



# حفاری افقی؛

## توسعه میدان، افزایش تولید و کاهش هزینه

خیرالله اصغری-نفت و گاز پاریس

### مقدمه

حفاری افقی، از پیشرفته‌ترین تکنولوژی‌هایی است که در ۳۰ سال اخیر در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته است. چاه افقی حالتی خاص از چاه‌های زاویه‌دار است که اغلب به نام Drain hole از آن یاد می‌شود. در ابتدا به این تکنولوژی به عنوان یک راه ناآشنا و دشوار برای حفاری اشاره می‌شد و مهندسين مخزن و تولید نیز به اقتصادی بودن این روش با دیده تردید می‌نگریستند. اما امروزه از این تکنولوژی، به عنوان یک ابزار مفید و موثر در صنعت نفت یاد می‌شود. عامل عمده گسترش این تکنیک، افزایش دبی تولیدی و بالابودن میزان بازیابی نهایی از چاه‌های افقی است آغاز حفاری افقی به سال ۱۹۲۷ در روسیه برمی‌گردد اما بعد از جنگ جهانی دوم و پیشرفت در مشبک‌کاری، توجه صنعت نفت به چاه‌های جداری و مشبک‌کاری مناطق مورد نظر، معطوف شد و از حفاری چاه‌های باز (Open Hole) اجتناب گردید. اعتماد به حفاری به عنوان یک تکنولوژی، به سال‌های آغازین دهه ۱۹۸۰ و دوران افزایش قیمت نفت می‌رسد. در آغاز سال‌های ۱۹۸۰ توسط شرکت فرانسوی ELF با حفر یک حلقه چاه افقی برای تولید نفت سنگین در میدان Rospo Mare ایتالیا، به صنعت نفت معرفی شد همزمان با آن، در آمریکا نیز شرکت‌های آمریکایی برای فایق آمدن بر پدیده مخروطی شدن آب و گاز (Water-Gas Coning) از حفاری افقی استفاده کردند. موضوع حفاری افقی دستیابی به مخازن با تراوایی و فشار کم، حفاری در مخزن با ضخامت کم (لنزهای ماسه‌ای)، تولید بیشتر نفت سنگین و مخازن گازی، دستیابی به شکستگی‌های عمودی مخزن، فاصله گرفتن از سطح تماس آب-نفت و آب-گاز، سیلاب‌زنی آب، فرآیندهای ازدیاد برداشت و همچنین سهولت شکافدار کردن مخزن به صورت هیدرولیکی می‌باشد.

مهمترین تاثیر حفاری افقی رامی‌توان در افزایش شاخص بهره‌دهی دانست. مخازنی که حفاری افقی در آنها تاثیر بیشتری دارد شامل مخزن شکافدار، مخزن کم ضخامت، ریف‌ها، مخازن گسل خورده و مخازن ناهمگنی است. اما ملموس‌ترین تاثیر حفاری افقی، افزایش تولید مخزن می‌باشد که بیشتر ناشی از تاثیر عملکرد چاه

افقی بر پارامترهای زیر است:

## ۱- افزایش سطح تماس چاه با مخزن

از آنجا که گسترش مخازن هیدروکربوری در بعد افقی (ناحیه‌ای) بیشتر از بعد عمودی (ضخامت) آنها است. دستیابی به سطح تماس بیشتر چاه با مخزن از طریق حفاری افقی میسر می‌باشد. به عنوان مثال سطح تماس یک چاه افقی با طول ۱۰۰۰ متر در یک مخزن با ضخامت ۱۰ متر، نسبت به یک چاه عمودی در همین مخزن ۱۰۰ برابر است.

## ۲- تولید انباشتی بیشتر

چاه افقی در بدو تولید دارای دبی بسیار بالایی است ولی به مرور زمان دبی آن کاهش می‌یابد اما در نظر مقایسه، تولید انباشتی از چاه افقی بسیار بیشتر از تولید انباشتی در چاه عمودی است.

