

## بررسی کارایی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای اجرای روش حفاری فروتعدالی در مخازن کربناته جنوب غرب ایران

سپیده ویس کریمی<sup>۱</sup>، خلیل شهبازی، دانشگاه صنعت نفت

### چکیده

در سال‌های اخیر با وارد شدن مخازن کشور به نیمه دوم عمرشان، نیاز به افزایش بهره‌وری، کاهش آسیب سازند و جلوگیری از هرزروی گل در عملیات حفاری، منجر به معرفی استفاده از فناوری حفاری فروتعدالی<sup>۱</sup> UBD، شده است. از این رو، در مخازنی که با افت فشار در اثر تولید روبه‌رو بوده‌اند، استفاده از سیالات حفاری با چگالی بسیار پایین مانند فوم‌ها<sup>۲</sup> یا گل‌های هوازده<sup>۳</sup>، برای دستیابی به فشار ستون سیالی کمتر از فشار درون منفذی سازند پیشنهاد شده است. در چنین مواردی، تغییرات القایی ناشی از تنش‌های درجا، بایستی به‌طور عمده توسط ساختار سازند جبران شود، زیرا درصد مشارکت سیال حفاری به دلیل فشار پایین تر ستون آن، نسبت به روش‌های حفاری متداول، کاهش یافته است. در این مقاله چندین مورد حفاری با استفاده از روش UBD مورد بررسی قرار گرفته است، تا بتوان با استفاده از این تحلیل‌ها، دلایل شکست آنها و امکان استفاده در موارد بیشتر را مورد بررسی قرار داد. عمده دلایل موفقیت شامل استفاده در مخازن تخلیه شده<sup>۴</sup> و سازندهای شکافدار کربناته<sup>۵</sup> است. در حالی که، موارد شکست این پروژه‌ها عمدتاً در مخازن شیلی تحت فشار و یا نواحی تحت تنش تکتونیکی بسیار بالا و یا به‌علت خرابی تجهیزات در درون چاه بوده است. لازم به ذکر است که کاربرد اصلی این فناوری تنها در لایه مخزنی پیشنهاد شده و هدف عمده آن کاهش آسیب‌های مخزن، بهبود بهره‌وری، کاهش هرزروی گل و بهبود ضریب بازیافت نفت است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۱/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۱/۲۷

### واژگان کلیدی:

روش حفاری فروتعدالی، هرزروی گل، روش حفاری متداول، آسیب سازند، حفاری در لایه مخزنی

### مقدمه

۹۰ فوت در ساعت در سازندهای شیلی) بوده است. همچنین، علاوه بر میزان نفوذ بالا، عمر مته نیز در این روش به نسبت استفاده از گل‌های حفاری متداول طولانی‌تر است. لازم به ذکر است که حفاری با هوا، محدود به مناطقی است که در آن، سازندهای ماسه‌سنگی با حجم آب همزاد بالا وجود ندارد. علاوه بر آن، نرخ هجوم آب قابل کنترل در حفاری با هوا به‌طور دقیق مشخص نشده است. از دیگر معایب ذاتی استفاده از هوا یا گاز طبیعی به‌عنوان سیال حفاری، می‌توان به احتمال آتش‌سوزی و انفجارهای درون‌چاهی و سفالینه شدن دیواره‌های چاه در اثر حرارت اشاره کرد. کنده‌های حفاری در ابتدا به‌صورت ذرات درشت‌تر بوده و سپس در اثر برخورد با سرعت بالا، با رشته حفاری و ابزارها ریزتر می‌شوند تا در نهایت از خرد شدن سازند، ذرات کوچک گردوغبار مانندی به وجود آید. در حضور رطوبت، حلقه‌های آبنده شده در نقاط با سطح مقطع کوچک‌تر فضای حلقوی، ممکن است شکل بگیرند. با هجوم گاز طبیعی از سازندهای گازی احتمال ایجاد آتش درون‌چاهی بسیار بالا خواهد بود. از دیگر عوامل مهم در حفاری با هوا، حجم هوای مورد نیاز است. در اکثر مواقع، به دلیل کافی نبودن حجم هوا، تمیز شدن ته چاه، به‌طور کامل اتفاق نمی‌افتد. این امر به‌ویژه در شرایط خاصی نظیر حفاری

