چاه پیمایی قابل استفاده است. در این مطالعه برای بهینه‌سازی رخنه گل حفاری از طریق وارون سازی نمودارهای مقاومت القایی، برنامه کامپیوتری به شکل چرخه کار در نرم‌افزار پترل تهیه شد. مقدار خطای انطباق نمودارهای مقاومت بازسازی شده با نمودارهای مقاومت واقعی به عنوان معیار کمی بهبود توزیع رخنه گل حفاری در مخزن حاکی از بهبود چشمگیر مدل سازی رخنه گل حفاری با بهینه سازی خصوصیات کیک گل می‌باشد.

کلمات کلیدی: رخنه گل حفاری، نمودار مقاومت، مدل سازی، وارون سازی و مخزن.

مقدمه

مخزن ایجاد می‌شود. طی این فرآیند بخش مایع گل حفاری در مخزن رخنه کرده و ذرات جامد آن در دیواره چاه تشکیل کیک گل را می‌دهد. میزان، هندسه، حجم رخنه توسط خصوصیات گل حفاری، ویژگی‌های سازند مخزنی و اختلاف فشار بین گل و

حین حفاری چاه‌های نفت و گاز، رخنه^۱ گل حفاری در سازندهای متخلخل و تراوا اتفاق می‌افتد. این پدیده به دلیل اختلاف فشار گل حفاری و سیال

1. Invasion

khoshtakhtf@ut.ac.ir

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی

و چنورت از شاخص ترین مطالعات آزمایشگاهی هستند. مطالعات تئوری ابتدا توسط عثمان، استماتیکس و تین و سیوان انجام شده است.

سیوان مدلی ریاضی بر پایه فرآیند انتقال-جابه‌جایی ارائه کرد. این مدل چند ترکیبی^۱ و دو فازی رخنه گل حفاری و تشکیل کیک گل را شبیه‌سازی می‌کرد [۳]. وی جنبه‌های دیگر رخنه گل حفاری نظیر ورود ذرات جامد به سازند و تراکم‌پذیری کیک گل را نیز مد نظر قرار داد. پازن آنورک و انگلر با ترکیب معادله موازنه جرم (برای تشکیل کیک گل) و معادله دارسی (برای مدل‌سازی رخنه گل حفاری) مدلی برای شبیه‌سازی فرآیند رخنه گل حفاری در چاه‌های افقی ارائه کردند [۴]. چاه‌های افقی بدلیل داشتن شعاع زهکشی^۲ بسیار وسیع‌تر و طول بزرگ‌تر، سطح تماس بزرگ‌تری با مخزن دارند لذا پدیده رخنه اثر چشمگیری روی کاهش تولید از این چاه‌ها داشته و شناخت مکانیسم‌های رخنه گل حفاری نقش مهمی در کاهش ریسک حفاری در این چاه‌ها دارد. یوو و همکاران، الگوریتم ترکیبی برای تشکیل شعاعی کیک گل و شبیه‌سازی رخنه گل حفاری ارائه دادند. رخنه گل حفاری شعاعی توسط جریان دو فازی غیر امتزاجی (معادله دارسی) با شرایط مرزی مدل می‌شود. این محققان برای محاسبه نرخ رخنه گل حفاری، معادلات مشتقات ضمنی تغییرات فشار و اشباع را با هم ترکیب کرده و به‌صورت تکرار در بازه‌های زمانی حل کردند [۶].

مدل آزمایشگاهی دیوان و چنورت برای رخنه گل حفاری

در مطالعات آزمایشگاهی، شرایط چاه در مقیاس سانتی متر مدل شده و با کنترل خصوصیات جریان و گل حفاری، حجم رخنه، سرعت تشکیل و ضخامت کیک گل تعیین می‌گردد. دیوان و چنورت، طی ۸

مخزن کنترل می‌شود. گرانشی، مقدار و اندازه ذرات جامد گل، خصوصیات از گل حفاری هستند که روی فرآیند رخنه موثر هستند. تخلخل، تراوایی، لیتولوژی و فشار سیال مخزنی نیز عوامل کنترل کننده رخنه می‌باشند.

رنه گل حفاری به سازند مخزنی، تعادل سیال‌ها را در مخزن به هم ریخته و باعث ایجاد ناهنجاری در آن می‌شود این ناهنجاری تحت عنوان آسیب دیدگی سازند^۲ نامگذاری می‌شود. آسیب دیدگی شامل فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی است که در اثر رخنه گل حفاری حادث شده و باعث کاهش کیفیت مخزنی و کاهش توان تولید مخزن می‌شود. همچنین رخنه گل حفاری داده‌های برداشت شده از مخازن نظیر نمودارهای چاه‌پیمایی، داده‌های لایه آزمایشی، نمونه‌های سنگ و سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا برای تحلیل این داده‌ها، ملاحظات رخنه باید در نظر گرفته شود [۱].

مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی متعددی برای شبیه‌سازی رخنه گل حفاری وجود دارد که هر یک به ابعاد خاصی از این فرآیند می‌پردازند. استفاده از این مدل‌ها در مخازن واقعی نتایج رضایت بخشی نداشته و نیازمند بهینه‌سازی می‌باشند. در این مطالعه الگوریتمی بر پایه وارون‌سازی نمودارهای مقاومت الکتریکی ارائه شده است تا عوامل اصلی تعیین کننده رخنه گل حفاری از جمله تراوایی کیک گل بهینه شود. نتایج این مطالعه در تفسیر داده‌های لایه آزمایشی و نمودارهای چاه‌پیمایی قابل استفاده است.

پیشینه تحقیق

به‌دلیل اهمیت فرآیند رخنه گل حفاری، مطالعات زیادی در طی چند دهه اخیر انجام شده است. این مطالعات در دو دسته کلی مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. فرگوسن و کلوتز، بزمر و هاوانر، فوردهام و همکاران و دیوان

1. Formation
2. Multi-species
3. Drainage Area

مدل سازی فرآیند رخنه گل حفاری

برای مدل سازی فرآیند رخنه گل حفاری، داده‌های یک چاه از یک میدان نفتی در ایران انتخاب گردید تا مراحل مدل سازی و بهینه سازی رخنه در آن انجام شود. این مدل مربوط به سازند مخزنی سروک است که حاوی نفت با دانسیته ۲۴ درجه API می باشد. سازند سروک متشکل از لایه‌های آهکی با مقادیر کمی شیل بوده و میزان تخلخل آن بین ۰ تا ۲۰ درصد تغییر می کند. در میدان مورد مطالعه سازند سروک از ۵ زون تشکیل شده است که زون‌های ۴، ۶ و ۷ زون‌های مخزنی و زون‌های ۵ و ۸ زون‌های غیرمخزنی محسوب می شوند (شکل ۱). به بیان دیگر زون‌های ۴، ۶ و ۷ زون‌های نفتی و زون‌های ۸ زون آبی است. وجود زونهای نفتی و آبی و همگنی سازند سروک، این مخزن را کاندید خوبی برای مطالعه رخنه گل حفاری و مدل سازی نمودارهای مقاومت می کند.

