

# افزایش کنترل دقیق TVD در حفاری افقی به وسیله Rotary Steerable System (RSS) در میدان نفتی فروزان

امیر حسین مولایی - دانشگاه صنعت نفت - شرکت توسعه پتروایران

نفتی فروزان توسط شرکت توسعه پتروایران (PEDCO) و مقایسه بازدهی آن با سیستم معمولی در این میدان بررسی می شود.

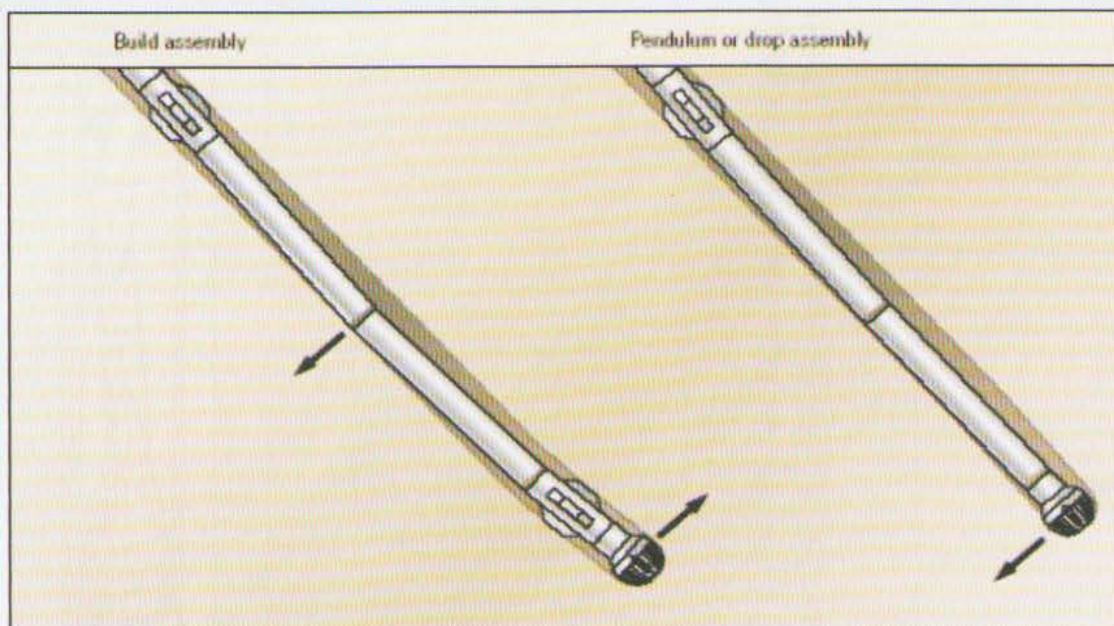
## موتورهای درون چاهی (Downhole Motors)

در بسیاری از مواقع، حفاری کج تنها تکنولوژی قابل اعتماد برای رسیدن به مخزن است. از جمله این موارد می توان به وجود مخزن نفتی در منطقه ای که قابل حفاری نباشد اشاره کرد مانند شهرها، کوهستان ها و دریاچه ها. همچنین در مواردی بهره برداری از مخزن را می توان با حفاری کج و در نهایت تبدیل آن به حفاری افقی که منجر به افزایش سطح تماس چاه و مخزن می گردد، بهینه سازی کرد.

شرکت های نفتی فعال در زمینه حفاری کج همواره به دنبال کشف

در سال های اخیر، Rotary Steerable System (RSS) به صورت فراگیری جایگزین موتورهای درون چاهی (Downhole Motors) در صنعت حفاری کج در جهان شده است. اگرچه استفاده از RS در خاورمیانه به ویژه در ایران، یک سال گذشته آغاز شده است ولی بازدهی بالای این سیستم مخصوصاً در افزایش کنترل TVD در قسمت های افقی چاه ها همزمان با افزایش ROP، بهبود Hole Cleaning و ایجاد مسیرهای صاف و بدون حالت مارپیچی (Non-tortuos) باعث تمایل بیشتر شرکت های نفتی داخلی به استفاده از این سیستم گشته است.

