

## تعریف

یک نیاز و مساله کلیدی در حفاری چاه‌های جهت‌دار و افقی، حفظ مسیر چاه درون بازه تولیدی است. این نکته زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که هدف، رسیدن به بیشترین میزان بازیافت هیدروکربن در حفاری لایه‌های نازک و مخازن گسلی و چین‌خورده پیچیده، باشد. پس از شناسایی و تعریف کلی هدف نهایی عملیات حفاری (مخزن) از طریق مطالعات لرزه‌نگاری، این عدم پیش‌بینی

## قسمت اول

# بهینه‌سازی

# عملیات حفاری

# چاه‌های جهت‌دار

محمد بشیر ذرتی  
مهندسی حفاری و استخراج نفت

مته فراهم می‌آورد، مهندس حفار را برای حفظ مسیر چاه<sup>۳</sup> در مخازن با ضخامت بسیار کم توانمندی سازد. در یک تعریف خوب می‌توان ژئوستیرینگ را به عنوان «حفاری یک چاه افقی یا جهت‌دار بیان کرد که در آن، تصمیم‌گیری برای نحوه تنظیم و کنترل مسیر حفاری، حفظ آن در یک مسیر از پیش تعیین شده و یا تغییر آن از مسیر اولیه، براساس داده‌های زمین‌شناسی و مخزن صورت می‌گیرد. که به طور مستقیم و در حین عملیات حفاری، در سطح در اختیار تیم ژئوستیرینگ قرار می‌گیرد» و یا به بیان ساده‌تر، ژئوستیرینگ، بهینه‌نمودن عملیات قرارگیری چاه<sup>۴</sup> در یک مخزن تولیدی برای به حداکثر رساندن دو مشخصه است:

- ۱) بازدهی و کارایی عملیات حفاری
- ۲) تولید هیدروکربن.

در واقع ژئوستیرینگ پیش‌بینی زمین‌شناسی در محل مته حفاری با استفاده از لاگ‌های هم‌زمان به دست آمده توسط سیستم MWD، همچنین بهره‌گیری از نتایج آن برای اصلاح و قطعی کردن تفاسیر زمین‌شناسی جهت تنظیم و انطباق ضروری مسیر چاه به منظور بهینه‌سازی

عملیات حفاری چاه‌های جهت‌دار می‌باشد.

تجسم دوبعدی و سه‌بعدی ژئوستیرینگ، در واقع فراهم نمودن یک درک و شناسایی بهتر از سازندها و مسیر چاه در حین حفاری و کاهش ریسک در فرایند نحوه کنترل مسیر چاه توسط تیم حفاری است. این تعریف و اهمیت این تکنولوژی زمانی بارزتر می‌گردد که بدانیم هنگام هدایت چاه در مخازن کمپلکس، خطا در محاسبه عمق عمودی به میزان ۵ فوت، می‌تواند باعث شکست پروژه گردد.

حفاری جهت‌دار با کاهش نیاز به تعداد سکوها و چاه‌های حفاری برای توسعه یک میدان می‌تواند سبب بهبود عملیات تولید و بازگشت سرمایه‌گردد و در این میان، ژئوستیرینگ ثابت‌نموده که پربازده‌ترین راه برای حفر چاه‌های جهت‌دار و افقی است به گونه‌ای که امروزه ژئوستیرینگ به صورت یک بخش اساسی در توسعه مدرن میداين نتهی به شمار می‌رود، هنگامی که دستیابی به مخازن ساده بر پایه توانمندی‌های دانش امروز نیز بی‌پاسخ می‌ماند. چندین تکنولوژی این امر را ممکن می‌سازند که شامل: سیستم‌های هدایت‌شونده<sup>۵</sup> معتبر، اندازه‌گیری‌ها و ارزیابی‌های جدید فیزیکی سازند، مدل‌سازی اطلاعات نمودارگیری و نقشه‌برداری مخزن<sup>۶</sup> با کمک عملیات لرزه‌نگاری سه‌بعدی است.

