

حفاری فروتعدالی مخازن شکاف دار غرب آسیا: چالش‌ها و راهکارها

ارسطو طاهری اوروند^۱، کارشناسی ارشد مهندسی حفاری نفت دانشگاه صنعت نفت اهواز ■ دکتر خلیل شهبازی، دانشیار مهندسی نفت دانشگاه صنعت نفت

چکیده

امروزه از روش‌های حفاری فروتعدالی و فروتعدالی استفاده می‌شود. حفاری فروتعدالی یک فناوری جدید است که به دلیل مشکلات حاصل از حفاری فروتعدالی ارائه شده است. اگر فشار حین حفاری سیال حفاری از فشار مخزن کمتر باشد، حفاری فروتعدالی است و در نتیجه‌ی آن ورود سیال به چاه را به دنبال دارد و به دنبال آن آسیب سازند حذف خواهد شد که این عامل، سبب افزایش ضریب تولید می‌شود. در صورتی که فشار سیال حفاری از فشار سازند بیشتر باشد، حفاری فروتعدالی است. سیالات به کار گرفته شده در حفاری فروتعدالی به صورت گاز، مه، کف و مایعات هوازده هستند. کشورهای غرب آسیا و حوزه‌ی خلیج فارس همواره به دنبال کاهش هزینه‌های حفاری و استخراج هستند. حفاری فروتعدالی به سبب کاهش زمان حفاری حاصل از سرعت زیاد حفاری و افزایش ضریب تولید، بسیار کاربردی شده است. مخازن موجود در غرب آسیا بیشتر از نوع کربناته و از نوع شکاف دار هستند. یکی از مهمترین معایب حفاری این سازندها هرزروی گل یا حتی قطع گردش گل در آن است. از آنجایی که گل حفاری در این حفاری به سازند نفوذ نمی‌کند، شرکت‌های این حوزه بیشتر از این نوع حفاری استفاده می‌کنند. این مقاله به بررسی مشکلات حفاری مخازن شکاف دار در غرب آسیا پرداخته است و همچنین از مزایای حفاری فروتعدالی و لزوم به کارگیری آن بحث شده است. کشورهای ایران، کویت و عمان به دلیل تنوع عملیات‌های انجام شده و قدمت آنها در این حفاری در این مقاله آورده شده‌اند. در مخازنی که دچار افت فشار شده‌اند این نوع حفاری الزامی است. در چاه‌های افقی استفاده از این روش، کاربردی تر است. مهمترین ویژگی‌های حفاری فروتعدالی عدم آسیب سازند و کاهش هزینه‌ی حفاری است و به همین دلیل هم‌اکنون در غرب آسیا بسیار به کار گرفته می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۹/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۱۱/۲۸

واژگان کلیدی:

حفاری فروتعدالی، مخازن شکاف دار، غرب آسیا، آسیب سازند.

مقدمه

فروتعدالی است. [۲] در زمان حفاری اگر فشار سیال حفاری کمتر از فشار منفذی^۳ باشد، آنگاه حفاری از نوع فروتعدالی خواهد بود. سیال حفاری می‌تواند هوا یا گاز باشد و همین‌طور می‌تواند سیال تک‌فاز یا سیالی دوفاز باشد. [۱] امروزه حفاری فروتعدالی به دلیل کاهش آسیب سازند، افزایش نرخ نفوذ، نبود هرزروی گل، بهبود و آسان‌سازی ارزیابی سازند مورد توجه قرار گرفته است. [۲] سیالات استفاده شده در حفاری فروتعدالی را می‌توان به این دسته‌ها تقسیم‌بندی کرد:

۱- سیالات حفاری به صورت گاز، هوا، مه^۴ و کف ناپایدار^۵: تکنولوژی حفاری با گاز و هوا از هوای فشرده و دیگر گازها به عنوان سیال حفاری بهره جسته است. زمانی که مایعات به جریان گاز اضافه شوند، سیال حفاری به کف یا کف ناپایدار مبدل می‌شود. هدف از

انتظار می‌رود با رشد روزافزون فناوری، هزینه‌های جانبی استخراج نفت کاهش بیابد و همچنین بیشترین مقدار انرژی نیز استخراج شود. طبیعتاً هرچه روش‌های حفاری و استخراج همراه با صرفه‌ی اقتصادی بیشتری باشند یعنی هزینه‌ها و آسیب‌های حاصل از حفاری به حداقل برسد می‌توان انرژی را ارزان‌تر استخراج کرد و صرفه‌ی اقتصادی را افزایش داد.

روش‌های حفاری عبارتند از:

۱- روش حفاری فروتعدالی^۱

۲- روش حفاری فروتعدالی^۲ [۱]

یکی از مشکلات شایع در روش‌های قدیمی حفاری ایجاد آسیب سازند به دلیل نفوذ سیال حفاری به درون سازند می‌باشد، مهمترین راه‌حل برای به حداقل رساندن آسیب سازند، حفاری

* نویسنده‌ی عهد دار مکاتبات (aras.tavarvand@gmail.com)

افزودن مایعات به سیال حفاری، تر کردن خرده‌های حفاری است و مزیت این کار جلوگیری از ایجاد حلقه‌ی گل است که این مشکل عامل اصلی ایجاد گیر لوله^۳ است. [۳]

۲- سیالات حفاری به صورت مایعات هوا زده: حفاری با مایعات هوا زده، حفاری با گل هوا زده و حفاری با مایع گازدار نیز نامیده می‌شود. چگالی میانگین در مایعات گاز زده به کسر حجمی گاز، فشار و دما بستگی دارد. گازهای استفاده شده در سیالات گاز زده معمولاً هوا یا نیتروژن است و مایعات عموماً گل حفاری، سوخت دیزل یا نفت سازند هستند. [۳ و ۴]

۳- سیالات حفاری به صورت کف پایدار: حفاری با کف پایدار نسبت به حفاری با گاز چندین مزیت دارد:

- نبود شویدگی دیواره^۴ در سازندهای غیرمستحکم در زمان حفاری
- حمل عالی خرده‌های حفاری (۷ تا ۸ برابر بهتر نسبت به آب)
- نیاز کم به فشرده‌سازی

کف پایدار شامل آب، عوامل کفزا (مواد فعال‌کننده‌ی سطحی) و گاز یا هوا است. [۳] مقایسه‌ی کارایی و عملکرد انواع سیالات مورد استفاده در حفاری فروتعدالی در جدول ۱ نشان داده شده است.

شکاف^{۱۰} از دیدگاه‌های متفاوتی قابل تعریف است. از دیدگاه ژئومکانیکی، هر سطحی که دارای عدم پیوستگی باشد، در واقع دارای شکاف است. از دیدگاه کلی‌تر شکاف، ناپیوستگی است که به واسطه‌ی آن لایه‌های سنگی به بلوک‌هایی در طول آن ناپیوستگی می‌شکنند. [۵] مشکلات حفاری مخازن شکافدار به ساختار چینه‌شناسی این مخازن برمی‌گردد.