مدل سه بعدی

فرآیند رخنه گل حفاری به صورت سه بعدی در اطراف چاه اتفاق می افتد که برای شبیه سازی واقع بینانه آن نیاز به مدل سه بعدی از مخزن می باشد. این مدل شامل مدل سه بعدی استاتیک و دینامیک است. برای این منظور، مدل قطاعی^۱ از مدل کل میدان مورد مطالعه انتخاب شد. مقطع برشی از مدل اشباع در شکل ۲ نمایش داده شده است. ابعاد اولیه سلول‌ها ۱۰۰ m × ۱۰۰ m است که برای اهداف این مطالعه که در ابعاد اطراف چاه است بسیار بزرگ می باشد. لذا برای بهینه سازی تعداد سلول‌ها و جلوگیری از زمان بر بودن شبیه سازی، ریزسازی محلی سلول‌ها در محل چاه انجام شد. ریزسازی محلی سلول‌ها از محل چاه با ۳ رده انجام شده است که در ریزترین رده، سلول‌های متصل به چاه، ۳۰ cm، در رده دوم ۱/۸ m و در رده سوم ۱۴ m می باشد که در نهایت به سلول‌های اصلی با ابعاد ۱۰۰ m متصل می شوند.

سال، مطالعات آزمایشگاهی مبسوطی بر روی نمونه‌های مختلف گل حفاری انجام دادند تا مدلی برای پیش بینی رفتار کیک گل و مکانیسم‌های رخنه ارائه کنند. ایشان معادله‌ای برای محاسبه میزان جریان عبوری از کیک گل را ارائه کردند (رابطه ۱)، که در آن μ : ویسکوزیته (cp)، T_{mc} : ضخامت

مغزه (cm) و k_{mc} : تراوایی کیک گل (mD) است.

$$q(t) = \frac{P - P_{mc}(t) K_{mc} \frac{1}{14.7} \frac{1}{1000 \mu T_{mc}} [cm^3 / sec] \quad (1)$$

با شروع رخنه که ضخامت کیک گل صفر است، مقدار جریان عبوری (q_i) حداکثر است و با گذشت زمان و گسترش کیک گل، فشار کیک گل (P_{mc}) افزایش یافته و مقدار جریان عبوری کاهش می یابد. مقدار افت فشار در طول کیک گل از (رابطه ۲) قابل محاسبه است. که در آن T_{mc} : ضخامت کیک گل و K_{mc} : تراوایی کیک گل است.

$$P_{mc}(t) = 14700 \frac{q(t) T_{mc}(t) \mu}{K_{mc}(t)} [psi] \quad (2)$$

تخلخل کیک گل

با گسترش کیک گل مقدار تخلخل کیک گل نیز تغییر می کند که میزان این تغییرات از (رابطه ۳) قابل محاسبه است.

$$\varphi_{mc}(t) = \frac{\varphi_{mc0}}{p_{\delta v}^{mc}(t)} \quad (3)$$

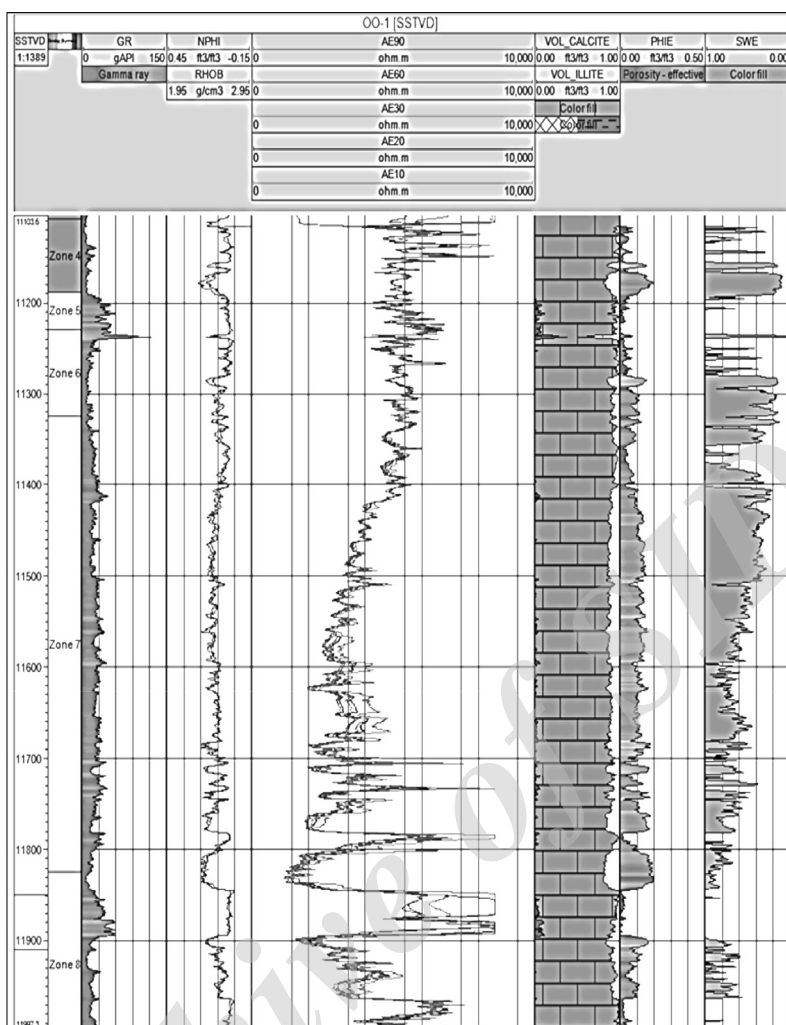
در این معادله δ ضریبی است که از رابطه تخلخل-تراوایی کیک گل که حاصل آزمایش‌های استاندارد روی نمونه کیک گل است، به دست می آید و v : ضریب تراکم پذیری می باشد.

تراوایی کیک گل

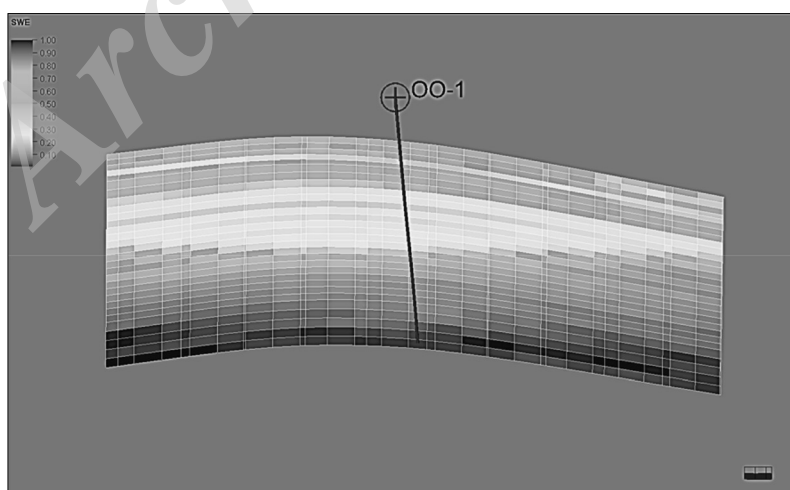
کاهش تراوایی کیک گل حفاری که با گسترش کیک گل رخ می دهد از (رابطه ۴) قابل محاسبه است.

$$k_{mc}(t) = \frac{k_{mc0}}{P_{mc}^v(t)} [mD] \quad (4)$$

که در آن k_{mc} : تراوایی کیک گل، k_{mc0} : تراوایی مرجع در فشار تفاضلی ۱ پام و v : توان تراکم‌پذیری است که به طور معمول بین ۰/۴ تا ۰/۹ است. مقدار صفر برای ۷ نشان دهنده کیک گل غیرقابل تراکم و مقدار ۱ نشان دهنده کیک گل کاملاً تراکم‌پذیر است. جزییات محاسبه φ_{mc} و k_{mc} در مقاله دیوان و چنورت تشریح شده است.



