



## نقش گل حفاری در ناپایداری دیواره‌ی چاه و مقایسه عملکرد انواع گل‌های حفاری پایه آبی ویژه‌ی پایدارسازی دیواره‌ی چاه

حسین بازاریار<sup>۱</sup>، مهرداد سلیمانی<sup>۲</sup>، محمود بیرق‌باغی<sup>۳</sup>، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

مشکلات حفاری در شیل‌های فعال یکی از مسائل اساسی صنعت نفت و گاز به‌شمار می‌رود. این شیل‌ها در حضور آب به‌سرعت دچار تورم و ریزش شده و مشکلاتی مانند ناپایداری دیواره‌ی چاه، چسبیدگی لوله‌ها و تویی شدن مته را پدید می‌آورند. با وجود عملکرد خوب گل‌های حفاری پایه‌روغنی جهت رفع مشکلات حفاری در شیل‌ها، این گل‌ها کاستی‌هایی نظیر آلودگی زیست‌محیطی، مشکلات دفع پسماند و هزینه‌ی فراوان نیز به‌همراه دارند. گل‌های حفاری پایه آبی گزینه‌هایی هستند که در صورت بازده مناسب می‌توانند جایگزین گل‌های پایه‌روغنی شوند. در این پژوهش تلاش بر این است که سازوکار ناپایداری شیمیایی سازند و عوامل مسبب ناپایداری دیواره‌ی چاه، بهتر شناخته شود. همچنین این مقاله سعی کرده ضمن مقایسه و رتبه‌بندی گل‌های پایه آبی در پایدارسازی شیل‌ها نشان دهد که پایداری سازنده‌های شیلی (که در گذشته تنها به کمک گل‌های پایه‌روغنی ممکن بود) امروزه توسط گل‌های حفاری پایه آبی و با هزینه‌ی کم‌تر و سازگارتر با محیط زیست نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

واژگان کلیدی: شیل، پایداری دیواره‌ی چاه، گل پایه آبی، گل‌های بازدارنده، گل گلاکولی، گل سیلیکاتی، گل حفاری سازگار با محیط زیست

### مقدمه

آگوست ۱۹۶۰ در حوضه‌ی لوس آنجلس بود که از ترکیب ۴۰ درصد آب امولسیون شده در یک نفت پالایشی ساخته شده بود. امولسیون‌هایی با بیش از ۳۰ درصد آب، سبب احتراق نخواهند شد و بنابراین خطر آتش‌سوزی نیز رفع گردید. گل‌های بازدارنده (ترکیبات پتاسیم) در ابتدای دهه‌ی ۶۰ میلادی ابداع شدند. نخستین بار در ۱۹۶۰ هنگام حفاری شیل‌ها در چاهی در ونزوئلا با گلی حاوی ترکیبات پتاسیم، بهبود چشم‌گیری در پایداری چاه گزارش شد [۵]. اولین آزمایش میدانی گل پتاسیم کلرید-پلیمری در ۱۹۶۹ در ناحیه‌ی فوتیزل کانادا انجام گردید [۶]. در دهه‌ی میلادی ۸۰ نگرانی‌های زیست‌محیطی منجر به استفاده از روغن‌های معدنی و روغن‌های بسیار پالایش یافته شد که کم‌تر از گازوئیل سمی بوده و از نظر زیست‌محیطی مناسب‌تر بودند [۳]. در ۱۹۹۰ برای نخستین بار جهت کنترل شیل در یک میدان از گلاکول و پلی گلاکول به همراه پتاسیم کلرید و گل پتاسیم کلرید-پلیمر با موفقیت محدودی استفاده شد [۷].

برای پیش‌گیری از ناپایداری چاه در عملیات حفاری، شناخت سازوکار ناپایداری و عللی که موجب ناپایداری چاه می‌شوند و همچنین شناخت گل‌های حفاری که به‌شکل مؤثری مانع از ناپایداری چاه شوند بسیار با اهمیت خواهد بود. گل‌های پایه‌روغنی علاوه بر پایدارسازی شیل، برتری‌های دیگری از قبیل روان‌کاری مناسب، پایداری دمایی و عدم چسبندگی نیز دارند. این امتیازات برجسته، در واقع هدف نهایی یک گل پایه آبی برای جایگزینی گل‌های پایه‌روغنی است. چراکه گل‌های پایه‌روغنی با وجود داشتن این برتری‌ها، معایبی نظیر هزینه‌ی فراوان،

بیش از ۷۵ درصد سازنده‌های حفاری شده در چاه‌های نفت و گاز جهان سازنده‌های شیلی هستند. هزینه‌های حفاری مربوط به مشکلات ناپایداری شیل‌ها بیش از نیم میلیارد دلار در سال گزارش شده است [۱]. در واقع ناپایداری دیواره‌ی چاه مهم‌ترین مشکل فنی در حفاری و یکی از بزرگ‌ترین منابع هدرروی وقت و هزینه است که حتی می‌تواند منجر به گیر کردن کامل لوله‌ها در اثر ایجاد حفره و فروریختن چاه گردد [۲]. شیل‌ها به دلیل داشتن کانی‌های رسی به‌راحتی می‌توانند آب را به‌خود جذب کنند. پیامد جذب آب گل حفاری در چاه تورم شیل و تنگ شدن چاه در شیل‌های نرم یا ریزش خرده‌ها و گشادشدگی چاه در شیل‌های ترد و سفت خواهد بود. هر دو پدیده می‌توانند موجب شکست سازند و در نتیجه برهم‌زدن پایداری دیواره‌ی چاه<sup>۲</sup> گردند [۳]. از طرفی تورم رس‌ها در مخازن نفت و گاز یکی از علل اصلی آسیب‌سازندی است [۴].