مهمترین مشکل حفاری این‌گونه مخازن، هرزروی شدید سیال حفاری است که به علت وجود شکاف‌های سازند است ولی مشکلات دیگری مانند بازیافت ضعیف مغزه (حدود ۳۰ درصد)، نمودارگیری مشکل‌تر به واسطه‌ی نفوذ فراوان اندود گل به درون سازند و سرعت حفاری بسیار پایین (مخازن شیلی شکافدار کالیفرنیا) نیز وجود دارد. [۵] هرزروی گل ممکن است در سازندهای شکافدار، غاردار و یا به شدت تراوا رخ دهد. [۶] هرزروی تجربه شده در حفاری مخازن کربناته‌ی ایران در حدود ۳۵ درصد است که علت اصلی آن شکاف‌های طبیعی مخزن است. [۷]

فشار مخزنی در ناحیه‌ی جنوبی مکزیک در طول ۲۵ سال تولید دچار افت شده بود و به منظور جبران این افت فشار، سه چاه افقی حفر شده بود که نتایج قابل‌قبولی در بر نداشت. حفاری چاه بعدی با گاز نیتروژن برای غلبه بر مشکلات حفاری همچون هرزروی گل حفاری و گیر اختلاف فشاری استفاده شده و نتایج نسبت به سه

چاه دیگر قابل‌قبول بود. [۸]

حفاری فروتعدالی در سامانه‌هایی که دارای تخلخل بالا یا شکاف زیاد هستند به منظور جلوگیری از آسیب سازند و کاهش تولید نهایی گاز یا نفت استفاده می‌شود. اگر در تمام مدت حفاری شرایط فروتعدالی وجود نداشته باشد در روی دیواره‌ی چاه اندود گل ایجاد می‌شود حتی اگر شرایط فروتعدالی رعایت شود، به دلیل آشام فیلتره‌های گل پایه‌ی روغنی یا پایه‌ی آبی به درون سازند، آسیب سازند حادث می‌شود. [۹]

سازند شعیبه سازند آهکی شکافدار در کویت است که دچار هرزروی شدید سیال حفاری شده بود و به منظور مقابله با هرزروی از روش حفاری فروتعدالی استفاده شد. حفاری فروتعدالی می‌تواند سبب کاهش یا حتی حذف آسیب سازند شود. یکی دیگر از مزایای این نوع حفاری، بهبود شناسایی خواص سنگ مخزن است. [۱۰]

حفاری به روش فروتعدالی سبب صدمات جبران‌ناپذیری به دلیل نفوذ گل حفاری به سازند خواهد شد و در حفاری‌های جهت‌دار عملیات همراه با مشکلات و هزینه‌های متعددی خواهد بود و حتی امکان بی‌نتیجه ماندن عملیات نیز وجود دارد. از آنجایی که حفاری فروتعدالی سبب تولید هنگام حفاری می‌شود پس مقداری از هزینه‌ها در همان زمان حفاری جبران خواهد شد. حفاری فروتعدالی به ویژه در حفاری افقی با توجه به بحث‌های اقتصادی ضروری است. [۱۱]

حفاری فروتعدالی یک روش کاربردی به ویژه برای حفاری لایه‌ی مخزنی است. به منظور طراحی و برنامه‌ریزی حفاری یک چاه به روش فروتعدالی باید غربال‌گری مخازن به خوبی و با دقت فراوان انجام شود. عوامل گوناگونی در طراحی حفاری باید مورد نظر قرار گیرد، از جمله: خواص سنگ و فشار مخزن، جنس دیواره‌ی چاه، نوع مته، تجهیزات سطحی و... در مخازنی که بر اثر تولید، دچار افت فشار شده‌اند، حفاری با فوم پایدار به دلیل رئولوژی مناسب و توانایی حمل‌کننده‌ی بالا، بسیار موثر خواهد بود. [۱۲]

در این پژوهش سعی شده است بررسی در سه کشور ایران، عمان و کویت انجام شود تا مشکلات حفاری فروتعدالی در سازندهای شکافدار و راه‌حل‌های آن در منطقه‌ی غرب آسیا بیان شود و تجربیات حاصل از آن به عنوان مقاله‌ای در اختیار مهندسان و دانش‌پژوهان قرار گیرد و کمکی به شرکت‌های حفاری باشد تا آمادگی لازم برای مقابله با مشکلات حفاری سازندهای شکافدار را داشته باشند و به خوبی و به‌هنگام، بتوانند اقدام به رفع مشکلات کنند.

می‌شود و در پایان، اطلاعات تکمیلی مانند نوع سیال حفاری بیان خواهند شد. متأسفانه در همه‌ی موارد بررسی شده، اطلاعات به صورت کامل بیان نشده است.

۱- حفاری‌های فروتعدالی در غرب آسیا

۱-۱- حفاری‌های فروتعدالی در ایران

در ابتدا به بررسی حفاری فروتعدالی در ایران می‌پردازیم. ۹۰ درصد مخازن ایران از نوع کربناته هستند و سازوکار تولید از این مخازن از طریق شبکه‌ی شکاف می‌باشد و این شکاف‌ها توسط ماتریس تغذیه می‌شوند. اگر چاه حفر شده شکاف‌ها را قطع نکند، تولید یا بسیار کم خواهد بود یا باید چاه را ترک کرد. در چنین مواردی اسیدزنی در اکثر مواقع بی‌نتیجه خواهد بود. [۷]

عملیات حفاری فروتعدالی در میدان دهلران با ضخامت ۳۰۰ متر انجام شده است که از نوع مخازن کربناته‌ی شکاف‌دار است. با توجه به جدول ۱ مشکل اصلی حفاری این میدان هرزروی گل حفاری از مقدار کم تا شدید بوده است.

برای طراحی موفقیت‌آمیز حفاری فروتعدالی باید معیارهای زیر را در نظر داشت:

۱- فشار انتهایی چاه: در تمام مدت حفاری و تکمیل، فشار در حال گردش انتهایی چاه می‌بایست پایا باشد.

۲- تمیزسازی گمانه: سیال به کار رفته باید توانایی گمانه را در هر جهتی و در هر عمقی داشته باشد.

۳- تجهیزات جداسازی سطحی: تجهیزات سطحی می‌بایست توانایی جداسازی و کنترل حجم خروجی گل حفاری به همراه هیدروکربن تولیدی را داشته باشند در غیر این صورت خود این مسئله مشکل‌زا خواهد بود و در نهایت مجبور به کشتن چاه می‌شویم.