شکل ۱ وضعیت نمودارهای چاه‌پیمایی و خصوصیات پتروفیزیکی سازند سروک در چاه مورد مطالعه.



شکل ۲ برش قائم از مدل اشباع آب در محل چاه.

داده شد تا اطمینان حاصل شود که مدل ساخته شده می‌تواند نماینده واقعی مخزن باشد.

پس از ساخت مدل استاتیک مخزن، با تغییر ضرایب تراوایی و منحنی‌های تراوایی نسبی، تاریخچه تولید با نتایج مدل برای یک دوره تولید ۲۰ ساله تطبیق

شکل ۴-ب در سلول‌های نزدیک چاه که سیال مخزن کاملاً توسط گل حفاری جابه‌جا شده است شوری سیال صفر است در حالی که در سلول‌های نزدیک جبهه رخنه، به تدریج درصد شوری افزایش می‌یابد تا به شوری اولیه مخزن برسد.

تبدیل مکعب اشباع و شوری به مقاومت

پس از مدل کردن رخنه گل، نمودار مقاومت از مدل سه بعدی اشباع و مدل شوری بازسازی شد. مرحله اول این فرآیند، تبدیل مدل اشباع به مدل سه بعدی مقاومت الکتریکی است که برای نیل به این مهم، از معادله آرچی استفاده شد (رابطه ۵). علت استفاده از این معادله وجود مقادیر ناچیز شیل در مخزن مورد مطالعه است [۷].

پارامترهای m ، n ، a ثوابت این معادله است که در مخزن سروک ۱، ۲ و ۲ می‌باشند و تخلخل (ϕ) ، اشباع (S_w) و شوری (R_w) حاصل شبیه‌سازی فرآیند رخنه هستند که در انتهای بازه شبیه‌سازی، از مدل دینامیک استخراج شده‌اند. برای این تبدیل برنامه کامپیوتری به شکل چرخه کار^۱ (شکل ۵) در نرم افزار پترل نوشته شد تا مقاومت الکتریکی (R_t) را از تخلخل، اشباع، شوری محاسبه کند.

در شکل ۶، نمودار مقاومت الکتریکی محاسبه شده از مدل سه بعدی نشان داده شده است (ستون اول از راست). در این شکل در ستون دوم از راست نمودارهای مقاومت واقعی در این چاه نشان داده شده است که نشان‌دهنده همخوانی روندهای این دو نمودار می‌باشد. از نظر کمی نیز مقادیر این دو نمودار در کراس پلات شکل ۷ نشان داده شده است که حاکی از آن است که مدل کارکرد مناسبی داشت و تا حد زیادی نمودار مقاومت بازسازی شده با نمودار مقاومت واقعی در این چاه همخوانی دارد.

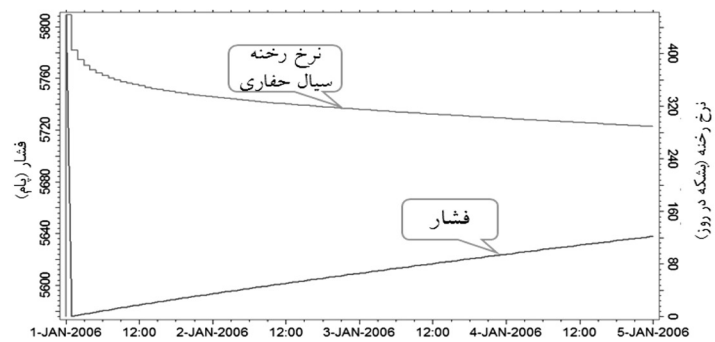
$$R_t = \frac{a R_w}{\phi^m S_w^n} \quad (5)$$

رنخه گل حفاری با لحاظ کردن تشکیل کیک گل و تغییرات شوری

برای شبیه‌سازی واقع بینانه فرآیند رخنه گل حفاری، سه خصوصیت اصلی کنترل کننده رخنه شامل اختلاف فشار گل و مخزن، تشکیل کیک گل در دیواره چاه و اختلاط دو سیال با درجه شوری مختلف در نظر گرفته شد. نفوذ گل حفاری به مخزن باعث می‌شود که دو نوع سیال با درجه شوری متفاوت در کنار هم قرار گیرد. پدیده رخنه از یک طرف باعث جابه‌جایی آب سازند توسط گل حفاری شده و از طرف دیگر به دلیل اختلاف شوری دو سیال، پدیده انتشار باعث تغییر غلظت نمک در نزدیکی جبهه رخنه می‌گردد. به بیان دیگر تغییرات شوری هم به دلیل تغییر اشباع سیالات و هم در اثر اختلاط دو سیال رخ می‌دهد.

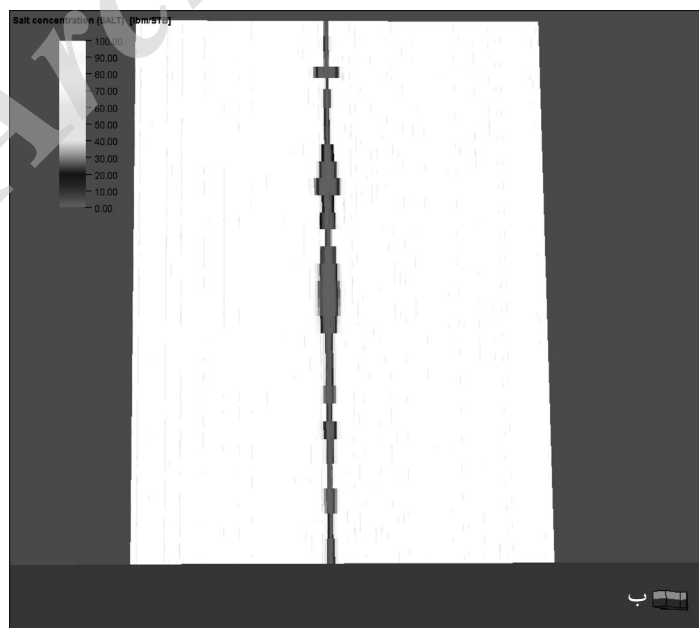
برای شبیه‌سازی کامل رخنه گل، از شبیه ساز اکلیپس استفاده شد تا تغییرات فشار، اشباع و شوری حاصل رخنه گل حفاری را شبیه‌سازی کند. فشار مخزن سروک ۵۵۰۰ پام و فشار ته چاهی ۶۰۰۰ پام می‌باشد با این اختلاف فشار، گل حفاری در مخزن رخنه می‌کند. در شکل ۳ منحنی تغییرات فشار مخزن و نرخ رخنه گل حفاری نشان داده شده است. گل حفاری با شوری صفر و درجه شوری آب سازندی $100/000$ ppm لحاظ شد. مقاطع برشی از تغییرات اشباع و شوری ناشی از رخنه گل حفاری، در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۴-ب میزان شوری سیال از صفر در نزدیک چاه تا $100/000$ پی پی ام در بخش‌های دست نخورده تغییر می‌کند. در زون‌های بالای سطح تماس، مقطع برشی اشباع (شکل ۴-الف) با مقطع برشی شوری آب (شکل ۴-ب) یکسان است ولی در زون‌های پایین سطح تماس سیالات (3550 m) این دو مقطع برشی کاملاً متفاوت هستند چرا که در مقطع شوری با ثابت بودن درصد اشباع سیال، درصد شوری سیالات تغییر کرده است. در