عملیات حفاری، یکی از هزینه‌های اصلی در بخش هزینه عملیاتی در صنعت نفت محسوب می‌شوند. از این رو، بهبود سرعت عملیات حفاری<sup>۶</sup> از طریق کاهش مشکلات حفاری نظیر گیر اختلاف فشاری<sup>۷</sup>، کاهش یا جلوگیری از هرزروی سیالات حفاری<sup>۸</sup> در گردش به‌عنوان یک روش مؤثر پیشنهاد شده است. در حفاری فروتعدالی متداول<sup>۹</sup>، اختلاف فشار اعمال شده بین ستون چاه و سیال حفاری، یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر میزان نرخ نفوذ در سازند است [۹-۱]. برای آنکه فشار ستون سیال حفاری از فشار استاتیک سازند پایین‌تر باشد، نیاز است که سیالات حفاری مورد استفاده از آب شیرین سبک‌تر باشند. بدین منظور می‌توان از تزریق هوا به همراه یک مایع برای به دست آوردن فشار مطلوب و نرخ نفوذ بیشتر بهره برد. استفاده صنعتی از گل‌های حفاری هوازده در سال‌های اخیر گزارش شده است [۱۲-۱۰]. همچنین سیالات کمتر چگال نظیر هوا، مه<sup>۱۰</sup>، فوم‌های پایدار و گل‌های هوازده با اعمال یک پس فشار<sup>۱۱</sup> در حفاری‌های فروتعدالی استفاده شده‌اند [۱۹-۱۳]. مزیت اصلی استفاده از هوا به‌عنوان یک سیال حفاری، چگالی پایین آن است که حداقل فشار اعمالی بر سازند را فراهم می‌کند، به‌طوری که هم در سازندهای سخت و هم در سازندهای خشک موجب به دست آمدن نرخ نفوذهای بالا (تا

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Sepideh.weiskarami@afp.put.ac.ir)

سازندهای حاوی آب، به دلیل هجوم آب به درون حفره چاه و رس‌های متورم شونده رخ می‌دهد [۲۰-۱۸]. در سال‌های اخیر، حفاری با فوم به دلیل برخی مزایا و ویژگی‌های آن مانند تراکم هیدرو استاتیک بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است و پژوهش‌های بسیاری به بررسی روند ساخت فوم پرداخته‌اند [۱۳, ۱۴, ۲۵-۲۱]. فوم دارای رئولوژی مطلوب و قابلیت انتقال کنده‌های آن بسیار عالی است. ویسکوزیته ذاتی طبیعی فوم باعث کاهش هرزروی گل حفاری می‌گردد. این امر باعث می‌شود که فوم یک سیال حفاری بسیار مطلوب باشد. دیگر مزیت فوم این است که در حین انجام اتصالات و جابه‌جایی رشته حفاری، پایدار باقی‌مانده و فشار ته‌چاهی پایداری را فراهم کند. در واقع، فوم‌ها بسیار پایدار هستند و حتی زمانی که به سطح دکل می‌رسند نیز

سازندهای حاوی آب، به دلیل هجوم آب به درون حفره چاه و رس‌های متورم شونده رخ می‌دهد [۲۰-۱۸]. در سال‌های اخیر، حفاری با فوم به دلیل برخی مزایا و ویژگی‌های آن مانند تراکم هیدرو استاتیک بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است و پژوهش‌های بسیاری به بررسی روند ساخت فوم پرداخته‌اند [۱۳, ۱۴, ۲۵-۲۱]. فوم دارای رئولوژی مطلوب و قابلیت انتقال کنده‌های آن بسیار عالی است. ویسکوزیته ذاتی طبیعی فوم باعث کاهش هرزروی گل حفاری می‌گردد. این امر باعث می‌شود که فوم یک سیال حفاری بسیار مطلوب باشد. دیگر مزیت فوم این است که در حین انجام اتصالات و جابه‌جایی رشته حفاری، پایدار باقی‌مانده و فشار ته‌چاهی پایداری را فراهم کند. در واقع، فوم‌ها بسیار پایدار هستند و حتی زمانی که به سطح دکل می‌رسند نیز

