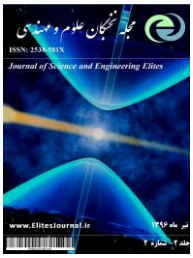
مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

ISSN 2538-581X

جلد ۲- شماره ۲- سال ۱۳۹۶

www.ElitesJournal.ir



طراحی بهینه سیال حفاری پایه آبی در سازندهای شیلی در میدان خانگیران

رضا قمرپور[۱*]، آرش ابراهیم آبادی[۲]، مهدی نظری صارم[۳]

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مهندسی معدن، واحد قایمشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قایمشهر، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*Rezaghamarpoor@yahoo.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۶ پذیرش: تیر ماه ۹۶

چکیده

در این تحقیق با استفاده از نتایج شناسایی انجام شده برروی سازندهای شیلی میادین ایران و بررسی تاریخچه حفاری در این سازندها، یک سیال حفاری پایه آبی و دوستدار محیط زیست برای جایگزینی با سیالات حفاری پایه روغنی طراحی و ساخته شده است. این سیال دارای خواص مطلوبی برای حفاری در این لایه ها می باشد. در ساخت این سیال از افزایه های جدیدی شامل عوامل بازدارنده، نسل جدید پلیمرها وجامدات سایزبندی شده استفاده شده است. از اهم ویژگی های این سیال کنترل نفوذ صاف آب و فشار گل به درون سازند، کاهش فعالیت رس ها از طریق تغییر ماهیت آنها، پایدارسازی کنده های حفاری، کاهش آسیب وارده به سازند، پایداری در مقابل درجه حرارت های بالا و تغییر اسیدیته و توانایی سازگاری با انواع آلاینده هایی که در خلال عملیات حفاری وارد گل می شوند را می توان نام برد. خاصیت روان سازی و بازیافت کنده های شیلی در سیال ساخته شده در مقایسه با سایر سیالات مشابه بهتر می باشد. جایگزینی این سیال با سیالات حفاری پایه روغنی مورد استفاده در صنعت حفاری علاوه بر کاهش هزینه ها، می تواند در حفاظت از محیط زیست و کاهش آسیب های وارده بر افراد در تماس با سیال حفاری مناسب باشد.

کلمات کلیدی: حفاری، شیل، ناپایداری دیواره چاه، سیال حفاری پایه آبی، سیال حفاری پایه روغنی، پلیمر، گلایکول.

۱. مقدمه

سیالات حفاری برای اهداف مختلفی در صنعت نفت به کار می روند و بر اساس نوع سیال پایه به سیالات پایه آبی، پایه روغنی و پایه گازی تقسیم می شوند که با توجه به شرایط چاه، افزودنی های مختلفی به آنها اضافه می شود. این افزودنی ها خواص نهایی گل حفاری را تعیین می کنند. فاکتورهای زیادی بر انتخاب افزودنی مناسب موثر می باشد که عبارتند از پارامترهای عملیاتی، مشخصات سازند، هزینه، ملاحظات زیست محیطی و زمین شناسی. در سال های اخیر خط مشی انتخاب افزودنی های گل حفاری به موازات رعایت مسایل و پارامترهای فنی از جمله زمین شناسی منطقه، طراحی چاه، استحکام سنگ، فشار و دمای چاه و آسیب سازند تغییر کرده است.

۲. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

سابقه استفاده موثر از سیالات در عملیات حفاری به سال ۱۸۶۰ برمی گردد. طبق تعریف به تمامی ترکیباتی که به منظور کمک به عملیات حفاری و خروج کنده ها[۱] از چاه مورد استفاده قرار می گیرد سیال حفاری[۲] اطلاق می شود. گل حفاری[۳] حاوی یک سیال اصلی و ترکیبی از افزودنی های شیمیایی و معدنی برای انجام وظایف گوناگون در طی حفاری هستند. تکنولوژی سیال حفاری در ارتباط تنگاتنگ با علوم زمین شناسی، شیمی و فیزیک بوده و هدف از آن اتمام عملیات حفاری چاه و تکمیل آن با حداقل مخارج و خسارت به چاه است[۹].

از سیالات حفاری برای مقاصد مختلفی استفاده می شود که ممکن است در شرایط مختلف حفاری، بعضی از این وظایف، مد نظر قرار گیرد به عبارتی اهمیت هر کدام از وظایف، با توجه به شرایط چاه و عملیات حفاری، تعیین خواهد شد. از مهمترین وظایف سیالات حفاری حمل کنده های حفاری از چاه و ترخیص آن ها در سطح، کنترل فشار سازند، ایجاد فیلتر کیک (اندود صافی) مناسب جهت جلوگیری از هرزروی، به حداقل رساندن صدمات وارد بر محیط زیست، تسهیل عملیات‌های سیمان کاری و تکمیل چاه، جلوگیری از خوردگی لوله های حفاری، تحمل بخشی از لوله های حفاری و جداری، کاهش صدمات وارد بر سازند، روانکاری و خنک نمودن مته و لوله های حفاری، انتقال نیروی هیدرولیکی به مته و معلق نگه داشتن کنده های حفاری می باشد[۱۰].

ناپایداری چاه در عملیات حفاری می تواند به خاطر شسته شدن سازند، به هم آمدن و یا فرسایش چاه باشد. از میان تمامی سازندهایی که از خود ناپایداری شدید نشان می دهند، شیل ها به عنوان مشکل سازترین آن‌ها شناخته شده‌اند[۷]. به گونه ای که ۹۰ درصد مشکلات ناپایداری چاه ها مربوط به حفاری در لایه های شیلی است[۱۵]. استفاده از سیال حفاری پایه آبی در کاهش آلودگی نقش موثری دارد بنابراین بسیاری از دانشمندان در تلاش برای توسعه حفاری کارآمد مبتنی به آب در سازندهای شیلی هستند. با این حال سازندهای شیلی قوی ناهمسانگرد و حساس به آب مشکلات جدی و روند بی ثباتی را در حین حفاری بوجود می آورد[۱۷].

در نهایت با توجه به اهمیت و ضرورت انتخاب صحیح و کاربردی سیال حفاری پایه آبی و تاثیر مستقیم آن بر هزینه و زمان عملیات حفاری و تاثیر مستقیم آن بر محیط زیست همچنین با بررسی و تجزیه و تحلیل روش های مختلف و شرایط موجود، مناسب ترین سیال (سیال حفاری پایه آبی) را برای سازندهای شیلی انتخاب کرده که نسبت به سیالات دیگر بازده و راندمان عملیات حفاری را افزایش می دهد.

۳. اهداف تحقیق

در این تحقیق با بررسی پارامترهای تاثیر گذار در انتخاب سیال مناسب برای سازندهای شیلی حساس به آب و مقایسه آن با روش های قبل، روشی برای طراحی بهینه سیال حفاری پایه آبی در سازندهای شیلی پیشنهاد خواهد شد. گروه های مختلفی از افزودنی ها برای انواع گل ها طراحی شده اند. در نتیجه فاکتورهای زیادی می توانند بر انتخاب افزودنی مناسب برای سازندهای شیلی موثر باشد که عبارتند از: پارامترهای عملیاتی، مشخصات سازند، هزینه، ملاحظات زیست محیطی و زمین شناسی. نوع و مقدار افزودنی های شیمیایی موجود در این فرمولاسیون سیال پایه آبی مطابق با خصوصیات مورد نیاز آن سازند شیلی طراحی و تاثیر سیال حفاری پایه آبی نسبت به سیال پایه روغنی بر سازندهای شیلی بررسی خواهد شد. بنابراین داشتن اطلاعات فنی و

---

[۱] Cuttings

[۲] Drilling Fluid

[۳] Drilling Mud

تعیین محدوده کاربرد مناسب افزودنی های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. در صورت عدم کنترل مناسب خواص آن ها، عملیات حفاری با مشکلات زیادی روبرو خواهد شد. در این تحقیق، در انتخاب افزودنی ها به مسایل زیست محیطی، کاهش آلودگی، هزینه ها و مسایل اقتصادی مربوطه توجه ویژه ای خواهد شد.

