



انتخاب ترکیب بهینه گلهای حفاری پایه آبی جهت کاهش آسیب شیمیایی به مخزن

مهدی عاقبتی^{۱*}، محمد رنجبر^۲، رضا یونسی^۳

۱- دانشجوی کارشناس ارشد اکتشاف معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

E-mail: m27agh@yahoo.com

چکیده

با توجه به اهمیت ترشوندگی در بهره‌برداری از مخازن نفتی، اثر گلهای حفاری پایه‌آبی بر کانی‌های مخزن مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه بر روی کانی‌های کوارتز و کلسیت با استفاده از روش زاویه تماس انجام شد. این اولین بار است که این مطالعه با استفاده از روش طراحی آزمایش انجام می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که Biovis و استر، زاویه تماس قطره آب‌شور ۳٪ را بر روی هر دو کانی افزایش داده‌اند. بنابراین می‌توان پیش‌گویی کرد که در غلظتهای بالای این مواد، ترشوندگی به حالت خنثی و کمی نفت‌تر نزدیک می‌شود و از بازدهی تولید نفت در هنگام بهره‌برداری می‌کاهد. همچنین با استفاده از تحلیلهای آماری، ساختار بهینه گل جهت اجتناب از آسیب شیمیایی به مخزن ارائه گردید.

کلمات کلیدی: گل حفاری، خسارت به سازند، ترشوندگی، زاویه تماس، آب‌تر، نفت‌تر.

* شیراز - معالی آباد - کوی خلبانان - ۱۶ متری نسترن - پلاک ۲۵۰.



۱- مقدمه

۱-۱- آسیب به سازند مخزن

خط مشی انتخاب یک افزودنی سیال حفاری در چندین سال اخیر تغییر کرده است [1]. امروزه دیگر عملکرد گل تنها معیار تعیین کننده یک افزودنی نیست بلکه علاوه بر آن پارامترهایی نظیر زمین شناسی منطقه، طراحی چاه، هزینه، اثرات زیست محیطی، استحکام سنگ، فشار و دمای چاه، تدارکات و آسیب به سازند در انتخاب افزودنی مهم می باشند [1,2].

آسیب سازند را می توان به عنوان هر مانعی که در تولید چاه اختلال ایجاد کند، تعریف نمود. آسیب به سازند یکی از مهمترین عوامل در انتخاب گل حفاری می باشد. یک چاه ممکن است با صرف وقت و هزینه های فراوان حفر شود، اما به علت طراحی نامناسب ترکیب گل مخزن آسیب ببیند و در هنگام بهره برداری از بازدهی آن کاسته شود. مکانیزمهای آسیب ناشی از نفوذ سیالات حفاری به مخزن بطور خلاصه عبارتند از:

- متورم و پراکنده شدن رسهای موجود در مخزن توسط تراویده سیال حفاری (تراویده):
- نفوذ گل به سازند و بستن حفرات توسط ذرات موجود در گل؛
- بسته شدن مجراهای شن، آستریها و لوله های مشبک توسط اندود گل؛
- ریزش ماسه های غیرمتراکم به درون چاه؛
- تغییر ترشوندگی (Wettability) سنگ مخزن.

آسیب سازند می تواند یک پدیده فیزیکی یا شیمیایی باشد. برای مثال بسته شدن حفرات توسط جامدات موجود در گل یک شکل فیزیکی و تغییر در ترشوندگی سنگ مخزن یک شکل شیمیایی از آسیب گلهای حفاری به مخزن می باشند [3,4].