۱ | داده‌های در دسترس مشاهده موردی در سایر نقاط دنیا

داده‌های در دسترس مشاهده موردی		مکان	سازند	عمق	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ بهبود سرعت تولید از طریق حذف آسیب سازند</li> <li>■ کاهش/حذف هدر رفت سیال حفاری و تسریع تمیز سازی چاه</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ سرعت تولید از MMCFD ۶ به MMCFD ۲۴ رسید</li> <li>■ حفاری در لایه مخاطره‌آمیز حاوی H<sub>2</sub>S و دمای ته‌چاهی ۳۵۰ درجه فارنهایت با موفقیت انجام شد</li> </ul>	جنوب شرقی آمریکا	کربناته Norphlet و Smackover	۱۸۳۰۰ فوت TVD	۲۷۰۰	حفاری عمودی چاه جدید	۶ ۱/۲			
		ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۲۲۰۰۰	۱۱۰۰	۳۸۰	تمیز سازی چاه عمودی	۳ ۱/۱۶		
		ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton		
		عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)	سازند	عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)
		۲۲۰۰۰	۱۱۰۰	۳۸۰	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶
		۱۱۰۰	۳۸۰	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	
		۳۸۰	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶		
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ حذف رسوب باریوم سولفات از لاینر/ مشبک‌ها به منظور به حداکثر رساندن میزان تولید</li> <li>■ جلوگیری از هدر رفت سیال به سازند</li> <li>■ حمل کنده‌های فلزی به سطح</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ افزایش سرعت تولید گاز به میزان ۸۰۰ Mcfd تا ۵۰۰۰ Mcfd</li> <li>■ کاهش خوردگی در لوله‌های جداری در اثر حضور CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>S</li> </ul>	ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶			
		ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	
		عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)	سازند	عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)
		۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶
		۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶
		۸۰۰-۱۰۰۰	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶		
		۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶			
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ حفاری با ۱۵۰ در طول ۴۰۰ اینچ به منظور حذف آسیب سازند</li> <li>■ کاهش خوردگی با اعمال مواد ضد خوردگی به روش مناسب</li> <li>■ ثبت در زمان داده‌های جریان و فشار</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ حفاری موفق لایه پیش‌بینی‌شده در زمانی کوتاه‌تر از زمان برنامه‌ریزی‌شده</li> <li>■ هزینه تمام‌شده این پروژه یک میلیون دلار کمتر از میزان بودجه در نظر گرفته‌شده برای آن بوده است</li> <li>■ نرخ تولید گاز به‌طور چشمگیری بالاتر از چاه‌های حفرشده به روش فراتعدالی در همان میدان بوده است</li> </ul>	ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶			
		ناحیه پنهدل تگزاس	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	
		عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)	سازند	عمق (ft TVD)	فشار منفذی (psi)	نوع چاه	اندازه حفره (اینچ)
		۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶
		۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶
		۸۰۰-۱۰۰۰	۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶		
		۳ ۱/۱۶	آهک Hunton	۱۹۷۰۰-۱۹۳۲۲	۸۰۰-۱۰۰۰	ورود مجدد به صورت افقی	۳ ۱/۱۶			

فشار انجام می‌شود. با تنظیم پس فشار<sup>۱۴</sup>، می‌توان سرعت جریان سیال در فضای حلقوی را نیز کنترل کرد. در برخی موارد فوم‌ها، نفوذ و تهاجم آب تا میزان ۱۰۰ bbl/h رانیز تحمل کرده‌اند [۱۳، ۱۸، ۱۹].

بنابراین، هدف این پژوهش، بررسی و تجزیه و تحلیل برخی از کاربردهای میدانی حفاری فروتعدالی است تا بتوان در آینده به برنامه‌ریزی دقیق‌تر حفاری در کشور پرداخت.

### ۱- مشاهدات موردی

در این قسمت به بررسی یک مورد مشاهده میدانی در کشور پرداخته و چالش‌ها و چشم‌اندازهای روش حفاری فراتعدالی بررسی خواهد شد. در این مطالعه موردی، مخزن هدف سازند آسماری است که لیتولوژی آن کربناته و از نوع شکافدار و بدون لایه شیلی است. مکانیسم تولید مخزن، رانش کلاهیگ گازی است. فشار و دمای مورد انتظار در سازند به ترتیب، ۲۶۲۲ psi و ۱۴۱ F است. سیال مخزن نفت با درجه API ۲۵ و نسبت گاز به نفت ۵۶۴ SCF/STB است. غلظت هیدروژن سولفید ۲۴۰ ppm می‌باشد. نفوذپذیری لایه مخزنی از ۱۰۰۰-۱/۰ میلی داری و تخلخل آن ۹٪ گزارش گردیده است [۲۱]. چاه با قطر ۹۵/۸ اینچ و در عمق ۲۹۳۸ متر (ارتفاع عمودی چاه ۲۵۶۷ متر) حفر شده است.