## ۳- افزایش شعاع تاثیر چاه

با افزایش شعاع تاثیر چاه، حجم بیشتری از مخزن تحت تاثیر افت فشار ناشی از وجود چاه افقی قرار می‌گیرد و بالطبع حجم بیشتری از مخزن در تولید، سهم می‌باشد از مخزن بهره‌گیری بهتری صورت خواهد گرفت.

## ۴- تبدیل جریان شعاعی به خطی

وجود چاه افقی در مخزن و تبدیل جریان شعاعی به جریان خطی سیال مخزن، باعث کاهش ضریب پوسته (Skin Factor) و افزایش تولید از مخزن می‌شود. به علت اینکه سرعت حرکت سیال در رژیم جریان شعاعی بیشتر است، انرژی بیشتری از مخزن صرف رسیدن سیال از مخزن به چاه می‌شود اما در رژیم جریانی خطی سرعت حرکت سیال کمتر و در نتیجه انرژی کمتری از مخزن مصرف می‌شود که خود باعث افزایش تولید از مخزن می‌شود.

## ۵- کاهش اشباع نفت باقیمانده

با افزایش شعاع تاثیر چاه، حجم بیشتری از مخزن در تولید، سهم می‌باشد و بالطبع نفت باقیمانده در منطقه تولید، کاهش می‌یابد.

## ۶- جلوگیری از پدیده مخروطی شدن

طبق مطالعات انجام شده راه حل مناسب برای توسعه مخازنی که مشکل مخروطی شدن دارند استفاده از تکنولوژی حفاری افقی است. یکی از آثار مثبت چاه‌های افقی در افزایش تولید از مخزن، تاثیر چاه افقی در کاهش پدیده نفوذ سیالات مزاحم و پدیده نفوذ مخروطی (نفوذ آب و یا گاز به حفره چاه) در هنگام برداشت از مخازن است. علت این پدیده همگرایی بیشتر جریان نفت و تغییر شدید شیب فشار در اطراف دیواره چاه می‌باشد. در چاه‌های عمودی، افت فشار شدید ناشی از وجود رژیم جریانی غالب نفت (شعاعی/چرخشی) و سطح کوچک ورود نفت به درون چاه، باعث می‌شود تا آب و یا گاز از فواصل دورتر به درون چاه نفوذ کنند. در حالی که چاه‌های افقی مانند یک منبع نقطه‌ای، تمام افت فشارهای اطراف ته چاه را به هم مرتبط می‌سازد اما چاه عمودی مانند یک خط عمل کرده و افت فشار را در کل طول دیواره چاه توزیع می‌کند و باعث کاهش افت فشار در اطراف چاه می‌شود. علاوه بر آن چون حجم مخروط زیر چاه افقی بسیار بزرگتر از حجم مخروط زیر چاه عمودی است حجم آب و یا گازی که باید جانشین نفت تولیدی شود بسیار بیشتر است و حرکت رو به بالا و رو به پایین آن کمتر خواهد بود و زمان بیشتری صرف وارد شدن آب و یا گاز در تولید خواهد شد.

## رفتار سیال در چاه افقی

رفتار سیال در چاه افقی و عمودی مشابه است. بدین نحو که حرکت سیال در چاه از حالت جریان ناپایدار به حالت پایدار می‌رسد. محدوده زمانی که جریان ناپایدار طی می‌کند، بستگی به تراوایی مخزن، فاصله چاه‌ها و دیگر خصوصیات مخزن دارد. در مخازن با تراوایی پایین، جریان ناپایدار در چاه‌های افقی چند روز تا چند ماه طول می‌کشد در صورتی که در مخازن با تراوایی بالا، جریان ناپایدار بیش از چند ساعت دوام ندارد و جریان چاه به سرعت به حالت پایدار می‌رسد.