در این مقاله ابتدا به بررسی تکنولوژی معمولی در حفاری کج محدودیت های آن پرداخته می شود و سپس RSS و فواید آن معرفی می گردد. در انتها کاربرد موفقیت آمیز این سیستم در میدان



شکل ۱- عوض کردن جهت حفاری بدون موتور درون چاهی: جایگذاری دقیق Stabilizer و Drill Collar به مسوول حفاری اجازه می دهد تا بدون نیاز به موتور درون چاهی زاویه حفاری را افزایش (Build) یا کاهش (Drop) دهد.

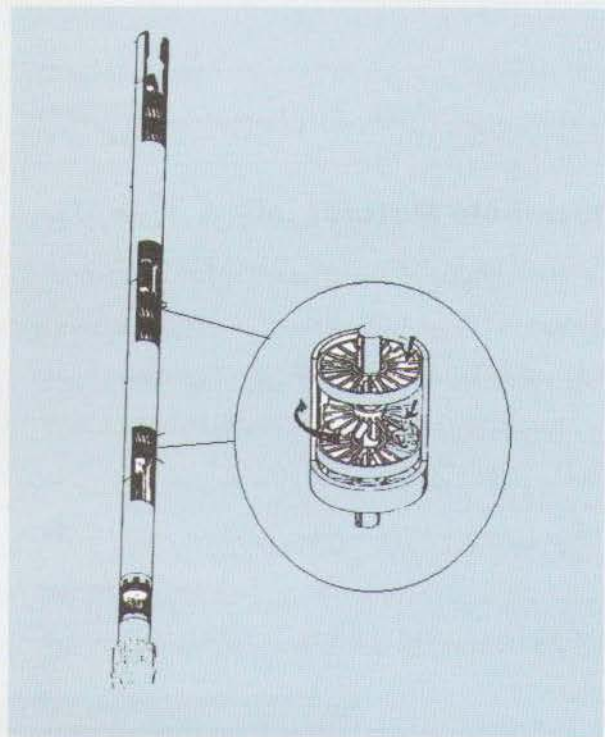
شماره ۲۵ - شهریور ۱۳۸۴

معرفی موتورهای درون چاهی در سال ۱۹۶۶ منجر به تحول عظیمی در صنعت حفاری کج گردید. این موتورها به دو دسته توربین ها و Positive Displacement Motors (PDM) تقسیم می شوند. در توربین های همانند شکل (۲-الف) در اثر جریان گل حفاری و برخورد آن با پره های توربین، ایجاد چرخش می شود. PDM ها شامل دو بخش Stator و Rotor هستند برخورد جریان گل حفاری با Rotor که به صورت مارپیچی است، باعث ایجاد چرخش در Rotor می شود. موتورهای درون چاهی توسط میله ای (Shaft) به مته وصل می شوند و انرژی چرخشی ایجاد شده را توسط این میله به مته انتقال داده و باعث چرخش مته و در نهایت حفاری می گردند. نمایی از PDM ها در شکل (۲-ب) نشان داده شده است.

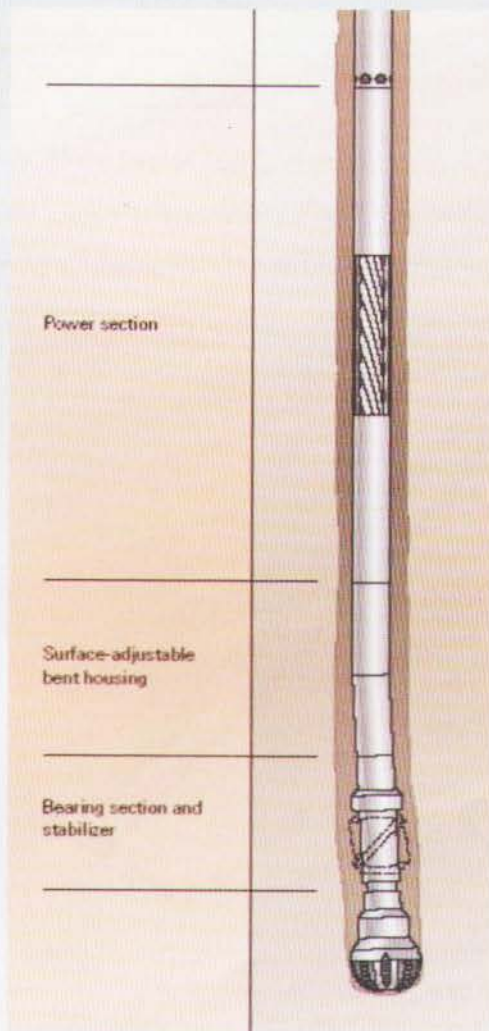
در حفاری کج معمولی برای زاویه دادن به مسیر حفاری از موتورهای درون چاهی و وسیله ای به نام Bent Sub که در پشت این موتورها نصب می شود، استفاده می گردد. Bent Sub ها، همان طور که از اسم آنها پیداست، Sub هایی