اهداف اولیه این پروژه حفاری فروتعدالی شامل موارد زیر بود:

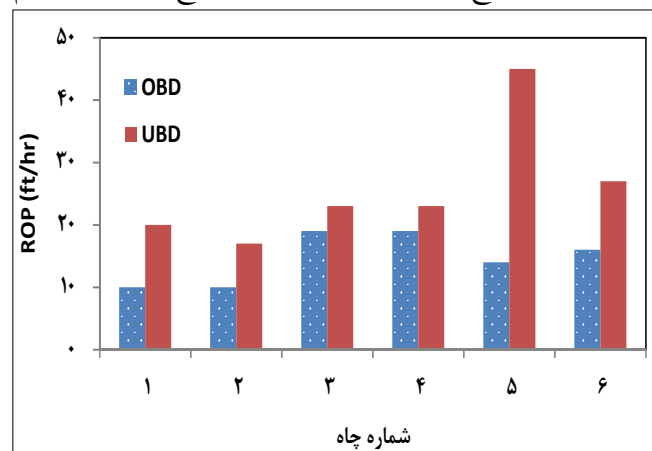
- به حداقل رساندن آسیب سازند القایی به وجود آمده در عملیات حفاری

- به حداقل رساندن هرزروی سیال حفاری

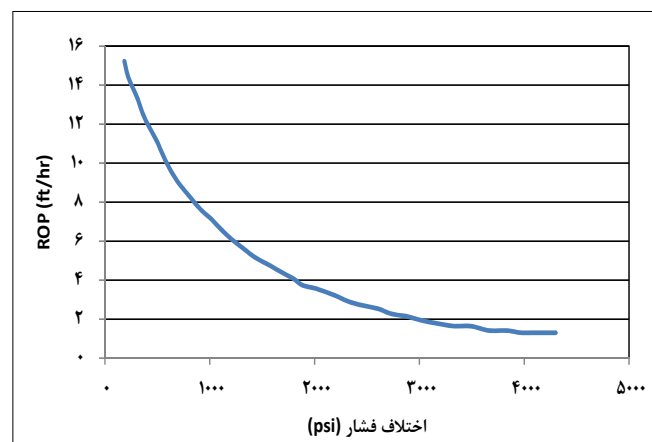
- بهبود عملکرد حفاری

انتخاب سیال حفاری یکی از مهم‌ترین تصمیمات در برنامه‌ریزی حفاری فروتعدالی در این چاه بود. سیال حفاری مناسب، منجر به تمیز شدن مناسب ته چاه، به حداقل رساندن گذارهای فشار و در نتیجه از بین بردن/به حداقل رساندن آسیب سازند می‌شود. بخش جهت‌دار در حفاری این چاه، با نفت خام طبیعی مخزن گچساران حفر شد. همچنین از یک سیستم تولید نیتروژن غشایی، متعلق به شرکت ملی نفت ایران، به منظور سبک‌سازی ستون چاه استفاده شد. در انتخاب سیال حفاری، استفاده از گازوئیل و دیگر سیالات حفاری ترجیح داده شد. چراکه سیال طبیعی این لایه مخزنی است و آسیب سازند حاصل از نوسانات فشار و آشام سیالات را به

در حفاری معمولاً بین ۸۰ تا ۹۵ درصد است. این درصد به معنای آن است که ۸۰ تا ۹۵ درصد حجمی فوم از گاز و ۵ تا ۲۰ درصد حجمی آن از مایع تشکیل شده است. در شرایط ته‌چاهی، به دلیل فشار هیدرواستاتیکی ستون سیال، کیفیت فوم<sup>۱۲</sup> تا میزان ۵۰ تا ۶۰ درصد پایین خواهد آمد. لازم به ذکر است که دانسیته فوم‌ها از ۶/۱ تا ۹۵/۶ ppg است [۱۸، ۱۹]. دانسیته فوم تشکیل شده با تنظیم کسر حجمی مایع<sup>۱۳</sup> (LVF) از طریق تزریق مایع و گاز و یا تنظیم



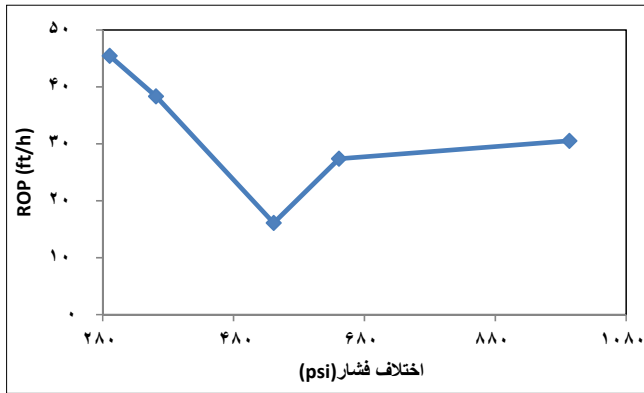
شکل ۱ | مقایسه نرخ نفوذ در سازند به دو روش فروتعدالی و فراتعدالی