۴. تئوری

۱.۴. معرفی گل

گل حفاری، یکی از مهمترین ارکان عملیات حفاری است. هر مشکلی که در حین عملیات حفاری بوجود می آید، به طور مستقیم یا غیر مستقیم با گل حفاری ارتباط دارد. این بدین معنا نیست که گل حفاری بوجود آورنده یا رفع کننده همه مشکلات حفاری است، اما گل حفاری یک ابزار است که اغلب موارد از آن برای کم کردن مشکلات حفاری استفاده می شود.[۲]

در گردش گل در سیستم چرخشی آن، کنترل نوع و مقدار ذرات جامد موجود در گل و محیط شیمیایی آن ها از اهمیت خاصی برخوردار است. همه خواص گل حفاری، بوسیله تنظیم ترکیب گل، منترل می شود. در نتیجه، برنامه کنترل مناسب ذرات موجود گل در همه برنامه های گل حفاری گنجانده می شود. خواصی از گل که مشخصات جریانی یک گل را تحت شرایط متفاوت جریانی وصف می کند رئولوژی گل گفته می شود. در یک سیستم گردش گل حفاری، گل با سرعت های متغیر در کانال هایی با اندازه و شکل های متفاوت در جریان است. به منظور شناخت و پیش بینی این جریان، به شناخت رفتار جریان گل در نقطه های مختلف جریان نیاز است. برای آسان کردن روش اندازه گیری خواص جریان و رئولوژی گل فقط یک سری تست های محدود استفاده می شود.[۱۶]

۵. مشکلات گل حفاری

آلودگی ها[۱]: اکثر مشکلات که برای گل حفاری بوجود می آید ناشی از آلوده شدن گل حفاری است. آلودگی گل حفاری شامل: آلودگی کلسیم و منیزیم، آلودگی سیمان و آهک، آلودگی کلرید سدیم یا نمک، آلودگی هیدروژن سولفید است.

جریان آب[۲]: جریان آب و از دست رفتن آب ممکن است ناشی از آب دوست بودن ذرات جامد موجود در گل یا آب دوست بودن سازند تحت حفاری باشد، و باعث کاهش میزان آب گل و در نتیجه افزایش ویسکوزیته قیفی گل و ویسکوزیته پلاستیک گل و نقطه تسلیم شود [۱۶]. در سال ۲۰۱۰ در یکی از میادین الجزایر از گل پایه آبی مبتنی بر پلیمرهای PAC و زانتان و پلیمر اکریل آمید[۳] به عنوان مهارکننده سطح شیل برای سازند شیلی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴].

هانی زونگ[۴] و همکارانش طی مقاله ای که در سال ۲۰۱۱ برای تورم شیل در تماس با آب ارائه دادند از پلی اتر دی آمین[۵] برای ساخت سیال پایه آبی استفاده کردند و نشان دادند که خاصیت مهار PEDA بیشتر از پتاسیم کلرید است. همچنین پیوند هیدروژنی PEDA و سیلیکا روی سطح خاک رس باعث تعامل الکترواستاتیک و اتصال صفحات می شود که باعث از دست دادن آب، در نتیجه آبدوستی آن می شود [۱۲].

در سال ۲۰۱۶ آقایان مسلم زاده و شادی زاده از پودر حنا در سیال حفاری پایه آبی برای استفاده در سازندهای شیلی حساس به آب استفاده کردند و پودر حنا به صورت قابل توجهی توانست از تورم شیل کاهش داده و ضد خوردگی و سازگار با محیط زیست نیز باشد [۱۳].

---

[۱] Contaminations

[۲] Water Flow

[۳] PHPA

[۴] Hanyi Zhong

[۵] Polyether diamine[PEDA]

در سال ۲۰۱۶ طی تحقیقی که برای بهبود خواص رئولوژیکی و مهار شیل با استفاده از سیال پایه آبی ساخته شده از نانوسیلیکا[۱]، نانولوله های کربنی چند دیواره و گرافن نانو پلاکت انجام گرفت از پنج سیستم مختلف گل حفاری استفاده شد، که توانست در مهار شیل و خواص رئولوژی موثر باشد اما باید در مورد نانو در غلظت های بالاتر و تورم بیشتر شیل مطالعه بیشتری انجام شود [۶].

شرکت هالیبرتون[۲] نیز در سال های اخیر برای سازندهای شیلی دستگاهی تولید کرده است که این دستگاه پایه ریزی آن بر اساس گل پایه آبی می باشد که به شیل دریل[۳] شهرت دارد که بیشتر هدف از ساخت این سیستم کاهش هزینه های جانبی اپراتور می باشد[۱۸].

همان طور که در کارهای انجام گرفته توسط افراد دیگر مشاهده می شود، اکثر افزودنی های که در گل حفاری مورد استفاده قرار گرفته شیمیایی بوده و آلودگی زیست محیطی به همراه دارند و همچنین دارای هزینه های زیادی می باشند. به همین دلیل استفاده از افزاینده هایی سازگار با محیط زیست همچنین دارای هزینه های کمتر مورد نیاز است.

۶. ویژگی های گل طراحی شده

پس از تحلیل اطلاعات چاه ها، شامل اطلاعات زمین شناسی، حفاری و پتروفیزیک مناطق مختلف، وجود هر دو نوع شیل ریزشی و آماسی در سازندهای مورد حفاری ایران قطعی به نظر می رسد[۳ و۴] گل طراحی شده با در نظر گرفتن همه احتمالات تأثیرگذار، می تواند ویژگی های زیر را داشته باشد[۸] و به عنوان یک سیال حفاری جدید موردا ستفاده قرار گیرد:

۱- دارای کمترین احتمال واکنش با شیل آبگیری و آماس می باشد.
۲- دارای قابلیت استحکام بخشی به وسیله تبادل یونی می باشد.
۳- دارای خواص رئولوژیکی کنترل شده برای کاهش مشکل ناپایداری شیل هاست.
۴- دارای افت صاف آب کمینه می باشد.
۵- در مقابل دما و آلاینده ها پایدار می باشد.
۶- کمترین آسیب را به سازندهای بهره ده وارد می کند.

۷. طراحی و ساخت سیال حفاری

یک برنامه قدم به قدم طراحی سیال حفاری مناسب در حفاری یک سازند شیلی پس از شناسایی کامل سازند شیلی و شرایط محیطی حاکم، معمولا شامل مراحل زیر است[۸]:

۱- تعیین وزن و رئولوژی سیال حفاری.
۲- چگونگی جلوگیری از نفوذ صاف آب و فشار گل به درون سازند.
۳- تبدیل رس ها به کانی هایی با فعالیت کمتر.
۴- کنترل pH گل
۵- بررسی تاثیر آلاینده های الکترولیتی بر سیال حفاری.
۶- بررسی پایداری در برابر دمای زیاد و زمان.