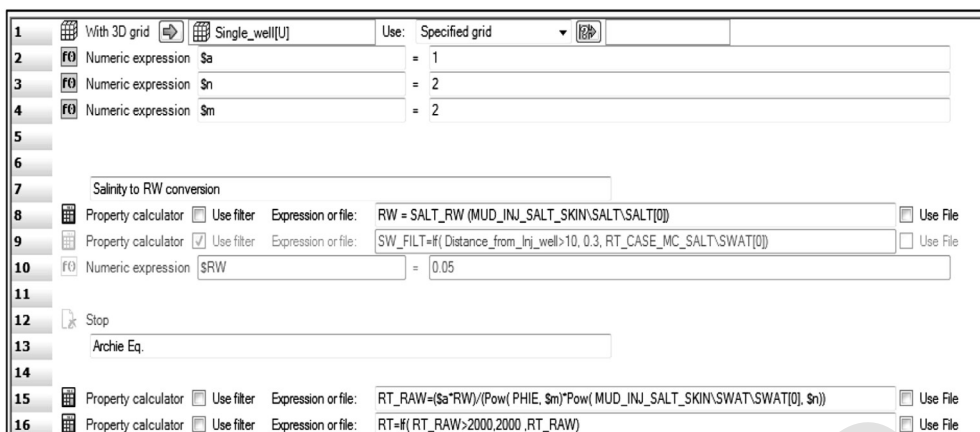


زمان (روز)

شکل ۳ منحنی نرخ رخنه گل حفاری و تغییرات فشار در چاه مورد مطالعه.



شکل ۴ مقطع برشی از تغییرات اشباع (الف) و درجه شوری (ب) مدل در انتهای فرآیند رخنه.

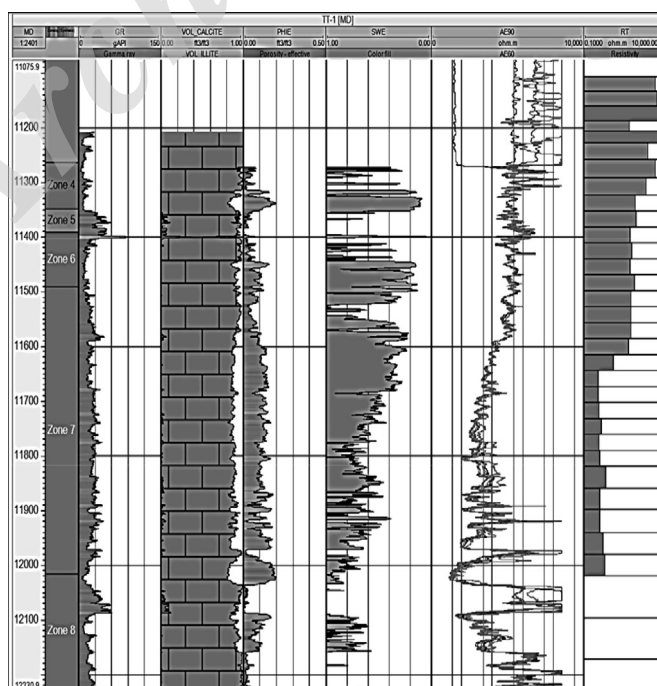


شکل ۵ چرخه کار پترل که برای تبدیل درصد شوری مدل به مقاومت الکتریکی استفاده شد.

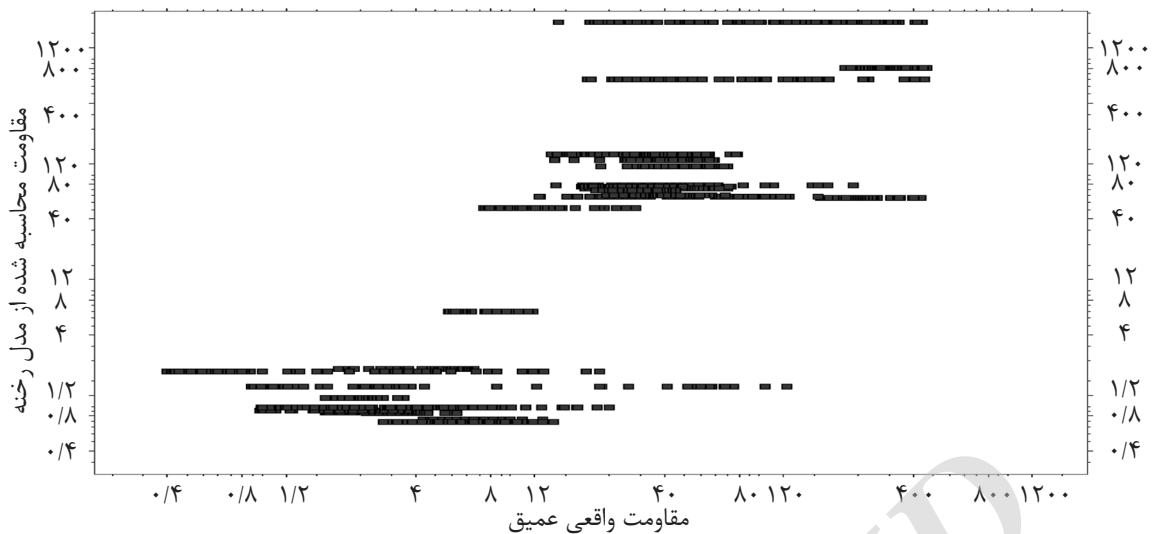
ساخت نمودارهای مقاومت واقعی

در مرحله قبل مدل سه بعدی اشباع و شوری تبدیل به مکعب مقاومت الکتریکی شد. برای بازسازی نمودارهای مقاومت، خصوصیات دستگاه نظیر فاصله گیرنده-فرستنده، فرکانس و خواص الکترونیکی قطعات آن باید در نظر گرفته شود که این خصوصیات در فاکتور هندسی تعریف می‌شود. فاکتور هندسی نشان می‌دهد که سیگنال دریافتی دستگاه از چه فضایی متاثر می‌باشد [۶].