راهی جدید به منظور افزایش کارایی این تکنولوژی - به خصوص افزایش سرعت حفاری همزمان با کنترل دقیق بر روی پارامترهای آن - هستند. در دهه ۱۹۲۰ همزمان با آغاز حفاری کج، قراردادن متناسب Stabilizer و ابزار درون چاهی (BHA) تنها تکنیک موجود برای این نوع حفاری و زاویه دادن به مسیر حفاری، شناخته می شد. (شکل ۱)

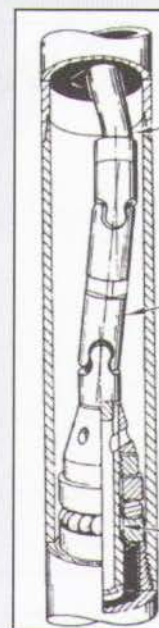
در این روش عدم کنترل دقیق زاویه انحراف (inclination angle) منجر به تغییر مسیر شاخه حفاری از مسیر از قبل تعیین شده می گشت.



شکل (۲-الف) توربین



شکل (۲-ب) PDM موتور جابه جایی مثبت



شکل ۳-BHA موتور درون چاهی

۱۴  
شماره ۲۵  
شهر نیور  
۱۳۸۴

افزایش پیدامی کند تا جایی که WOB توانایی غلبه بر اصطکاک را از دست می دهد و حفاری بیشتر امکان پذیر نمی شود.

۳- عدم کنترل دقیق در این نوع تکنیک، بر پارامترهای حفاری کج از جمله زاویه انحراف (inclination angle) منجر به انحراف ناخواسته شاخه حفاری از مسیر تعیین شده می گردد. برای جبران این انحرافها معمولاً BHA را بالاکشیده و Bent Sub را تغییر داده و با این تغییر زاویه، شاخه حفاری به مسیر از قبل طراحی شده بازگردانده می شود. این انحرافات و تغییرات باعث ایجاد یک مسیر مارپیچی (turtuos) می گردد که حین بهره برداری از چاه، این گونه مسیرها باعث کاهش بهره دهی چاه می شود. (شکل ۴)

علاوه بر این، این مسیرها باعث افزایش اصطکاک در حین راندن Casing به داخل چاه و در نهایت باعث آسیب دیدن Casing می شود.

باتوجه به مشکلات موجود در حفاری کج به وسیله موتورهای درون چاهی، RSS در اوایل سال ۱۹۹۹ به منظور افزایش کارایی و بازدهی حفاری کج، معرفی شد.

## Rotary Steerable System(RSS)

با افزایش تمایل شرکت های نفتی در حفاری افقی، در اواخر دهه ۹۵، RSS به منظور جایگزینی موتورهای درون چاهی و حذف محدودیت های آن، وارد بازار جهانی شد.

در این سیستم با ایجاد چرخش در تمامی طول شاخه حفاری کج

و یا حفاری افقی، بسیاری از محدودیت های موتورهای درون چاهی برطرف می شود. به طور کلی این سیستم شامل دو قسمت است: بخش متمایل کننده (Bias Unit) و بخش کنترل (Control Unit) بخش Bias دقیقاً در پشت مته نصب می شود و شامل سه بازو که با هم زاویه ۱۲۰ درجه می سازند، است. این سه بازو با وارد کردن نیرو به دیواره چاه باعث زاویه دار کردن مسیر حفاری می گردند به این