---

[۱] Nanosilica
[۲] Halliburton
[۳] SHALEDRIL

۷- بررسی میزان صدمه رسانی به لایه های بهره ده.

۸- بررسی خاصیت روان کاری گل.

۸. روش انجام آزمایشات

با توجه به خواص مورد نیاز برای این سیال و شرایط کاربردی آن در مناطق عملیاتی مشکل دار با انجام آزمایش های متعدد ساخت نمونه، مطلوب ترین افزایه ها انتخاب شدند و در مقادیر مختلف به منظور رسیدن به اهداف فنی مورد نظر در آزمایش های ساخت گل در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آن بهترین فرمولاسیون برای سیال حفاری پیشنهادی با وزن مخصوص g/cm^3 ۱/۲ به شرح ذیل به دست آمد. لازم به ذکر است که طراحی این سیال به گونه ایست که با تغییرات جزئی می توان سیالات حفاری با وزن های مختلف را نیز فرموله کرد.

۹. ساخت یک بشکه آزمایشگاهی این گل شامل مراحل زیر است:

۱- ۳۵۰ سی سی از یک نوع آب منطقه (حاوی ۳۰۷۲ ppm Ca^{2+}، ۳۹۷۸۳ ppm NaCl و ۲۴۱۴۰ ppm Cl^-) تهیه می شود.

۲- بی کربنات سدیم به آب اضافه شده و ۱ دقیقه مخلوط می شود.

۳- پلیمرهای کنترل کننده افت صاف آب اضافه می شوند و ۲۰ دقیقه در دور بالا مخلوط می شوند.

۴- پلیمر PHPA اضافه و ۲۰ دقیقه در دور بالا مخلوط می شود.

۵- پلیمر ایجاد گرانروی اضافه شده و ۲۰ دقیقه در دور بالا مخلوط می شود.

۶- نمک ها اضافه و ۱۰ دقیقه مخلوط می شوند.

۷- گلیکول اضافه و ۱۰ دقیقه مخلوط می شود.

۸- کربنات کلسیم سایزبندی شده اضافه و ۵ دقیقه مخلوط می شود.

۹- پتاس اضافه و ۵ دقیقه مخلوط می شود.

جدول۱- فرمولاسیون گل پیشنهادی

ترکیب افزودن	نوع ماده	مقدار	زمان اختلاط	کارکرد در سیال
۱	آب منطقه	۳۵۰سی سی	-	-
۲	بی کربنات سدیم	۱گرم	۱دقیقه	حذف یون های دو ظرفیتی
۳	پلیمر سنتزی کنترل افت صاف آب[۱]	۶+۱ گرم	۲۰دقیقه	کنترل افت صاف آب
۴	پلیمرPHPA	۱گرم	۲۰دقیقه	کپسول کننده سطح شیل
۵	بیوپلیمرXC	۱/۵گرم	۲۰دقیقه	ایجاد گرانروی
۶	کلرید پتاسیم	۲۱گرم	۱۰دقیقه	پایدارسازی شیل
۷	کلرید سدیم	۹۱گرم	۱۰دقیقه	ایجاد وزن
۸	گلیکول	۱۷/۵سی سی	۱۰دقیقه	پایدار سازی
۹	کربنات کلسیم دانه بندی شده	۵گرم	۵دقیقه	ایجاد کیک و تنظیم وزن
۱۰	پتاس	۰/۲گرم	۵دقیقه	تنظیمPH

[۱] دو نوع پلیمر که یکی کنترل کننده صاف آب بوده و دیگری تینر می باشد

قابل ذکر است که مقدار موادی که در جدول نوشته شده است مقدار نهایی است که در نتیجه ۴۰ آزمایش به دست آمده است که ما به ۳ نمونه از آزمایش ها اشاره خواهیم کرد.

بعد از اینکه گل مورد نظر آماده شد، خواص آن اندازه گیری می شود. روش اندازه گیری خواص شامل این موارد می باشد: ۱) با استفاده از دستگاه گرانروی سنج دوار مقدار انحراف عقربه دستگاه را در سرعت های متفاوت اندازه گیری کرده و داده های بدست آمده ثبت می شود. ۲) بوسیله دستگاه PH متر خواص قلیایی آن مطالعه می شود. ۳) با استفاده از ترازوی گل، وزن آن اندازه گیری می شود. ۴) بوسیله دستگاه صافی فشار، مقدار صافی عبوری (FL) آن اندازه گیری می شود.

در بعضی ازآزمایشات که نیاز به بررسی تاثیر زمان است، طبق روش معمول آزمایشگاه، نمونه مورد نظر را بصورت ۲۴ ساعت گذاشته و روز بعد دوباره خواص آن اندازه گیری و نتایج یادداشت می شود.

۱۰. شناسایی شیل ها و بررسی تاریخچه حفاری در مناطق مختلف ایران

گام اول در طراحی سیالات بازدارنده، شناسایی کامل سازندهای شیلی است. هدف از شناسایی شیل ها، تعیین نوع کانی های رسی موجود در نمونه شیل، خصوصیات سیال موجود در حفره شیل، مقدار فعالیت شیل و تعیین ویژگی های مشکل ساز شیل ها مثل آماس و پراکندگی و غیره می باشد[۱]. برای دستیابی به نتایج دقیق در آزمایش های شناسایی شیل ها، نمونه ها باید شرایط اولیه خود را حفظ کرده باشند. تغییر سریع ماهیت کنده ها و مغزه های شیلی در اثر تغییر شرایط تنش و فشار و از دست دادن سیالات محتوی شیل، دقت اطلاعات به دست آمده در مورد شیل ها را محدود می کند[۱۱]. اطلاعات کلی مثل موقعیت میدان، زمین شناسی عمومی ناحیه، عمق، فشار، دما، اطلاعات تکتونیکی، زمین شناسی ساختمانی و غیره تا حد ممکن از منابع مختلف قابل استحصال می باشند.

مطالعه تاریخچه حفاری چاه های حفر شده در این نواحی نیز یکی دیگر از مراحل شناسایی است. مشخصات سازند، نوع مشکل، نوع و خصوصیات سیال حفاری، مدت زمان تماس سازند با سیال حفاری، راه کارهای استفاده شده در حل مشکل و نتایج به دست آمده از جمله اطلاعاتی هستند که از مدارک، قابل دستیابی هستند. در مرحله شناسایی مستقیم، ترکیب کانی شناسی نمونه های شیل دریافتی از نظر کمی و کیفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برروی نمونه های بالک، آزمایش XRD[۱] انجام شد و با مشاهده نشانه هایی از کانی های رسی در نمونه، آزمایش استخراج کانی های رسی از نمونه ها انجام گرفت و نمونه ها به روش های نرمال، حرارتی و اشباع اتیلنی آماده سازی شدند. تهیه تصویرهای SEM[۲]، طیف سنجی پرتوهای گامای نمونه و اندازه گیری ظرفیت تبادل یونی نمونه های مغزه از دیگر آزمایش های شناسایی بودند. نمودارهای پتروفیزیکی برای شناسایی محل، نوع و مقدار سازندهای شیلی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین محل های ناپایداری دیواره چاه شامل تنگ شدگی و گشادشدگی و پیش بینی فشار سیال سازند از طریق این نمودارها تعیین شدند. با توجه به شناسایی ها و مطالعات انجام شده بر روی سازندهای شیلی ایران، به طور کلی ویژگی های این سازندها را می توان به شرح زیر بیان کرد[۳و۴]:

۱- بر اساس اطلاعات موجود مهمترین انواع ناپایداری های موجود در سازندهای شیلی ریزش و تنگی دیواره چاه می باشد.