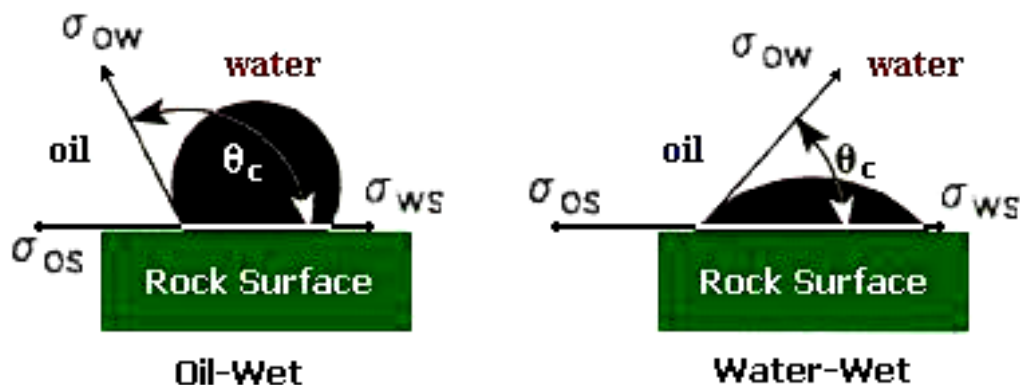
۱-۲- تئوری ترشوندگی

ترشوندگی یک سیستم مخزنی سنگ - سیال به عنوان توانایی یک سیال در حضور دیگر سیالات برای پخش شدن روی سطح سنگ و ترکردن آن تعریف می شود. درجه ترشدن یک جامد توسط مایع معمولاً بوسیله زاویه تماس (Contact Angle) بیان می شود. یک سیستم نفت - آب - سنگ در شکل ۱ نشان داده شده است که انرژی های سطحی آن بر اساس قانون Young بیان می شود:

$$\sigma_{ow} \cos \theta_c = \sigma_{os} - \sigma_{ws} \quad (1)$$

σ_{ow} : انرژی سطح مشترک بین آب و نفت θ_c : زاویه تماس

σ_{os} : انرژی سطح مشترک بین نفت و جامد σ_{ws} : انرژی سطح مشترک بین آب و جامد



شکل ۱- ترشوندگی سیستم نفت / آب / سنگ. a- سنگ آب تر، b- سنگ نفت تر.

زمانیکه θ_c از ۹۰ درجه کمتر باشد، سطح سنگ ترجیحاً بوسیله آب و زمانیکه θ_c بیشتر از ۹۰ درجه باشد، ترجیحاً بوسیله نفت، مرطوب می شود. آب تری (آبدوستی) مطلق تحت زاویه صفر درجه و نفت تری (آبرانی) مطلق تحت زاویه ۱۸۰ درجه بدست می آید که بندرت مشاهده می شود و اغلب سطوح سنگی به صورت نسبی، آب تر یا نفت تر هستند [5,6,7].

روش اندازه گیری زاویه تماس یکی از روشهای کمی اندازه گیری ترشوندگی است. از پیشرفته ترین روشهای زاویه تماس می توان به روش تصویربرداری اشاره کرد که اساس مطالعات آزمایشگاهی این تحقیق بوده است.

۱-۳- اثر تغییر ترشوندگی بر نفوذپذیری نسبی

زمانیکه تراویده گل پایه آبی به یک سازند دارای نفت وارد می شود، نفت را جابجا می کند. تحت شرایط محیطی معین هیچگونه آبی جابجا نمی شود و در نتیجه تولید زیان می بیند. این مکانیزم، بازداشت آب نامیده می شود. ساختار واقعی حفرات بیشتر سنگها از یک شبکه سه بعدی نامنظم از حفرات مرتبط بوسیله کانالهای باریک تشکیل شده است. وقتی که دو سیال مخلوط نشدنی (آب و نفت) بطور همزمان در این محیط نفوذپذیر جریان می یابند، مسیرهای جریان سیالات توسط ترشوندگی آنها کنترل می شود. با توجه به اینکه سطح بیشتر سنگها آب تر است (یعنی آب در مجاورت نفت، تمایل بیشتری به ترکردن سطح دارد) آب روی سطح سنگ و کانالهای باریک جریان می یابد، در صورتیکه نفت در مرکز حفرات و کانالهای بزرگ جاری می شود [3].