بازدهی جریان نفت در چاه افقی، وابسته به رژیم پایدار (Steady State) و یا شبه پایدار (Pseudo-Steady) نفت در اطراف چاه است. برای یک چاه افقی در محدوده‌ای مشخص با فرض عدم وجود هیچ جریانی در مرزهای مشترک این محدوده با مخزن (No Flow Boundary)، اختلاف فشار متوسط مخزن و فشار جریانی در چاه به مقدار معین و ثابتی میل می‌کند که به آن فشار شبه پایدار می‌گویند. در صورتی که چاه در مرز فوقانی یا تحتانی این محدوده با یک منبع فشار ثابت در ارتباط باشد، با گذشت زمان طولانی اختلاف فشار جریانی چاه با این فشار به مقدار ثابتی می‌رسد که به آن حالت پایدار می‌گویند. در صورتی که این فشارها به یک مقدار مشخص و ثابت دبی تولید ارتباط داده شوند، می‌توان به این مفهوم رسید که جهت تولید مقدار مشخصی افت فشار نیاز است و معادله اصلی راندمان تولید به صورت زیر در می‌آید:

$$Q_{OH} = J_H \Delta P$$

$$J = \frac{0.00708 K_H h}{\mu_o B_o (P_{WD} + S_m)}$$

$P_{WD}$ : فشار بدون بعد در حالت شبه پایدار

$J$ : شاخص بهره‌دهی چاه

$S_m$ : پارامتر ضریب پوسته

تأثیر هر کدام از این پارامترها در چاه افقی متفاوت است که به صورت مختصر بیان می شوند:

### نسبت تراوایی

این نسبت معمولاً از مغزه‌ها (Core) به دست می آید. در مواقعی که مخزن دارای آبده و یا کلاهیگ گازی باشد با داشتن زمان نفوذ آب و یا گاز، این نسبت محاسبه می شود. برای محاسبه این نسبت باید از مدل زمین شناسی حوضه و

همچنین مدل رسوب گذاری آن آگاهی کامل وجود داشته باشد چراکه دامنه گستردگی نفوذ پذیری عمودی به طور کلی به گسترش جنبی سدهای شیلی (Shale barriers) و گسل های تراوایی که صفحات زهکش را قطع می کنند، بستگی دارد. گسترش جانبی سدهای شیلی نیز عمدتاً به مدل رسوب گذاری در

حوضه بستگی دارد. به عنوان مثال در محیط های رسوبی ماسه ای دانه درشت متمركز (Coarse Point bar) سدهای شیلی در حدود ۳۰ متر گستردگی دارند اما در محیط های دریایی این مقدار به بیش از ۶۰۰ متر می رسد. به طور کلی بیشترین تراوایی عمودی را می توان در محیط های پوینت بار و کانال ها و دلتاها یافت. اگر طول یک چاه افقی ۵۰ درصد از طول سدهای شیلی را قطع کند، بیشترین مقدار تراوایی عمودی به دست خواهد آمد. در محاسبه مقدار نسبت تراوایی، باید به محدودیت های اندازه گیری تراوایی عمودی نیز توجه داشت.

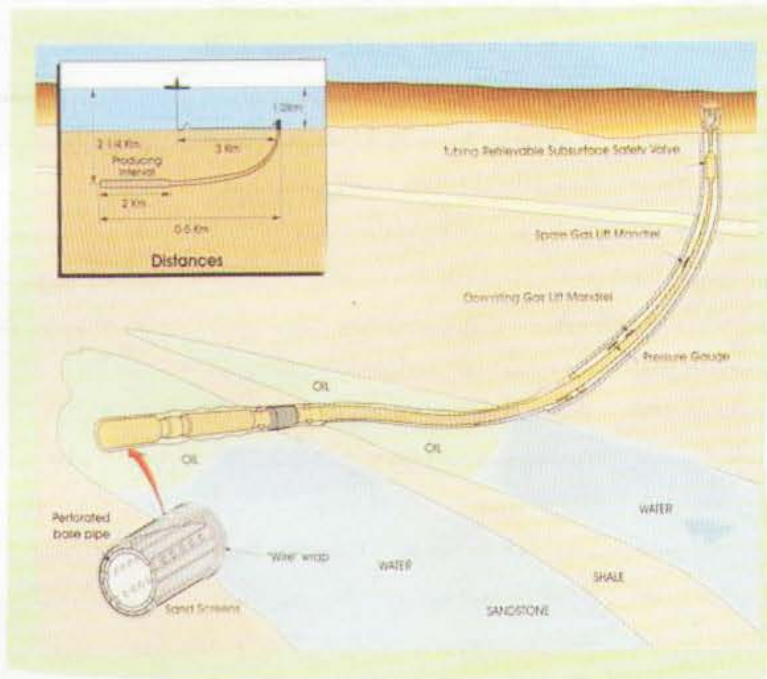
تولید بیشتر از مخزن نیست. میزان تولید از چاه افقی از رابطه های متفاوتی قابل محاسبه است که مهمترین آنها در ادامه آمده است:

رابطه Joshi:

$$Q_{oh} = \frac{2\pi k_h h \Delta p / \mu_o B_o}{\ln\left(\frac{a + \sqrt{[a^2 - (L/2)^2]}}{L/2}\right) + \left(\frac{h}{L}\right) \ln\left(\frac{h}{2r_w}\right)}$$

رابطه Borisov:

$$Q_{oh} = \frac{2\pi k_h h \Delta p / \mu_o B_o}{\ln(4r_{ch}/L) + (h/L) \ln(h/2\pi r_w)}$$



### پارامترهای موثر در تولید از چاه افقی

در چاه های افقی، آگاهی از عملکرد چاه، نیاز به شناخت چهار پارامتر دارد که عملاً محاسبه این پارامترها مشکل است و معمولاً تخمین زده می شوند و در محاسبه میزان تولید به کار می روند. پارامترهای موثر در تولید از چاه افقی عبارتند از:

- ۱- نسبت تراوایی
- ۲- طول فواصل تولیدی
- ۳- ضریب حجمی نفت
- ۴- گرانیوی نفت در شرایط مخزن
- ۵- جرم حجمی سیال در شرایط مخزن
- ۶- ضریب پوسته مکانیکی (Sm)(Skin factor)

با توجه به این که پارامتر  $P_{wd}$  بر حسب ضخامت سازند تعریف شده است بنابراین احتمال مشاهده پوسته در چاه های افقی نیز وجود دارد. با داشتن فشار متوسط مخزن و یا فشار در سطح تماس مشترک سیالات و محاسبه پارامتر  $P_{wd}$ ، می توان رابطه ای بین فشار جریان درون چاه با دبی تولیدی آن به دست آورد.

### راندمان تولید (Flow Efficiency) در چاه های افقی

یکی از دلایل اصلی پیشرفت تکنولوژی حفر چاه های افقی، میزان بهره دهی و تزریق پذیری بالای این چاه ها در مقایسه با چاه های عمودی است. چاه افقی در بدو تولید دارای دبی بسیار بالایی است اما این دبی به سرعت کاهش می یابد. در بسیاری از موارد، دبی ثابت یک چاه افقی (بسته به خواص مخزن)

حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد دبی اولیه آن است اولین قدم در آنالیز عملکرد یک چاه افقی، تخمین میزان تولید از چاه می باشد که بر اساس اندازه گیری دبی تولید و یا از نتایج حاصل از تست های افت فشار Draw Down به دست می آید. خصوصیات مخزن مانند تراوایی، تخلخل، اشباع هیدروکربور و... تأثیر یکسانی در میزان تولید چاه افقی از هر مخزن دارند. تفاوت میزان تولید در چاه افقی می تواند ناشی از یکسان نبودن طول حفره افقی در چاه ها باشد که باعث می شود تا خواص مخزن به طور یکسان در تولید موثر نباشند. هر چند افزایش طول حفره افقی تضمینی برای

