



بهینه‌سازی سیال حفاری از نظر میزان هرزروی در یکی از میادین نفتی ایران

مهدی متین^۱، عبدالحمید باقری^۲ | دانشگاه صنعتی شریف

پوریا قبادی، جواد نبوی زاده^۳ | دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

هرزروی گل حفاری یکی از موضوعات مهم در صنعت حفاری محسوب می‌شود که باعث از دست رفتن زمان و افزایش هزینه‌ها می‌شود. این هرزروی به علت اختلاف فشار سیال حفاری و سازند، وجود شکاف، خواص سازند و عوامل دیگری به وجود می‌آید. برای جلوگیری از این مشکل از مواد کنترل‌کننده هرزروی^۲ گل حفاری (حاصل از آزمایش‌های گوناگون) استفاده می‌شود که کمترین آسیب را به سازند می‌رسانند. در این تحقیق علل هرزروی سیال حفاری در یکی از میادین نفتی ایران بررسی شده است. ابتدا مشخصات کلی مخزن بیان و سپس هرزروی در چاه‌های دیگر بررسی شده است. با توجه به رابطه هرزروی با فشار سیال و وزن گل، مقدار بهینه وزن گل به دست آمده و در پایان با تجزیه و تحلیل آزمایش‌های انجام شده، مقدار و نوع مواد کنترل‌کننده هرزروی برای استفاده در این منطقه معرفی شده است.

واژگان کلیدی | هرزروی، سیال حفاری، شکاف، مواد کنترل‌کننده هرزروی (LCM)

مقدمه

مشخص می‌شود [۴].

در این پژوهش علل و عوامل هرزروی سیال حفاری در یکی از میادین نفتی ایران بررسی شده است. ابتدا به بررسی مشخصاتی از مخزن که در هرزروی گل حفاری تأثیرگذار بوده و سپس به بررسی چاه‌های حفر شده در این میدان و تعیین نوع و میزان هرزروی در هر کدام از این چاه‌ها پرداخته شده است. پس از بررسی و آنالیز داده‌های آزمایشگاهی و رسم نمودارهای مربوط به این جداول و تحلیل این نمودارها بهترین مواد کنترل‌کننده هرزروی در بخش پنجم میدان نفتی مارون و همچنین بهترین ترکیب درصد این مواد پیشنهاد شده است.

هدرروی سیال حفاری یا دوغاب سیمان در فضاهای خالی درون سازند حین عملیات حفاری را هرزروی می‌گویند. هرزروی در صنعت به صورت نشست (کمتر از ۱۰ bbl/hr)، مختصر (۱۰۰-۱۰۰۰ bbl/hr)، شدید (۵۰۰-۱۰۰۰ bbl/hr) و کامل (بیشتر از ۵۰۰ bbl/hr) طبقه‌بندی می‌شود [۱]. باید توجه داشت که کاهش حجم گل از حجم کل در اثر کم شدن عصاره گل و پر کردن چاه جدید، کاملاً متفاوت از هرزروی است [۲]. هرزروی در نوع، شدت و مکان وقوع درون چاه متفاوت است. اما روشی سیستماتیک برای کنترل هرزروی به صورت اقتصادی و مؤثر شناخته شده است. این روش شامل هر دو عامل پیش‌گیری و درمان است [۳]. دانستن نوع و مکان هرزروی در انتخاب صحیح مواد کنترل هرزروی (LCM) کمک می‌کند. مکان هرزروی با استفاده از اطلاعات حفاری‌های قبلی، تغییرات سازندی و تکنیک‌های مختلف نمودارگیری

۱- بررسی خواص سنگ مخزن و میزان هرزروی در آن

بخش مورد نظر از ماسه‌سنگ تبخیری، سنگ آهک و دولومیت تشکیل شده است. بافت تخلخل در میدان مارون از نظر تشکیل (اولیه

محدوده تخلخل و نفوذپذیری در سنگ مخزن آساماری



Rock Type	I	II	IIIa & IIIb	IV	Va	Vb	Vc
%φ	۸-۲۰	۱۴-۳۰	< ۰/۶	۲-۱۱	۱۲-۳۵	۱۲-۳۰	۱۰-۲۵
k(md)	۱-۱۰۰	۱۰۰-۱۰۰۰	< ۰/۱	۰/۰۰۵-۱	۰/۵-۱۰	۱-۱۰	۱-۱۰