## اصول ژئوستیرینگ:

هفت پارامتر به عنوان اصول اساسی تکنولوژی ژئوستیرینگ مطرح می‌گردند که ذیلاً راجع به آنها بحث خواهد شد:

۱) تیم ژئوستیرینگ: حفر یک چاه جهت‌دار با زاویه زیاد، چالش‌هایی را

۱۴  
شماره ۲۰ - فروردین ۱۳۸۴

1) Geosteering

2) Real-time

3) Well trajectory

4) Wellbore placement

5) Steerable

6) Reservoir mapping



برای هر شیوه که دربرگیرنده به همراه دارد. مهندسان حفار باید توانایی رویارویی و سروکار با مخازن متحرک<sup>۷</sup>، کنترل سه بعدی مسیر حفاری و نیز آشنایی با زمین شناسی به منظور وفق دادن اطلاعات ژئوفیزیست‌ها را داشته باشند. زمین شناسان و ژئوفیزیست‌ها نیز باید با دانش جدید اندازه‌گیری‌ها و تفاوت کاربرد ابزارهای مربوط در حفاری‌های عمودی و کج آشنا باشند و نهایتاً تمام این اطلاعات باید در بهینه‌سازی موقعیت چاه شامل مختصات سه بعدی و جایگاه آن در ستون زمین شناسی، به منظور افزایش کلی ارزش پروژه به کار گرفته شود.

موفقیت یک پروژه ژئوستیرینگ بسته به میزان و کیفیت اطلاعاتی است که بین گروه‌های مختلف تیم مبادله می‌گردد. انتخاب هدف و مقصد حفاری، طراحی مسیر حفاری و طراحی‌های تکمیل چاهی همراه با پیچیدگی‌های روزافزون این فرایندها، امروز کاملاً به هم مرتبطند. فرایند طراحی‌های چاه از مسیرهای سه بعدی پیچیده که اغلب دربرگیرنده مخازن چندگانه‌اند، استفاده می‌نماید، عملیات تکمیل چاه‌های جهت‌دار مشکلات خاص خود را ایجاد می‌کند و تمامی این ضرورت‌ها باید جهت دستیابی به مخازن مورد نظر و اهداف طراحی و تکمیل چاه، موازنه گردد.

یک تیم موفق شامل مهندسان حفار، زمین شناس، ژئوفیزیست، مهندس مخزن از سوی شرکت کارفرما و متخصص MWD/LWD و نمودارگیری، مهندس حفاری کج و متخصص ژئوستیرینگ از سوی شرکت پیمانکار می‌باشد. فعالیت هماهنگ این اعضا منجر به انتخاب بهینه مقصد حفاری می‌شود. به دلیل ارزش

اطلاعات، اظهار نظر کلیه اعضای تیم ضروری است و تصمیمی که براساس راه‌ها و چاره‌های گوناگون گرفته شود، تضمین می‌کند که چاه براساس مدل زمانی برنامه چاه بودجه حفاری گردد و تمامی واقعیات مطرح را پوشش دهد.

۲) درک ساختار زمین شناسی: تحلیل دقیق ساختار زمین شناسی با استفاده از ترکیبی از اطلاعات لرزه نگاری، روابط لاگ‌های افسست و اطلاعات دیگر پتروفیزیکی انجام می‌گیرد. لرزه نگاری، مشخصه‌های زمین شناسی را در ابعاد بزرگ نظیر شیب، گسل، گستردگی جانبی و دگرشیبی، نمایان می‌سازد و در این میان نقاط نامشخص بسیاری در ارزیابی این مشخصه‌ها به چشم می‌خورد که بزرگی این نقاط کور ارزیابی با نوع و میزان اطلاعات و نیز مدل‌های ساختاری مورد استفاده مرتبط است.

این نوع مطالعه زمین، فرم‌های زمین شناسی را با تفکیک پذیری ۲۵-۵ فوت تعریف می‌کند و از آنجایی که در حفاری جهت‌دار مقصد، اندازه کوچک تری دارد، دقت و میزان تفکیک پذیری بالاتری مورد نیاز است که این مهم از راه تلفیق اطلاعات پتروفیزیکی و نیز مغزه‌گیری با لرزه نگاری حاصل می‌گردد. مشخصه‌های زمین شناسی در ابعاد کوچک نظیر لایه‌های باریک، رشته‌های شیلی و تغییرات کیفی ماسه سنگ‌ها، اکنون قابل شناسی گردیده، دقت محاسبه شیب بهبود یافته و نقاط کور در ارزیابی این مشخصه‌های ساختاری کوچک، کاهش می‌یابد. همین ساختارهای کوچک هستند که می‌توانند باعث رخدادهای غیرمنتظره زمین شناسی در طول مسیر

حفاری چاه گردند که نتیجه آن گم کردن ناحیه و موقعیت چاه خواهد بود. اگر یک رشته شیلی ۲ فوتی در حفاری عمودی ممکن است به چشم نیاید ولی همین لایه باریک می‌تواند در حفاری چاهی ۸۱/۲ اینچ، موازی با لایه بی نهایت به نظر آید.