## طول فواصل تولیدی در چاه افقی

طول مناسب برای یک چاه افقی به میزان تولید و هزینه حفاری بستگی دارد و حالت بهینه وقتی است که میزان درآمد حاصل از تولید بیشتر از هزینه های حفاری باشد. طول فواصل تولیدی یک چاه افقی همیشه از طول قسمت افقی حفاری شده کمتر است. برای تخمین طول فواصل تولید از لاگ های لیتولوژی، لاگ گاما، لاگ های تولید (Production) و لاگ گل حفاری (Mud log) استفاده می کنند. اما به علت نفوذ سیال در بین آستری و چاه و همچنین وجود جریان سیال در پشت لوله ها، نتایج به دست آمده از این لاگ ها چندان صحیح نیست. نقش این پارامترها با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$CFR=19.91*L_{wv}$$

شاخص بهره دهی چاه رابطه ای مستقیم با طول مفید چاه دارد و در صورتی که طول مفید چاه از ۴۴۰ فوت کمتر باشد، حفر یک چاه افقی از نقطه نظر تولید به چاه عمودی برتری ندارد.

## ضریب حجمی نفت

ضریب حجمی نفت در دبی تولید تاثیر معکوس دارد. همچنین افزایش ضریب حجمی نفت باعث کاهش زمان نفوذ آب در هنگام تولید، افزایش میزان افت فشار درونی چاه و کاهش شاخص بهره دهی چاه می شود.

## گرانروی نفت در شرایط مخزن

با افزایش گرانروی نفت، شاخص بهره دهی چاه کاهش می یابد. همچنین با افزایش گرانروی نفت، دبی بحرانی (بالاترین نرخ تولید از چاه که مانع ایجاد پدیده مخلوطی شدن می گردد) کاهش و در نتیجه میزان تولید از چاه افقی کاهش می یابد.

## جرم حجمی سیال در شرایط

### مخزن

با افزایش اختلاف جرم حجمی سیال مخزن آب در شرایط مخزن، زمان نفوذ آب در تولید نفت افزایش می یابد که باعث افزایش دبی بحرانی تولید از چاه افقی می گردد.

## ضریب پوسته مکانیکی

Sm: ضریب پوسته از داده های به دست آمده از نتایج حاصل از آزمایش چاه (یک تست Draw down و یا یک تست Build up) در هنگامی که جریان در چاه افقی به صورت شعاعی است، محاسبه می شود و به طور کلی آسیب این پوسته ناشی از حفاری و تکمیل چاه می باشد. چگونگی اندازه گیری Sm و پارامترهای موثر در آن عبارتند از:

## ۱- زمان فرآیند (Time duration)

جریان شعاعی اولیه در یک تست فشار در حدود چند ثانیه تا چند دقیقه طول می کشد ولی به علت اثر چاه (Wellbore)، این جریان قابل مشاهده نیست. بنابراین محاسبه Sm از این طریق ممکن نیست.

## ۲- تفسیر (Interpretation)

افت فشار ممکن است درون چاه (Wellbore) و یا بیرون از چاه (Out side of Wellbore) (در مخزن) اتفاق بیفتد. افت فشار درون چاه، در چاه های بادبی بالا، مخازن نفت سنگین و در تخلیه مخزن کم فشار، مهم است. در چنین مواقعی باید توجه داشت که گل با دانسیته پایین به کار برده شود تا گم شدن گل حفاری در سازند به حداقل برسد در یک مخزن مورد مطالعه، دبی تولید بعد از تحریک سازند با دبی تولید قبل از آن یکسان بوده است که بیانگر این است که عملیات تحریک سازند موثر نبوده یا این که افت فشار بیرون چاه در اثر آسیب، کمتر از افت فشار درون چاه بوده است و عملیات اسیدکاری (Acid job) نتوانسته افت فشار

در درون چاه را برطرف کند. بنابراین آگاهی از این که پوسته در اثر افت فشار درون چاه ایجاد شده یا در اثر افت فشار بیرون چاه، بسیار مهم است.

## ۳- تطبیق (Adjustment)

در این مرحله فاکتور پوسته بر اساس طول فواصل در تست های فشار و با استفاده از رابطه Joshi محاسبه می شود که برای این منظور باید از ارتفاع منطقه نفت ده، نسبت تراوایی و طول فاصله تولیدی نیز آگاه بود.