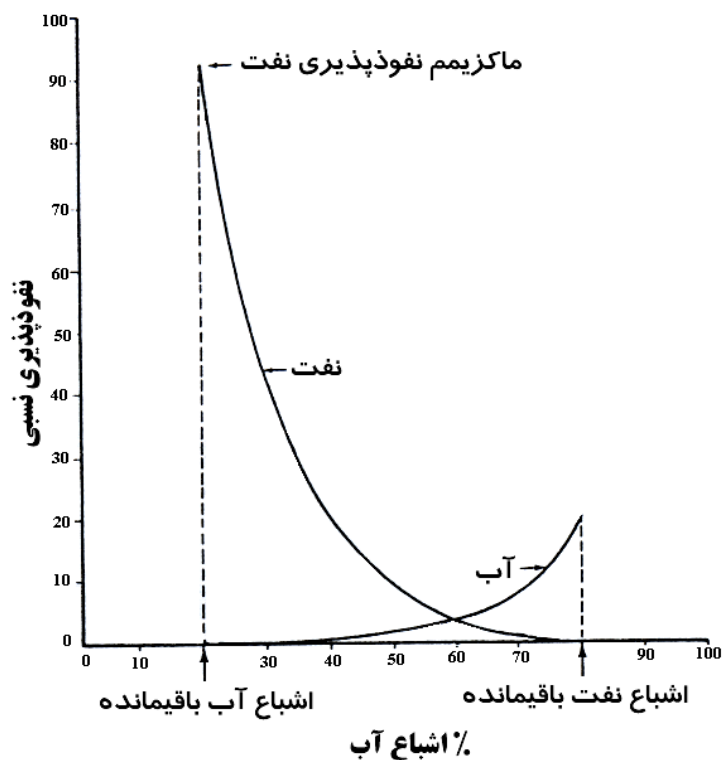


نفوذپذیری نسبی هر سیال به ترشوندگی سنگ و درصد اشباع هر سیال بستگی دارد. نفوذپذیری نسبی نفت در یک اشباع معین بیش از نفوذپذیری آب در همان اشباع آب است (شکل ۲). در شکل ۲ این اشباع معین می‌تواند هر نقطه‌ای تا اشباع آب ۶۰٪ باشد. زمانیکه تنها نفت در یک افت فشار معین جریان دارد، حداقل اشباع آب، اشباع آب باقیمانده است و زمانیکه تنها آب جریان دارد، حداقل اشباع نفت، اشباع نفت باقیمانده است. مخازن نفتی دست‌نخورده در اشباع آب باقیمانده قرار دارند. نفوذ تراویده گل، نفت را به سوی اشباع نفت باقیمانده هدایت می‌کند و زمانیکه چاه به تولید می‌رسد نفت، تراویده را به عقب به سوی اشباع آب باقیمانده می‌راند. بنابراین همچنانکه به اشباع آب باقیمانده نزدیک می‌شویم نفوذپذیری نسبی آب کاهش می‌یابد. در نتیجه قبل از اینکه تمامی تراویده خارج شود، زمان قابل توجهی سپری می‌شود و تولید کل حاصل می‌گردد، مخصوصاً اگر نسبت ویسکوزیته آب/نفت پایین باشد. در بیشتر مخازن دست‌نخورده، فشار مخزن برای خارج کردن همه تراویده کافی است، بنابراین آسیب ایجاد شده توسط اثرات نفوذپذیری نسبی، زودگذر است. در مخازن با فشار بالا و نفوذپذیری پایین، فشارهای مؤثر اهمیت دارند. افت فشار نمی‌تواند برای بیرون راندن فیلترات از کانالهای مؤثر ریز کافی باشد (بویژه در مجاورت دیواره چاه که افت فشار در سطح مشترک نفت تر به صفر نزدیک است). این مکانیزم که آنرا مربوط به بازداشت آب می‌دانیم، سبب خسارت دائمی و حتی مسدود شدن کامل روزنه پای بعضی مخازن می‌شود [3,5].

۲- روش تحقیق

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر افزودنیهای سیالات حفاری از کانیهای کوارتز و کلسیت به ترتیب به عنوان نماینده‌ای از مخازن ماسه‌سنگی و کربناتی استفاده شد. در ابتدا نمونه‌هایی از این دو کانی با ابعاد تقریبی $2/5 \times 2/5 \times 0/5$ سانتیمتر تهیه گردید. با توجه به اینکه زبری سطح کانی روی اندازه‌گیری زاویه تماس اثر زیادی می‌گذارد، نمونه‌ها در دو مرحله بوسیله پودرهای ۱۰۰ و ۴۰۰ مش سیلیکون کاربید صیقل داده شدند تا هرگونه ناهمواری سطح نمونه‌ها از بین رود.



شکل ۲- نفوذپذیری نسبی نفت و آب در یک مخزن آب تر [4].

۲-۲- مواد

به منظور بررسی اثر گلهای حفاری پایه آبی بر کانی های کلسیت و کوارتز از مواد متداول و تجاری فهرست شده در جدول ۱ استفاده شد. هدف از استفاده هر کدام از این مواد در ترکیب گلهای در جدول ۱ آورده شده است. سطح بالا و پایین غلظت هر کدام از مواد مصرفی در ترکیب گلهای نیز در این جدول آمده است. در تمامی آزمایشات از آب مقطر به عنوان فاز اصلی گلهای پایه آبی استفاده گردید.