شناسایی سه بعدی نحوه توزیع این ساختارهای کوچک به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند از امکان برخورد با ساختارهای غیرمنتظره زمین شناسی هنگام حفاری جلوگیری نماید و کل ضخامت حفاری شده را افزایش دهد.

با مطالعه دقیق باید تاثیر نحوه قرارگیری چاه در مخزن خاص مورد نظر بر روی میزان تولید بررسی شود. تلفیق اطلاعات بالا و تحلیل و ارزیابی هزینه‌های راه‌های گوناگون، به انتخاب بهینه مقصد حفاری و طراحی چاه می‌انجامد.

۳) فهم اطلاعات پتروفیزیکی و استفاده از آن: روش‌های اندازه‌گیری مختلفی با کاربردهای خاص وجود دارد که می‌تواند در حین حفاری‌های افقی در ارزیابی سازند استفاده شود. در مخازن کربناته، مقاومت، بسیار بالا و پرتوگاما (GR) دریافتی غیرعادی است. اندازه‌گیری چگالی به خاطر نفوذ پذیری پایین از دقت کمی برخوردار است و عملاً لاگ نوترونی بهترین گزینه می‌باشد. فاکتورهای دیگر نظیر شرایط چاه، محدودیت زمانی عملیات حفاری، محدودیت‌های طراحی تجهیزات درون چاهی و نیز میزان دبی چاه، محدودیت دیگری را در انتخاب نوع اندازه‌گیری مورد نیاز اعمال می‌کند. یک کمیت اندازه‌گیری باید براساس میزان فایده آن در عملیات ژئوستیرینگ ارزیابی گردد.



استفاده اولیه داده‌های پتروفیزیکی در ژئوستیرینگ، تشخیص ساختار زمین‌شناسی بوده و ارزیابی سازندگی، استفاده ثانویه محسوب می‌شود.

موفقیت پروژه ژئوستیرینگ بسته به قرارگیری همزمان و کنترل شده مسیر چاه در ساختار مقصد می‌باشد. لذا اندازه‌گیری‌ها در محل و یا نزدیک به مته و نیز سنسورهای محاسبه انحراف در عملیات ژئوستیرینگ از اهمیت بسیاری برخوردارند.

ارزیابی سازندگی باید در منظر کار قرار داشته باشد ولی صرف توجه ویژه به یک کمیت اندازه‌گیری شده از منظر ارزیابی سازندگی می‌تواند توانایی ژئوستیر کردن را محدود نماید.

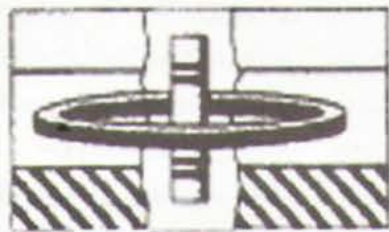
تغییر در خواص پتروفیزیکی معرف مرزهای لیتولوژیکی و سیالی است که این داده‌ها باید در اصلاح مدل ساختاری اولیه زمین در هنگام شروع پروژه، استفاده شود. شکست در ربط دادن صحیح تغییرات پتروفیزیکی به تفسیرهای ساختاری مربوط، همواره به شکست در عملیات ژئوستیرینگ خواهد انجامید.