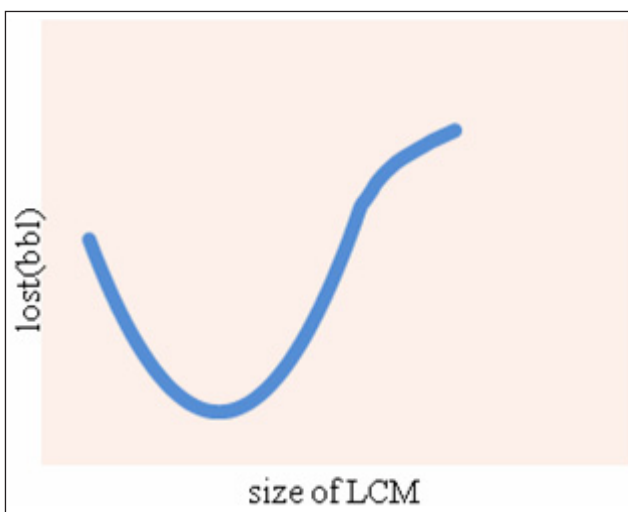
بهترین ویژگی های گل حفاری قادر به کنترل هرزروی خواهیم بود. این دو متغیر عبارتند از:

۲-۱- مواد کنترل کننده هرزروی

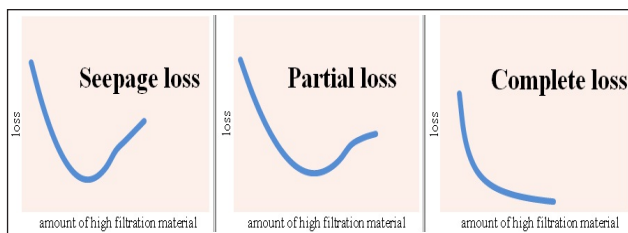
با انجام آزمایش هایی بر روی مواد کنترل کننده مختلف و ترکیبات آنها، نمودارهای میزان کاهش هرزروی نسبت به اندازه ذرات و LCM رسم شده که با استفاده از آنها بهترین ماده کنترل هرزروی و وزن بهینه گل تعیین می شود.

۲-۲- خواص آب از دست دادگی (عصاره) گل حفاری

جستجو برای یافتن گلی با عصاره بالا و مقاومت تراکمی زیاد بخش دیگری از این مطالعه است. برای دست یابی به گلی با عصاره بالا، مخلوطی از (بنتونایت، اتاپولگیت (رس های سپیولیت) / آهک / خاک دیاتومه / مواد LCM) استفاده می شود. پس از مخلوط کردن این مواد، نمودارهای شکل ۳- که نشان دهنده مقدار هرزروی برای هر نوع دوغاب در مقابل سه نوع اصلی هرزروی خواهد بود، به دست می آید. با داشتن مقدار ماده کنترل کننده عصاره و میزان هرزروی و با استفاده از این نمودارها می توان نوع منطقه هرزروی را تعیین کرد.



شکل ۲ | مقدار هرزروی برحسب اندازه ماده کنترل کننده هرزروی



شکل ۳ | مقدار هرزروی نسبت به ماده کنترل کننده فیلتراسیون

و ثانویه) و فراوانی بسیار مختلف است. خلاصه مشخصات سنگ های مختلف و تخلخل و نفوذپذیری آنها در جدول ۱- آمده است.