بر اساس معیارهای بالا پنجره‌ی حفاری فروتعدالی تعریف می‌شود. [۱۰]

ابتدا ویژگی‌های هر مخزن یا سازند مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس مشکلات حفاری در آنها بیان خواهد شد و سپس به این پرداخته می‌شود که آیا حفاری فروتعدالی راهکار مناسبی بوده است یا خیر؟

همچنین بررسی مزایای جانبی حفاری فروتعدالی نیز بررسی

۱ | هرزروی در چاه‌های میدان دهلران [۷]

چاه	مقدار هرزروی	نوع گل	چاه	مقدار هرزروی	نوع گل
۲	هرزروی شدید	گل پایه‌ی آبی	۱۴	بدون هرزروی	معلوم نیست
۳	بدون هرزروی	گل پایه‌ی روغنی	۱۶	هرزروی شدید	گل پایه‌ی آبی
۴	بدون هرزروی	گل پایه‌ی آبی	۱۷	هرزروی میانگین	گل پایه‌ی آبی
۵	هرزروی شدید	گل پایه‌ی آبی	۱۸	هرزروی میانگین	گل پایه‌ی آبی
۶	بدون هرزروی	معلوم نیست	۱۹	بدون هرزروی	گل پایه‌ی روغنی
۱۱	بدون هرزروی	روغن پایه	۲۰	هرزروی جزئی	گل پایه‌ی روغنی
۱۲	بدون هرزروی	گل پایه‌ی روغنی	۲۱	هرزروی جزئی	گل پایه‌ی روغنی

۲ | مقایسه‌ی روش حفاری فراتعدالی و فروتعدالی در میدان دهلران [۷]

UBD	OBD	
۱۰۰۰	۱۰۰۰	طول حفاری (m)
۶	۳	نرخ نفوذ (m/hr)
۱۶۷	۳۳۳	کل زمان حفاری (hour)
۰	۲۴	زمان TRIPPING در ناحیه‌ی مخزنی (hour)
۲۴	ندارد	زمان نصب تجهیزات (hour) UBD
۰	۱۲۰	زمان تحریک چاه (hour)
۱۲۰	۱۲۰	زمان تکمیل چاه (hour)
۳۱۱	۵۹۷	کل زمان حفاری ناحیه‌ی مخزنی (hour)
		زمان ذخیره شده (day)

دمای مخزن ۱۵۰ درجه‌ی فارنهایت و چگالی نفت API ۳۳/۵ است. مشکلات اصلی حفاری در مخازن پیر مانند این میدان، به روش فراتعدالی یکی هرزروی شدید و دیگری آسیب فراوان به سازند است.

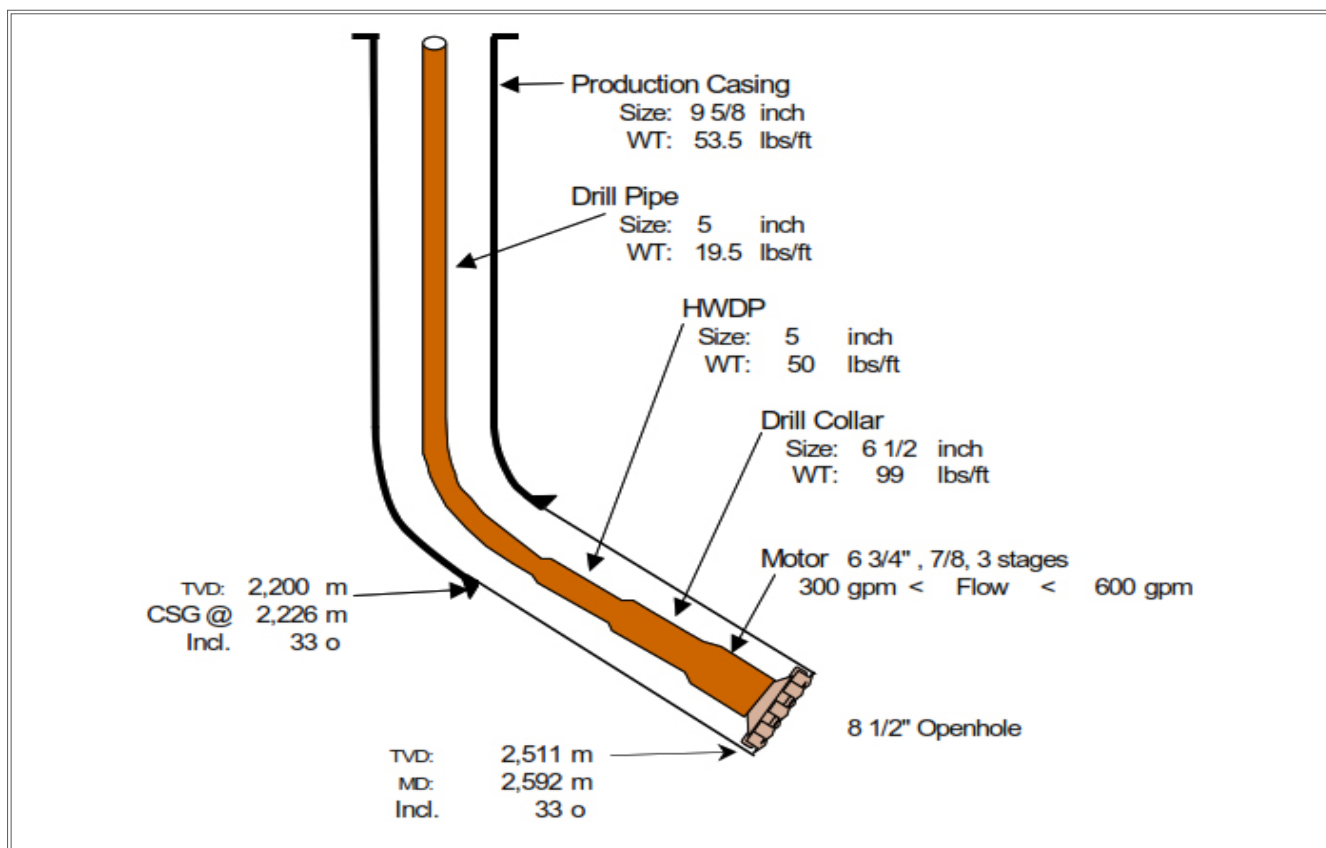
به کمک حفاری فراتعدالی تولید چاه افزایش می‌یابد. در زمان ۸۶ ساعت قسمتی از چاه به روش فراتعدالی حفر شد. با شروع حفاری انحرافی، حفاری به روش فراتعدالی تغییر پیدا کرده است. چاه با موفقیت کامل به هدف خود دست یافته است. در زمان حفاری فراتعدالی هیچ‌گونه هرزروی وجود نداشت اما اگر به روش فراتعدالی اقدام می‌شد، مقدار هرزروی بسیار زیاد بود. یکی دیگر از مزایای حفاری فراتعدالی تولید اولیه‌ی نفت است که سبب بهبود وضع اقتصادی می‌شود.

ابتدا سیال حفاری مورد استفاده، دیزل به همراه نیتروژن بود و سپس به سیال مخزن پارسی به همراه نیتروژن تغییر پیدا کرد، علت استفاده از سیال خود مخزن کاهش آسیب سازند و علت استفاده از گاز نیتروژن خنثی بودن آن است.

هنگام حفاری فراتعدالی اکثر شکاف‌ها توسط گل یا مواد جلوگیری‌کننده از هرزروی بسته می‌شوند که این مورد سبب آسیب شدید به سازند می‌شود. با به‌کارگیری حفاری فراتعدالی نه تنها مشکل هرزروی گل برطرف شده است بلکه حفاری فراتعدالی سبب بهبود تولید شده است.