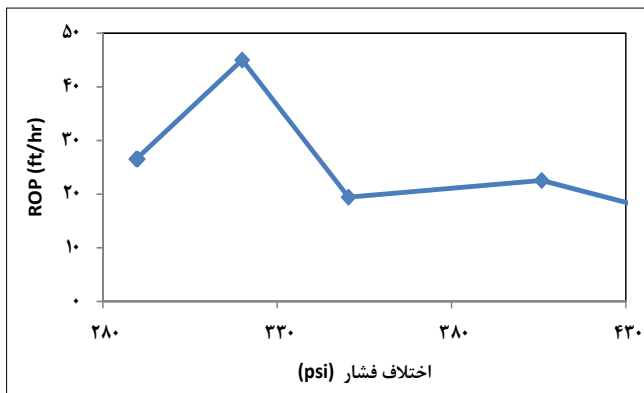
شکل ۲ | اثر افت فشار بر عملکرد مته حفاری و میزان نفوذ در سازند آسماری

### جدول ۲ | بررسی رابطه متقابل افت فشار و نرخ نفوذ در سازند کربناته

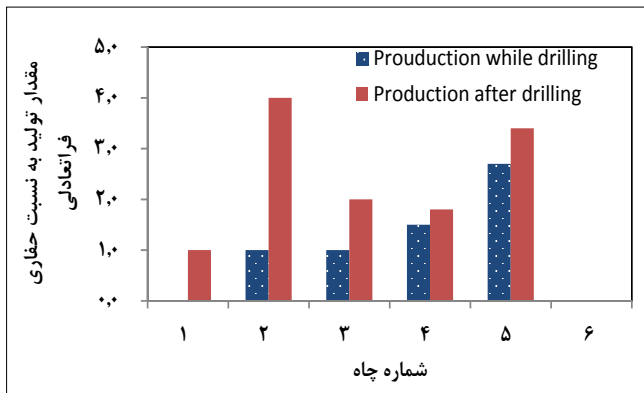
سنگ‌شناسی	فشار لایه مخزنی (psi)	افت فشار (psi)	ROP (ft/h)
کربناته	۲۹۰۰	۲۹۰	۴۵
کربناته	۳۰۰۰	۳۶۰	۳۸
کربناته	۱۳۵۰	۵۴۰	۱۶
کربناته	۳۲۰۰	۶۴۰	۲۷
کربناته	۵۵۰۰	۹۹۰	۳۰



شکل ۳ | بررسی رابطه اختلاف فشار سازند-دالیز و سرعت حفاری در سازند



شکل ۴ | مقایسه اختلاف فشار و نرخ نفوذ در سازند با نادیده گرفتن دیگر پارامترهای حفاری



شکل ۵ | مقایسه میزان تولید نفت در حین حفاری و پس از آن در روش تولید فروتعدالی

سنگ‌شناسی	تولید ثانویه (%)	تولید در زمان حفاری (%)	سرعت حفاری (ft/hr)	افت فشار (psi)
کربناته	۱/۲	۰	۲۶/۶	۲۹۰
کربناته	۳/۹	۰/۸	۴۴/۷	۳۲۰
کربناته	۲	۱	۱۹/۴۵	۳۵۰
کربناته	۱/۸	۱/۵	۲۲/۵	۴۰۶
کربناته	۳/۴	۲/۷	۱۷/۶	۴۳۵

حداقل می‌رساند. از گاز نیتروژن به دلیل فراوانی آن در طبیعت، اقتصادی بودن و بی‌اثر بودن آن استفاده شد. بدین منظور گاز نیتروژن در یک واحد غشایی در محل تهیه گردید. رفتار چند فاز سیالات در حین عملیات حفاری بسیار پیچیده بود. به همین دلیل، برای پیشینه کردن شانس یک عملیات موفق، باید پاسخ سیستم به هر گونه تغییر در پارامترهای جریان به دقت بررسی و تغییرات فشار ته چاهی بر حسب سرعت حرکت گاز نیتروژن و سرعت حرکت نفت مخزن گچساران محاسبه می‌گردید. حداقل اختلاف فشار لازم، برای اطمینان از فروتعدالی بودن عملیات، در نزدیک مته ۲۰۰ psi است. این میزان در سازند حداکثر ۳۰۰ psi است. بنابراین فشار جریانی در این لایه مخزنی در حدود ۲۳۰۰-۲۴۰۰ psi بوده است. انجام عملیات UBD در این چاه با چالش‌هایی همراه بود. اگرچه حفر این چاه، اولین عملیات UBD در ایران بود اما دستاوردهای زیر حاصل شد:

- حفر ۳۰۸m از لایه مخزنی
  - عدم هرزروی سیال حفاری
  - عدم رخداد هر گونه حادثه کیفی، سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست<sup>۱۵</sup>
- همچنین در جدول ۱- نتایج و اهداف برخی عملیات UBD رخ داده در سایر نقاط دنیا شرح داده شده است.