از آغاز دهه‌ی ۳۰ میلادی تلاش‌هایی برای ساخت گل‌های حفاری مناسب جهت حفر شیل‌های دردرساز انجام گرفت. در ۱۹۳۵ شرکت تگزاس در منطقه‌ی برایان موند واقع در تگزاس یک گل سدیم سیلیکاتی به کار گرفت و در ۱۹۳۸ شرکت شل در میدان راند مونتاین واقع در کالیفرنیا یک گل روغنی استفاده کرد [۵]. در سال‌های ۱۹۴۳ تا ۱۹۵۷ گل‌های آهکی در حفاری مقاطع ضخیم شیل، محبوبیت فراوانی داشتند. در حدود ۱۹۵۶ گل کلسیم سورفکتانت توسط شرکت تگزاسکو معرفی گردید. نخستین استفاده‌ی میدانی از گل پایه‌روغنی امولسیون معکوس در

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (h.baziar61@gmail.com)

وضعیت تنش شیل پس از حفاری را نشان می‌دهد که توسط موهر و کولمب ارائه شده است. تنش‌های روی محور افقی، تنش بین دانه‌های هستند که به عنوان تنش‌های مؤثر نیز شناخته می‌شوند. با بسط نظریه‌ی تنش مؤثر ترازقی، تنش‌های مؤثر به صورت معادله‌ی ۱- نشان داده می‌شوند [۲]:

$$\sigma_i^{\text{eff}} = \sigma_i - P_{\text{pore}} - P_{\text{swelling}} \quad (1)$$

که  $\sigma$  تنش‌های درجای سازند هستند و  $P_{\text{pore}}$  و  $P_{\text{swelling}}$  به ترتیب فشار منفذی و فشار تورم را نشان می‌دهند. پوش شکست موهر-کولمب که بازتابی از مقاومت شیل است به شکل معادله‌ی ۲- تعریف می‌شود [۲]:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (2)$$

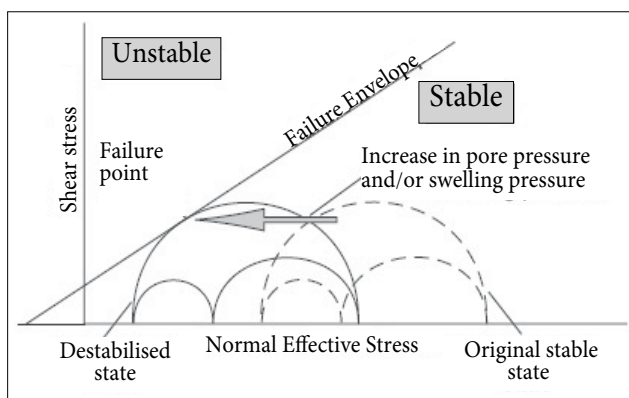
که  $\tau$  تنش برشی را بیان می‌کند،  $\varphi$  زاویه‌ی اصطکاک است و  $C$  چسبندگی را نشان می‌دهد.

در شکل ۲- مشاهده می‌شود که با کاهش تنش‌های مؤثر، وضعیت تنش (منحنی خط چین) به پوش شکست (خط شیب‌دار) نزدیک می‌شود و در لحظه‌ی برخورد با پوش شکست (منحنی پر)، سازند دچار شکست شده و چاه ناپایدار می‌گردد. فرض کنیم که با انتخاب درست وزن گل، شیل پس از حفاری در آغاز پایدار است. این پایداری اولیه موجب پیشگیری از شکست آنی سازند خواهد شد. اما این پایداری همیشگی نخواهد بود. با توجه به معادله‌های ۱- و ۲ اساساً طی سه سازوکار روبرو شدن سازند با گل حفاری می‌تواند منجر به ناپایداری سازند شود [۲]:

الف) افزایش فشار منفذی ناشی از نفوذ فشار گل، تنش مؤثر را کاهش می‌دهد.

ب) افزایش فشار تورم (برای مثال به علت تبادل کاتیونی نامطلوب در جایگاه‌های رسی)، تنش‌های مؤثر را کاهش می‌دهد.

ج) نوسان شیمیایی و سست شدن پیوندهای سیمانی (هرچند این اثر با توجه به معادله‌ی ۱- موجب کاهش تنش مؤثر نمی‌شود اما ممکن است با تنظیم مقاومت شیل و عوامل شکست یعنی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در نظر گرفته شود و بنابراین موجب جابجایی موقعیت



شکل ۲ | نمودار موهر-کولمب برای شکست شیل [۲]

محدودیت‌های زیست محیطی، مشکلات پسماند، پیامدهای مربوط به سلامتی و ایمنی و اثرات زیان‌آور بر حفاری و تکمیل قسمت‌های بهره‌ده نیز دارند [۷].

### ۱- ناپایداری دیواره‌ی چاه

در شکل ۱- مدلی ساده شده و در عین حال عملی از نیروهای وارد بر یک سیستم شیلی شامل رس‌ها و دیگر کانی‌ها (اصولاً کوارتز) در اندازه‌ی سیلت نشان داده شده است [۲].