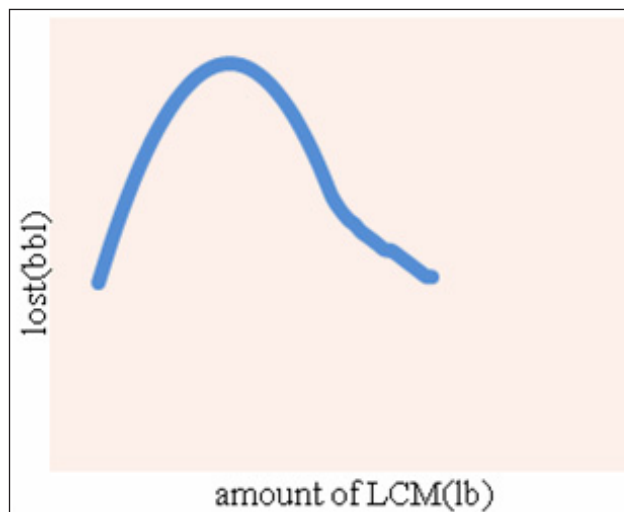
عرض شکاف ها نقش بسیار مهمی در هرزروی سیال حفاری ایفا می کنند. شکاف های در هم پیچ خورده عرض های مختلفی را به نمایش می گذارند که تابعی از درجه و چگونگی فعالیت های اخیر تکتونیکی در آن قسمت از میدان خواهد بود. عرض شکاف ها بر اساس این معیار در نواحی فعال ۰/۱۱ تا ۰/۲۰، در نواحی متوسط ۰/۰۳ تا ۰/۱۵، در نواحی غیرفعال: ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی متر است و اکثر شکاف ها دارای طولی بین ۰۳ سانتی متر و ۷/۵ متر هستند.

جدول ۲- خلاصه ای از هرزروی سیال حفاری در میدان مورد نظر را نشان می دهد. با توجه به طبقه بندی ذکر شده، نرخ هرزروی در این میدان از نوع شدید یا هرزروی کامل است و بنابراین بررسی و تعیین گل حفاری مناسب الزامی به نظر می رسد.

۲- بررسی متغیرهای اصلی با استفاده از داده های آزمایشگاهی

چنانچه دو متغیر مهم گل حفاری را تغییر دهیم با دست یابی به

۲ خلاصه هرزروی در میدان مورد نظر		
لایه ها	کمترین هرزروی (bbl/hr)	بیشترین هرزروی (bbl/hr)
۱	۱۲۰	۹۷۰
۲	۱۱۰	۶۱۰
۳	۱۳۷	۷۴۰
۴	۱۹۰	۱۱۰۰



شکل ۱ | میزان هرزروی برحسب مقدار ماده کنترل کننده هرزروی



۳- تجزیه و تحلیل گزارشات روزانه حفاری

سیال حفاری است. اختلاف فشار بین سیال حفاری و سازند و همچنین فشار شکست سازند، دو عامل تأثیرگذار بر هرزروی هستند. اما از آنجا که فشار شکست قابل تغییر نیست، بنابراین اختلاف فشار بین گل حفاری و سازند باید مورد مطالعه قرار گیرد.

پیش تر اشاره شد که رابطه‌ای منطقی بین فشار حفره‌ای سازند و مقدار هرزروی وجود ندارد. بنابراین فشار سیال حفاری تنها عامل تأثیرگذار بر هرزروی خواهد بود. فشار گل تابعی از وزن گل، فشار پمپاژ و عوامل دیگری است که قابل تغییر نیستند. بنابراین در این قسمت سعی شده مقدار بهینه وزن و سرعت پمپاژ گل حفاری با تجزیه و تحلیل گزارشات روزانه تعیین شود.

در شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای تغییرات وزن گل و فشار پمپ نسبت به هرزروی رسم شده است. در بیشتر چاه‌ها به علت تغییرات کم فشار پمپ، این عامل قابل بررسی نبوده یا به عبارت دیگر تغییرات آن محسوس نیست. در چاه E- افزایش فشار پمپ تا ۹۰۰ psi تأثیر کمی بر مقدار هرزروی دارد. هم‌چنین در چاه F- با کاهش فشار تا ۲۵۰ psi، مقدار هرزروی کاهش می‌یابد.