۲- ناپایداری مکانیکی به واسطه تنش های تکتونیکی در سازندهای شکننده، نفوذ سیال حفاری بین شکاف های موجود در شیل ها و یا آبگیری کانی های رسی و متلاشی شدن ساختار شیل می تواند علت ریزش ها باشد. علت تنگی چاه نیز می تواند تغییر شکل پلاستیکی و یا تأثیر هیدراسیون گل و واکنش سنگ و سیال باشد.

---

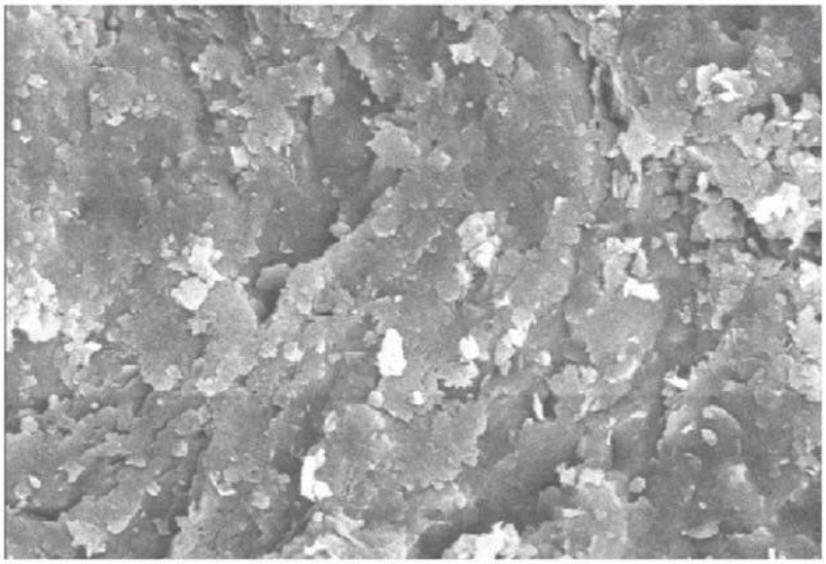
[۱] X-Ray Diffraction

[۲] Scanning Electron Microscope

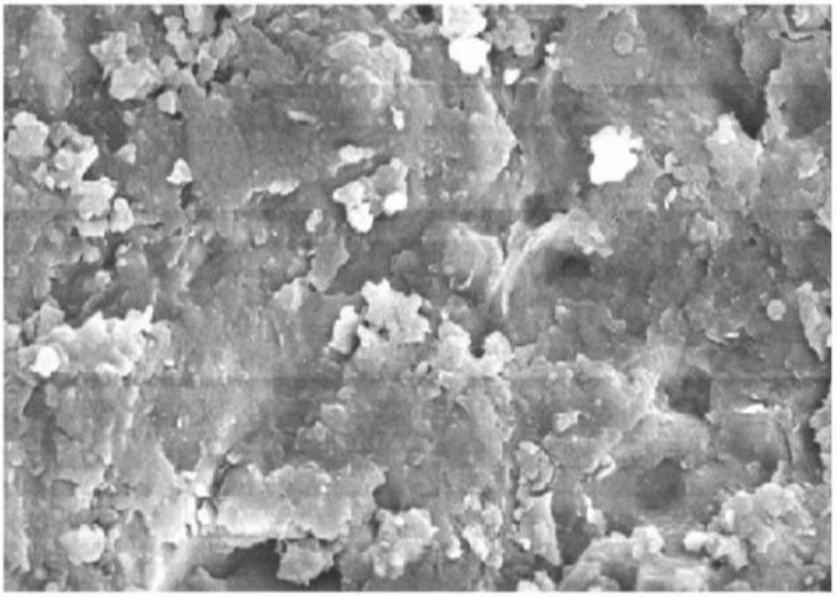
۳- به علت وجود پایداری نسبی در حفاری با سیالات پایه روغنی، دلیل عمده ناپایداری شیل، واکنش شیل ها با گل های پایه آبی است.

۴- این سازندها دارای فشار نرمال می باشند، لذا احتمال ناپایداری به واسطه فشار بالای حفره منتفی است.

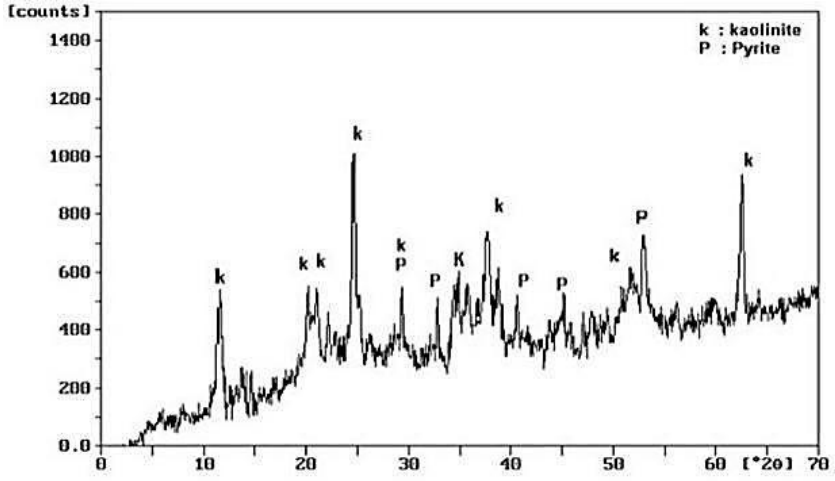
۵- در این میادین استفاده از گل پایه روغنی، همیشه پایداری چاه را به همراه ندارد، یعنی ناپایداری ها می توانند منشأ مکانیکی نیز داشته باشند.



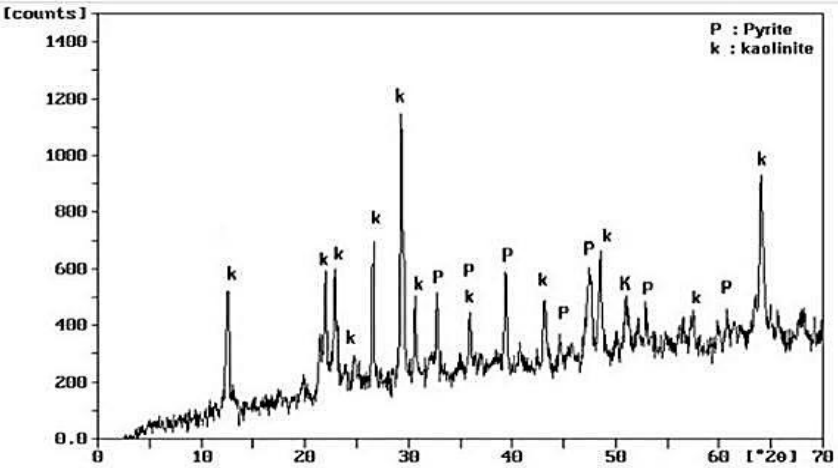
شکل ۱- تصویر SEM نمونه شیل ۱: بلورهای شش ضلعی کائولینیت محکم در یک ماتریس بدون منفذ از کلسیت و کوارتز