در میادین یا سازندهایی که دچار افت فشار شده‌اند یا دارای سازند سخت و یا سازندی آسیب‌دیده هستند، می‌توان از روش حفاری فراتعدالی استفاده کرد. حفاری فراتعدالی در بهبود تولید از مخازن شکاف‌دار بسیار مناسب است، سبب بهبود تشخیص شبکه‌ی شکاف و کاهش زمان حفاری و آسیب سازند می‌شود و سرعت حفاری را افزایش می‌دهد، همان‌طوری که در جدول ۲ نشان داده شده است و تمامی این مزایا سبب صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود. [۷]

چاه ۷۰-PR (شکل ۱) چاهی است که به صورت فراتعدالی در میدان پارسی حفر شده است. سازند هدف، آسماری است. این سازند دارای لایه‌های کربناته‌ی شکاف‌دار به همراه دولومیت و رس است. در واقع سازند آسماری به پنج بخش تقسیم می‌شود و عمدتاً شکاف‌دار است. فشار مخزن در بالای ناحیه‌ی مخزنی ۲۱۹۰ پام،



حساس‌تر عمل می‌کند و حتی اگر تراوایی عمودی آن بیشتر از تروایی افقی آن باشد حفاری فراتعدالی آسیب‌های بسیار زیادی به سازند وارد می‌کند. بر خلاف چاههایی که به روش فراتعدالی حفر شده‌اند، چاههای ۷۶،۵،۴ به روش فراتعدالی حفاری شده‌اند و با توجه به جدول ۴ هیچ‌گونه مشکلی در زمان حفاری به وجود نیامده است.

متوسط سرعت حفاری به روش فراتعدالی ۲/۱۲۵ برابر نسبت به حفاری فراتعدالی است که این مهم سبب کاهش زمان و هزینه‌ی حفاری خواهد شد. در نتیجه با توجه به مزایای حفاری فراتعدالی و معایب حفاری فراتعدالی در چاههای افقی و انحرافی می‌توان گفت که حفاری به روش فراتعدالی بسیار ضروری و اقتصادی خواهد بود. [۱۱]

مزایای جانبی حفاری فراتعدالی در این عملیات عبارتند از: کاهش هرزروی، هزینه‌ی حفاری و تولید اولیه‌ی نفت و ارسال آن به واحد بهره‌برداری.

با توجه به انجام موفقیت‌آمیز عملیات حفاری فراتعدالی در ایران برای چاههای افقی، توصیه می‌شود که به منظور حذف مشکلات به وجود آمده از حفاری فراتعدالی استفاده شود و همچنین در مخازنی که دارای فشار کمی هستند، به منظور جلوگیری از آسیب سازند و هرزروی سیال حفاری باید از حفاری فراتعدالی بهره جست.

نرخ متوسط نفت و گاز تولیدی در هنگام حفاری SCFM ۹۰۰۰ و ۲۵۰ bbl/min است. یکی از نگرانی‌های این حفاری تولید گاز سولفیددی‌هیدروژن بود که در عملیات از خنثی‌کننده‌ی H₂S^{۱۱} استفاده شد تا در سطح از سیال حفاری جدا شود. چاه با موفقیت به عمق هدف بدون هرزروی گل رسید و همچنین به دلیل تولید اولیه سبب بهبود وضعیت اقتصادی شد. [۱۳]

محرکه‌ی اصلی استفاده از چاههای انحرافی و افقی، کاهش تولید نفت و نیاز به کاهش هزینه‌ی بازیافت و بهبود آن است. این واقعیت که اکثر مخازن به صورت جزئی دچار افت تولید شده‌اند بر کسی پوشیده نیست و این مهم سبب شده تا نیاز به حفاری انحرافی و افقی با چاههای چند شاخه‌ای بیشتر حس شود. همچنین به منظور کاهش آسیب سازند و افزایش نرخ نفوذ، حفاری فراتعدالی یک امر ضروری است. [۱۴]

به همین منظور در یکی از مخازن جنوب‌غربی ایران، حفاری ۷ حلقه چاه مورد بررسی قرار گرفته است که ۳ حلقه به روش فراتعدالی و ۴ حلقه به روش فراتعدالی حفر شده است. چاههای ۱ و ۲، ۳ به روش فراتعدالی و انحرافی حفر شده‌اند. مشکلات حین حفاری این چاهها عبارتند از: هرزروی گل حفاری، گیر کردن لوله‌ها، مانده‌گذاری، افزایش زمان و هزینه‌ی حفاری.

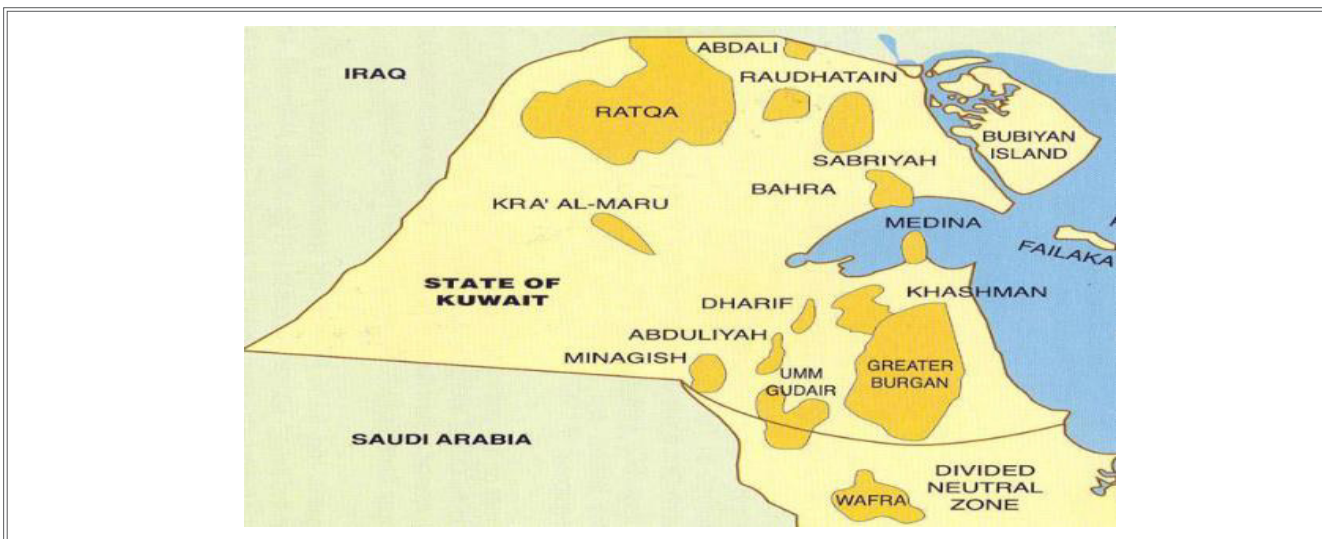
حفاری افقی به دلیل اینکه مخزن بیشتر در معرض حفاری است

۳ | شرایط حفاری فراتعدالی [۱۳]

شرایط توصیه شده			
نرخ تزریق نیتروژن (SCFM)	فشار ته چاه (PSI)	فشار سر چاه (PSI)	دبی مورد نیاز سیال (GPM)
۱۵۰۰	۱۹۹۷	۶۵	۳۸۶
شرایط واقعی			
نرخ تزریق نیتروژن (SCFM)	فشار ته چاه (PSI)	فشار سر چاه (PSI)	دبی مورد نیاز سیال (GPM)
۳۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰۰-۲۱۵۰	۳۰۰-۸۰۰	۳۵۰-۵۰۰