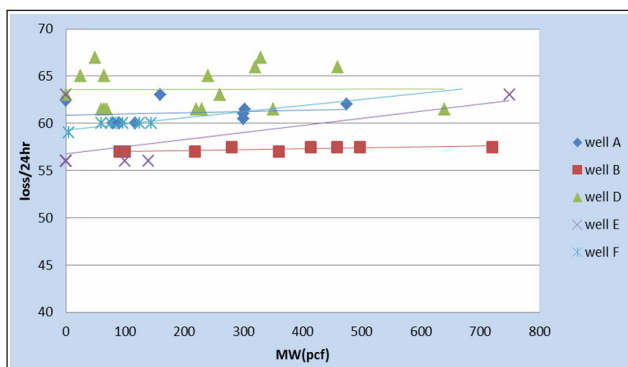
در چاه‌های A- و B هرزروی به وسیله کاهش وزن گل تا 56 lb/ft^3 ، به طور کامل از بین خواهد رفت. مقدار هرزروی در چاه

عوامل بسیاری می‌توانند باعث کاهش یا افزایش هرزروی شوند که مهم‌ترین آنها را می‌توان وزن گل دانست. چنان‌چه چگونگی تأثیر این عامل بر هرزروی دقیقاً مشخص باشد، به راحتی می‌توان هرزروی را کنترل و حتی از وقوع آن جلوگیری کرد. اطلاعات مفیدی که در این بخش گردآوری شده به بررسی عوامل اصلی جریان عملیات حفاری در میدان مورد نظر می‌پردازد.

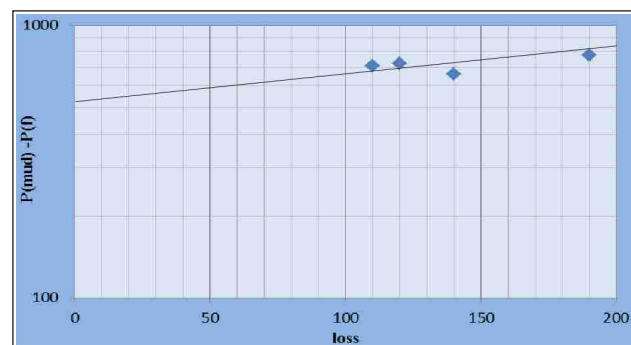
همان‌گونه که در شکل ۴- مشخص است، با افزایش اختلاف فشار بین گل حفاری و سازند میزان هرزروی نیز افزایش و با کاهش اختلاف فشار گل و سازند به 50 psi ، مقدار هرزروی کاهش می‌یابد. در شکل ۵- رابطه بین هرزروی و فشار حفره‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فشار حفره‌ای مقدار هرزروی افزایش می‌یابد. اما از آنجا که فشار سازند قابل تغییر نیست، تنها راه کاهش فشار گل حفاری، کاهش وزن گل است.

۴- تجزیه و تحلیل چاه‌های حفر شده در میدان نفتی مارون

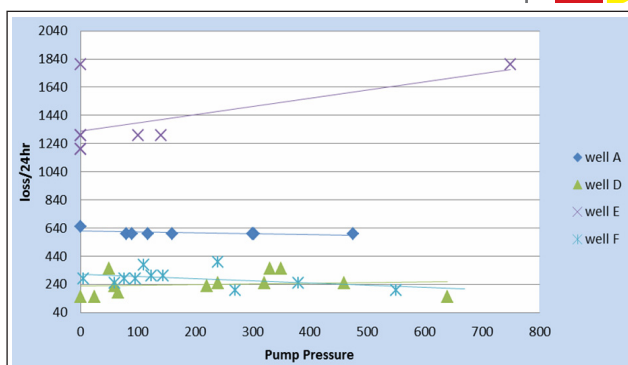
در این بخش تعدادی از چاه‌های حفر شده در میدان مارون بررسی می‌شود. در واقع هدف، دست‌یابی به عوامل ایجادکننده هرزروی



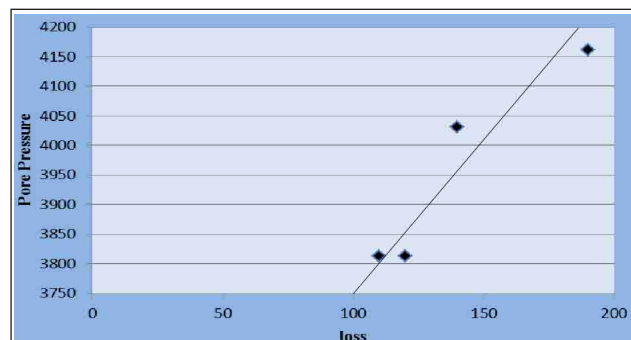
شکل ۶ | رابطه بین هرزروی با وزن سیال حفاری