جدول ۱- ماده افزودنی، هدف از استفاده و غلظت استفاده شده آنها در آزمایشات

ماده افزودنی	هدف از استفاده در گل حفاری	سطح بالا و پایین غلظت (g/l)
نمک طعام	کنترل کننده شوری و جلوگیری کننده از تورم رسها	۱۰ - ۸۰
پتاس	کنترل کننده قلیائیت	۱ - ۸
کربنات کلسیم	کنترل کننده تراوایی	۴۰ - ۱۰۰
باریت	کنترل کننده وزن گل	۲۰ - ۵۰
بنتونیت	کنترل کننده گرانروی و تراوایی	۱۱ - ۲۸
گازوئیل	عامل امولسیون شده در گل (فاز روغنی)	۱۰ - ۵۰
بنزیل بنزوات (استر)	عامل امولسیون کننده روغن در آب	۱۰ - ۳۰
CMC	کنترل کننده تراوایی	۴ - ۱۴
Biovis	گرانروکننده بیوپلیمریک	۳/۵ - ۱۴
Pollythin	رقیق کننده پلیمری	۲/۵ - ۶

۲-۳- روش انجام آزمایشات

برای آنالیز اثر افزودنیهای گلپایه آبی از یک طرح ۱۱ فاکتوری (Plackett – Burman Design) PB با دو بار تکرار به صورت تصادفی استفاده شد. برای تهیه گلپایه مختلف از محدوده مجاز استفاده از هر کدام از افزودنیها برای تعیین سطح بالا و پایین غلظت آنها در گل استفاده گردید (جدول ۲ پیوست).

برای اندازه گیری زاویه تماس از "سیستم اندازه گیری زاویه تماس G₂" استفاده گردید. این دستگاه با استفاده از روش تصویربرداری، زاویه تماس یک قطره را با سطح مشخص می کند. پس از تهیه ترکیب هر کدام از گلپایه ذکر شده در جدول ۲، نمونه های کلسیت و کوارتز در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد درون ظرف حاوی گلپایه نکه داشته شدند. پس از ۴۸ ساعت نمونه ها از ظرف خارج گردیده و برای از بین بردن اثر رسوبات سطحی ناشی از اجزاء نامحلول موجود در گل، نمونه ها در آب بدون یون قرار گرفته و شستشو شدند. سپس نمونه ها از ظرف حاوی آب بدون یون خارج گردیده و در روی یک سطح صاف قرار گرفتند تا خشک شوند. سپس زاویه تماس قطره آب شور ۳٪ با سطح سنگ دوباره مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ثبت شد. نهایتاً



مقادیر زاویه تماس ثبت شده در آزمایشات مذکور (جدول ۲) در نرم افزار Minitab وارد گردید تا با استفاده از آنالیزهای آماری این نرم افزار، تحلیل گردد.

۳- ارائه یافته‌ها و بحث

در این مرحله برای آنالیز آزمایشات انجام شده بر روی گلهای حفاری پایه‌آبی از نرم افزار Minitab کمک گرفته شد. به این منظور، نتایج حاصله از آزمایشات روی نمونه‌های کوارتز و کلسیت (جدول ۲ پیوست) در نرم افزار وارد شده و تحلیل گردید. نتایج این تحلیل در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. در این جداول، P رد یا قبول موثر بودن هر فاکتور را نشان می‌دهد، بدین صورت که:

اگر $P < 0.05$	با سطح اعتماد ۹۵٪ فاکتور موثر می‌باشد.
اگر $P > 0.05$	با سطح اعتماد ۹۵٪ فاکتور موثر نمی‌باشد.

منظور از "اثر" میزان تأثیرپذیری زاویه تماس به افزودنی مورد نظر می‌باشد. مقدار مثبت آن نشان می‌دهد که افزودنی مذکور، زاویه تماس را افزایش داده و مقدار منفی آن زاویه تماس را کاهش داده است. همانطور که از جداول ۳ و ۴ و همچنین اشکال ۲ و ۳ برای نمونه‌های کوارتز و کلسیت مشاهده می‌شود، $Polythin$ زاویه تماس را در هر دو نمونه کاهش داده است. همچنین می‌توان دریافت که در سطح بالای غلظت $Polythin$ ، زاویه تماس کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش غلظت $Polythin$ در گلهای، زاویه تماس کاهش یافته و سطح سنگ بیشتر آب‌تر شده است. $Polythin$ یک پلیمر آلی بسیار آنیونی مصنوعی است که روی سطح جذب شده و ترشوندگی سطح را تغییر می‌دهد. در ترکیب این گلهای $Biovis$ نقش زیادی را در افزایش زاویه تماس هر دو نمونه دارد. با افزایش غلظت $Biovis$ زاویه تماس افزایش یافته و ترشوندگی به سوی حالت خنثی نزدیک شده است. $Biovis$ یک پلی‌ساکارید زنجیری است که از تخمیر یک کربوهیدرات بدست می‌آید. علت بالا رفتن زاویه تماس ته‌نشست این ماده آلی با وزن مولکولی بالا بر روی سطح نمونه‌ها است.