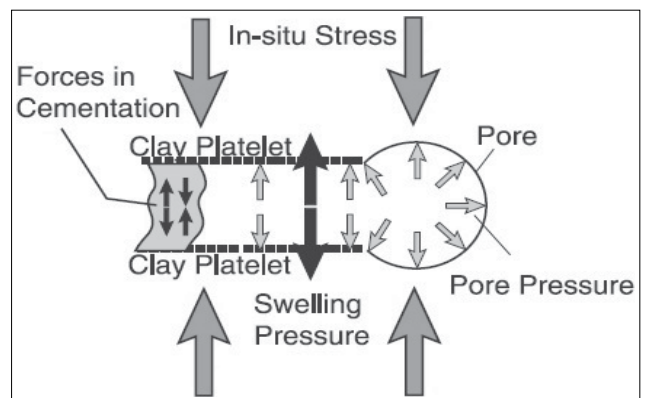
این نیروها می‌توانند به نیروهای مکانیکی و فیزیوشیمیایی تقسیم شوند. دسته‌ی نخست (نیروهای مکانیکی) شامل نیروهای زیر هستند:

- تنش‌های درجای عمودی (طبقات روین) و افقی
- فشار منفذی

■ تنش وارد بر نقاط تماس بین دانه‌های مانند پیوندهای سیمان‌شدگی و دسته‌ی دوم (نیروهای فیزیوشیمیایی) که اصولاً در فابریک رس عمل می‌کنند شامل نیروهای زیر هستند:

- جاذبه‌ی وان‌در والس
- دافعه‌ی الکترواستاتیکی
- نیروهای جاذبه و دافعه‌ی کوتاه‌برد که برگرفته از آب‌دار شدن/حلال‌پوشی<sup>۴</sup> صفحات رس و یون‌های موجود در فضاهای بین‌لایه‌ای (جذب شده یا آزاد) هستند.
- برآیند این نیروهای فیزیوشیمیایی را در اصطلاح فشار آب‌دار شدن<sup>۵</sup> یا فشار تورم<sup>۶</sup> می‌نامند؛ چراکه این نیروها عامل رفتار تورمی رس‌ها و شیل‌ها هستند [۲].

تا چندین دهه راهکار استاندارد حل مشکلات شیل، بازدارندگی<sup>۷</sup> نام داشت. این واژه برگرفته از توانایی برخی افزایش‌ها به‌ویژه نمک‌ها برای پیشگیری از تورم بنتونایت در آب بود. امروزه واژه‌ی بازدارندگی و بازدارنده<sup>۸</sup> تنها برای افزایش‌هایی به کار می‌رود که سبب کاهش فشار تورم می‌شوند. با این حال همان‌گونه که نشان خواهیم داد بازدارندگی لزوماً به معنی پایداری‌سازی شیل نیست. شکل ۲- (منحنی خط چین) نمونه‌ای از



شکل ۱ | نیروهای وارد بر یک سیستم شیلی [۲]

و شیب پوش شکست در طی زمان شود)

باید توجه داشت که عکس این قضیه نیز درست است؛ هنگامی که فشار منفذی یا فشار تورم کاهش یافته یا تغییرات شیمیایی شیل را تقویت کنند، ممکن است وضعی پایدارتر به وجود آید. با توجه به مطالب عنوان شده اهمیت پیشگیری از آب دار شدن شیل به کمک طراحی گل حفاری مناسب در حفظ پایداری چاه به روشنی آشکار می گردد.

دو جریان مهم بین سیال چاه و شیل دیواره وجود دارد؛ یکی جریان دارسی آب با نیروی محرکه‌ی گرادیان هیدرولیکی و دیگری انتشار مواد حل شده و یون‌ها با نیروی محرکه‌ی گرادیان پتانسیل شیمیایی بین سیال حفاری و شیل (پدیده‌ی اسمز).

بر عکس محیط‌های تراوا، انتشار در شیل‌هایی با تراوایی کم نسبت به جریان دارسی فرآیندی سریع‌تر و برجسته‌تر است. با این حال در شیل‌ها فرآیند مهم دیگری به نام فشار منفذی وجود دارد که سریع‌تر از انتشار یونی رخ می‌دهد (شکل-۳). جریان دارسی آب تقریباً تراکم‌ناپذیر در یک ماتریکس شیلی با سفتی زیاد، تأثیر ژرفی بر فشار منفذی خواهد داشت. به دلیل تراوایی پایه‌ای کم، شیل‌ها نمی‌توانند با سرعت کافی فشارهای منفذی را به بیرون پراکنده کنند. در نتیجه‌ی نفوذ آب، فشار منفذی در یک گستره‌ی پهناور پیرامون دیواره‌ی چاه افزایش خواهد یافت. بنابراین دیده می‌شود که حفاری با یک گل پایه‌آبی به روش فراتعادلی<sup>۱۱</sup> با گذشت زمان فشار منفذی را در نزدیکی دیواره‌ی چاه افزایش خواهد داد. به عنوان یک قاعده‌ی سرانگشتی می‌توان گفت در جایی که نفوذ کلی آب یا صافاب گل با سرعت چند میلی‌متر در روز پیشروی می‌کند انتشار یونی چندین سانتی‌متر در روز خواهد بود و فشار چندین دسی‌متر در روز منتشر خواهد شد [۲].