## ۲- نتایج و آنالیز داده‌ها

آنالیزهای زیر بر اساس برخی عملیات UBD انجام شده در دنیا صورت پذیرفت. همان‌طور که پیش‌ازین ذکر شد، مزیت اصلی عملیات UBD، افزایش سرعت حفاری در مقایسه با روش حفاری متداول است. شکل ۱- داده‌های جمع‌آوری شده از عملیات UBD موفق با گل هوازده در سازندهای کربناته را نشان می‌دهد [۲۲]. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی موارد نرخ حفاری افزایش داشته است. در عملیات حفاری فروتعدالی، سرعت حفاری به دلیل حذف اثر پایین نگه‌داشته شدن کننده‌ها<sup>۱۶</sup> افزایش می‌یابد. بنابراین روند طبیعی، شامل افزایش سرعت حفاری در مقابل کاهش فشار ته چاهی خواهد بود. شکل ۲- این روند را تأیید می‌کند.

جدول ۲- داده‌های سرعت حفاری بر حسب افت فشار در چاه‌های مختلفی که با گل هوازده حفر شده‌اند را نشان می‌دهد. این داده‌ها از مخازن با سنگ‌شناسی مشابه و فشار ته چاهی متفاوت ضبط شده‌اند.

جدول ۳- داده‌های ضبط شده در مخازن با فشار ته چاهی و

سنگ‌شناسی مشابه با عملیات حفاری متداول را نشان می‌دهد.

شکل ۳- نشان می‌دهد که سرعت حفاری ابتدا کاهش یافته و سپس با کاهش بیشتر فشار، افزایش می‌یابد. شکل ۴- نشان می‌دهد که سرعت حفاری با نادیده گرفتن پارامترهای دیگر حفاری، رابطه مشخصی با افت فشار ندارد. هر چند که با افزایش افت فشار ته‌چاهی، افزایش پیوسته در تولید سیال لایه مخزنی مشاهده می‌شود.

شکل ۵- نشان می‌دهد که همه چاه‌هایی که توسط UBD حفاری شده‌اند، از تولید بیشتری نسبت به چاه‌های حفاری شده توسط روش متداول برخوردارند. به علاوه اینکه، رابطه مشخصی بین میزان سیال تولیدشده در حین حفاری و میزان تولید پس از بهره‌برداری از چاه مشاهده نشد.

جدول ۴- کاهش زمان لازم برای حضور دکل را در میدان‌های ایران نشان می‌دهد [۲۶]. صرفه‌جویی در هزینه در یک چاه با قطر ۸ ۱/۲ اینچ، بین ۹۰ تا ۱۱۰ هزار دلار و در چاه با قطر ۶ ۱/۲ اینچ، در حدود ۱۷۰ تا ۱۹۰ هزار دلار است. به طور کلی در حفاری هر چاه نزدیک به ۰/۲ میلیون دلار و بنابراین، در حفاری پنج چاه یک

میلیون دلار صرفه‌جویی شده است.

### نتیجه‌گیری

با برنامه‌ریزی و به کارگیری صحیح، روش حفاری فروتعدالی می‌تواند پاسخگوی مشکلات آسیب‌سازند، هرزروی سیال حفاری و پایین بودن نرخ نفوذ باشد. همچنین در این روش، هم‌زمان با حفاری می‌توان به بررسی و تجزیه و تحلیل سازندهای در حال حفاری پرداخت. بر اساس آنالیز موارد میدانی واقعی بحث شده در این پژوهش، نتایج زیر حاصل شده است:

۱. روش حفاری فروتعدالی، یکی از روش‌های کاربردی حفاری، به‌ویژه در لایه مخزنی است. این روش از ایجاد آسیب‌سازند جلوگیری کرده، نرخ نفوذ در سازند و تولید پذیری مخزن را افزایش و هزینه کلی حفر چاه را کاهش می‌دهد.

۲. غربالگری مخازن کاندید برای حفاری فروتعدالی، مرحله اولیه و بسیار مهمی در طراحی و برنامه‌ریزی موفق حفاری فروتعدالی است. اگرچه حفاری فروتعدالی مزایای بسیار زیادی دارد، اما، راه‌حل جادویی برای همه مشکلات حفاری در میدان نیست. غربالگری ضعیف و برنامه‌ریزی ناقص منجر به انتظارهای بلندپروازانه و نادرست از این روش خواهد شد و احتمال شکست برنامه‌ریزی حفاری را افزایش می‌دهد.