CMC اثر کمی را روی زاویه تماس نمونه کلسیت دارد، اما آن را در کوارتز افزایش داده است. با افزایش غلظت CMC زاویه تماس نمونه کوارتز افزایش یافته است. با توجه به اینکه این پلیمر طبیعی، آنیونی است و یک قطب منفی دارد و همچنین سطح سنگ نیز دارای بار منفی است، جذب شیمیایی می‌تواند علت جذب CMC بر روی سطح باشد.



بنزیل بنزوات زاویه تماس را در هر دو نمونه افزایش داده است. با افزایش غلظت این استر، زاویه تماس افزایش یافته و به حالت خنثی نزدیک شده است. ترکیبات قطبی حاوی اکسیژن، نیتروژن و سولفور می‌توانند ترشوندگی سیستم را تغییر دهند. ترکیبات اکسیژن که معمولاً اسیدی هستند، از فنل‌ها و تعداد زیادی از اسیدهای کربوکسیلیک مختلف تشکیل شده‌اند. علت افزایش زاویه تماس می‌تواند جذب سطحی این سورفاکتانت و کمک به جذب گازوئیل باشد. بنابراین غلظتهای بالای این ماده احتمالاً می‌تواند منجر به کاهش نفوذپذیری نفت در مخزن شود.

جدول ۳- تأثیرات تخمین زده شده برای نمونه کوارتز

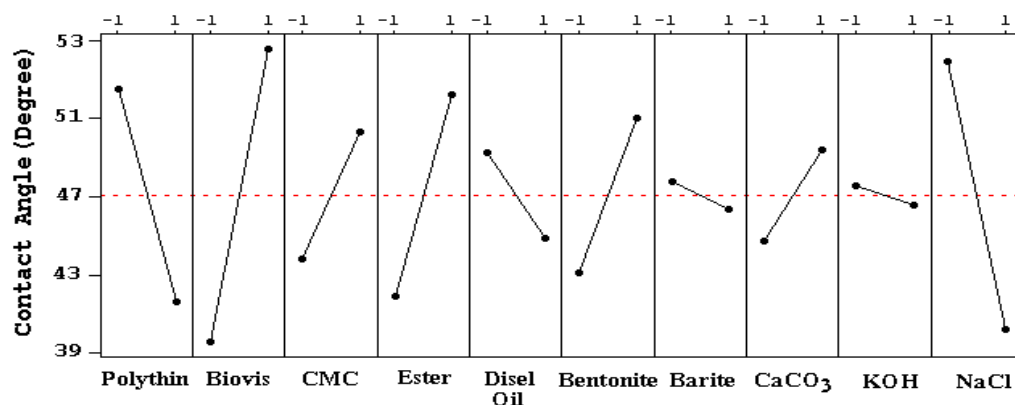
افزودنی	اثر (درجه)	P
Polythin	-۱۰/۹۲	۰/۰۰۰
Biovis	۱۵/۰۹	۰/۰۰۰
CMC	۶/۵۸	۰/۰۰۰
بنزیل بنزوات (استر)	۱۰/۳۷	۰/۰۰۰
گازوئیل	-۴/۴۷	۰/۰۰۴
بنتونیت	۸/۰۰	۰/۰۰۰
باریت	-۱/۴۱	۰/۲۸۲
کربنات کلسیم	۴/۷۳	۰/۰۰۳
پتاس	-۱/۰۳	۰/۴۲۷
نمک طعام	-۱۳/۷۴	۰/۰۰۰



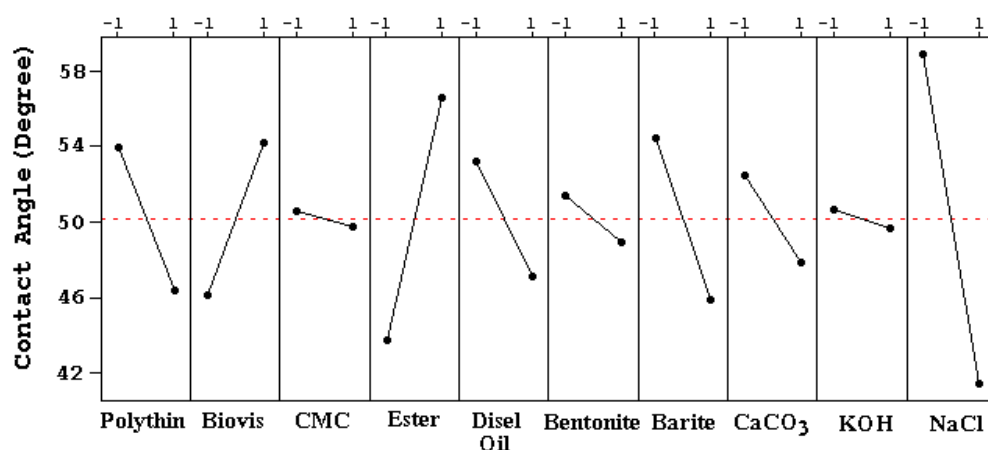
جدول ۴- تأثیرات تخمین زده شده برای نمونه کلسیت