محاسبات نمودارگیری تماماً متأثر از ناهمگنی می‌باشند. ناهمگنی شرایطی است که سنسورهای اندازه‌گیری نتایج متفاوتی را در جهت‌های مختلف در یک واحد حجمی، ثبت نمایند. دو نوع عمده

اندازه‌گیری‌های مقاومت الکتریکی و القایی هستند که هر دو به‌طور مشخصی متأثر از ناهمگنی هستند (شکل ۱). ناهمگنی مقاومتی به گوناگونی اندازه ذرات بین طبقات و یا لایه‌بندی‌های نازک، بستگی دارد، این بی‌نظمی‌ها کوچک‌تر از آن است که توسط بسیاری از ابزارهای مقاومت تشخیص داده شود و سبب می‌شود تا مقاومت اندازه‌گیری شده در صفحه افقی ( $R_H$ ) کمتر از مقاومت در صفحه عمودی ( $R_V$ ) باشد. نسبت  $R_V/R_H$  از یک تا ۵ متغیر است و هنگامی که این نسبت از ۱۰ بزرگ‌تر گردد، تاثیرات ناهمگنی بر داده‌های نمودارگیری بارز می‌شود. علاوه بر تاثیرات ناهمگنی، محاسبات

مقاومت القایی در چاه‌های با زاویه بزرگ از رگه‌های قطبیدگی در مرزهای طبقه تاثیر می‌پذیرد. این قطبیدگی‌ها به‌صورتی کاملاً مشخص و متمایز در تشخیص مرز به‌کار می‌روند. آنالیز کمیتی لاگ مقاومت در حضور این رگه‌ها ناممکن است.

۴) تشخیص مرزهای طبقه: چنانچه در بخش قبل اشاره شد، وجود رگه‌های قطبیدگی در محاسبات مقاومت القایی می‌تواند در تشخیص مرز به‌کار رود. این مساله زمانی عملی است که ضخامت طبقه بزرگ‌تر از ۵ فوت باشد. وجود قطبیدگی‌ها در لایه‌بندی‌ها و طبقات نازک می‌تواند محاسبه درست مقاومت را با مشکل روبرو سازد، لذا در لایه‌های نازک این مقاومت الکتریکی است که تشخیص



1a) وسایلی که بر اساس متد القایی کار می‌کنند به‌صورت یک مسیریضی در راستای عمود بر ابزار، اطلاعات را می‌خوانند. اندازه‌گیری به‌صورت موثر در هر لایه‌ای دیده می‌شود.



2a) وسیله‌های الکتریکی در مسیر جریان موازی با ابزار اندازه‌گیری را ثبت می‌کنند.

(a)



1b) مسیریضی موازی وسایل القایی به وسیله لایه‌های با مقاومت بالا بازمی‌شوند و مقدار بالایی را می‌خوانند.

2b) وسایل الکتریکی با جریان کوتاه به وسیله لایه‌های با مقاومت پایین بازمی‌شوند و مقدار پایین را می‌خوانند.

(b)

شکل ۱) سنسورهای مقاومتی ژئومتری را در راستای (a) چاه‌های عمودی و (b) چاه‌های افقی اندازه‌گیری‌کنند.



بترمز طبقه را فراهم می‌آورد.

بازرسی‌های لاگ مقاومت القایی، مقاومت را عمود بر محور ابزار ثبت می‌نماید. این ابزارها براساس تغییر عمق مورد بررسی طراحی شده‌اند و تشخیص مرزهای عمودی دورتری از چاه را ممکن می‌سازد. مدل‌سازی امواج دریافتی در ابزار می‌تواند برای تخمین فاصله تا مرز به کار رود و به طور نظری فاصله‌ای را که باید حفرتمود تا به نزدیک‌ترین مرز رسید، قابل محاسبه نماید. این فاصله، «فاصله پیش‌رو در سیستم ژئوستیرینگ»<sup>۸</sup> نام دارد و محاسبات مربوط به آن ساختار سطح یا پیوسته را در نظر دارد و تغییرات شیب و یا وجود گسل‌های کوچک قابل شناسایی نیست. تنها روش موثر در حین حفاری همراه و تحت محدودیت‌های تفسیر ساختاری مسیر، دریافت اطلاعات از محل و یا بسیار نزدیک به مته و نیز توانایی محاسبه آزیموث (انحراف در صفحه افقی) چاه است.

تخمین و اطمینان به فاصله پیش‌رو تا مرز لایه بعدی، براساس میزان عمق قابل بررسی، می‌تواند سبب گمراهی تیم حفاری گردد. تشخیص هر مرزی براساس میزان تغییر در لاگ مقاومت صورت می‌پذیرد، یک تغییر ۲۰ درصدی در اندازه مقاومت برای تعیین مرز طبقه در نظر گرفته می‌شود، هرچند که تغییرات در اندازه ذرات و نیز اشباع‌شدگی می‌تواند سبب نمود تغییر ۱۰ تا ۲۰ درصدی در مقاومت شود. اندازه‌گیری‌های الکتریکی مقاومت، برای تشخیص مرزهایی با مقاومت پایین، بهتر است.