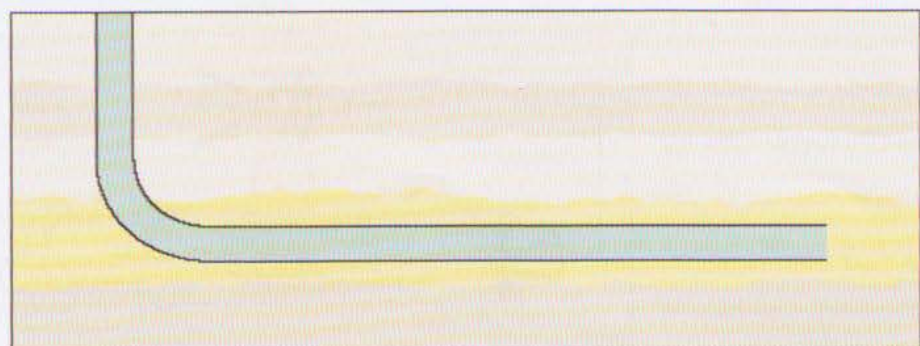
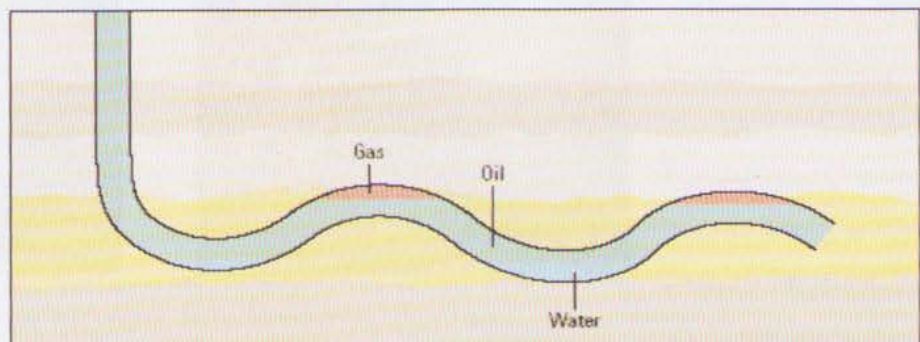
داری زاویه هستند. (در حدود ۱ تا ۲ درجه) و باعث می شوند که وسایل درون چاهی که در پایین آنها قرار می گیرند با قسمت بالایی شاخه حفاری زاویه سازند.

بدین ترتیب، در این تکنولوژی با حرکت گل حفاری تنها BHA که توسط Bent Sub زاویه ای را با شاخه حفاری ساخته است، به وسیله موتورهای درون چاهی شروع به چرخش کرده و عملیات حفاری کج آغاز می شود. بنابراین چرخشی در قسمت بالای Bent Sub وجود ندارد از این رو این نوع حفاری به Slide drilling نیز معروف است. نمایی از BHA برای حفاری کج در شکل زیر نشان داده شده است. (شکل ۳)

اگرچه تا امروز در ایران استفاده از این نوع تکنیک برای حفاری کج رایج ترین روش بوده است ولی این نوع حفاری مشکلات و چالش های فراوانی را ایجاد می کند که منجر به کاهش کارایی آن می شود. از جمله آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- همان طور که ذکر شد، در این نوع حفاری تنها BHA می چرخد و در قسمت بالایی Bent Sub چرخشی وجود ندارد. این موضوع علاوه بر این که احتمال (Differential Sticking) را بسیار افزایش می دهد، همچنین در (hole cleaning) ایجاد اختلال می کند و باعث تجمع Cutting ها می گردد. تمامی این موارد در نهایت منجر به کاهش سرعت حفاری (ROP) و افزایش هزینه حفاری می شود.

۲- در حفاری های با طول زیاد، به خصوص در چاه های افقی، اصطکاک میان شاخه حفاری و دیواره چاه در اثر عدم چرخش،



شکل ۴- نوسان در بهره برداری ناشی از چاه با مسیر مارپیچی

در آن - مشخص می‌کند. مکانیزم این کار بسیار پیچیده است ولی به صورت ساده به این ترتیب است که هنگام رسیدن هر بازو چرخش شاخه حفاری به نقطه مورد نظر برای باز شدن، خروجی شیر نصب شده در بخش Bias، مرتبط با پیستون آن بازو، باز نگه داشته شده و در خروجی دیگر که به دوبازوی دیگر ارتباط دارند، بسته نگاه داشته می‌شوند. این عمل در نهایت به انحراف شاخه حفاری با زاویه مطلوب به نقطه مقابل مکان اعمال نیرو، منجر می‌گردد.