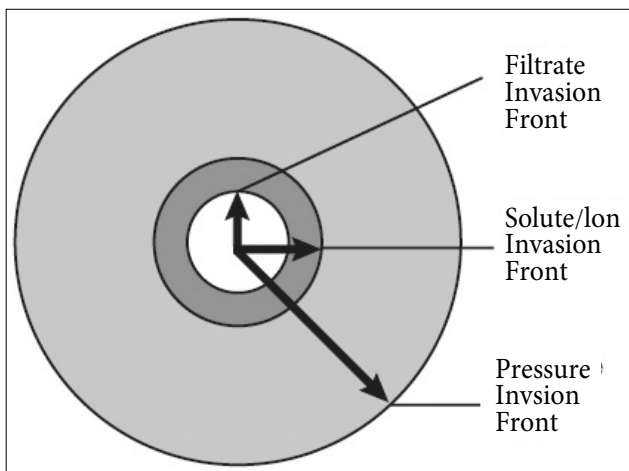
جریان‌های موجود بین شیل و سیال چاه زمینه‌ی جابه‌جایی آب و ماده‌ی حل شونده/یون‌ها را فراهم می‌کنند که سبب تغییر فشار تورم، محتوای آب و فشار منفذی خواهند شد. با گذشت زمان این گونه تغییرات همگی بر وضعیت تنش یا مقاومت شیل تازه حفاری شده مؤثر خواهند بود و همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد بر پایداری یا ناپایداری دیواره‌ی چاه نیز اثر گذار خواهند بود.

اکنون این پرسش مطرح است که طبق معادله‌ی ۱-آیا کاهش  $P_{swelling}$  می‌تواند افزایش  $P_{pore}$  را خنثی کند؟ به عبارت دیگر از آن‌جا که بازدارنده‌ها، افزاینده‌های کاهش فشار تورم ( $P_{swelling}$ ) هستند آیا افزاینده‌های بازدارنده می‌توانند جهت جلوگیری از مشکلات شیل به شکل مؤثری به کار گرفته شوند؟ بنابر گفته‌های پیشین اگر بازدارنده‌ها را افزاینده‌هایی بدانیم که تنها فشار تورم را کاهش می‌دهند پاسخ این است که نمونه‌هایی در هر گونه ناپایداری شیل دیده می‌شود که با به کارگیری هر بازدارنده‌ای نمی‌توان از آن‌ها جلوگیری کرد. زیرا در شیل‌های سالم و غیرشکاف‌دار جبهه‌ی انتشار بازدارنده در پشت جبهه‌ی فشار منفذی است (شکل-۳) و در بخش میان دو جبهه که هنوز بازدارنده به آن نفوذ نکرده ولی فشار منفذی افزایش یافته، نمی‌توان از ناپایداری جلوگیری کرد.

در انتقال بازدارنده‌ها زمان تأخیر (به عنوان یکی از کاستی‌های عمده‌ی افزاینده‌های بازدارنده) به عنوان پایدارکننده‌های شیل به شمار می‌رود. بازدارندگی تنها زمانی کارساز خواهد بود که جبهه‌ی نفوذ فشار گل و انتشار بازدارنده بتوانند پهلو به پهلو حرکت کنند و سرشت شیل و بازدارنده به گونه‌ای باشد که فشار تورم به اندازه‌ای کاهش یابد تا بتواند افزایش فشار منفذی را خنثی نماید. این شرایط تنها برای شیل‌هایی که مقادیر چشم‌گیری از رس‌های تورمی دارند (مانند اسمکتیت‌ها) فراهم خواهد شد. برای رس‌هایی مانند کائولینیت‌ها که فعالیت کم تا غیرفعال دارند بازدارنده‌ها کمک چندانی نخواهند کرد. به روشنی دیده می‌شود که برای پایداری شیل، چیزی بیش از بازدارندگی مورد نیاز است. جلوگیری از ورود آب/صافاب گل به شیل و جلوگیری هم‌زمان از نفوذ فشار در شیل به همراه کاهش فشار تورم به کمک بازدارنده‌ها، کلید پایداری شیل است [۲]. با این همه آنچه گفته شد تنها برای ناپایداری شیمیایی پدید آمده در شیل در اثر گذشت زمان صادق است و جهت جلوگیری از ناپایداری مکانیکی سازند، طراحی و انتخاب درست وزن گل الزامی است.

## ۲- مقایسه عملکرد انواع گل‌های حفاری در پایداری شیل

همان‌گونه که در بحث ناپایداری گفته شد جلوگیری از ورود آب/صافاب گل به شیل و جلوگیری هم‌زمان از نفوذ فشار در شیل به همراه کاهش فشار تورم، کلید پایداری شیل بوده و هم‌چنان که در شکل-۳ دیده می‌شود سه منطقه‌ی متمایز پیرامون دیواره‌ی چاه وجود دارد. بنابراین برای مقایسه‌ی انواع گل‌های حفاری باید دید که این گل‌ها چه اثری بر مقادیر محتوای آب<sup>۱۱</sup> (WC)، فشار تورم (SP) و فشار منفذی<sup>۱۲</sup> (PP) در سه منطقه‌ی نفوذی شناخته شده یعنی منطقه‌ی نفوذ صافاب<sup>۱۳</sup> (FI)، منطقه‌ی نفوذ ماده‌ی حل شده<sup>۱۴</sup> (SI) و منطقه‌ی نفوذ فشار<sup>۱۵</sup> (PI) دارند [۲]. سه عامل SP، WC و PP عوامل ناپایداری شیمیایی شیل هستند. هر قدر



شکل ۳ | جبهه‌های نفوذ آب (صافاب)، ماده‌ی حل شده/یون‌ها و فشار در شیل‌های پیرامون دیواره‌ی چاه [۲]

افزایش می‌یابد. در منطقه‌ی SI مقادیر SP و PP و در منطقه‌ی PI مقدار PP افزایش خواهند یافت. بنابراین یک پخش‌شدگی سریع در خرده‌ها و یک گشادشدگی پیش‌رونده با زمان در دیواره‌ی چاه پدید می‌آید. در این میان گل آهکی یک استثناست و به دلیل بالا بردن سیمان کاری در جای فابریک شیل تأثیر مناسبی بر پایدارسازی دارد [۲].