۴ | جزئیات عملیات حفاری فراتعدالی در چاههای حفاری شده به روش فراتعدالی [۱۱]

شماره چاه	اندازه‌ی حفره (اینچ)	عمق نهایی (متر)	زاویه (درجه)	نفت تولیدی (بشکه)	مانده‌یابی	گیر لوله
۴	۸/۵	۳۲۳۲	۳۵	۲۱۴۷	-	-
۵	۸/۵	۲۹۳۶	۵۵	۴۰۵۱۹	-	-
۶	۸/۵	۲۷۱۳	۶۰	۳۱۰۹	-	-
۷	۸/۵	۲۵۴۰	۷۰	۳۸۰	-	-



شکل ۲ | میدین نفتی کویت [۱۵]

۱-۲- حفاری‌های فروتعدالی در کشور کویت

سازند شعیه در کویت سازندی به شدت شکافدار و از نوع آهکی است و به طور طبیعی دارای فشار غیرعادی کم می‌باشد که در زمان حفاری‌های انجام شده در این ناحیه هرزروی کامل گل حفاری اتفاق افتاده است. فشار مخزن برابر با ۳۲۰۰ پام است. هدف از حفاری فروتعدالی آشنایی کارکنان با تجهیزات و روش کار با این روش بود. ناحیه‌ی موردنظر بدون هیچ‌گونه هرزروی گل حفر شد. نرخ نفوذ در سازند به طور متوسط برابر با ۲۷ft/hr است. [۱۰]

عملیات حفاری فروتعدالی مهندسی شده سبب افزایش چشمگیر تولید چاه و کاهش زمان حفاری می‌شود. کاهش آسیب سازند ناشی از عدم هجوم سیال حفاری به درون سازند یکی دیگر از مزایای حفاری فروتعدالی است. با پیر شدن مخازن کویت نیاز به احیای مخزن بیشتر می‌شود.

حفاری فروتعدالی روشی جایگزین برای حفاری فراتعدالی است. تعداد گوناگونی از گازها در هر عملیاتی به کار گرفته می‌شوند که عبارتند از: گاز طبیعی، نیتروژن و... که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

تزریق ترکیبات اکسیژن‌دار سبب وقوع آتش‌سوزی شده و همچنین خاصیت خوردگی ایجاد می‌کنند، به همین دلیل سیالات هوازه توصیه نمی‌شود. حفاری فروتعدالی سبب جمع‌آوری اطلاعات ارزیابی ذخیره‌ی نفت و گاز در سازند شعیه شده است. گاز استفاده شده در این عملیات نیتروژن است. حفاری فروتعدالی تحت شرایط تزریق ۴۰۰ gpm آب و ۱۲۰۰ scfm نیتروژن فشار ته‌چاهی گردشی برابر با ۳۱۵۰ پام ایجاد می‌کند.

مخزن اوولیتی مناقش^{۱۲} در میدان ام‌قدیر (غرب کویت)

میدان ام‌قدیر در غرب کویت مخزنی عمدتاً کربناته است. مخزن به عنوان اوولیت مناقش شناخته می‌شود که شامل دو طاق‌دیس است، طاق‌دیس شرقی تحت عنوان ام‌قدیر شرقی شناخته شده است و دیگری ام‌قدیر غربی که این دو در ناحیه‌ای میانی به هم متصل هستند.

مطالعات نشان می‌دهد که مخزن اوولیتی مناقش از نوع مخازن با فشار پایین (۰/۳۰ psi/ft) است از این رو در صورت حفاری به روش مرسوم سبب افزایش آسیب سازند و هرزروی سیال حفاری می‌شود. با توجه به ویژگی‌های این مخزن به منظور جلوگیری از آسیب سازند می‌توان از حفاری فروتعدالی استفاده کرد. (جدول ۵) علاوه بر حفاری موفقیت‌آمیز این چاه به روش فروتعدالی می‌توان به مزایای زیر نیز اشاره کرد:

■ بهبود بالقوه در عملکرد حفاری: حفاری فروتعدالی سبب افزایش عمر مته و نرخ نفوذ که در نتیجه سبب کاهش زمان و هزینه‌های حفاری می‌شود.

■ بهبود شناسایی مخزن: حفاری فروتعدالی به کمک اندازه‌گیری مهمترین ویژگی مخزن یعنی ویژگی تولید سبب بهبود شناسایی مخزن می‌شود.

این مخزن شامل چهار مرحله جداری‌گذاری است که قسمت تولیدی افقی آن به صورت چاه باز تکمیل شده است. قسمت تولیدی توسط سیال حفاری نیتروژن‌دار به روش فروتعدالی حفاری شد که حدوداً فشار سیال ۱۰ درصد کمتر از فشار سازند است.

بسیاری دارد که سبب کاهش هزینه‌های حفاری و عملیات‌های بعد از آن خواهد شد اما در صورت عدم رعایت شرایط فروتعدالی آسیب‌هایی به سازند نیز وارد خواهد شد که در آینده سبب افزایش هزینه‌های تکمیل و تحریک چاه می‌شود.

۳-۱- حفاری‌های فروتعدالی در کشور عمان

در کشور عمان در سال ۱۹۹۲، چند چاه آزمایشی به منظور ارزیابی عملیاتی بودن و مزایای مالی حفاری فروتعدالی با کف پایدار انجام شد.

دو چاه آزمایشی با موفقیت مشبک‌کاری شدند و نتایج تولید، تحسین برانگیز بود. چاه سوم به علت ناپایداری دیواره‌ی چاه (شیل‌های ریزشی) در قسمت افقی متوقف شد.

در برخی میداین مانند فهود (مخزن کربناته‌ی شکافدار) مقدار فشار زیاد گل حفاری سبب قطع گردش گل می‌شود. برای مثال، حفاری در قسمت افقی میداین فهود همراه با هرزروی ۳۲۵۰۰m-۱۰ آب بوده است و چاه در زمانی بین ۶-۲ ماه، آب گل حفاری را تولید می‌کرد و سپس بیشترین میزان تولید نفت حاصل شد. همچنین این مورد سبب آسیب سازند نیز شد.

در حفاری افقی همراه با کف، تجهیزات قدیمی مانند موتورهای درون‌چاهی و ابزار اندازه‌گیری حین حفاری (MWD) عملیاتی نیستند و باید از ابزار اندازه‌گیری الکترومغناطیسی حین حفاری (EMMWD) و موتورهای درون‌چاهی مخصوص حفاری با هوا استفاده کرد.

چاه عمل ۴۳

چاه عمل ۴۳ به صورت عمودی در مخزن ماسه‌سنگی حیما حفر شده است. بعد از نصب لوله‌ی لاینر ۷ اینچی در بالای مخزن، ضخامتی به طول ۱۰۰ متر و قطر ۵/۷ به روش فروتعدالی بدون هیچ‌گونه مشکلی حفاری شد.