در این سیستم همانند حفاری معمولی، چرخش شاخه حفاری توسط Rotary Table و یا Top Drive صورت می‌گیرد که ذکر شد. انحراف در شاخه حفاری و زاویه دادن به آن نیز توسط بازوهای تعبیه شده در این سیستم صورت می‌گیرد.

چرخش پیوسته شاخه حفاری در این سیستم باعث افزایش کارایی و بازدهی نهایی حفاری کج و حذف محدودیت‌های موجود در سیستم معمولی می‌گردد.

بزرگترین مزیت RSS مناسب بودن آن در انتقال WOB به مته در حفاری‌های افقی با طول زیاد است. در حفاری‌های افقی با تکنولوژی معمول، باتوجه به عدم حرکت شاخه حفاری و تماس آن با دیواره چاه حین حفاری، به طور قابل توجهی اصطکاک را افزایش می‌دهد

تا جایی که حفاری متوقف شود. اما در RSS، باتوجه به حرکت شاخه حفاری و حذف تماس آن با دیواره چاه، اصطکاک کاهش پیدا کرده و حفاری افقی با طول بیشتر امکان پذیر می‌گردد.

از دیگر مزایای RSS می‌توان به بهبود Hole Cleaning باتوجه به چرخش شاخه حفاری و همچنین کاهش قابل ملاحظه احتمال

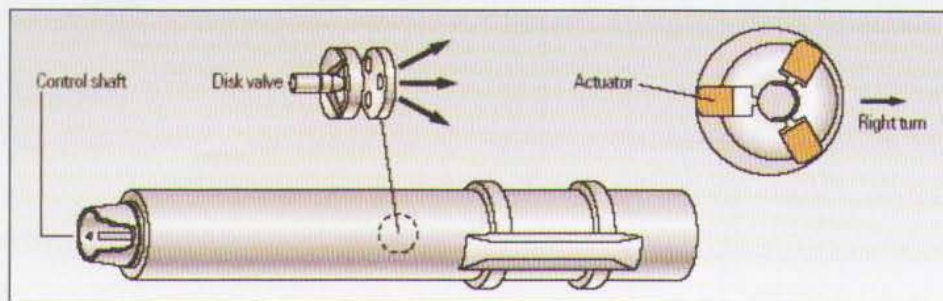
Differential Sticking

صورت که با باز شدن یکی از بازوها و ثابت ماندن دوبازوی دیگر، نیرویی از طرف شاخه حفاری به دیواره چاه وارد و در نتیجه شاخه حفاری به سمت مخالف جهت نیروی وارد شده، رانده می‌شود. (شکل ۵-الف) نمایی از عملکرد بخش Bias را نشان می‌دهد.

نیروی مورد نیاز برای باز شدن این بازوها و در نهایت انتقال آن به دیواره چاه توسط جریان گل حفاری در داخل دستگاہ ایجاد می‌شود. در داخل بخش Bias شیری با یک ورودی و سه خروجی تعبیه شده است که جریان گل حفاری را به پیستون هر بازو منتقل کرده و این جریان باعث باز شدن هر بازو در محل مورد نظر برای وارد کردن نیرو بر دیواره چاه - به صورت متناوب در حین چرخش شاخه حفاری می‌شود. (شکل ۵-ب) کنترل زمان، مقدار و محل باز شدن، هر بازو توسط بخشی به نام (Control Unit) انجام می‌گیرد. این بخش شامل سنسورها و بسته الکترونیکی (Electronic Package) است که در سطح برنامه ریزی آن صورت می‌گیرد. به این صورت که زاویه انحراف، Azimuth و Toolface angle مناسب را در آن ذخیره می‌کنند. بعد از راندن دستگاہ به داخل چاه و فعال کردن آن، این سیستم الکترونیکی به صورت هوشمند اندازه و زمان باز شدن هر بازو چرخش شاخه حفاری - به منظور ایجاد زاویه انحراف مطلوب برنامه ریزی شده