## ۲-۲- دسته‌ی II: گل‌های پایه‌آبی بازدارنده‌ی سنتی<sup>۲۱</sup>

گل با کلرید پتاسیم زیاد، گل کلرید پتاسیم-پلیمر، گل‌های آمینی شده/ کاتیونی از این دسته هستند. در رویارویی شیل با گل‌های این دسته، مقدار PP در هر سه منطقه‌ی نفوذی افزایش خواهد یافت ولی ممکن است به دلیل مواد محلول بازدارنده‌ی منتشر شده در شیل و جابه‌جایی در سطوح رس مقدار SP کاهش یابد. هنگامی که انتشار فشار گل و انتشار مواد حل شده تقریباً به موازات یکدیگر انجام شوند (در سازندهای شیلی فعال مانند شیل‌های با محتوای اسمکتیت زیاد و با فشار تورمی زیاد)، ممکن است تأثیر SP افزایش PP را خنثی کند. بنابراین یک وضعیت کمابیش پایدار پدید خواهد آمد. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، این گل‌ها هنگام حفاری شیل‌های قدیمی تر و با فعالیت کم تر، ناکارآمد هستند [۲].

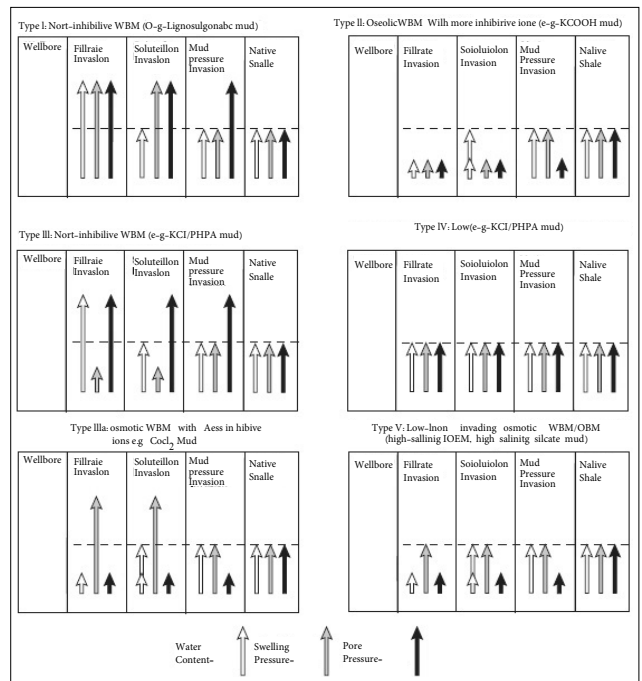
ویژگی بازدارندگی پتاسیم ناشی از تبادل یونی پتاسیم با یون‌های سدیم یا کلسیم میان لایه‌های رس و همچنین تثبیت یون پتاسیم در شبکه بلوری کانی‌های رسی آماسی است. پلیمر به کار رفته می‌تواند پلی‌آنیونیک سلولز (PAC) یا پلی‌آکرلامید جزئی هیدرولیز شده (PHPA) یا ترکیبی از هر دو باشد. این پلیمرها به علت اندازه‌ی بزرگ مولکول‌هایشان اجازه‌ی نفوذ به لایه‌های رسی را نداشته، جذب آن‌ها بر روی سطوح بیرونی صورت گرفته و یک پوشش محافظ روی سطح شیل تشکیل می‌دهند. این عمل کپسوله کردن<sup>۲۲</sup> نامیده می‌شود. در مناطقی که از نظر زیست محیطی کلرید پتاسیم پذیرفته شده نیست گونه‌ای دیگر از گل‌های پتاسیمی کاربرد دارند. منبع پتاسیم در این گل‌ها می‌تواند لیگنیت پتاسیم، استات پتاسیم و پتاس سوزآور<sup>۲۳</sup> (KOH) باشد [۳].

توانایی بازدارندگی شیل در گل‌های پلیمری کاتیونی ناشی از حضور دو پلیمر است. یک پلیمر کاتیونی با وزن مولکولی کم برای جلوگیری از آبدار شدن شیل و پلیمر دیگر با وزن مولکولی زیاد برای ایجاد پوششی محافظ روی سطوح بیرونی شیل (کپسوله کردن) در این گل حضور دارند. پلیمر نخست با نفوذ به شبکه‌ی ساختار رس جایگزین کاتیون‌های قابل تبادل و مولکول‌های آب و در نتیجه کاهش تورم رس می‌شود. به علت اتصال چندگانه<sup>۲۴</sup> این پلیمر روی سطوح رس، کاتیون‌های عادی نمی‌توانند جایگزین پلیمر جذب شده گردند و این پلیمر پیوندی سخت میان لایه‌ها (مانند تثبیت پتاسیم) فراهم می‌کند که بازگشت‌ناپذیر است. به دلیل فراوانی بخش‌های سطحی با بار منفی روی کانی‌های رسی، کپسوله کردن توسط پلیمر کاتیونی، بسیار بهتر از پلیمرهای آنیونی (گل کلرید پتاسیم-پلیمر) انجام شده و پایدارتری شیلی‌تری فراهم می‌کند. اما این گل به ذرات جامد حساس بوده و بسیار گران‌تر از گل‌های پایه‌آبی سنتی است. این گل