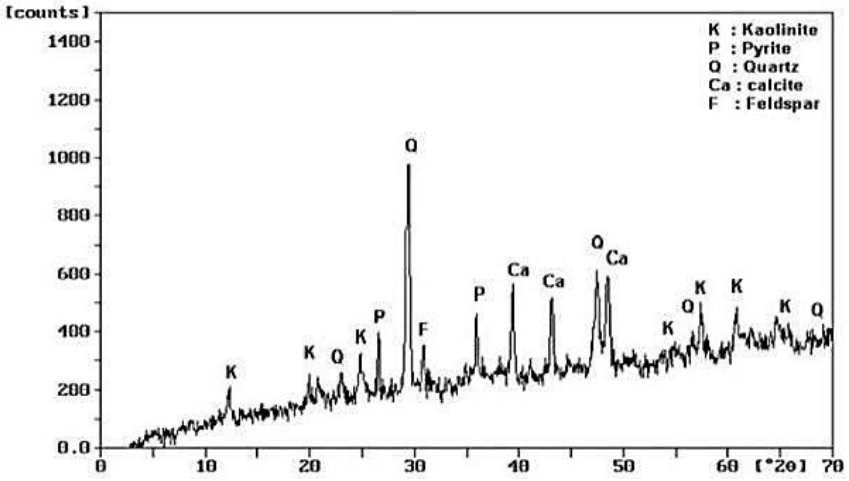
شکل ۲- تصویر SEM شیل نمونه ۲: کریستال کائولینیت در یک ماتریس از کلسیت و کوارتز



شکل ۳- الگوی XRD نمونه ۱



شکل ۴- الگوی XRD نمونه ۲



شکل ۵- الگوی XRD نمونه ۳

۱۱. موقعیت میدان مورد مطالعه

میدان گازی خانگیران[۱]، از میدان‌های گازی ایران است، که در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال‌غربی سرخس و ۱۸۰ کیلومتری شمال‌شرقی مشهد، در منطقه خانگیران، در استان خراسان رضوی قرار دارد. شرکت نفت و گاز شرق، که از زیرمجموعه‌های

[۱] Khangiran

شرکت نفت مناطق مرکزی ایران است، مسئولیت توسعه و بهره‌برداری از میدان‌های هیدروکربوری این منطقه را بر عهده دارد. هم اکنون تولید گاز از سه مخزن مزدوران، شوریجه، به حدود ۶۰ میلیون متر مکعب در روز رسیده‌است. خانگیران یکی از وسیع ترین مناطق عملیاتی صنعت نفت ایران است به طوری که فاصله دو چاه در این منطقه به حدود ۶۰ کیلومتر می‌رسد.

۱۲. مخزن مزدوران[۱]

این مخزن، در سال ۱۳۴۷ کشف گردید. پس از حفر چاه‌های بیشتر، و طراحی و ساخت تأسیسات تولید و پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد، بهره‌برداری از آن، از زمستان ۱۳۶۲ آغاز گردید. در حال حاضر، ۳۲ چاه به سیستم بهره‌برداری از مخزن مزدوران متصل می‌باشند، که ۲ حلقه از آن‌ها، بعلت تولید آب سازند بالا تا رفع احتمالی اشکال، با تعمیر توسط دکل حفاری، از مدار تولید خارج شده‌اند. در زمستان سال ۱۳۸۹ از ۳۰ چاه تولیدی مخزن مزدوران، در مواقع نیاز شرکت ملی گاز ایران، تا ۴۸/۵ میلیون مترمکعب در روز، بهره‌برداری بعمل آمده‌است.

گاز تولیدی منطقه خانگیران، پشتوانه اصلی تولید و تأمین گاز مصرفی در شرق ایران می‌باشد. گاز پرفشار مخزن مزدوران، گاز ترش می‌باشد، که با دارا بودن ۳/۵٪ درصد سولفور و ۶/۵٪ درصد گاز کربنیک، گازی بسیار خورنده، برای چاه‌ها و تأسیسات و خطوط لوله بوده و با توجه به سمی بودن بالای گاز سولفید هیدروژن، آزادشدن آن در محیط نیز، بسیار خطرناک است.

چاه مورد مطالعه ۳۵۵۵متر حفاری شده، با هدف تولید گاز از مخزن مزدوران، که عمق نهایی چاه ۴۷۷ متر درون سازند مزدوران می باشد.

شکل۶- موقعیت میدان خانگیران روی نقشه

در این پژوهش با مطالعه چاه شماره ۷۴ میدان خانگیران و برخورد به لایه شیلی در سکشن ۱/۴-۱۲، یک سیال حفاری پایه آبی و دوستدار محیط زیست برای جایگزینی با سیالات حفاری پایه روغنی برای این سکشن طراحی و ساخته خواهد شد. این سیال دارای خواص مطلوبی برای حفاری در این لایه ها می باشد. در ساخت این سیال از افزایه های جدیدی شامل عوامل بازدارنده، نسل جدید پلیمرها وجامدات سایزبندی شده استفاده شده است. خاصیت روان سازی و بازیافت کنده های شیلی در سیال ساخته شده در مقایسه با سایر سیالات مشابه بهتر می باشد. جایگزینی این سیال با سیالات حفاری پایه روغنی مورد استفاده در

۲ Mozduran

صنعت حفاری علاوه بر کاهش هزینه ها، می تواند در حفاظت از محیط زیست و کاهش آسیب های وارده بر افراد در تماس با سیال حفاری مناسب باشد.

۱۳. بحث

θ میزان انحراف عقربه دستگاه گرانروی سنج را در سرعت های ۶۰۰، ۳۰۰ rpm (Revelation Per Minute) (دور در دقیقه)، pH میزان خاصیت قلیایی، FL صافی عبوری و AV، PV، YP به ترتیب میزان ویسکوزیته ظاهری[۱]، ویسکوزیته پلاستیک[۲] و نقطه تسلیم[۳] گل را نشان می دهد. به ۳ نمونه از آزمایش ها که اشاره می شود.

جدول۲- نتایج ۳ آزمایش به صورت تصادفی

شماره ردیف	$\theta_{۶۰۰}$	$\theta_{۳۰۰}$	pH	FL(CC/30min)	AV(CP)	PV(CP)	YP(llb/100ft^2)
۱	۲۷	۲۲	۸/۶	۲۰	۱۳/۵	۵	۱۷
۲	۱۵	۹	۵/۳	۱۴	۷/۵	۶	۳
۳	۱۸	۱۱	۵/۱	۱۳/۴	۹	۷	۴

برای مشاهده تاثیر گذشت زمان بر خواص و رفتار گل، دو نمونه گل را بعد از گذشت ۲۴ ساعت دوباره تست و خواص آن ها اندازه گیری و در جدول۳ ارائه شده است.