در شکل ۶، نمودار مقاومت الکتریکی محاسبه شده از مدل سه بعدی نشان داده شده است (ستون اول از راست). در این شکل در ستون دوم از راست نمودارهای مقاومت واقعی در این چاه نشان داده شده است که نشان‌دهنده همخوانی روندهای این دو نمودار می‌باشد. از نظر کمی نیز مقادیر این دو نمودار در کراس پلات شکل ۷ نشان داده شده است که حاکی از آن است که مدل کارکرد مناسبی داشت و تا حد زیادی نمودار مقاومت بازسازی شده با نمودار مقاومت واقعی در این چاه همخوانی دارد.



شکل ۶ مقاومت الکتریکی محاسبه شده از مدل بعد از رخنه گل حفاری (ستون راست) و نمودار مقاومت واقعی (ستون دوم از راست).

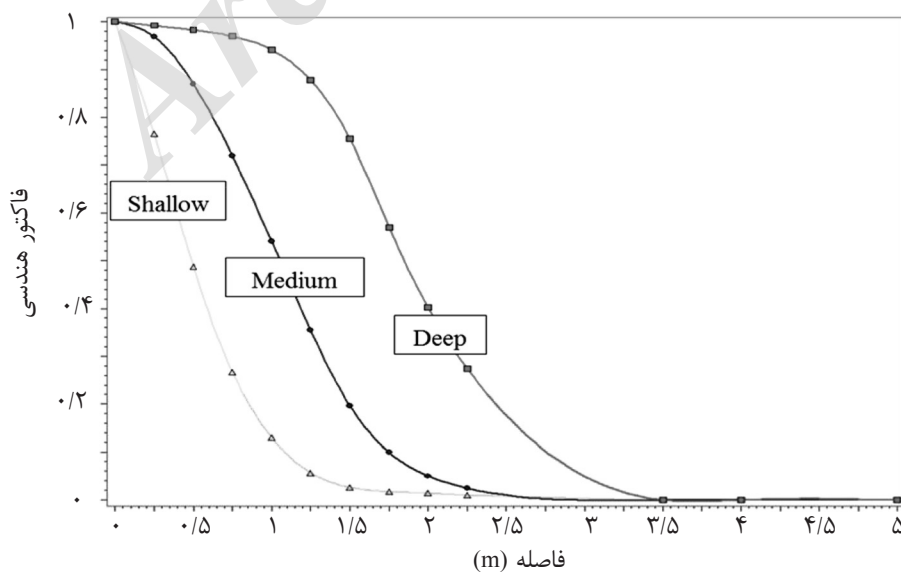


شکل ۷ مقاومت محاسبه شده از مدل رخنه (محور قائم) در مقابل نمودار مقاومت واقعی عمیق در محل چاه.

نوشته شد (شکل ۹) که نمودارهای مقاومت را در محل چاه بازسازی می‌کند. ورودی‌های این چرخه کار، مدل سه بعدی مقاومت الکتریکی، منحنی‌های فاکتور هندسی هر یک از نمودارهای مقاومت و مشخصات چاه (مسیر) می‌باشد. این الگوریتم در مسیر چاه در فواصل منظم نمونه برداری، مقدار نمودار را محاسبه کرده و نهایتاً نمودارهای الکتریکی پیوسته را بازسازی می‌کند. در شکل ۱۰ نمودارهای مقاومت کم عمق، عمق متوسط و عمیق بازسازی شده و نمودارهای واقعی با هم مقایسه شده‌اند.

فاکتور هندسی دستگاه القایی برداشت شده در این چاه با مدل‌سازی آن به دست آمد (شکل ۸). لازم به ذکر است که نحوه محاسبه اثر هندسی در مقاله دیگری ارائه شده است. برای بازسازی نمودارهای مقاومت، علاوه بر مقاومت الکتریکی سلول‌ها، می‌بایست اثر آرایش دستگاه نیز لحاظ شود که این در فاکتور هندسی تعریف می‌شود.

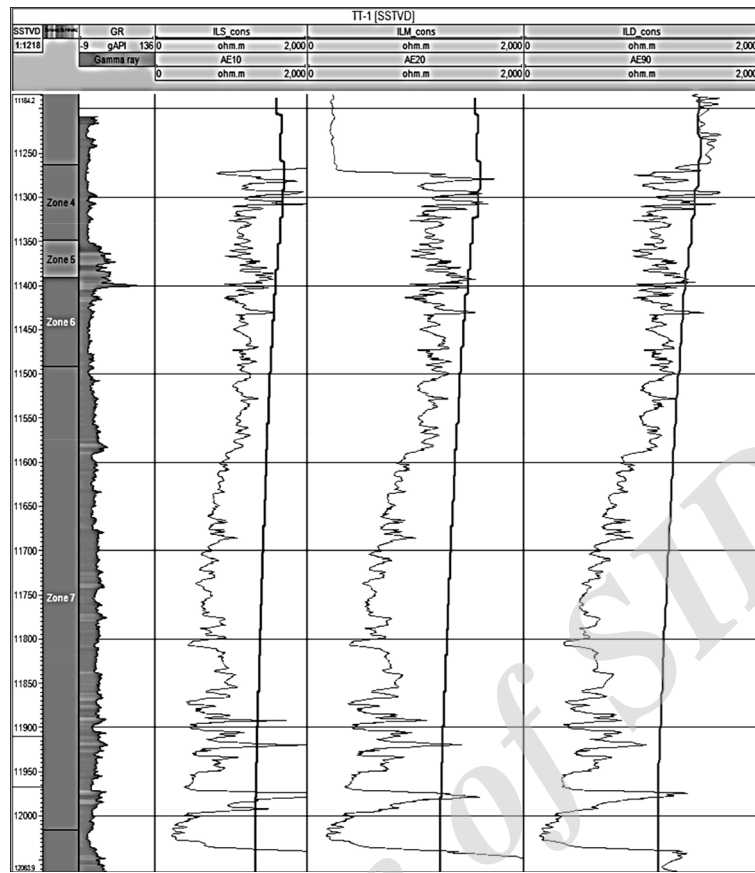
برای تبدیل مکعب اشباع و شوری به نمودارهای مقاومت با عمق نفوذ متفاوت، چرخه کاری در پترن



شکل ۸ فاکتور هندسی آرایش‌های کم عمق (ILS)، عمق متوسط (ILM) و عمیق (ILD) دستگاه مقاومت القایی.