شکل (۵-الف) واحد متمایل کننده وضعیت طبیعی (راست) و وضعیت باز شده (چپ)



شکل (۵-ب) جهت گیری Disk valve

۹۰۰ و با قطر  $8\frac{1}{4}$ ، RSS، جایگزین موتورهای درون چاهی شد. هدف استفاده از RSS در این بخش، ثابت نگه داشتن TVD با دقت بسیار در قسمت افقی چاه - که در نهایت منجر به قرارگیری دقیق این بخش از چاه در مخزن می شود - بود. در طراحی اولیه چاه TVD مطلوب برای بخش افقی  $8\frac{1}{4}$ ، 2834m (9298ft) در نظر گرفته شده بود.

بدین ترتیب قسمت افقی  $8\frac{1}{4}$  این چاه، با طولی بیشتر از 450m (1470ft) توسط RSS حفر گردید.

حین حفاری این بخش، بعد از طی مسیری حدود 43m (141ft) BHA، از چاه به منظور تعویض مته بیرون کشیده شد و بعد از تعویض مته دوباره به داخل چاه رانده شد اما بعد از رسیدن به انتهای چاه، RSS از کار افتاد و حفاری بیشتر با آن ممکن نشد. دلیل اصلی از کار افتادن دستگاه باز شدن بی موقع بازوهای بخش Bias سیستم حین راندن دستگاه به داخل چاه و گیر کردن آنها با Casing های بالایی، ارزیابی شد که در نهایت به آسیب دیدن این بازوها منجر گردید. بعد از بررسی، سرعت بسیار راندن دستگاه به داخل چاه باعث این اتفاق ارزیابی گردید. بعد از تعمیر دستگاه، با شیوه ای تجدیدنظر شده دستگاه به داخل چاه رانده و حفاری از سر گرفته شد.

بعد از اتمام حفاری بخش افقی  $8\frac{1}{4}$ ، نتایج زیر که نشان دهنده بازدهی بسیار بهتر و بیشتر RSS نسبت به موتورهای درون چاهی است به دست آمد:

#### ۱. کارایی حفاری (Drilling Performance):

به منظور بررسی کارایی حفاری در قسمت افقی  $8\frac{1}{4}$  آنچه باید مورد توجه قرار بگیرد، جایگیری بهینه بخش افقی چاه در مخزن است. در این عملیات، 459m به صورت افقی در مخزن توسط RSS حفر و تنها  $\pm 1ft$  انحراف از TVD مطلوب (2834m) ثبت شد. چنین دقتی در ثابت نگه داشتن TVD بدون استفاده از RSS امکان پذیر نمی گردید. از طرفی دیگر، دقت در ثابت نگه داشتن TVD در بخش افقی، منجر به جایگیری مناسب چاه در مخزن مطابق برنامه، گردید. در نتیجه، در کل مدت عملیات حفاری افقی، ۶۹٪ زمان حفاری در بخش بهینه مخزن صورت گرفت و تنها ۴٪ زمان حفاری در قسمت نامناسب مخزن انجام پذیرفت در حالی که در موتورهای درون چاهی، براساس تجربه های گذشته، در کل مدت زمان حفاری افقی، تنها ۳٪ زمان حفاری در بخش بهینه مخزن صورت گرفت.

اشاره کرد. تمامی این منجر به افزایش ROP و کاهش زمان حفاری و در نتیجه کاهش هزینه تولید می شود. همچنین باتوجه به کنترل دقیقی که بر روی پارامترهای حفاری کج در این سیستم توسط بخش کنترل، اعمال می گردد هرگونه انحراف ناخواسته از مسیر از قبل طراحی شده، به حداقل رسیده و در نتیجه باعث ایجاد مسیری صاف (Smooth) و بدون حالت مارپیچی می شود (Non-Turtous). همچنین این کنترل دقیق در حفاری های افقی، باعث ثابت نگه داشتن دقیق TVD در بخش افقی و عدم انحراف از TVD مطلوب و مورد نظر می شود.