۳. در طراحی عملیات حفاری، باید عوامل مختلفی نظیر خواص سنگ، فشار مخزن، پایداری دیواره چاه، خواص سیال حفاری، روش تزریق گاز، اثر سیال حفاری تراکم پذیر بر روند نمودارگیری از چاه، نیاز و لزوم به کارگیری موتورهای درون‌چاهی، نوع مته، خوردگی، در دسترس بودن تجهیزات، جداسازها و کنترل سیالات هیدروکربنی تولیدی، روند ثبت داده‌ها و برنامه‌ریزی تکمیل چاه دقت شود. در برنامه‌ریزی و طراحی مناسب باید هر کدام از این عوامل در نظر گرفته شوند.

۴. حفاری با فوم‌های پایدار در مخزنی که بر اثر تولید با کاهش فشار روبه‌رو بوده‌اند، می‌تواند روش امیدوارکننده‌ای در حفاری چاه‌های افقی و عمودی باشد. حفاری با فوم به سبب ویژگی‌های خاص آن مانند دانسیته پایین، رئولوژی مناسب و توانایی حمل‌کننده‌ها روش مناسبی خواهد بود.

۵. در حفاری فروتعدالی، ثبت داده‌های فشاری برحسب زمان، می‌تواند داده‌های گسترده‌ای را فراهم آورد که در دیگر روش‌ها امکان‌پذیر نیست. ■

مقایسه هزینه عملیات حفاری فروتعدالی به نسبت هزینه عملیات حفاری فروتعدالی در حفره چاه به قطر ۸ ۱/۲ اینچ				
حفاری فروتعدالی (حفره ۸ ۱/۲ اینچ)				
شماره چاه	هزینه‌های کل		هزینه‌های حفاری	
	تعداد روزهای حفاری (هزینه هزار دلار)	تعداد روزهای حفاری (هزینه هزار دلار)	تعداد روزهای حفاری (هزینه هزار دلار)	تعداد روزهای حفاری (هزینه هزار دلار)
۱	۲۷	۱۱۷۱	۲۷	۱۱۷۱
۲	۲۵/۷	۱۱۴۶/۳	۲۴/۴	۱۱۱۴
۳	۳۰/۴	۲۱۲۵/۳	۲۱/۶	۱۷۷۱/۹
۴	۱۹/۳	۱۳۶۰/۱	۱۷/۶	۱۲۳۰/۸
۵	۲۳/۳	۱۰۵۸/۵	۲۲/۴	۱۰۳۵
۶	۳۱/۴	۱۳۸۵/۱	۲۳	۱۰۰۵/۶
۷	۲۱/۶	۱۲۴۱/۵	۱۷/۸	۹۸۹/۹
۸	۲۰/۷	۸۹۹/۱	۱۷/۲	۶۶۷/۴
۹	۳۱/۹	۲۲۱۵/۷	۱۶/۷	۱۶۲۹/۳
۱۰	۳۴/۱	۱۵۵۱/۶	۳۰/۳	۱۳۰۰/۱
میانگین	۲۶/۵	۱۴۱۵/۴	۲۱/۸	۱۱۹۱/۵
حفاری فروتعدالی (حفره ۸ ۱/۲ اینچ)				
۱	۲۰/۵	۱۶۵۲	۱۴/۸	۱۳۹۵/۶
۲	۱۹	۱۴۵۸	۱۳/۷	۱۲۴۳/۵
۳	۲۱/۲	۱۹۹۸/۶	۱۶/۵	۱۵۴۱/۵
۴	۱۷/۸	۱۱۹۳/۶	۱۵/۷	۷۲۸
۵	۱۲/۹	۵۹۷	۱۲/۲	۵۵۳/۹
میانگین	۱۸/۳	۱۳۷۹/۸	۱۴/۶	۱۰۹۲/۵

1. Under Balanced Drilling (UBD)
2. Foams
3. Aerated mud
4. Depleted reservoirs
5. Fractured carbonates formations
6. Rate of Penetration (ROP)
7. Pressure differential pipe sticking
8. Lost circulation
9. Over balanced drilling (OBD)
10. Mist
11. Back pressure
12. Foam quality
13. Liquid Volume Fraction (LVF)
14. Back pressure
15. Quality, Health, Safety and Environment (QHSE)
16. Chip hold-down effect