سیالات برگشتی (شامل نفت خام) به سمت مشعل گاز فرستاده شد. پتانسیل اولیه‌ی این چاه حدوداً $135 \text{ m}^3/\text{d}$ است که ۵۰ درصد بیشتر از مقدار تخمینی توسط نمودارهای چاه‌پیمایی بود. شاخص تولید این چاه برابر با $0.35 \text{ m}^3/\text{d}/\text{kPa}$ است که بیش از دو برابر میانگین چاه‌های عمودی اطراف است و طبق تحقیقات این چاه هیچ‌گونه آسیب سازندی ندارد.

۵ | مشخصات مخزن اوولیتی منقاش [۱۵]

چینه‌شناسی	آهک دانه‌ای و کریستالی
نوع سیال مخزن	نفت سیاه
عمق واقعی عمودی	۸۲۰۰ Ft
احتمال ناپایداری دیواره‌ی چاه	کم
شکاف‌های طبیعی	خیر

۶ | مشخصات مخزن معدود [۱۶]

چینه‌شناسی	آهک تمیز / دولومیت / آهک گلوکونیتی
فشار استاتیک مخزن	۱۸۵۰ Psi
ضخامت قسمت تولید	۳۰ ft

مخزن معدود در میدان بورغان (شرق و جنوب کویت)

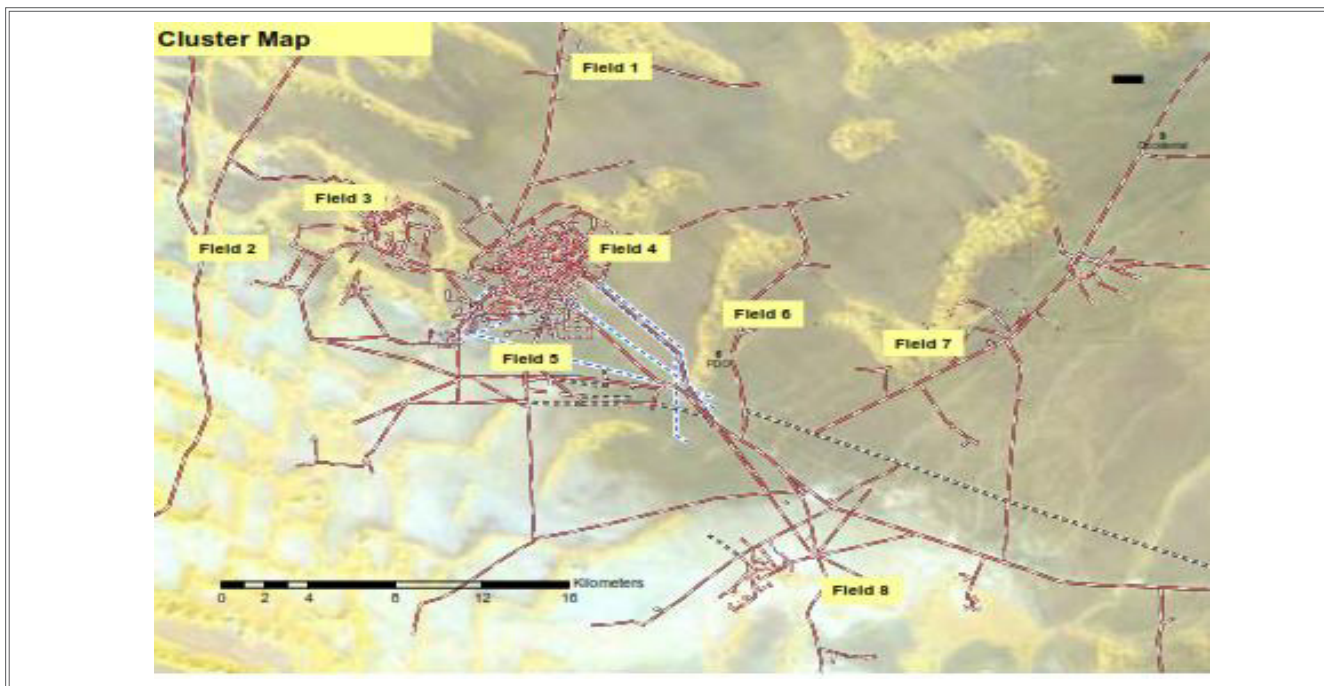
مخزن معدود در شمال کویت، به عنوان مخزنی با لایه‌ی آهکی تولیدی ضخیم شناخته می‌شود که تولید خوبی هم دارد ولی در جنوب‌شرقی کویت، در میدان بورغان، تولید بسیار مشکل است و قسمت تولیدی سازند معدود تقریباً ۱۲ متر ضخامت دارد.

در این قسمت مخزن دارای تخلخل بالا (۱۸ درصد) است ولی تراوایی زمینه کم (۱۰ - ۰/۸ میلی‌داریسی) است. [۱۵] همین موضوع سبب می‌شود که از روش حفاری بهره جست که میزان تراوایی را از این مقدار کمتر نکند، در غیر این صورت هزینه‌های تحریک چاه افزایش پیدا خواهد کرد در ضمن از آنجایی که حفاری به صورت افقی است و در حفاری فراتعدالی میزان تهاجم سیال حفاری به سازند در حد صفر است بهترین گزینه، حفاری فروتعدالی است.

بر اساس مدل‌سازی سیال و بررسی‌های مهندسی، مشخص شده است که حفاری فروتعدالی راه‌حل مناسب برای مخزن معدود در میدان بورغان می‌باشد.

در صنعت، راه‌حل جلوگیری از آسیب سازند، حفاری فروتعدالی است. حفاری فروتعدالی همواره در حین حفاری باید شرایط فروتعدالی را حفظ کند، در غیر این صورت به دلیل عدم وجود اندود گل آسیب چاه بسیار شدید خواهد بود. در برخی مواقع حتی با رعایت شرایط فروتعدالی، آسیب سازند حاصل می‌شود که ناشی از آشام، ریزش ثقیلی، لعاب مکانیکی ۱۳ و تاثیرات افت فشار است. [۱۶]

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت که حفاری فروتعدالی مزایای



شکل ۳ | میداین خوشه‌ای عمان [۱۸]

چاه فهود شمالی ۲۹۳

همراه با لایه‌های شیلی است. در حین برنامه‌ریزی چاه، ناپایداری لایه‌های شیلی در نظر گرفته شد ولی به دلیل دیدگاه مالی، تصمیم گرفته شد که حفاری به صورت فروتعدالی باشد. حفاری با کف تا عمق ۷۵ متری با سرعت مناسبی در حال انجام بود، زمانی که به لایه‌ی شیلی رسید، به دلیل ریزش چاه و عدم توانایی کف در تثبیت پایداری دیواره‌ی چاه گشتاور و نیروی کشش افزایش یافت. افزایش غلظت کف سبب بهبود وضعیت چاه نشد پس، حفاری با کف متوقف شد و حفاری به روش فراتعدالی ادامه یافت. [۱۷]

حفاری فروتعدالی در چندین میدان کربناته از میداین خوشه‌ای در عمان به کار گرفته شده است و علت اصلی آن بهبود تولید و تزریق پذیری، مشخصه‌سازی مخزن در زمان واقعی و کاهش یا حذف آسیب سازند بوده است.