افزودنی	اثر (درجه)	P
Polythin	-۷/۵۳	۰/۰۰۰
Biovis	۸/۰۴	۰/۰۰۰
CMC	-۰/۸۸	۰/۴۷۴
بنزیل بنزوات (استر)	۱۲/۸۲	۰/۰۰۰
گازوئیل	-۶/۱۷	۰/۰۰۰
بتونیت	-۲/۴۱	۰/۰۶۶
باریت	-۸/۶	۰/۰۰۰
کربنات کلسیم	-۴/۶۶	۰/۰۰۲
پتاس	-۰/۹۴	۰/۴۴۳
نمک طعام	-۱۷/۵۶	۰/۰۰۰

از روی ستون P در جداول ۳ و ۴ مشخص است که KOH بر تغییر زاویه تماس نمونه کوارتز و کلسیت تقریباً بی تأثیر است. بنابراین می توان گفت با افزایش غلظت KOH ترشوندگی تغییر چندانی نخواهد کرد. افزایش غلظت NaCl باعث کاهش زاویه تماس در هر دو نمونه شده و سطح کانیها را بیشتر آب تر کرده است. افزایش مقدار گازوئیل و باریت در ترکیب گلهای زاویه تماس را کاهش می دهد، اما تأثیر آنها چندان نمی باشد. کربنات کلسیم (CaCO_3) اثر چندانی روی نمونه کوارتز ندارد، اما آن را در نمونه کلسیت به مقدار زیادی کاهش داده است. علت این کاهش زاویه به علت وجود یون فلزی Ca^{2+} در محلول است. وجود این یون در ترکیب گل باعث می شود که حلالیت سورفاکتانتها کاهش یابد و جذب در سطح کانی ها زیاد شود که منجر به نفت تری بیشتر کانی می شود.



شکل ۵-۱- گراف تأثیرات اصلی برای نمونه کوارتز



شکل ۵-۲- گراف تأثیرات اصلی برای نمونه کلسیت

مسئله مهم در این روش آزمایش، در نهایت ارائه ترکیب گلی است که با مواد استفاده شده کمترین تأثیر را بر ترشوندگی سیستم داشته باشد و ترشوندگی را به حالت نفت تر کمتر نزدیک کند. برای تحقق این مطلوب کافیت با مراجعه به اشکال ۲ و ۳ غلظتی از هر افزودنی برای ترکیب گل مورد نظر انتخاب گردد که آن افزودنی در آن غلظت، حداقل زاویه تماس را داشته باشد. ترکیب گل مورد نظر با مواد فوق برای یک سازند ماسه‌سنگی یا کربناتی که کمترین آسیب شیمیایی را به سازند بزند مطابق با جدول ۴ خواهد بود.



جدول ۴- ترکیب گل ایده‌آل با توجه به کمترین خسارت احتمالی به مخزن
(واحدها بر حسب گرم در یک لیتر آب می‌باشد)

افزودنی	سازندهای ماسه‌سنگی	سازندهای کربناتی
Polythin	۶	۶
Biovis	۳/۵	۳/۵
CMC	۴	۱۴
بنزیل بنزوات (استر)	۱۰	۱۰
گازوئیل	۵۰	۵۰
بنتونیت	۱۱	۲۸
باریت	۵۰	۵۰
کربنات کلسیم	۴۰	۱۰۰
پتاس	۱	۱
نمک طعام	۸۰	۸۰

ترکیب گل ذکر شده در جدول ۴ تنها برای این ترکیبات و شرایط آزمایش ذکر شده می‌باشد. کاربرد مهم این روش، بررسی اثر آسیب مواد گوناگونی است که شرکت‌های حفاری در مناطق مختلف از آنها استفاده می‌کنند. در صورتیکه مواد مصرفی این شرکتها در اختیار باشند، با این روش می‌توان ترکیب ایده‌آلی را برای گل مصرفی آنها طراحی کرد. قابل ذکر است که غلظتی که از این راه برای هر ترکیب بدست می‌آید تنها در بحث آسیب شیمیایی به سازند مخزن جای دارد و ترکیب مذکور می‌بایستی از لحاظ خواص جریانی و تراوایی گل نیز مورد بررسی قرار گیرد.