جدول۳- تاثیر گذشت زمان بر خواص و رفتار گل بعد از گذشت ۲۴ ساعت

شماره ردیف	$\theta_{۶۰۰}$	$\theta_{۳۰۰}$	pH	FL(CC/30min)	AV(CP)	PV(CP)	YP(llb/100ft^2)
۲	۱۶	۱۰	۵/۲	۱۴	۸	۶	۴
۳	۲۰	۱۲	۵/۱	۱۳/۷	۱۰	۸	۴

مراحل ۱ تا ۹ گل نهایی ما همراه با کارکرد و مقادیر مواد در جدول ۱ آورده شده اند. خواص به دست آمده از این گل در دو مرحله بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در مرحله اول و ۱۶ ساعت هات رول در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت در مرحله دوم در دمای ۱۴۰ درجه فارنهایت اندازه گیری شد (جدول۴). همان گونه که از نتایج جدول فصل (۴) و نمودار(۱) مشخص است رئولوژی سیال پیشنهادی قبل و بعد از چرخش، بسیار مطلوب بوده و به دلیل وجود پلیمرهای ویژه، حتی بعد از حرارت افت صاف آب سیال پیشنهادی کاهش داشته است. اندود صافی ایجاد شده دارای پیوستگی و ضخامت بسیار مناسب بوده (شکل ۷) که این امر سبب می شود سیال پیشنهادی بتواند دیواره سازی مناسبی را در اطراف چاه ایجاد کرده و از کاهش قطر چاه و خطر گیر لوله ها ممانعت کند. علاوه بر موارد مذکور، سیال پیشنهادی به مدت ۴۸ ساعت در یک استوانه مدرج به صورت استاتیک نگهداری شد که پایداری آن با زمان بسیار مناسب بوده و هیچ گونه به هم خوردن همگنی سیال (دوفازی) مشاهده نشد(شکل ۸).

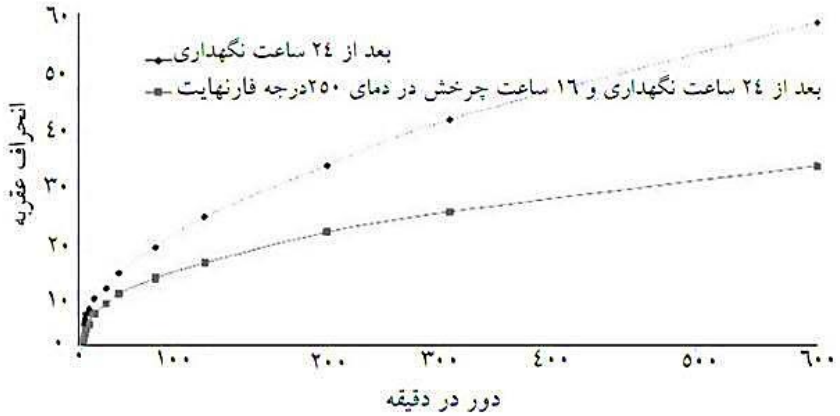
[۱] Apparent Viscosity

[۲] Plastic Viscosity

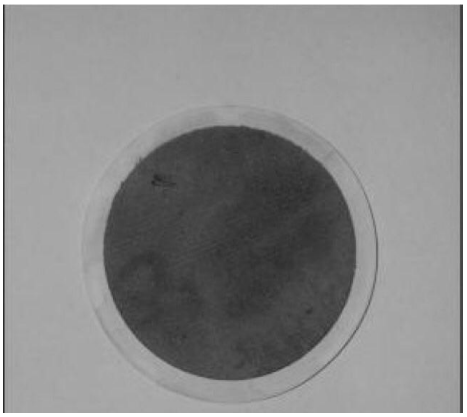
[۳] Yield Point

جدول۴- خواص گل پیشنهادی هدف

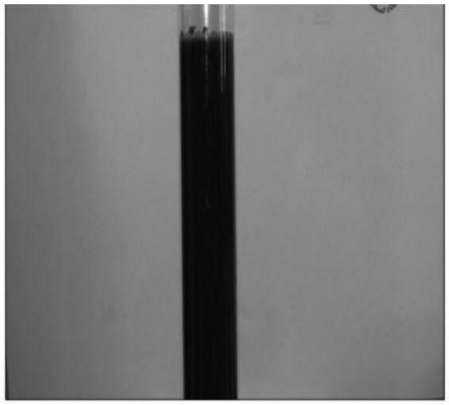
	بعد از چرخش در حرارت	قبل از چرخش در حرارت
گرانروی ظاهری (cp)	۱۷/۵	۳۱/۵
گرانروی پلاستیک (cp)	۹	۱۹
نقطه واروی ($lbf/100ft^2$)	۱۷	۲۵
مقاومت ژله ای ۱۰ ثانیه($lbf/100ft^2$)	۳	۶
مقاومت ژله ای ۱۰ دقیقه($lbf/100ft^2$)	۴	۷
افت صاف آب (cm^3)	۲/۶	--
pH	۸	۹
وزن مخصوص گل(gr/cm^3)	۱/۲	۱/۲