## معایب و محدودیت های حفاری

### افقی

۱- هزینه بالا  
هزینه حفر چاه افقی در مقایسه با چاه های عمودی بالا است و حدود ۱/۵ تا ۲/۵ برابر هزینه حفر یک چاه عمودی است. همچنین تبدیل یک چاه عمودی به چاه افقی ۴/۰ تا ۱/۳ برابر هزینه حفر یک چاه عمودی می باشد.

۲- به طور معمول با استفاده از چاه افقی امکان دستیابی به یک منطقه نفتی (Pay Zone) در هر چاه فراهم می باشد. خصوصاً «در مخازن چند لایه ای که فاصله عمودی مخزن زیاد است و یا تراوایی لایه های مخزنی تفاوت زیادی با هم دارد هر چند امروزه از چاه های افقی برای مخازن چندگانه بهره می برد اما استفاده از این تکنیک همیشه ممکن نیست.

۳- نرخ موفقیت اقتصادی چاه های افقی حدود ۶۵ درصد می باشد بدان معنی که تنها ۲ چاه از ۳ چاه افقی حفاری شده، از دیدگاه اقتصادی موفق است.

۴- محدودیت های مکانیکی:

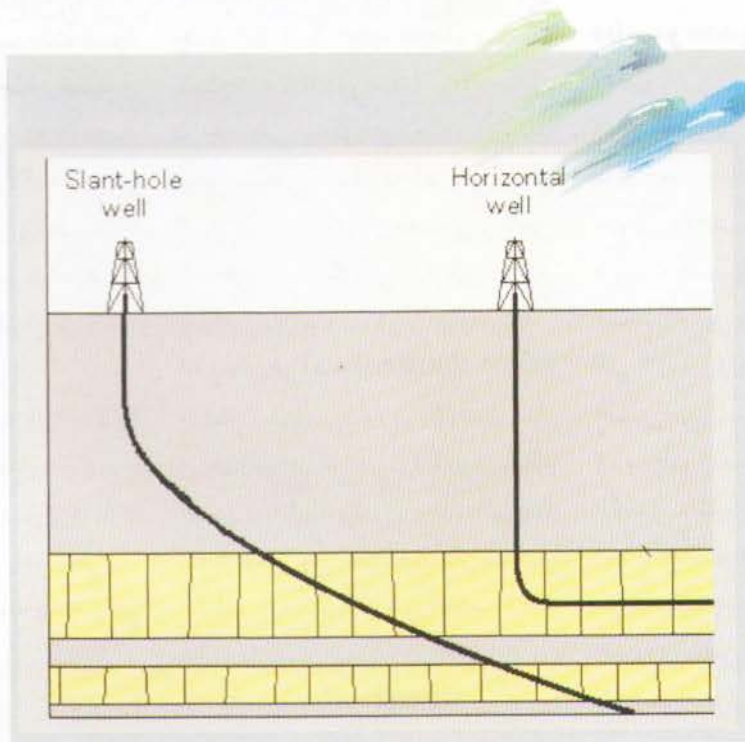
محدودیت های مکانیکی برای چاه های افقی ارتباط مستقیم به شعاع انحنا چاه دارد. بر اساس الگوی حفاری افقی مورد استفاده با محدودیت های خاص آن الگو مواجه هستیم که مهمترین آنها شکستگی و ترک خوردگی لوله ها، مشکلات زاویه سازی وارد شدن به مخزن در نقطه غیر دلخواه (ناشی از نوع مته های

مصرفی)، عدم دقت در انتخاب و محل نقطه شروع انحراف می باشد. از دیگر محدودیت های چاه های افقی می توان به مشکلات تولید ماسه، محدودیت در تعداد چاه های افقی در یک منطقه (از نظر فاصله بین چاه ها) و مشکلات خارج کردن کنده های حفاری اشاره کرد.