برای تعیین دقت آزمایشات، پس از انجام آزمایشات مذکور و مشخص شدن ترکیب گل ایده‌آل برای گلهای پایه‌آبی، ترکیب گلهای موجود در جدول ۴ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری زاویه تماس به ترتیب برای نمونه کوارتز و کلسیت، ۳۱/۶۵ و ۳۷/۴۵ بدست آمد. نتایج نشان داد که ترکیب گلهای بدست آمده با این مواد برای حفاری سازندهای ماسه‌سنگی و کربناتی، باعث نفت‌تر شدن سنگ این مخازن نمی‌شود و ترشوندگی سنگ را در حالت آب‌تر نگه می‌دارد. بنابراین تأثیر این ترکیب بر آسیب به سازند نسبت به حالت



اولیه کمتر بوده است. این موضوع دلالت بر این دارد که ترکیب مذکور با مواد فوق از لحاظ آسیب شیمیایی بهینه شده است.

۴- نتیجه گیری

۱. در بحث آسیب به سازند، ترشوندگی یک فاکتور مهم در انتخاب ترکیب گل حفاری می باشد.
۲. تغییر ترشوندگی سنگ مخزن از حالت آب تر به نفت تر، نفوذپذیری نسبی نفت را کاهش می دهد و از تولید نفت در هنگام بهره برداری می کاهد.
۳. با افزایش غلظت Polythin در گلهای زاویه تماس کاهش یافته و سطح سنگ بیشتر آب تر شده است.
۴. با افزایش غلظت Biovis زاویه تماس افزایش یافته و ترشوندگی به سوی حالت خنثی نزدیک شده است.
۵. بنزینزوات زاویه تماس را در هر دو نمونه افزایش داده است. با افزایش غلظت این استر، زاویه تماس افزایش یافته و به حالت خنثی نزدیک شده است.
۶. با افزایش مقدار گازوئیل و باریت در ترکیب این گلهای زاویه تماس کاهش یافته است، اما تأثیر آنها زیاد نمی باشد.
۷. وجود یون فلزی Ca^{2+} در ترکیب گل باعث می شود که حلالیت سورفاکتانتها کاهش یابد و جذب در سطح کانی ها زیاد شود که منجر به نفت تری بیشتر کانی می شود.
۸. پتاس بر تغییر زاویه تماس نمونه کوارتز و کلسیت تقریباً بی تأثیر است. بنابراین می توان گفت با افزایش غلظت پتاس ترشوندگی تغییر چندانی نخواهد کرد.
۹. افزایش غلظت نمک طعام باعث کاهش زاویه تماس در هر دو نمونه شده و سطح کانیها را بیشتر آب تر کرده است.
۱۰. با استفاده از تحلیلهای آماری ساختاری از گل حفاری ارائه گردید که کمترین آسیب شیمیایی را به سنگ مخزن وارد می کند.



۵- مراجع

- [1] England, A.A. and Davis, N., (1988), *"The Characterization of a Drilling Fluid Additives"*, IADC/SPE 17199.
- [2] Bleier, R., (1990), *"Selecting a Drilling Fluid"*, SPE, M-I Drilling fluids Co.
- [3] Gray G.R. and Darley, H.C.H., (1980), *"Composition and Properties of Oil-Well Drilling Fluids"*.
- [4] Tweheyo, M.T., Holt, T. and Torsaeter, O., (1999), *"An Experimental Study of the Relationship between Wettability and Oil production Characteristics"*.
- [5] Anderson, W.G., (1986), "Wettability Literature Survey-Part5: The Effects of Wettability on Relative Permeability", SPE.
- [6] Anderson, W.G., (1986), *"Wettability literature Survey – Part 2: Wettability Measurment"*, SPE.
- [7] Drummond, C., Israelachivili, J., (2002), *"Surface Force and Wettability"*, USA.