شکل ۷ | رابطه هرزروی و اختلاف فشار بین گل حفاری و سازند



شکل ۸ | رابطه بین هرزروی با فشار پمپاژ



شکل ۹ | رابطه بین هرزروی با فشار حفره

به گل حفاری مورد استفاده در این مخزن، اجتناب ناپذیر است. در همه آزمایش‌ها باید این نکته مدنظر قرار گیرد که مواد کنترل کننده هرزروی (LCMها) نباید شکاف‌ها و فضاهای متخلخل را پر کنند؛ زیرا در این حالت به سازند خسارت وارد خواهد شد. برای جلوگیری از چنین مشکلاتی، استفاده از LCMهایی که توسط عواملی شیمیایی مثل اسید و گازوئیل دچار تخریب ساختاری خواهند شد، توصیه می‌گردد. بنابراین پس از انجام آزمایش روی مواد مختلف، استفاده از LCM به انتخاب خرده‌های سنگ آهک^۲، پوست صدف^۴ و گیلسونات^۵ محدود می‌شود. گیلسونات اغلب به عنوان ماده‌ای افزودنی در دوغاب سیمان استفاده می‌شود. حلالیت این ماده در گازوئیل به ۴۰ درصد رسیده و در نتیجه استفاده از خرده سنگ آهک و پوست صدف در آزمایش به شدت توصیه می‌شود.

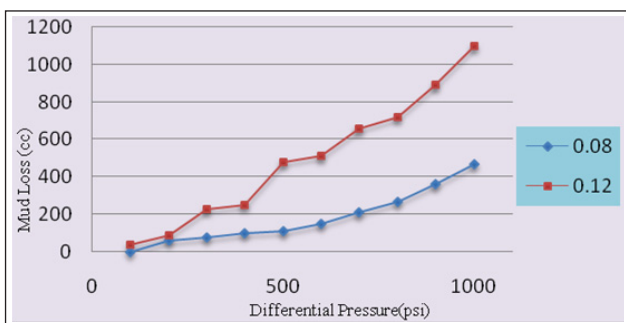
استاندارد ویژه‌ای برای اندازه ذرات هر نوع LCM وجود دارد که سازندگان باید محصولات خود را بر اساس این استانداردها تهیه کنند. ولی در عمل و هنگام استفاده از آنها اختلافی مشاهده می‌شود. در این آزمایش سعی شده تا حد امکان توزیع اندازه ذرات به واقعیت نزدیک باشد.

C پایین است و این به دلیل وزن گل استفاده شده برای حفاری است تا 56 lb/ft^3 . بنابراین نتایج به دست آمده در این چاه، کاهش وزن گل تا 56 lb/ft^3 را به عنوان روشی مؤثر برای کاهش مقدار هرزروی تایید می‌کند.

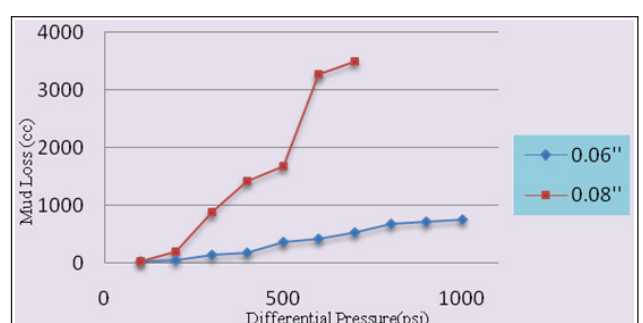
علت اصلی هرزروی در چاه-D صرفاً به دلیل بالا بودن وزن گل است. با کاهش وزن گل تا 59 lb/ft^3 ، هرزروی از بین خواهد رفت. هرزروی در چاه-E ناچیز است. این امر می‌تواند به خاطر وزن گل مورد استفاده (57 lb/ft^3) باشد. بنابراین چاه مذکور، کاهش وزن گل تا 57 lb/ft^3 برای کنترل هرزروی را تایید می‌کند. با کاهش وزن گل در چاه-F، تا 58 lb/ft^3 ، مقدار هرزروی ناچیز خواهد بود.