### محاسن چاه های افقی

۱- با توجه به نرخ تولید بالای چاه های افقی، هزینه حفاری در هر بشکه نفت تولید برای یک چاه افقی حدود ۳ تا ۴ دلار است در حالی که این مقدار برای یک چاه عمودی حدود ۷ تا ۹ دلار می باشد.

۲- هزینه توسعه که به صورت تقسیم هزینه چاه به توان تولید چاه تعریف می شود برای هر چاه افقی حدود ۳ تا ۴ دلار می باشد.



قابلیت های آن، باید به محدودیت های آن، مشکلاتی که در حین حفاری ایجاد می شود و همچنین هزینه های استفاده از این روش توجه کافی داشت. تجربه نشان داده است که مشکلات پیش آمده در حفاری افقی، ناشی از برنامه ریزی و طراحی و یا انتخاب نادرست ابزار مورد استفاده نیست بلکه عمده این مشکلات ناشی از عدم نظارت دقیق در هنگام حفاری می باشد هرچند که یک طراحی مناسب و انتخاب محل مناسب در مخزن نیز برای یک چاه افقی بسیار مهم است.

علاوه بر موارد ذکر شده، باید پارامترهای زیر از جمله: شناخت جهت طبیعی شکاف های سنگ مخزن، تعیین دقیق فاصله چاه تا سطح تماس آب- نفت و گاز- نفت، انتخاب الگوی مناسب تکمیل و همچنین شناخت مکانیسم رانش مخزن را در نظر گرفت تا بهترین

راندمان را از چاه افقی به دست آورد.

تکمیل چاه ها در چند جهت، حفاری با لوله مغزری و حفاری فروتعدالی اشاره کرد. تجارب حفاری افقی در میدان مختلف ثابت کرده است که حفاری افقی، ابزاری مناسب در توسعه میدان نفتی، افزایش تولید از مخازن، کاهش هزینه حفاری در مخازن، کاستن از مشکلات تولید، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و... می باشد و بهترین نتایج این تکنولوژی در مخازن

شکاف دار، مخازن ناهمگن، ریف ها، مخازن ماسه ای (Sand bodies)، مخازن گسلی و مخزن با ضخامت کم (Thin reservoirs) و دارای تراوایی عمودی دیده می شود. به عنوان مثال استفاده از حفاری افقی در میدان نفتی قوار (بزرگترین میدان نفتی خشکی جهان در عربستان) باعث افزایش تولید (۱۵۰ تا ۴۰۰ درصد) کاهش تعداد چاه های مورد نیاز (۳۰ درصد) کاهش هزینه کنترل آب و گاز (۵۰ درصد) کاهش هزینه های جانبی حفاری (۲۰ درصد)، کنترل مشکلات عملکرد مخزن و چاه و... گردیده است.

درکنار استفاده از این تکنولوژی و

۳- برای دستیابی به یک میزان تولید مشخص، در مقایسه با چاه عمودی، به تعداد کمتری چاه افقی نیاز است که باعث کاهش هزینه های جانبی، خطوط لوله و غیره می شود.

### نتیجه گیری

استفاده از تکنولوژی حفاری افقی در فعالیت های اکتشاف، تولید و توسعه مخازن نفتی در پنج سال اخیر رشد روزافزونی یافته است هر چند هنوز این تکنولوژی در مخازن گازی کاربرد زیادی ندارد. امروزه پیشرفت های قابل توجهی در تکنولوژی حفاری افقی پدید آمده است که از آن جمله می توان به حفاری و

منابع:

1. S.D.Joshi, May 2003, Cost/Benefits of Horizontal Wells, SPE83621
2. Roger M. Butler, 1994, Horizontal Wells for Recovery of Oil and Gas Petroleum Society Monograph
3. خلیلی مسعود، ۱۳۷۴، گزارش تولید چاه شماره ۲۴۲ آسماری، مناطق نفت خیز جنوب

۳۴  
شماره ۲۰ - فروردین ۱۳۸۴  
آرژانت تولید