نمودار۱- رئولوژی گل



شکل۷- کیفیت کیک گل

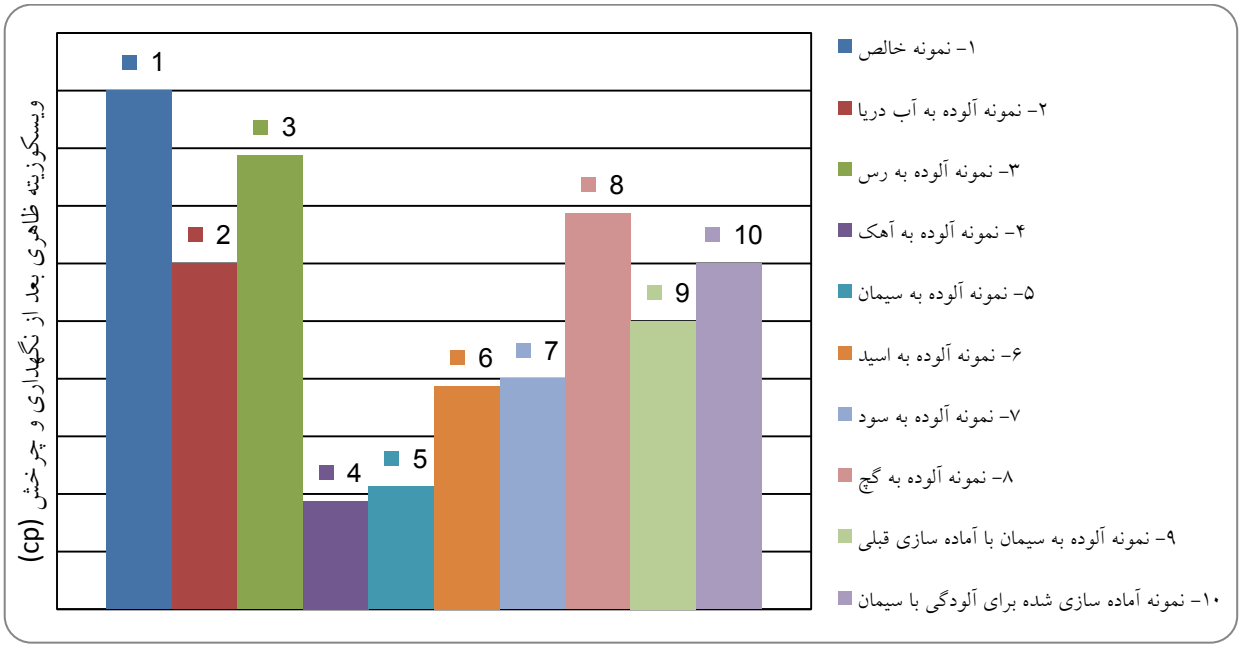


شکل۸- پایداری گل با زمان

۱۴. بررسی تأثیر آلاینده ها بر سیال حفاری پیشنهادی

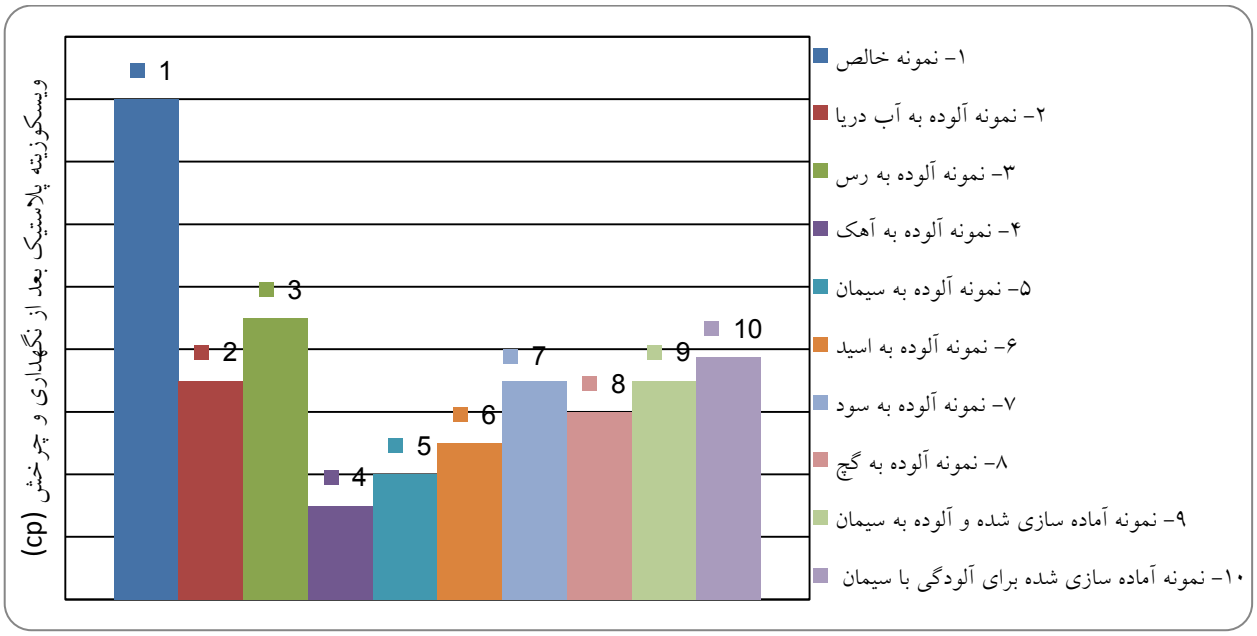
سیال حفاری در حین عملیات، همواره در معرض آلودگی با آلاینده های مختلف می باشد که خواص فیزیکی و شیمیایی سیال را تحت تاثیر قرارمی دهند. متداول ترین آلاینده ها در صنعت حفاری شامل آب دریا، جامدات فعال (رس)، آهک، گازهای اسیدی، سیمان و ژیپس هستند که در حین عملیات حفاری در اثر حفر سازندهای مختلف به صورت مایع و جامد و گاز به

سیستم سیال حفاری وارد می شوند. از این رو سیال مناسب باید طوری طراحی شود که در مقابله با این آلاینده ها کمترین تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی را داشته باشد و در صورت لزوم امکان اصلاح آن با روش های فیزیکی و شیمیایی وجود داشته باشد. لذا در ادامه آزمایش های طراحی سیال حفاری پیشنهادی، این سیال در معرض آلاینده های فوق قرار گرفت تا ضمن بررسی اثر آنها، راه های مقابله با آنها و امکان استفاده مجدد در عملیات حفاری مورد مطالعه قرار گیرد. بدین منظور نمونه سیال حفاری به ترتیب با ۱۰ درصد حجمی آب دریا، ۲۵ گرم بنتونیت حفاری، ۱۰/۵ گرم سیمان، ۱۰/۵ گرم آهک، ۱۰/۵ گرم گچ، ۳ سی سی اسید سولفوریک خالص آلوده شد و بعد از ۲۴ ساعت نگهداری و ۱۶ ساعت چرخش در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت، خواص آن در دمای ۱۴۰ درجه فارنهایت اندازه گیری شد که نتایج آن به صورت نمودارهای میله ای ۲ تا ۸ آمده است. در این نمودارها خواص سیال پیشنهادی قبل و بعد از آلودگی مقایسه شده است. نمودارهای ۲ تا ۸ به ترتیب ویسکوزیته ظاهری، ویسکوزیته پلاستیک، نقطه واروی، افت صاف آب، استحکام سیال پایه (آب دریای مورد استفاده برای pH ژله ای ساخت این نمونه با نمونه ارائه شده در جدول (۴) متفاوت است و منجر به اختلاف جزئی در خواص سیال حفاری شده است) و نمونه های آلوده شده را با هم مقایسه می کند. نتایج به دست آمده حاکی از این است که سیال حفاری پیشنهادی در مقابل آلودگی آب دریا، جامدات فعال (رس)، گازهای اسیدی و ژیپس دارای پایداری قابل قبولی است و تغییرات جزئی به وجود آمده در خواص سیال با بهسازی های معمول مثل استفاده از تینرها و یا رقیق کردن سیال حفاری قابل دفع است، اما سیمان و آهک اثرات تخریبی شدیدی بر خواص سیال حفاری داشته و عملاً سیال حفاری غیر قابل استفاده می شود. توجیه این اتفاق می تواند اینگونه باشد که سیمان و آهک هنگام انحلال در بالا باعث می شود pH را تا حدود ۱۲ بالا می برند و pH، آب که پلیمرهای موجود در گل هیدرولیز شده و توسط کلسیم رسوب داده شده وکارکرد خود را از دست بدهند.