#### تجربه موفقیت آمیز RSS در میدان نفتی فروزان

شرکت توسعه پتروایران (PEDCO) تاکنون در بسیاری از میدان های نفتی ایران در خلیج فارس مجری عملیات حفاری بوده است. باتوجه به محدودیت های موجود در منطقه و اهمیت کاهش زمان حفاری و همچنین تقلیل هزینه تولید یک بشکه نفت، شرکت توسعه پتروایران در سالیان اخیر همواره بر استفاده از تکنولوژی های پیشرفته حفاری تمرکز کرده است.

در سال گذشته، شرکت توسعه پتروایران به منظور افزایش سطح تماس مخزن و چاه و در نتیجه افزایش تولید، اقدام به حفاری افقی در میدان نفتی فروزان کرد.

بعد از بررسی مطالعات صورت گرفته در زمین شناسی منطقه و طراحی مسیر حفاری مناسب برای انجام عملیات، به منظور قراردادن مطلوب بخش افقی چاه در مخزن، ثابت نگه داشتن TVD و جلوگیری از هرگونه انحراف از مسیر تعیین شده برای اولین بار در ایران تصمیم به استفاده از RSS گرفت.

به همین جهت، طی قراردادی با شرکت RSS, Backer ساخته شده توسط این شرکت با نام تجاری (AutoTrack Backer HughesINTEQ) توسط شرکت توسعه پتروایران خریداری شد. از مشخصات بارز این دستگاه می توان به قابلیت بسیار Build rate آن تا  $100^{\circ}14$  محدوده دمایی تا  $302^{\circ}f$  ( $150^{\circ}c$ ) و حداکثر فشار 25000psi اشاره کرد.

بعد از اتمام طراحی چاه، RSS برای استفاده در قسمت افقی چاه با قطر  $8\frac{1}{4}$  در نظر گرفته شد. کلیه عملیات حفاری کج تا قبل از رسیدن به بخش افقی چاه، با موتورهای درون چاهی صورت گرفت. در آغاز بخش افقی چاه با زاویه انحراف نزدیک به

دلیل اشتباه در راندن به داخل چاه توسط پرسنل، از کار افتاد و متاسفانه انتظارات در این زمینه برآورده نگردید.

در شکل زیر نمودار چاه و کنترل دقیق TVD توسط RSS نشان داده شده است: (شکل ۶)

## نتایج

در طول سالیان اخیر، RSS به صورت موفقیت آمیزی در جهان جایگزین موتورهای درون چاهی به منظور حفاری کج و افقی، شده است. ROP بالا، hole cleaning بهتر و کنترل دقیق تر پارامترهای حفاری کج باعث تمایل روزافزون شرکت های نفتی به استفاده از این سیستم در پروژه های حفاری شده است. در سال گذشته، شرکت توسعه پتروایران، RSS را در قسمت افقی ۸ ۱/۴ چاهی در میدان نفتی فروزان به منظور ثابت نگه داشتن TVD در قسمت افقی چاه و در نهایت قراردادن مناسب چاه در مخزن، مورد استفاده قرار داد.

نتایج استفاده از این سیستم بسیار موفقیت آمیز، ارزیابی شد. علاوه بر آن منافع غیر محسوسی دیگری از جمله افزایش ROP، مسیر صاف و بدون حالت مارپیچی و همچنین سود اقتصادی ایجاد کرد.

با توجه به موفقیت این سیستم و بازدهی بالای آن در این پروژه، انتظار می رود شرکت های دیگر نفتی نیز در ایران، برای انجام پروژه های حفاری کج و افقی، به این سیستم روی آورند. ■

- 1- Hartmut Gruenhagen, Ulrich Hahne, Baker Hughes INTEQ; Graham Alvord, Phillips Alaska Inc. " Application of New Generation Rotary Steerable System for Reservoir Drilling in Remote Areas " Spe paper No.74457, IADC/SPE Drilling Conference, 26 - 28 February, Dallas, Texas.
- 2- Charlie Pratten, Khamel El Kholly, Sivaraman Naganathan, Ehab Sharaf, Schlumberger. " Rotary Steerable System Applications in the Middle East " Spe paper No.85285, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 20-22 October, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- 3- Abdullah Al-suwaïdi, Frank Allen, Abu Dhabi Company for Onshore Oil Operations; Randolph Taylor, Khalid Hussein, Richard Russell, Halliburton Sperry - Sun " Experience With Rotary Steerable Systems in Onshore Abu Dhabi Fields " Spe paper No.85291, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 20-22 October, Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- 4- M.A. Colebrook, S. R. Peach, Drilling & Service; F.M. Allen, BP Exploration; G. Conran, Anadrill Schlumberger " Application of Steerable Rotary Drilling Technology to Drill Extended Reach Wells " Spe paper No.39327, IADC/SPE Drilling Conference, 3-6 March, Dallas, Texas.