1	With 3D grid	Single_well[U]	Use: Specified grid
2	Numeric expression	\$STATION	= 11200
3	Numeric expression	\$TD	= 12200
4			
5	Deep Induction Prop. Construction		
6	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILD_PROP=#(Distance_from_TT_1<60.GF_ILD(Distance_from_TT_1).0) Use File
7	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILD_PROP=#(GF_ILD_PROP<0.0.GF_ILD_PROP) Use File
8	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILD_PROP=GF_ILD_PROP * RT Use File
9	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILD_FILTER=U Use File
10			
11	Medium Induction Prop. Construction		
12	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILM_PROP=#(Distance_from_TT_1<40.GF_ILM(Distance_from_TT_1).0) Use File
13	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILM_PROP=#(GF_ILM_PROP<0.0.GF_ILM_PROP) Use File
14	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILM_PROP=GF_ILM_PROP * RT Use File
15	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILM_FILTER=U Use File
16			
17	Shallow Induction Prop. Construction		
18	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILS_PROP=#(Distance_from_TT_1<20.GF_ILS(Distance_from_TT_1).0) Use File
19	Property calculator	Use filter	Expression or file: GF_ILS_PROP=#(GF_ILS_PROP<0.0.GF_ILS_PROP) Use File
20	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILS_PROP=GF_ILS_PROP * RT Use File
21	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILS_FILTER=U Use File
22			
23	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILD_MODEL=U Use File
24	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILM_MODEL=U Use File
25	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILS_MODEL=U Use File
26			
27	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILS_log=U Use File
28	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILM_log=U Use File
29	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILD_log=U Use File
30			
31	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILD_cons=U Use File
32	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILM_cons=U Use File
33	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILS_cons=U Use File
34			
35	For loop Variable: \$STATION From: 11200 To: \$TD-10		
36			
37	Property calculator	Use filter	Expression or file: temp_ILD=#(Elevation_general<\$STATION+25 And Elevation_general>\$STATION-25 And Distance_fro Use File
38	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILD_MODEL=#(Elevation_general<\$STATION+25 And Elevation_general>\$STATION-25 And Distance Use File
39	Property calculator	Use filter	Expression or file: \$ILD_PROP_avg=round (ILD_MODEL.Mean) Use File
40	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILD_cons=#(Elevation_general>\$STATK Use File
41			
42	Property calculator	Use filter	Expression or file: temp_ILM=#(Elevation_general<\$STATION+20 And Elevation_general>\$STATION-20 And Distance_frc Use File
43	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILM_MODEL=#(Elevation_general<\$STATION+20 And Elevation_general>\$STATION-20 And Distance Use File
44	Property calculator	Use filter	Expression or file: \$ILM_PROP_avg=round (ILM_MODEL.Mean) Use File
45	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILM_cons=#(Elevation_general>\$STATK Use File
46			
47	Property calculator	Use filter	Expression or file: temp_ILS=#(Elevation_general<\$STATION+15 And Elevation_general>\$STATION-15 And Distance_fro Use File
48	Property calculator	Use filter	Expression or file: ILS_MODEL=#(Elevation_general<\$STATION+15 And Elevation_general>\$STATION-15 And Distance Use File
49	Property calculator	Use filter	Expression or file: \$ILS_PROP_avg=round (ILS_MODEL.Mean) Use File
50	Well Log calculator	Well input: TT-1	Use search filter Expression or file: ILS_cons=#(Elevation_general>\$STATK Use File
51			
52	Numeric expression	\$STATION	= \$STATION+10
53	Pause Duration:	0.01	
54	Message	Station = \$STATION (ft)	
55	Message	ILD=\$ILD_PROP_avg (OHM.M) ILM=\$ILM_PROP_avg (OHM.M) ILS=\$ILS_PROP_avg (OHM.M)	
56	Message	~~~~~	
57	End loop		

شکل ۹ چرخه کار مورد استفاده برای بازسازی نمودارهای مقاومت الکتریکی از مدل سه بعدی مقاومت الکتریکی.



شکل ۱۰ نمودارهای مقاومت استخراج شده از مدل و مقاومت الکتریکی مدل در محل چاه.

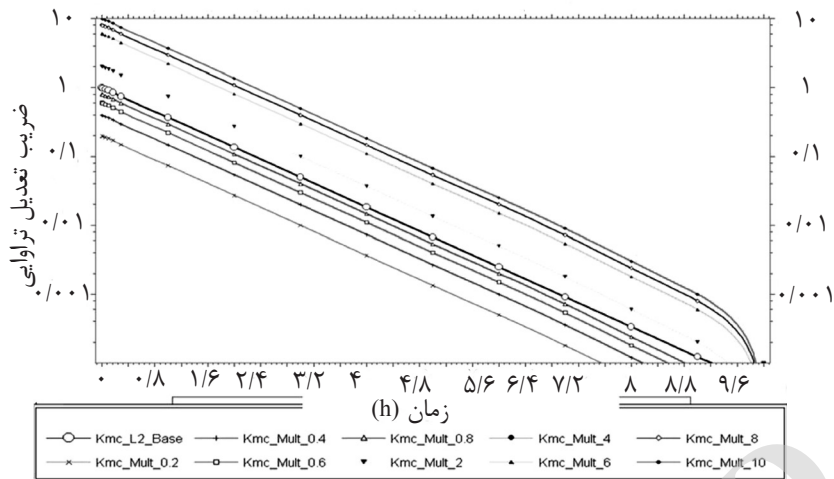
منظور بهبود این انطباق، مخزن مورد مطالعه به ۶ بخش همگن (از نظر تخلخل و تراوایی) تقسیم شد. سپس چرخه کاری تهیه شد تا در هر یک از این بخشها، ضریب ۰/۱ تا ۱۰ را بر تراوایی کیک گل اعمال کرده و خطای انطباق نمودارهای مقاومت را محاسبه کند. منحنی‌های تراوایی کیک گل برای لایه شماره ۲ (به عنوان نمونه) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

در این شکل، محور افقی زمان (بر حسب ساعت) و محور قائم تراوایی کیک گل است که بصورت لگاریتمی نمایش داده شده است. منحنی اصلی تراوایی کیک گل با نام "Kmc_L2_Base" می‌باشد که ضرایب ۰/۱ تا ۱۰ بر روی آن اعمال شده است. لازم به ذکر است که ضریب تعدیل برای تک تک زون‌ها اعمال شده است. لذا مقادیر نهایی انتخاب شده برای زون‌های مختلف، متفاوت است.

در زون‌های بالای مخزن که غالباً نفتی هستند تطابق نسبتاً خوبی بین نمودار بازسازی شده و نمودار مقاومت واقعی وجود دارد ولی در زون‌های پایین‌تر اختلاف این دو نمودار زیادتر می‌شود علت اصلی این اختلاف خطای مدل رخنه است که ناشی از عدم قطعیت پارامترهای کیک گل است. از این رو نیاز است که خصوصیت اصلی کیک گل یعنی تراوایی آن بهینه شود.