(۵) مدل‌سازی مقاومت<sup>۹</sup>: اختلالی که در نتیجه تاثیر ناهمگنی بر لاگ مقاومت ایجاد می‌شود، می‌تواند با مدل‌سازی

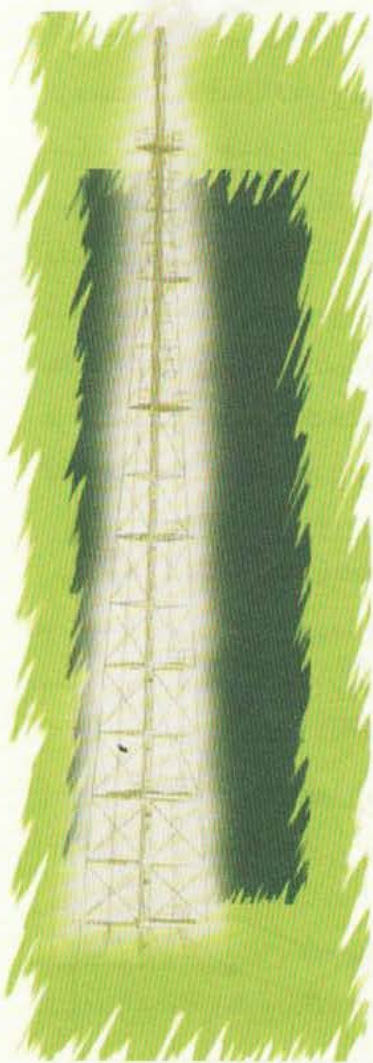
انحرافی و افقی که در میان طبقات زاویه‌دار حفرت شده باشند، خط‌هایی را در شناسایی و نقشه‌برداری ساختمانی این چاه‌ها نمایان می‌سازند، در این گونه موارد روابط صحیح فقط هنگامی به دست می‌آیند که از پارامترهای TST و TVT در آنها استفاده شود. ■

“ ادامه دارد ”

پیاپی از داده‌های چاه‌های افست کاهش یابد. نمودارگیری، یک بعدی و روابط معمولاً خطی است و استفاده از داده‌های نمودارگیری برای بیان مشخصه‌های سه بعدی سازند مناسب نیست. آنچه که در چاه‌ها و مدل‌های افست وجود ندارد نظیر لایه‌بندی‌های شیلی، منجر به روابط و تفسیرهای ساختاری نادرستی خواهد شد. ارزش یک مدل‌سازی به قابلیت آن در استفاده از داده‌های کسب‌شده از ابزار مدل برای تشخیص وجود یک مرز چیده‌شود. مدل‌سازی همچنین در فهم میزان ناهمگنی کاربرد دارد ولی اطلاعات کافی را از جهت‌گیری مرز به دست نمی‌دهد. تمامی اطلاعات نمودارگیری بدین صورت محدود می‌گردد. نکته حیاتی در پروژه‌های ژئوستیرینگ، تشخیص مرز می‌باشد و این که آیا با استفاده از این اطلاعات، تست‌های آزیموثی برای تشخیص جهت‌گیری مرز مناسب است یا خیر.

(۶) تحلیل کمی مشخصات طبقات: پس از تعیین موقعیت و جهت یک طبقه، آنالیز کمی شامل ارزیابی سازند می‌تواند انجام گیرد. چندترم جدید برای نمایاندن سازندی که با یک چاه زاویه بزرگ حفاری گردیده مورد نیاز است که عبارتند از ضخامت عمودی واقعی<sup>۱۰</sup> (TVT) که بیانگر ضخامت اندازه‌گیری شده یک بازه ساختاری در راستای عمودی است و ضخامت چینه‌ای واقعی<sup>۱۱</sup> (TST) که عبارت از ضخامت اندازه‌گیری شده در راستای عمود بر صفحه طبقه حفاری شده می‌باشد.

روابطی که براساس عمق واقعی (TVD) به دست آمده‌اند در کاربرد برای چاههای



۱۷  
شماره ۲۰ - فروردین ۱۳۸۴