۵- انتخاب مواد کنترل کننده هرزروی برای آزمایش

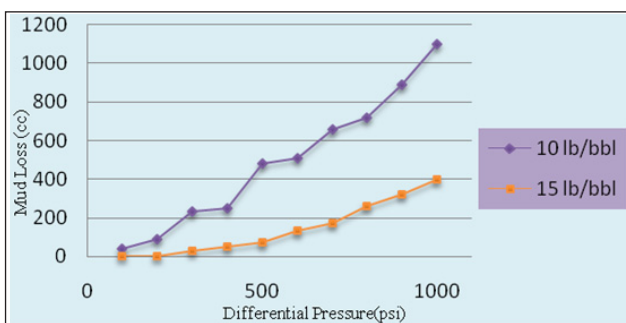
همان‌گونه که اشاره شد، به دلیل تولید نامنظم از مخزن، فشار سازند کاهش یافته و شکاف‌های این سازند نقش مهمی در جریان سیال درون مخزن و انتقال آن به دهانه چاه ایفا می‌کنند. این کاهش فشار سازندی علتی اساسی برای هرزروی سیال حفاری بوده و بنابراین با توجه به فشار سازند، سیال حفاری سبک‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین افزودن مواد کنترل کننده هرزروی



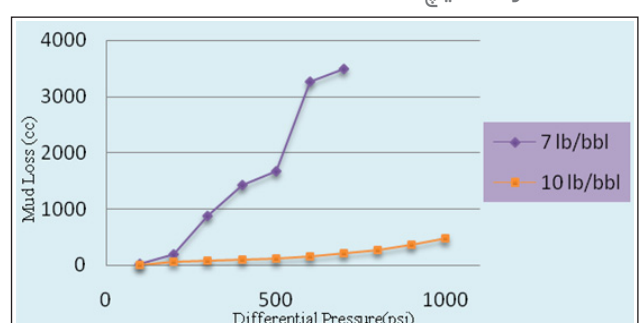
شکل ۱۰ اثر ۱۰ lb/bbl آهک (LCM) بر هرزروی در slot اندازه ۰/۰۸ و ۰/۱۲ اینچ



شکل ۸ اثر ۷ lb/bbl آهک (LCM) بر هرزروی در slot اندازه ۰/۰۶ و ۰/۰۸ اینچ



شکل ۱۱ اثر مقادیر مختلف خرده‌های آهک (LCM) بر هرزروی در slot



شکل ۹ اثر مقادیر مختلف خرده‌های آهک (LCM) بر هرزروی در slot



۶- ارزیابی آزمایش‌های انجام شده در میدان مارون

حالت قبل) خواهد رسید. در این مرحله با ثابت نگه داشتن قطر سوراخ دوباره میزان lb/bbl به LCM اضافه می‌کنیم. مشاهده می‌شود که هرزروی قابل کنترل است. این روند را با افزایش قطر سوراخ‌ها و افزایش میزان LCM ادامه می‌دهیم تا جایی که دیگر افزایش میزان LCM توانایی چندانی در جلوگیری از هرزروی نداشته باشد. سپس ماده LCM را عوض کرده و آزمایش‌ها را تکرار می‌کنیم.

نتیجه‌گیری در بهینه‌سازی مصرف گل حفاری

با کاهش اختلاف فشار بین گل و سازند تا ۵۰۰ psi تا حد زیادی می‌توان از هرزروی جلوگیری کرد. مقدار هرزروی با فشار شکاف^۷ رابطه عکس دارد. بنابراین هرچه فشار شکاف کمتر باشد مقدار هرزروی بیشتر خواهد بود. در میدان نفتی مطالعه شده، رابطه‌ای منطقی بین فشار پمپ و مقدار هرزروی وجود ندارد. این در حالی است که هرزروی با وزن گل رابطه مستقیم دارد. با کاهش وزن گل تا ۵۷ lb/ft^۳، هرزروی در این بخش کاملاً از بین خواهد رفت. استفاده از گل پایه روغنی به جای گل پایه آبی برای جلوگیری از هرزروی بسیار مؤثر خواهد بود. هیچ‌یک از سه نوع ماده کنترل‌کننده هرزروی (Fiber, Flake, Granular) به تنهایی در درمان هرزروی مؤثر نخواهند بود. برای درمان هرزروی در این میدان نفتی و به منظور جلوگیری از آسیب سازند، باید از مواد کنترل‌کننده هرزروی محلول در نفت یا اسید استفاده کرد. مخلوطی از مواد Limestone chips و Oyster shell و Gilsonate برای درمان هرزروی در میدان مارون بسیار مؤثر خواهد بود.