بهینه‌سازی تراوایی کیک گل

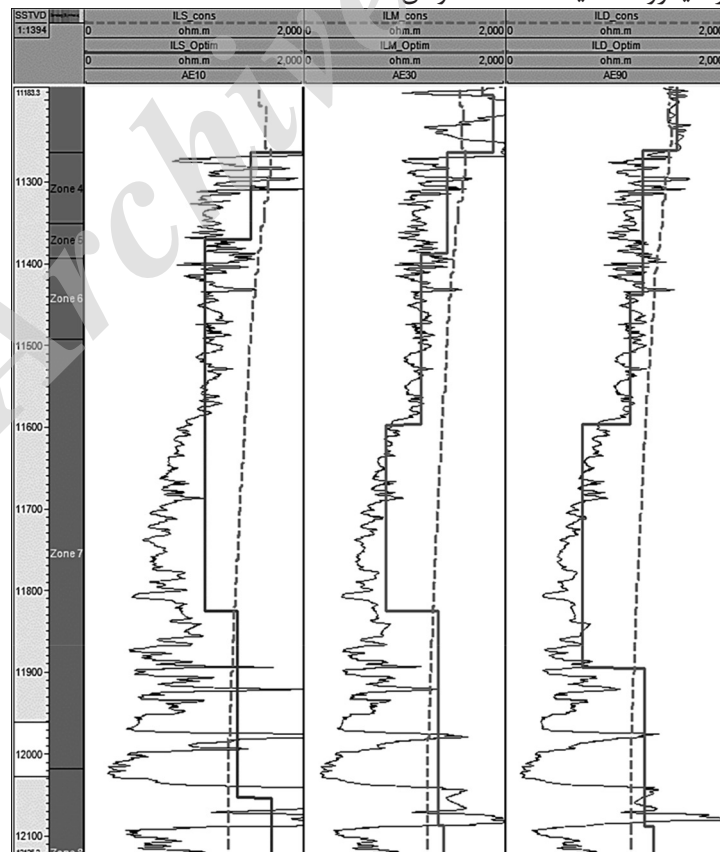
برای بهبود مدل‌سازی رخنه، پارامتر تعیین کننده توزیع رخنه یعنی تراوایی کیک گل باید بهینه شود. تراوایی کیک گل که در مدل پایه استفاده شد بوسیله شبیه ساز کیک گل که مبتنی بر مدل آزمایشگاهی دیوان و چنورت است، محاسبه گردید. پس از استفاده در شبیه ساز رخنه گل حفاری، انطباق قابل قبولی بین نمودارهای مقاومت بازسازی شده و نمودارهای مقاومت واقعی حاصل نشد. به



شکل ۱۱ منحنی‌های تراوایی کیک گل که در چرخه بهینه‌سازی تراوایی کیک گل استفاده شد.

گل حفاری، خواص سیال مخزن و مشخصات پتروفیزیکی مخزن با شرایط آزمایشگاه است. ضریب تعدیل اعمالی سعی در تصحیح این ناهمخوانی دارد. نمودار مقاومت کم عمق، عمق متوسط و عمیق بازسازی شده پس از بهینه‌سازی تراوایی کیک گل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

علت اینکه ضریب تعدیل در محدوده ۰/۱ تا ۱۰ تغییر داده می‌شود این است که تراوایی کیک گل از شبیه‌ساز کیک گل به دست آمده است که این شبیه‌ساز با داده‌های آزمایشگاهی بهینه‌سازی شده است لذا اختلاف زیادی با واقعیت ندارد. ناهمخوانی مشاهده شده در چاه مورد مطالعه به دلیل تفاوت شرایط چاه نظیر فشار هیدرواستاتیک، دما، خواص



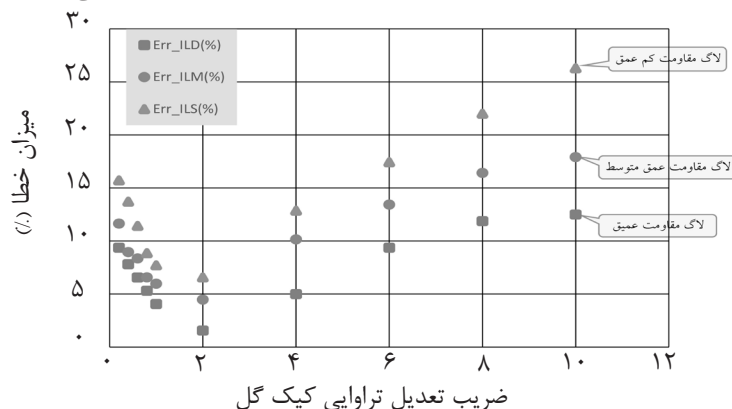
شکل ۱۲ نمودار مقاومت واقعی (مشکی)، نمودار مقاومت بازسازی شده (خط چین) و نمودار مقاومت بازسازی شده پس از بهینه‌سازی تراوایی کیک گل (خط پر).

بحث و نتایج

مقاومت واقعی بهبود چشمگیری یافت و تراوایی کیک گل که در مدل قبلی تنها بر اساس مدل آزمایشگاهی لحاظ شده بود با افزودن نتایج شبیه‌سازی سه بعدی بهبود یافت. در نتیجه تلفیق مدل تجربی با نتایج شبیه‌سازی منجر به بهبود مدل‌سازی فرآیند رخنه و مقطع برشی اشباع و فشار گردید. میزان حاصلجمع خطای هر شبیه‌سازی که در واقع اختلاف بین نمودار مقاومت واقعی و نمودار مقاومت بازسازی شده است در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

منحنی‌های خطای نمودارهای بازسازی شده (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که میزان خطا برای نمودار مقاومت کم عمق نسبت به نمودار مقاومت عمیق افزایش می‌یابد. میانگین خطا برای این سه نمودار به ترتیب ۵۰، ۳۵ و $23 \Omega m$ می‌باشد با توجه به ابعاد سلول‌های مدل که در حد ۳۰ cm است و بازسازی نمودار مقاومت کم عمق در حد یک یا حداکثر ۲ سلول در امتداد شعاعی چاه انجام می‌شود لذا کوچکترین خطا در محاسبه میزان اشباع در این سلول‌ها منجر به خطای بالایی در بازسازی نمودار مقاومت می‌شود در حالی که برای بازسازی نمودار مقاومت عمیق تا ۱۰ سلول در امتداد شعاعی میانگین‌گیری می‌شود که بخشی از این سلول‌ها دارای اشباع اولیه بوده و رخنه تا سلول‌های عمیق‌تر پیشروی نکرده است و در صورت بروز خطا در محاسبه اشباع سلول‌های نزدیک چاه، این خطا با میانگین‌گیری سلول‌های دورتر به صورت نسبی کاهش می‌یابد.

برای راستی آزمایی مدل رخنه به دست آمده، نمودارهای مقاومت القایی آرایه‌ای که تغییرات شعاعی مقاومت الکتریکی مدل را اندازه‌گیری می‌کنند، بازسازی شد. مقایسه نمودارهای مقاومت واقعی با نمودارهای مقاومت بازسازی شده در مدل اولیه رخنه گل حفاری نشان داد که اختلاف این دو نسبتاً زیاد است که ناشی از عدم تطابق مدل رخنه به دست آمده با واقعیت است. طبق بررسی‌های انجام شده بر مبنای آنالیز حساسیت، علت این عدم تطابق عدم قطعیت بالا در تعیین خواص کیک گل است بدین معنی که افت تراوایی کیک گل با گذشت زمان که در مدل لحاظ شده بود تنها مبتنی بر یک مدل آزمایشگاهی است که با فرضیاتی ارائه شده است به عنوان مثال دما ثابت در نظر گرفته شده و تراکم‌پذیری کیک گل در نظر گرفته نشده است. در نتیجه، مدل رخنه به دست آمده نیازمند کالیبراسیون با داده واقعی (نمودارهای مقاومت القایی) است لذا مدل اولیه رخنه با وارون‌سازی نمودارهای مقاومت تعدیل شد. برای این منظور زون مخزنی به بازه‌های عمقی ریزتری که خواص مخزنی ثابتی دارند تقسیم شد و چرخه کاری طراحی شد تا در هر یک از این بازه‌ها با وارون‌سازی نمودارهای مقاومت و مقایسه با نمودار مقاومت واقعی، تراوایی کیک گل برای آن بازه بهینه شود. پس از پیاده‌سازی این الگوریتم، تطابق نمودارهای مقاومت بازسازی شده با نمودارهای



شکل ۱۳ مقدار خطای نمودار مقاومت مستخرج از مدل (محور قائم) و ضرایب اعمالی برای تراوایی کیک گل.