میداین خوشه‌ای در شمال عمان واقع شده‌اند. سه واحد مخزنی عمده در مخزن کربناته‌ی شعبیه در میداین خوشه‌ای وجود دارند: شعبیه‌ی بالایی، خریب و شعبیه‌ی پایینی.

حفاری فروتعدالی در میداین خوشه‌ای در سال ۲۰۰۳ با هدف مطالعه‌ی امکان‌پذیری این نوع حفاری و مزایای آن در مخزن شعبیه‌ی پایینی شروع شد.

میدان فهود، مخزنی کربناته‌ی شکاف‌دار است. بعد از جداری‌گذاری، عملیات فروتعدالی به طول ۷۷۷ متر و قطر ۱/۸ به صورت افقی با موفقیت و در ایمنی کامل انجام شد. فناوری‌های جدید (EM-MWD و موتور کف) به خوبی عمل کردند. زمانی که حفاری فروتعدالی کامل شد، افزایش تولید هیدروکربن پدیدار شد، تقریباً بعد از حفاری ۶۰۰ متر از قسمت افقی، تخلیه‌ی سیالات درون سازند بسیار مشکل شد که علت آن هرزروی کف ناشی از افزایش فشار هیدروستاتیک ستون نفتی بود. عملکرد چاه در این مخزن به شدت وابسته به تعداد شکاف‌ها است. چهار حلقه چاه افقی در این مخزن حفر شده است و این چاه کمترین میزان شکاف را دارا است. انتظار می‌رفت که تولید این چاه $330 \text{ m}^3/\text{d}$ نفت به همراه برش آب اولیه ۱۰۰ درصد و کاهش به ۵۰ درصد بعد از سه ماه باشد ولی در واقع تولید این چاه $330 \text{ m}^3/\text{d}$ نفت به همراه برش آب ۱۷ درصد بعد از یک ماه بود.

چاه بهجه ۱۸

چاه بهجه ۱۸، اولین چاه از شش چاه افقی حفر شده بود که مخزن آنها دچار افت فشار شده بود. این مخزن، مخزنی ماسه‌سنگی

مثالی از میدان شماره ۸

در زمان و هزینه می‌شوند. [۷، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۷ و ۱۸] دیگر مزایای حفاری فروتعدالی عبارتند از: حفر ایمن‌تر چاه‌های افقی با آسیب سازند کمتر، تولید اولیه‌ی هیدروکربن، شناسایی توزیع شبکه‌ی شکاف و کاهش تولید آب. در مواقعی که نتوان حجم تولیدی هیدروکربن را در سطح کنترل کرد باید چاه کشته شود و سیال سازند به درون آن برگردد. [۱۱، ۱۳ و ۱۸]

مهمترین عیب در حفاری فروتعدالی عدم توانایی ایجاد پایداری دیواره‌ی چاه به خصوص در سازندهای شیلی است که می‌تواند سبب ریزش دیواره‌ی چاه و توقف حفاری شود [۱۷] که این مشکل سبب استفاده‌ی حفاری فراتعدالی به جای فروتعدالی در سازندهای ریزی می‌شود.

همچنین به دلیل اینکه در این نوع حفاری لزوماً از مایع استفاده نمی‌شود نیاز به نصب تجهیزات سرچاهی مانند تانک‌های مخصوص است، همچنین ابزار درون‌چاهی مانند ابزار EM-MWD و موتورهای درون‌چاهی مخصوص نیاز است که نصب این تجهیزات نیازمند صرف زمان و هزینه هستند [۷ و ۱۷] اما باید توجه داشت که در کل، با توجه به افزایش سرعت حفاری زمان و هزینه کاهش می‌یابد. [۷ و ۱۱] سیالات حفاری فروتعدالی باید به دقت انتخاب شوند، از آنجایی که هوا دارای اکسیژن است، سبب ایجاد خوردگی می‌شود و در صورت اختلاط با هیدروکربن درون چاه و ایجاد شرایط آتش‌سوزی، انفجار درون‌چاهی رخ می‌دهد و گاز طبیعی نیز احتمال دارد در سطح، سبب انفجار شود، به منظور رفع این نقیصه می‌توان از نیتروژن به عنوان گازی خنثی استفاده کرد. [۱۰]

در این چاه، حفاری فروتعدالی به منظور شناسایی توزیع شکاف‌های دارای نفت انجام شد. اهمیت شناسایی این شکاف‌ها در تکمیل چاه ارزش می‌یابد. در حفاری این چاه، بدون استفاده از نگاره‌های تصویری چاه، شکاف‌ها شناسایی شدند و همچنین توزیع سیالات در این شکاف‌ها.

تفاوت زیادی در نرخ تولید بین روش فروتعدالی و روش مرسوم وجود ندارد ولی در حفاری فروتعدالی شتاب تولید بیشتر است. یعنی به لحاظ زمانی زودتر به تولید موردنظر خواهیم رسید. شاخص تولید در چاه‌هایی که به روش فروتعدالی حفاری شده‌اند نسبت به روش مرسوم بیشتر است ولی در برخی چاه‌ها این موضوع برعکس است که می‌تواند به علت قرار گرفتن در نواحی کم فشار باشد. [۱۸]

جدا از مزایای حفاری فروتعدالی باید این نکته را در نظر داشت که این نوع حفاری در سازندهای ریزی از جمله شیل‌ها به دلیل عدم توانایی ایجاد پایداری در دیواره‌ی چاه بسیار خطرناک است و به همین دلیل باید از روش فراتعدالی استفاده کرد.

نتایج به‌دست آمده از عملیات‌های انجام شده در غرب آسیا نشان می‌دهد که علاوه بر حل مشکلات شایع در مخازن شکاف‌دار، مزایای دیگری در این روش حفاری وجود دارد، همچون کاهش زمان و هزینه‌ی حفاری، شناسایی اولیه‌ی خواص مخزن و شناخت شبکه‌ی شکاف، بهبود وضعیت حفاری و تولید اولیه.

مقایسه‌ی حفاری فروتعدالی و حفاری فراتعدالی

با توجه به عملیات‌های بالا می‌توان مقایسه‌ای بین حفاری فروتعدالی و فراتعدالی انجام داد. در حفاری فروتعدالی به دلیل عدم نفوذ سیال حفاری به سازند، آسیب سازند به شدت کاهش می‌یابد، در نتیجه بهبود وضعیت تولید را خواهیم داشت [۱۷] البته در برخی مناطق کم‌فشار شاخص تولید کاهش یافته است. [۱۸] در این حفاری هرزروی گل حفاری نخواهیم داشت. [۷، ۱۱، ۱۳ و ۱۶] زمان‌هایی مانند ایجاد اتصال لوله یا خروج رشته‌ی حفاری، در صورت عدم کنترل شرایط، سبب تبدیل شدن شرایط فروتعدالی به فراتعدالی می‌شود و در پی آن سیال حفاری وارد سازند شده و به دلیل عدم وجود اندود گل روی دیواره‌ی چاه آسیب فراوانی به سازند وارد خواهد شد. [۱۶ و ۱۹] یکی دیگر از مزایای حفاری فروتعدالی افزایش سرعت حفاری و عمر مته است که این دو مورد سبب صرفه‌جویی

نتیجه‌گیری

حفاری فروتعدالی یک فناوری کارآمد در صنعت حفاری است که مزایای بسیار فراوانی دارد و می‌تواند سبب کاهش معایب حفاری فراتعدالی و یا حتی حذف آنها شود. با توجه به بررسی عملیات‌های متفاوت در غرب آسیا می‌توان به این نتایج رسید:

۱- بهترین گزینه برای حفاری لایه‌ی مخزنی با توجه به عدم ایجاد آسیب سازند و تولیدپذیری مخزن و کاهش کلی هزینه‌ها، حفاری فروتعدالی است.