یک گل حفاری بتواند این سه عامل را در سه منطقه‌ی یاد شده کاهش دهد، عملکرد بهتری در پایدارسازی شیل خواهد داشت. بر این اساس با توجه به کارایی گل‌های حفاری می‌توان در راستای پایدارسازی شیل، آن‌ها را به پنج گروه تقسیم کرد که روی هم رفته توانایی پایدارسازی در هر گروه بیش‌تر از گروه قبل است [۲]. شکل ۴- تغییرات مقادیر عوامل ناپایداری شیمیایی را پس از رویارویی شیل با گل حفاری نشان می‌دهد. تغییرات به شکل افزایش یا کاهش، نسبت به مقادیر طبیعی و به صورت کیفی است.

## ۲-۱- دسته‌ی I: گل‌های پایه‌آبی غیربازدارنده<sup>۱۹</sup> پخش‌شده/پخش‌کننده<sup>۱۷</sup>

از این دسته می‌توان گل لیگنو سولفونات و گل‌های درمان‌شده با کلسیم (آهکی و ژپسی) را نام برد. این گل‌ها با افزودن آهک/ژپس همراه با مقداری سود سوزآور<sup>۱۸</sup> و یک رقیق‌کننده‌ی زیستی<sup>۱۹</sup> (لیگنوسولفونات یا لیگنیت) به یک گل بنتوناتی یا گل آغازین<sup>۲۰</sup> به دست می‌آیند [۱]. برتری گل‌های کلسیمی در کم‌هزینه بودن و جلوگیری از آبدار شدن شیل‌ها توسط این گل‌هاست. اما گل آهکی در دمای بیش از ۲۷۵ °F به دلیل زلزله‌ای شدن شدید و احتمال پیدایش یک سیمان سخت از ترکیب کلسیم، سود و رس، قابل استفاده نیست [۸] و گل ژپسی نیز در PH بیش از ۱۰/۵ به تدریج نامحلول می‌شود [۳]. این گل‌ها روی هم رفته موجب بی‌اثر شدن مقدار کمی از ناپایداری شیل در گل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۴- دیده می‌شود با گذشت زمان مقادیر هر سه عامل ناپایداری در منطقه‌ی FI



شکل ۴ | تأثیر کیفی گل‌های حفاری بر محتوای آب (WC)، فشار تورم (SP) و فشار منفذی در شیل‌ها پیرامون دیواره‌ی چاه (تغییرات نشان داده شده به صورت نسبی و نسبت به ویژگی‌های شیل طبیعی هستند که به صورت خطچین نشان داده شده‌اند) [۲]

همچنین دارای محدودیت دمایی در حدود  $275^{\circ}\text{F}$  است [۳].

### ۲-۳- دسته‌ی III: گل‌های پایه آبی اُسمتیک<sup>۲۰</sup> [۲]

به صورت درجا به شکل امولسیون درمی آید و از فاز آبی جدا گشته و منافذ شیل را پُر می‌کند. بخشی از پلیمرهایی که این گونه درجا رسوب کرده‌اند اکنون به سدی تبدیل شده‌اند که نفوذ سیال و فشار آب را محدود می‌کنند. بنابراین دیواره‌ی چاه و منافذ شیل از یکدیگر جدا شده و شیل به شکل مؤثری پایدار خواهد شد [۱۰]. از برتری‌های این سیستم می‌توان درجه‌ی بازدارندگی زیاد شیل، پایداری دیواره‌ی چاه، کنترل افت صافاب در دما و فشار زیاد و روان کاری<sup>۲۱</sup> مناسب را نام برد. همچنین تجمع مناسب خرده‌ها، بهبودی کیفیت فیلتر کیک، گشادشدگی کم چاه، مقاومت بهتر نسبت به جامدات، عملکرد بهتر مته‌های PDC، کم‌تر توی شدن مته و افزایش سرعت حفاری از دیگر امتیازات این گل می‌باشد [۳].

گل سیلیکاتی یک سیستم نمک-پلیمر است که جهت بهبود بازدارندگی از سیلیکات سدیم بهره می‌گیرد. در برخورد سیلیکات محلول با سطح شیل‌هایی (رس‌هایی) که PH کمی دارند، در صورت وجود سازندهای تراوا و تراوش در آن‌ها، روی سطح یا درون شیل PH کاهش یافته و واکنشی با کاتیون‌های دو ظرفیتی ( $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$ ) رخ می‌دهد. از آن‌جا که سیلیکات‌ها تنها در PH بیش از ۱۰/۴ و در غیاب کاتیون‌های دو ظرفیتی پایدارند، روی شیل رسوب کرده و پوششی از سیلیکات کلسیم یا منیزیم به وجود می‌آورند که از تماس آب با شیل (رس) دیواره‌ی چاه جلوگیری می‌کند [۳]. گل سیلیکاتی یک گل سازگار با محیط زیست است که از گل‌های گران قیمت به شمار نمی‌رود. این گل که می‌توان آن را هم با آب شیرین و هم با آب دریا ساخت با پلیمرهای آنیونی و غیر یونی کاملاً سازگار بوده، توی شدن مته، چسبیدگی لوله‌ها و هرزروی گل را کاهش می‌دهد. گل سیلیکاتی همچنین سبب کاهش بسیار زیاد خوردگی خواهد شد [۱۱]. از کاستی‌های این گل می‌توان به پایداری دمایی نسبتاً کم (در حدود  $275^{\circ}\text{F}$ )، آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی ذرات جامد و همچنین آب سخت، وارد کردن آسیب سازندگی<sup>۲۲</sup> به مخزن و برهم کنش با برخی ابزارهای حفاری یا نمودارگیری اشاره کرد. همچنین گزارش‌هایی از نرخ فراوان تخلیه‌ی سیلیکات در سازندهای شیلی جوان در استفاده از این گل وجود دارد [۱۱].