برای ارزیابی آزمایش‌ها، ابتدا باید تمامی اطلاعات به دست آمده نظیر اختلافات فشار اعمالی، اندازه سوراخ نوع ماده‌کننده کنترل هرزروی LCM مورد استفاده و مقدار آن، مقدار هرزروی و زمان آزمایش‌ها جدول‌بندی شود. سپس با در نظر گرفتن اندازه سوراخ و LCM مورد استفاده، باید برای هر آزمایش نمودار مقدار هرزروی در مقابل میزان اختلاف فشار رسم شود. پس از آن، با در نظر گرفتن اندازه سوراخ (Slot) و LCM مورد استفاده در هر آزمایش، در هر اختلاف فشار خاص، مقدار هرزروی نسبت به اندازه سوراخ رسم گردد.

- در نهایت، با در نظر گرفتن نوع و مقدار LCM مورد استفاده در هر آزمایش، در هر فشار خاص، مقدار هرزروی نسبت به اندازه سوراخ رسم می‌شود. باید در نظر داشت که هر آزمایش LCM مورد استفاده، برای شرایط و نوع گل آن آزمایش معتبر است و این بدان معناست که با تغییر سایر شرایط، آزمایش باید دوباره انجام گیرد.
- در شکل‌های ۸ تا ۱۱ براساس داده‌های عنوان شده، نمودارهای مربوط رسم شده است. در ادامه تحلیل هر نمودار آمده است:
 - با توجه به نمودار شکل ۸- میزان هرزروی در اندازه سوراخ ۰/۰۸ بین اختلاف فشارهای ۲۰۰ تا ۵۰۰ psi بیشتر از هرزروی در اندازه سوراخ ۰/۰۶ است. نکته قابل توجه در این نمودار، افزایش شدید شیب در اختلاف فشارهای بین ۵۰۰ psi تا ۶۰۰ psi است که نشان‌دهنده شکسته شدن انسداد جزئی ناشی از LCM می‌باشد.
 - با توجه به نمودار شکل ۹- می‌توان مشاهده کرد که اگر میزان خرده‌های آهک فقط به میزان ۳ lb/bbl افزایش پیدا کند، میزان هرزروی ۷ برابر کمتر خواهد شد.
 - حال اگر با در نظر گرفتن افزایش ۳۰ درصدی LCM؛ قطر سوراخ را به ۰/۱۲ افزایش دهیم، خواهیم دید که هرزروی دوباره آغاز می‌شود ولی میزان آن حداکثر به ۱۲۰۰ میلی‌متر (یعنی ۲۳۰۰ میلی‌لیتر کمتر از

پانویس‌ها

¹ mahdi.matin@gmail.com

² LCM

³ limestone chip

⁴ oyster shell

⁵ gilsonate

⁶ salt

⁷ fracture pressure

منابع

- [1] Daccord, G., Craster, B., Ladva, H., Jones, T.G.J., and Manescu, G.: "Cement-Formation Interactions," Chapter 6 in Nelson EB and Guillot, D (eds.): Well Cementing—2nd Edition, Houston: Schlumberger (2006).
 [2] Davidson E., Richardson L., Zoller S. "Control of Circulation in Fractured Limestone Reservoir" IAD/SPE, 2000, p.9.

- [3] Lummus, James L. "Drilling Fluids Optimization" Penn Well Publing Company Tulsa Oklahoma, 1986.
 [4] Cole R., Syed A. Ali, Foley K., "A new environmentally safe cross linked polymer for fluid-loss control, SPE 29525, Halliburton Energy Services, Chevron USA Production Co., 1985.