۲- حفاری فروتعدالی مزایای بسیار زیادی دارد ولی با توجه به عدم توانایی حفاری فروتعدالی در ایجاد پایداری دیواره‌ی چاه به خصوص در سازندهای شیلی، می‌بایست در انتخاب سازند یا مخزن مناسب دقت فراوانی به خرج داد در غیر این صورت عملیات

زمان حفاری و به طور کلی سبب کاهش هزینه‌های حفاری و عملیات‌های بعد از آن می‌شود، اشاره کرد.

۵- در تمام زمان حفاری فروتعدالی باید شرایط فروتعدالی حفظ شود، یعنی فشار سازند از فشار گل حفاری بیشتر باشد در غیر این صورت آسیب سازند حتی در مقایسه با حفاری فروتعدالی بیشتر خواهد بود و سبب افزایش هزینه‌های آتی مانند تحریک چاه، تکمیل چاه و دیگر موارد خواهد شد. ■

با شکست روبرو خواهد شد.

۳- علت اصلی به کارگیری حفاری فروتعدالی در غرب آسیا، بررسی امکان‌پذیری عملیات فروتعدالی، جلوگیری از هرزروی گل و کاهش آسیب سازند است.

۴- از دیگر مزایای حفاری فروتعدالی می‌توان به افزایش سرعت حفاری، شناخت شبکه‌ی شکاف، تولید اولیه‌ی هیدروکربن که سبب بهبود وضعیت مالی و شناخت سیال مخزن می‌شود، کاهش

پانویس‌ها

- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1. Overbalanced Drilling | 8. Stable Foam |
| 2. Underbalanced Drilling | 9. Washout |
| 3. Pore Pressure | 10. Fracture |
| 4. Mist | 11. H2S Scavenger |
| 5. Unstable Foam | 12. Minagish |
| 6. Pipe Sticking | 13. Mechanical Glazing |
| 7. Aerated Liquids | |

منابع

- [1]. Rehm B., Haghshenas A., Paknejad A., Al-Yami A., Hughes J., Jerome S., Underbalanced Drilling: Limits and Extremes, Houston, Gulf Publishing Company, 2012, 3, 45.
- [2]. Enamul M. H., Al-Majed A. A., Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering, New Jersey, Wiley Scrivener Publishing, 2015, 188.
- [3]. Ghalambor A., Guo B., Gas volume requirements for underbalanced drilling – deviated holes, Tulsa, PennWell Corporation, 2002, 5, 6, 11-14.
- [4]. Lyons C.W., Guo B., Graham R.L., Hawley G. D., Air and Gas drilling Field Guide, Burlington, Gulf Professional Publishing, 2009, 2, 21-24,
- [5]. VAN GOLF-RACHT T.D., fundamentals of fractured reservoir engineering, Amsterdam, ELSEVIER, 1982, pp6, 118, 137, 257.
- [6]. Albattar R., Hoteit H., Modeling yield-power-law drilling fluid loss in fractured formation, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 182, 1-10.
- [7]. Abdollahi J., Carlsen I.M., Mjaaland S., Skalle P., Rafiei A., Zarei S., Underbalanced Drilling as a Tool for Optimized Drilling and Completion Contingency in Fractured Carbonate Reservoirs, SPE/IADC Underbalanced Technology Conference and Exhibition, 2004, SPE.
- [8]. Perez-Tellez C., Urbietta A., Lupo C., Castellanos J.M., Ramirez O., Puerto G., Bedoya J., Gabaldon O., Beltran J., Castiblanco G., MPD Concentric Nitrogen Injection Used to Drill a Successful Horizontal Well in Fractured and Depleted Mature Reservoir in Mexico South Region, 2004, SPE.
- [9]. Bennion D.B., Thomas F.B., Underbalanced Drilling of Horizontal Wells: Does It Really Eliminate Formation Damage?, SPE Symposium on Formation Damage Control, 1994, SPE.
- [10]. Vieira P., Larroque F., Al-Saleh A.M., Ismael H., Qutob H.H., Chopty J.R., Kuwait Employs Underbalanced Drilling Technology To Improve Drilling Performance While Simultaneously Evaluating the Reservoir, SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition, 2007, SPE.
- [11]. محمدی صابر، کمری احسان، موسوی دهقانی سیدعلی، اسکندری امین، اسکندریا سامره، مطالعه‌ی مقایسه‌ی حفاری فروتعدالی و فرائعدالی در چاه‌های موجود در یکی از میداین نفتی جنوب‌غربی ایران، ماهنامه‌ی علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۹۴، ۱۲۵، ۶۹-۶۴.
- [12]. ویس کریمی سپیده، شهبازی خلیل، بررسی کارایی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای اجرای روش حفاری فروتعدالی در مخازن کربناته‌ی جنوب‌غرب ایران، ماهنامه‌ی علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۹۸، ۱۶۵، ۷۱-۶۶.
- [13]. Shadravan A., Khodadadian M., Roohi A., Amani M., Underbalanced Drilling in Depleted Formation Achieves Great Success: Case Study, SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 2009, SPE.
- [14]. Ismail A. R., Hassan Z., Moherey M. A., Horizontal Drilling, Underbalanced Drilling And Synthetic Drilling Fluids Will Show A Near Commingle, Fourth Asian Science and Technology Congress, 2002.
- [15]. W.H. Al-Bazzaz, et al., Reservoir Characterization and Data Integration of Complex Maudud-Burgan Carbonate Reservoir, SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, 2006, SPE.
- [16]. Hussain I., Al-Enezi D., Al-Khaldy A., Sulaiman S., Hayat S., Underbalanced Drilling Holds key to Enhanced Production in Kuwait's Depleting Reservoirs, SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, 2013, SPE.
- [17]. Kitsios E., Kamphuis H., Quaresma V., Fxovlg J.W., Reynolds E., Underbalanced Drilling Through Oil Production Zones With Stable Foam in Oman, IADC/SPE Drilling conference, 1994, SPE.
- [18]. Carrera M., Al Hadhrami H., Hadhrami A., Al Jabri H., Successful Use of Underbalanced-Drilling in a Cluster of Fields, North Oman, SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, 2008, SPE.
- [19]. Salimi S., Ghalambor A., Tronvoll J., SPE, karami R.A., The Experimental Study of Formation Damage During UBD Operation in the Fractured Carbonate Formations, SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2008, SPE.