### ۲-۵- دسته‌ی V: گل‌های پایه آبی یا روغنی اُسمتیک کم نفوذ یا بدون نفوذ

گل سیلیکاتی با فعالیت کم، گل امولسیون معکوس با فعالیت کم و گل‌های مخلوط پلی‌ال-نمک با غشای القایی (ترکیبی از چندین پلی‌ال شامل پلی‌گلیسرول‌ها، پلی‌گلائیکول‌ها، متیل گلوکوزید و چند نمک شامل NaCl و  $\text{CaCl}_2$  و ...) از این دسته به شمار می‌روند. این دسته از ترکیب گل‌های دسته‌ی ۳ و ۴ پدید آمده‌اند؛ یعنی در آنها هم از سازو کار جلوگیری از نفوذ صافاب و هم از ایجاد غشاهای اُسمتیک با کارایی زیاد (جهت افزایش پایداری) بهره گرفته شده است. ایجاد فشار اُسمتیک ممکن است موجب تحریک جریان اُسمتیک آب از حفره‌های شیل به سمت گل شود. این جریان می‌تواند WC و PP را در نزدیکی دیواره‌ی چاه کاهش دهد. در واقع گل‌های IOEM<sup>۲۳</sup> (پایه روغنی/سنتزی معکوس) با

این دسته شامل گل پایه  $\text{CaCl}_2/\text{MgCl}_2$ ، گل فرمات پتاسیم (KCOOH) و گل متیل گلوکوزید<sup>۲۴</sup> است. نحوه‌ی عملکرد این گل‌ها بر اساس عمل غشای تراوا و نشست پذیر سیال-شیل است. این گل‌های حفاری از مواد حل شده با تحرک کم برای ایجاد کارآیی غشایی و کاهش فعالیت آب بهره می‌گیرند؛ به گونه‌ای که یک شیب فشار اُسمتیک از طرف شیل به سمت گل (چاه) پدید آید. این فشارهای اُسمتیک به اندازه‌ی کافی نیرومند هستند که فراتعدالی بودن هیدرولیکی گل را خنثی کنند و از آب‌دار شدن شیل جلوگیری نمایند. بر اساس شکل ۴- پیش‌بینی می‌شود که برای این دسته اندازه‌ی WC و PP کاهش یافته و در پایان وضعی پایدارتر پدید آید. این گل‌ها بر اساس تأثیر گل بر مقدار SP به دو گروه تقسیم می‌شوند؛

الف) گل‌های گروه IIIA که مقدار SP را در مناطق FI و SI بر اثر جابه‌جایی نامطلوب کاتیون‌های رس افزایش می‌دهند. این پدیده می‌تواند پاره‌ای از آثار سودمند بر مقادیر WC و PP را بی‌اثر کرده و امکان ناپایداری را افزایش دهد.

ب) گل‌های گروه IIIB که مقدار SP را نیز در نواحی FI و SI کاهش داده و پایداری بیشتری فراهم می‌آورند. با این همه آن‌چه در شکل ۴- برای گل‌های گروه IIIB نشان داده شده، مطلوب‌ترین سناریو است که در آن جریان برگشتی<sup>۲۵</sup> آب منفذی بر جریان روبه داخل هیدرولیکی صافاب گل چیره می‌شود.

### ۲-۴- دسته‌ی IV: گل‌های پایه آبی یا روغنی کم نفوذ یا بدون نفوذ<sup>۲۸</sup>

گل‌های پلی‌گلائیکولی TAME<sup>۲۶</sup>، گل سیلیکاتی با فعالیت متعادل شده و گل‌های پایه روغنی با سنتزی با فعالیت متعادل شده از این دسته به شمار می‌روند. این گل‌ها با سازو کار ویژه‌ای کار می‌کنند که از نفوذ آن‌ها به شیل و تغییر SP، WC، و PP جلوگیری می‌نماید. بنابراین عوامل مذکور تقریباً بدون تغییر می‌مانند. هنگامی که فعالیت آب شیل و آب گل یکسان باشد (برای نمونه در تعادل باشند) هیچ انتقال آب اُسمتیکی انجام نخواهد شد [۲]. پلی‌گلائیکول‌ها عموماً در غلظت‌های ۳ تا ۱۰ درصد وزنی به گل‌های پایه آبی به ویژه گل‌های پلیمر KCl اضافه می‌شوند. هر چند نمک‌های دارای  $\text{Na}^+$  و  $\text{Ca}^{2+}$  نیز همراه با پلی‌گلائیکول به کار می‌روند ولی عملکرد آن‌ها به خوبی نمک پتاسیم نیست [۹]. ویژگی آشکار پلی‌گلائیکول‌های دورو یا TAME (امولسیون گل فعال شونده با دما) حلالیت‌پذیری معکوس با دما در آب است. این پلی‌گلائیکول‌ها در دماهای کم با آب آمیخته می‌شوند ولی با گرم شدن سرانجام به صورت دو فاز مایع از یکدیگر جدا می‌گردند و پلی‌گلائیکول تا اندازه‌ای در فاز آبی نامحلول می‌ماند [۱۰].