## ۲. کارایی اقتصادی (Economic Performance):

در آنالیز ابتدایی قبل از شروع حفاری، با توجه به ROP بسیار در استفاده از RSS و کاهش زمان حفاری ۳۵۰۰۰۰ دلار سود اقتصادی نسبت به موتورهای درون چاهی پیش بینی می شد. اما با توجه به از کار افتادن دستگاه حین عملیات حفاری و از دست رفتن زمان به منظور تعمیر دستگاه و راندن دوباره آن، تنها ۴ روز نسبت به موتورهای درون چاهی حفاری زودتر به اتمام رسید. با در نظر گرفتن هزینه روزانه حفاری حدود ۶۰۰۰۰ دلار، در نهایت RSS نسبت به موتورهای درون چاهی تقریباً ۲۴۰۰۰۰ دلار بهره اقتصادی به دست داد.

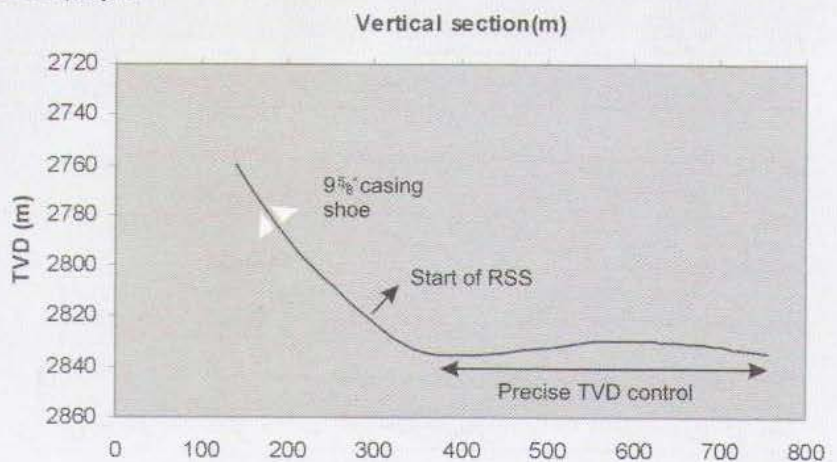
## ۳. کیفیت چاه (Wellbore Quality):

همان طور که ذکر شد یکی از فواید RSS، ایجاد مسیر صاف و بدون حالت مارپیچی (Non-turtous) است. یکی از مشکلات همراه موتورهای درون چاهی ایجاد مسیرهای مارپیچی است که در نهایت باعث ایجاد مشکلات در بهره برداری می شود. RSS با جلوگیری از انحرافات ناخواسته از مسیر از پیش تعیین شده، منجر به حذف حالت مارپیچی گشته و در نهایت علاوه بر ایجاد سهولت در راندن Casing باعث بهینه سازی بهره برداری می شود.

در این پروژه، نمودارهای (logs) به دست آمده از چاه از جمله Caliper نشان دهنده مسیر ایده آل حفاری شده توسط RSS است.

## ۴. اطمینان پذیری RSS (Rss Reliability):

در شروع حفاری قسمت ۸ ۱/۴ چاه به وسیله RSS، انتظار می رفت که RSS از هر سه بار راندن در چاه، تنها یک بار از کار بیفتد و مدت زمان هر بار راندن حداقل ۷۲ ساعت در نظر گرفته شده بود. اما در این پروژه، همان طور که ذکر شد تنها بعد از ۴۲m، دستگاه به



شکل ۶- نمای قسمت ۸ ۱/۴ چاه

۱۸  
تاریخچه  
۱۳۸۴