- [1] Murray, A. and R. Cunningham, Effect of mud column pressure on drilling rates. 1955.
- [2] Eckel, J.R., Effect of pressure on rock drillability. 1958.
- [3] Cunningham, R. and J. Eenink, Laboratory study of effect of overburden, formation and mud column pressures on drilling rate of permeable formations. 1959.
- [4] Garnier, A. and N. Van Lingen, Phenomena affecting drilling rates at depth. 1959.
- [5] Vidrine, D. and E. Benit, Field verification of the effect of differential pressure on drilling rate. *Journal of Petroleum Technology*, 1968. 20(07): p. 676682-.
- [6] Bourgoyne Jr, A.T. and F. Young Jr, A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1974. 14(04): p. 371384-.
- [7] Black, A. and S. Green, Laboratory simulation of deep well drilling. *Petroleum Engineer*, March, 1978.
- [8] Miszewski, A., T. Miszewski, and P. Hatgelakas. Underbalanced Drilling with Coiled Tubing: A Case Study in Marginal Shallow Wells. in *SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition*. 2018. Society of Petroleum Engineers.
- [9] Thow, P.A. and Y. Couturier, Fluid Loss and Gain for Flow, Managed Pressure and Underbalanced Drilling. 2018, Google Patents.
- [10] Rankin, M., T. Friesenhahn, and W. Price. Lightened fluid hydraulics and inclined boreholes. in *SPE/IADC Drilling Conference*. 1989. Society of Petroleum Engineers.
- [11] Claytor, S., K. Manning, and D. Schmalzried. Drilling a medium-radius horizontal well with aerated drilling fluid: A case study. in *SPE/IADC Drilling Conference*. 1991. Society of Petroleum Engineers.
- [12] Pedersen, T., U.J.F. Aarsnes, and J.-M. Godhavn, Flow and pressure control of underbalanced drilling operations using NMPC. *Journal of Process Control*, 2018. 68: p. 7385-.
- [13] Fattah, K., S. El-Katatney, and A. Dahab, Potential implementation of underbalanced drilling technique in Egyptian oil fields. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2011. 23(1): p. 4966-.
- [14] Porter, M., et al. Optimizing the Application of Underbalanced Drilling Through the Use of Air and Foam Systems in Low-Pressure Gas Reservoirs. in *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. 2018. Society of Petroleum Engineers.
- [15] Akhshik, S. and M. Rajabi, CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. 160: p. 229246-.
- [16] Wang, Y., C. Thiberville, and S.I. Kam. Modeling of Foam-Assisted Wellbore Cleanup and Drilling Processes with Both Dry-and Wet-Foam Rheological Properties. in *SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference*. 2018. Society of Petroleum Engineers.
- [17] Akhtar, T.F., et al., Rheological behavior of aqueous foams at high pressure. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. 162: p. 214224-.
- [18] Guo, B. and J. Rajtar, Volume requirements for aerated mud drilling. *SPE Drilling & Completion*, 1995. 10(03): p. 165169-.
- [19] Okpobiri, G.A. and C.U. Ikoku, Volumetric requirements for foam and mist drilling operations. *SPE Drilling Engineering*, 1986. 1(01): p. 7188-.
- [20] Sivrikoz, A., M. Jimenez Chavez, and S. Buwaiqi. Tackling High Water Production in Oman South Fields with New Technology. in *SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition*. 2018. Society of Petroleum Engineers.
- [21] Hooshmandkoochi, A., M. Zaferanieh, and A. Malekzadeh. First Application of Underbalanced Drilling in Fractured Carbonate Formations of Iranian Oilfields Leads to Operational Success and Cost Savings. in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. 2007. Society of Petroleum Engineers.
- [22] Moore, C. and V. Lafave, Air and gas drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 1956. 8(02): p. 1516-.
- [23] Bentsen, N. and J. Veny, Preformed stable foam performance in drilling and evaluating shallow gas wells in Alberta. *Journal of Petroleum Technology*, 1976. 28(10): p. 1,2371,240-.
- [24] Su, J., et al., Synthesis and Assessment of a CO<sub>2</sub> Switchable Foaming Agent Used in Drilling Fluids for Underbalanced Drilling. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2018. 21(3): p. 375387-.
- [25] Khalid, A., et al. Underbalanced Nitrified Foam Drilling Enabled Extensive Reservoir Characterization and Production from a Highly Depleted Formation in Dhodak Field in Pakistan: A Case History. in *Offshore Technology Conference Asia*. 2018. Offshore Technology Conference.
- [26] Kitsios, E., et al. Underbalanced drilling through oil production zones with stable foam in Oman. in *SPE/IADC Drilling Conference*. 1994. Society of Petroleum Engineers.