این ویژگی در گل حفاری به کار گرفته می‌شود و پلی‌گلائیکولی که در دماهای کم در فاز آبی سیال حفاری محلول است در دمای ته چاه

برای رس‌های با فعالیت کم تا غیرفعال مانند کائولینیت‌ها، بازدارنده‌ها به تنهایی کمک چندانی نخواهند کرد. این افزاینده‌ها تنها برای پایداری شیل‌های با مقادیر چشم‌گیری از رس‌های تورمی مانند اسمکتیت‌ها سودمند خواهند بود.

گل‌های پلی‌گلايکولی و گل‌های سیلیکاتی به شرط آنکه همراه با نمک‌ها و پلیمرهای مناسب به کار گرفته شوند می‌توانند جایگزین مناسبی برای گل‌های پایه‌روغنی باشند. چراکه افزون بر پایداری دیواره‌ی چاه، با محیط زیست سازگار بوده و هزینه‌ی آن‌ها نیز بسیار کم‌تر از گل‌های پایه‌روغنی و سنتزی خواهد بود. ■

شوری زیاد به استاندارد صنعت جهت حفاری شیل‌های در دسرساز تبدیل شده‌اند [۲].

### نتیجه‌گیری

افزایش فشار منفذی، افزایش فشار تورم و همچنین نوسان شیمیایی و سست شدن پیوندهای سیمانی در شیل‌ها می‌تواند موجب بروز ناپایداری در چاه شود. بنابراین جلوگیری از ورود آب/صافاب گل به شیل و جلوگیری هم‌زمان از نفوذ فشار در شیل به همراه کاهش فشار تورم، کلید پایداری‌سازی شیل‌هاست.

### پانویس‌ها

- |                                 |                             |                                       |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1. mssoleimani@shahroodut.ac.ir | 12. pore pressure           | 23. caustic potash                    |
| 2. pirgharebaghi@gmail.com      | 13. filtrate invasion       | 24. multi segment attachment          |
| 3. wellbore stability           | 14. solute invasion         | 25. osmotic WBMs                      |
| 4. solvation                    | 15. pressure invasion       | 26. methylglucoside mud               |
| 5. hydration pressure           | 16. non inhibitive          | 27. back-flow                         |
| 6. swelling pressure            | 17. dispersed/dispersive    | 28. low/non-invading muds             |
| 7. inhibition                   | 18. caustic soda            | 29. Thermally Activated Mu d Emulsion |
| 8. inhibitor                    | 19. organic thinner         | 30. lubricity                         |
| 9. diffusion                    | 20. spud mud                | 31. formation damage                  |
| 10. overbalance                 | 21. conventional inhibitive | 32. Invert Oil Emulsion Muds          |
| 11. water content               | 22. Encapsulating           |                                       |

### منابع

- [1] Azar, J.J., Robello Samuel, G., Drilling Engineering USA, Pennwell Corporation, 2007. Page 367.
- [2] Van Oort, E. On The Physical And Chemical Stability Of Shales. Journal Of Petroleum Science And Engineering 2003 Vol. 38 Pp 213235-.
- [3] M-I Swaco. Drilling Fluid Manual. M-I Swaco. 1998, Chapters 10,11 & 16
- [4] Onuoha, I.E.O., Bilgesu, H.I., And Ameri, S. Study Of Drilling Fluid Additives And Their Impact On Smectite Inhibition. SPE 149271. 2011.
- [5] Caenn R., Darley H.C.H., And Gray G.R. Composition And Properties Of Drilling And Completion Fluids. Sixth Edition, Gulf Professional Publishing Is An Imprint Of Elsevier, USA. 2011. Pp 5267-
- [6] Clark, R.K., Scheurman, R.F., Rath, H. And Van Larr, H.G. Polyacrylamide/Pottassium-Chloride Mud For Drilling Water Sensitive Shales. Jurnal Of Petroleum Technology, SPE 5514, 1976.
- [7] Patel, A., Stamatakis, E., Young S., Friedheim, J., M-I Swaco, Advances In Inhibitive Water-Based Drilling Fluids-Can They Replace Oil-Based Mud ?, SPE 106476, 2007.
- [8] Bourgoyne Jr. Adam T., Millheim Keith K., Chenevert Martin E., Young Jr F.S., Applied Drilling Engineering, Second Printing, SPE Textbook Series, 1991, Page 73.
- [9] Brady M.E, Craster B., Getliff J.M., Reid P.I., Highly Inhibitive, Low-Salinity Glycol Water-Base Drilling Fluid For Shale Drilling In Environmentally Sensitive Locations, SPE 46618, 1998, Page 1.
- [10] Bland R.G., Smith G.L., Eagark P., "Low Salinity Polyglycol Water-Based Drilling Fluids As Alternatives To Oil-Based Muds", SPE/Ladc 29378, Pages 405408-.
- [11] Van Oort E., Ripley D., Ward I., Chapman J.W., Williamson R., Aston M., Silicate-Based Drilling Fluids: Compotent, Cost-Effective And Benign Solutions To Wellbore Stability Problems, IADC/SPE 35059, 1996, Pages 193196-.