فرآیند را در نظر می‌گیرند قادر به مدل کردن کامل این پدیده نیستند. در این مطالعه از نمودارهای مقاومت القایی که مستقیماً متأثر از توزیع رخنه گل حفاری هستند، استفاده شد تا عامل کنترل کننده رخنه گل حفاری (تراوایی کیک گل) بهینه شود. بهینه‌سازی رخنه گل حفاری از طریق وارون‌سازی نمودارهای مقاومت القایی انجام شد که این فرآیند توسط برنامه کامپیوتری به شکل چرخه کار در نرم‌افزار پترل انجام گردید. در غالب مطالعات مشابه وارون‌سازی نمودار مقاومت صرفاً با داده‌های مدل سه بعدی انجام شده و خصوصیات دستگاه نمودارگیری در آن لحاظ نمی‌شود. در پژوهش حاضر به دلیل اهمیت خصوصیات دستگاه در افزایش صحت و دقت بازسازی نمودارهای مقاومت، ابتدا بر اساس آرایش واقعی دستگاه‌های مقاومت، این دستگاه‌ها طراحی و کالیبره شده و فاکتور هندسی برای سه نمودار اصلی مقاومت به دست آمد. فاکتور هندسی که به صورت ضریب وزنی در مدل سه بعدی لحاظ شد تا نمودارهای مقاومت بازسازی شده منطبق بر واقعیت گردد. مقدار خطای انطباق نمودارهای مقاومت بازسازی شده با نمودارهای مقاومت واقعی به عنوان معیار کمی بهبود توزیع رخنه گل حفاری در مخزن حاکی از بهبود چشمگیر مدل‌سازی رخنه گل حفاری با بهینه‌سازی خصوصیات کیک گل می‌باشد.

علائم و نشانه‌ها

μ : ویسکوزیته (cp)

T_{mc} : ضخامت مغزه (cm)

φ_{mc} : تخلخل کیک گل

φ_{mc0} : تخلخل کیک گل در فشار مبنا

K_{mc} : تراوایی کیک گل (mD)

K_{mc} : تراوایی کیک گل در فشار مبنا (mD)

$q(t)$: دبی (cm^3/sec)

P_{mc} : فشار کیک گل (psi)

V : ضریب تراکم پذیری

δ : ضریب تخلخل-تراوایی

چنین رفتاری در پاسخ نمودارهای واقعی نیز دیده می‌شود و نمودارهایی که عمق نفوذ کمی دارند نظیر نمودارهای مقاومت کم عمق، بیشتر تحت تاثیر شرایط چاه قرار می‌گیرند و میزان عدم قطعیت این نمودارها به نسبت بالاتر از نمودارهای با عمق نفوذ زیاد است.

میزان انطباق نمودار مقاومت بازسازی شده با نمودارهای مقاومت واقعی در زونهای بالایی مخزن مورد مطالعه بسیار خوب می‌باشد ولی در بخش پایینی زون ۷ و زون ۸ این درصد انطباق کاهش می‌یابد به نظر می‌رسد که این عدم انطباق ناشی از حضور کانی‌های رسی در این بخش باشد. در تبدیل مکعب اشباع به مکعب مقاومت الکتریکی از رابطه آرچی استفاده شد. این معادله برای لایه‌های عاری از شیل کاربرد مناسبی دارد ولی برای محاسبه اشباع در لایه‌های شیلی دارای خطای زیادی می‌باشد لذا در لایه‌های بالایی این مخزن که درصد شیل تقریباً صفر است مقدار مقاومت الکتریکی لایه‌ها با دقت بالایی محاسبه شده است در حالی که در لایه‌های پایینی حضور شیل باعث خطا در محاسبه مکعب مقاومت الکتریکی شده که به دنبال آن نمودار مقاومت بازسازی شده نیز با خطای بالایی همراه شده است. در لایه‌های پایین مخزن، اشباع آب بالا می‌باشد در حالی که لایه‌های بالایی تقریباً اشباع از نفت می‌باشند. با عنایت به اینکه گل حفاری تزریقی، آب شیرین با مقاومت الکتریکی بالا می‌باشد لذا همسانی رفتار الکتریکی این دو سیال که در زون‌های بالایی مجاور هم قرار می‌گیرند منجر به تطابق بهتر نسبت به زون‌های پایین شده است.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که رخنه گل حفاری، فرآیندی پیچیده است که متأثر از خصوصیات مخزن، شرایط محیط چاه و گل حفاری است لذا مدل‌های آزمایشگاهی که تنها جوانب اصلی این

مراجع

- [1]. Civan F., "Reservoir formation damage fundamentals," Modeling, Assessment, and Mitigation, Gulf Professional Publishing, p. 1042.
- [2]. Dewan J. T., and Chenevert M. E., "A model for filtration of water-Base mud during drilling: determination of mudcake Petrophysics parameters," 42, No. 3, pp. 237-250, 2001.
- [3]. Civan F., "A Multi-phase mud filtrate invasion and wellbore filter cake formation model," SPE 28709, 1994
- [4]. Parn-anurak S. and W. Engler T., "Modeling of fluid filtration and near-wellbore damage along a horizontal well," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 46, Issue 3, pp. 149–160, 15 March 2005.
- [5]. Wu J. Torres-Verdin C., Sepehrnoori K. and Delshad M., "Numerical simulation of mud-filtrate invasion in deviated wells," SPE Reservoir Evaluation & Engineering, SPE 87919, 2004.
- [6]. Anderson B. and Barber T., "Induction logging," Schlumberger Wireline & Testing, 1997.
- [7]. Serra O. and Serra L., "Well logging data acquisition and applications," Serralog, p. 688, Book, 2004.
- [8]. Ferguson C. K., and Klotz J. A., "Filtration of mud during drilling," Petroleum Trans. of AIME, 201, pp. 29-42, 1954.
- [9]. Fordham E. J., Ladva H. K. J. and Hall C., "Dynamic filtration of bentonite muds under different flow conditions," Paper SPE 18038 Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, TX, 1988.
- [10]. Bezemer C., and Havenaar I., "Filtration behavior of circulating drilling fluids," SPE Journal, No. 4, pp. 292-298, 1966.
- [11]. Outmans H. D., "Mechanics of static and dynamic filtration in the borehole," SPE Journal, September, pp. 236-244, 1963.
- [12]. Stamatakis K. and Tien C., "Cake formation and growth in cake filtration," Chemical Engineering Science, Vol 46, No. 8, p. 1917, 1981.
- [13]. Wu J., Torres-Verdín C., Sepehrnoori K. and Proett M. A., "The influence of waterbase mud properties and petrophysical parameters on mudcake growth, filtrate invasion, and formation pressure," Petrophysics, Vol. 46, No. 1, pp. 14-32, 2005.