۶- پیوست

جدول ۲- طرح آزمایش ۱۲ ترکیب گل پایه آبی مختلف با دو بار تکرار
به صورت تصادفی و نتایج اندازه گیری زاویه تماس پس از انجام آزمایشات

شماره گل	غلظت (گرم در ۱ لیتر آب)										زاویه تماس (درجه)	
	Polythin	Biovis	CMC	استر	گازوئیل	بنتونیت	باریت	کلسیم کربنات	پتاس	نمک طعام	کوارتز	کلسیت
۱	۲/۵	۱۴	۱۴	۱۰	۵۰	۱۱	۲۰	۴۰	۸	۸۰	۴۰/۴۶	۴۵/۲۹
۲	۲/۵	۳/۵	۴	۳۰	۵۰	۲۸	۲۰	۱۰۰	۸	۱۰	۵۱/۱۹	۵۷/۶۰
۳	۲/۵	۱۴	۴	۱۰	۱۰	۲۸	۵۰	۱۰۰	۱	۸۰	۵۲/۷۵	۲۸/۷۲
۴	۲/۵	۳/۵	۱۴	۳۰	۵۰	۱۱	۵۰	۱۰۰	۱	۸۰	۴۲/۵۷	۴۰/۷۳
۵	۶	۳/۵	۱۴	۱۰	۱۰	۱۱	۵۰	۱۰۰	۸	۱۰	۳۳/۷۱	۳۶/۶۲
۶	۶	۳/۵	۱۴	۳۰	۱۰	۲۸	۲۰	۴۰	۱	۸۰	۳۷/۰۲	۴۴/۲۷
۷	۶	۳/۵	۴	۱۰	۵۰	۲۸	۵۰	۴۰	۸	۸۰	۲۱/۸۶	۲۵/۱۸
۸	۲/۵	۳/۵	۱۴	۳۰	۵۰	۱۱	۵۰	۱۰۰	۱	۸۰	۴۸/۹۴	۴۲/۱۸
۹	۲/۵	۳/۵	۴	۳۰	۵۰	۲۸	۲۰	۱۰۰	۸	۱۰	۵۸/۵۴	۶۳/۱۵
۱۰	۶	۱۴	۱۴	۱۰	۵۰	۲۸	۲۰	۱۰۰	۱	۱۰	۶۲/۱۵	۵۰/۰۷
۱۱	۲/۵	۱۴	۴	۱۰	۱۰	۲۸	۵۰	۱۰۰	۱	۸۰	۴۷/۱۱	۳۴/۳۷
۱۲	۶	۱۴	۴	۳۰	۵۰	۱۱	۵۰	۴۰	۱	۱۰	۴۳/۵۶	۵۹/۳۰
۱۳	۶	۳/۵	۱۴	۱۰	۱۰	۱۱	۵۰	۱۰۰	۸	۱۰	۳۶/۶۹	۴۱/۶۳
۱۴	۶	۱۴	۱۴	۱۰	۵۰	۲۸	۲۰	۱۰۰	۱	۱۰	۶۳/۲۹	۵۵/۷۱
۱۵	۲/۵	۱۴	۱۴	۳۰	۱۰	۲۸	۵۰	۴۰	۸	۱۰	۸۱/۹۳	۷۵/۰۰
۱۶	۶	۱۴	۴	۳۰	۱۰	۱۱	۲۰	۱۰۰	۸	۸۰	۴۴/۸۰	۵۲/۹۲
۱۷	۶	۳/۵	۴	۱۰	۵۰	۲۸	۵۰	۴۰	۸	۸۰	۱۸/۳۶	۲۱/۳۷
۱۸	۲/۵	۱۴	۱۴	۳۰	۱۰	۲۸	۵۰	۴۰	۸	۱۰	۸۰/۶۹	۷۴/۰۵
۱۹	۶	۱۴	۴	۳۰	۱۰	۱۱	۲۰	۱۰۰	۸	۸۰	۵۱/۵۸	۶۰/۴۱
۲۰	۲/۵	۳/۵	۴	۱۰	۱۰	۱۱	۲۰	۴۰	۱	۱۰	۴۴/۷۹	۶۷/۲۲
۲۱	۶	۳/۵	۱۴	۳۰	۱۰	۲۸	۲۰	۴۰	۱	۸۰	۳۸/۰۶	۴۸/۰۷
۲۲	۲/۵	۱۴	۱۴	۱۰	۵۰	۱۱	۲۰	۴۰	۸	۸۰	۳۸/۹۱	۴۳/۱۵
۲۳	۶	۱۴	۴	۳۰	۵۰	۱۱	۵۰	۴۰	۱	۱۰	۴۸/۲۶	۶۱/۳۱
۲۴	۲/۵	۳/۵	۴	۱۰	۱۰	۱۱	۲۰	۴۰	۱	۱۰	۴۲/۶۰	۶۵/۸۰