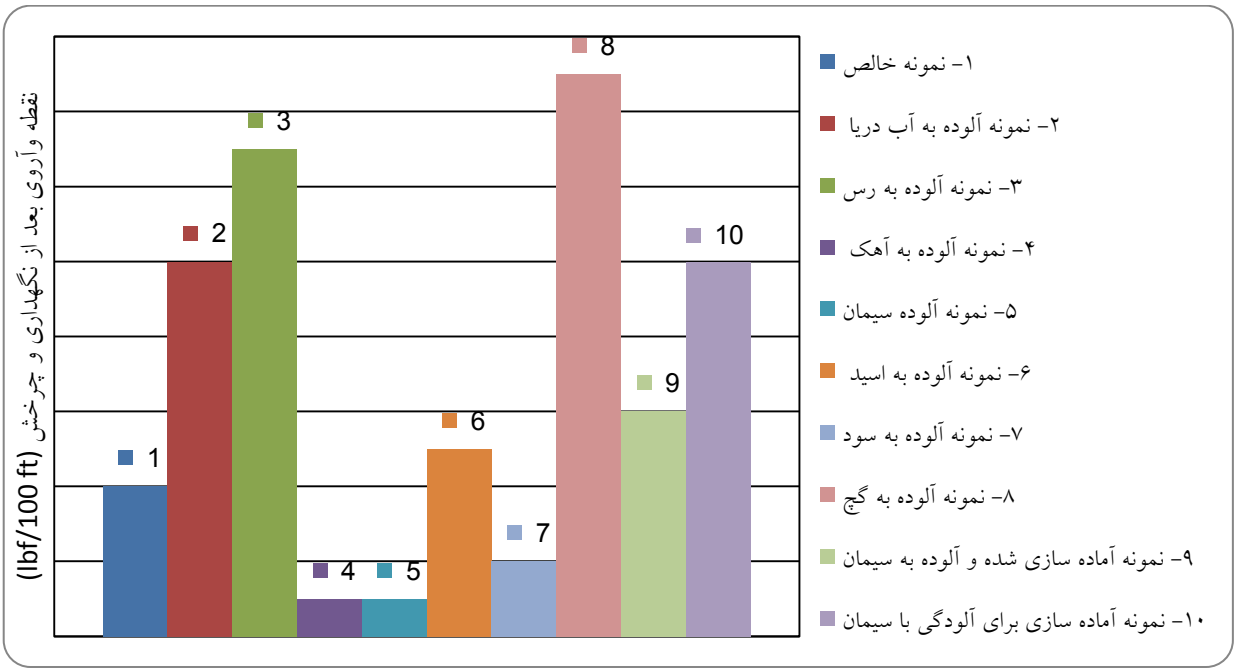
نمودار۲- اثر آلاینده های مختلف بر ویسکوزیته ظاهری گل پیشنهادی

همانطور که در نمودار (۲) مشاهده می شود تنها نمونه آلوده به سیمان و نمونه آلوده به آهک دارای ویسکوزیته ظاهری کمتری نسبت به بقیه نمونه ها می باشد.



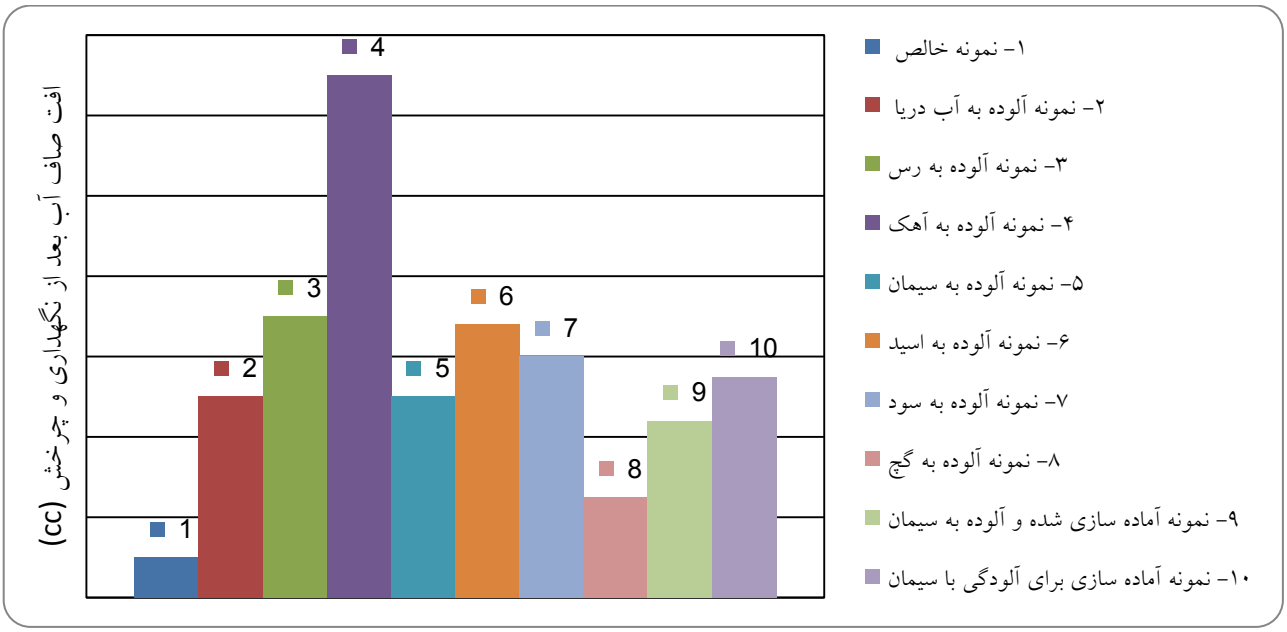
نمودار۳- اثر آلاینده های مختلف بر ویسکوزیته پلاستیک گل پیشنهادی

در نمودار (۳) سیمان، آهک و اسید بیشترین تاثیر را بر روی ویسکوزیته پلاستیک گل پیشنهادی قرار می دهند.



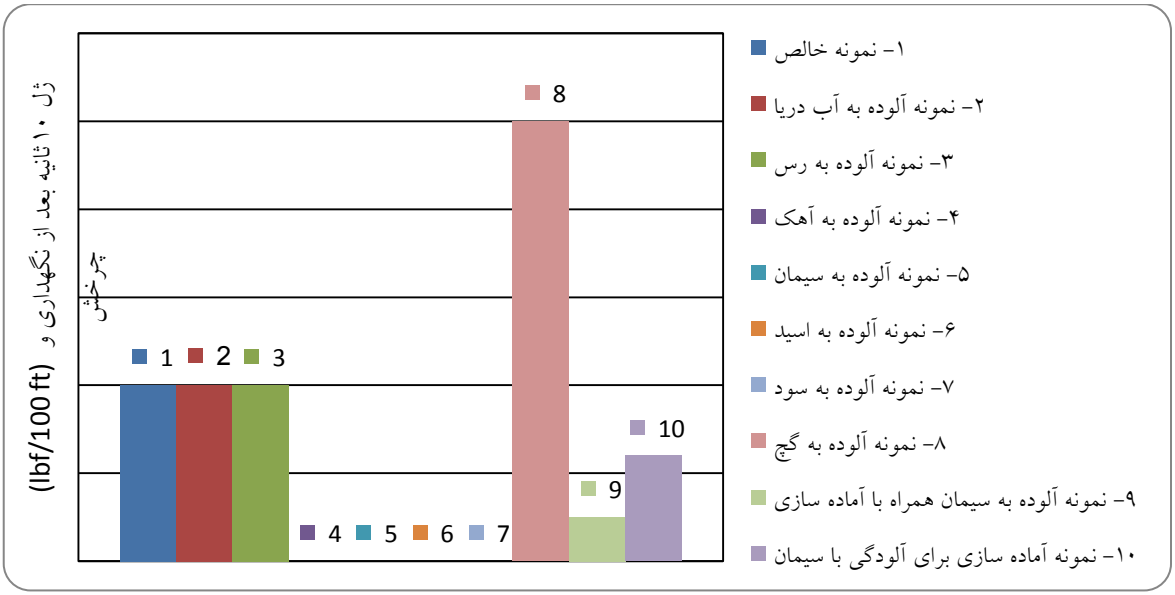
نمودار۴- اثر آلاینده های مختلف بر نقطه وآروی گل پیشنهادی

اثر آلاینده های مختلف بر نقطه وآروی گل پیشنهادی با توجه به نمودار(۴) نشان می دهد که نمونه های آلوده به سیمان، آهک و سود دارای کمترین نقطه وآروی و نمونه های آلوده به آب دریا، رس، اسید، گچ دارای بیشترین نقطه وآروی هستند.



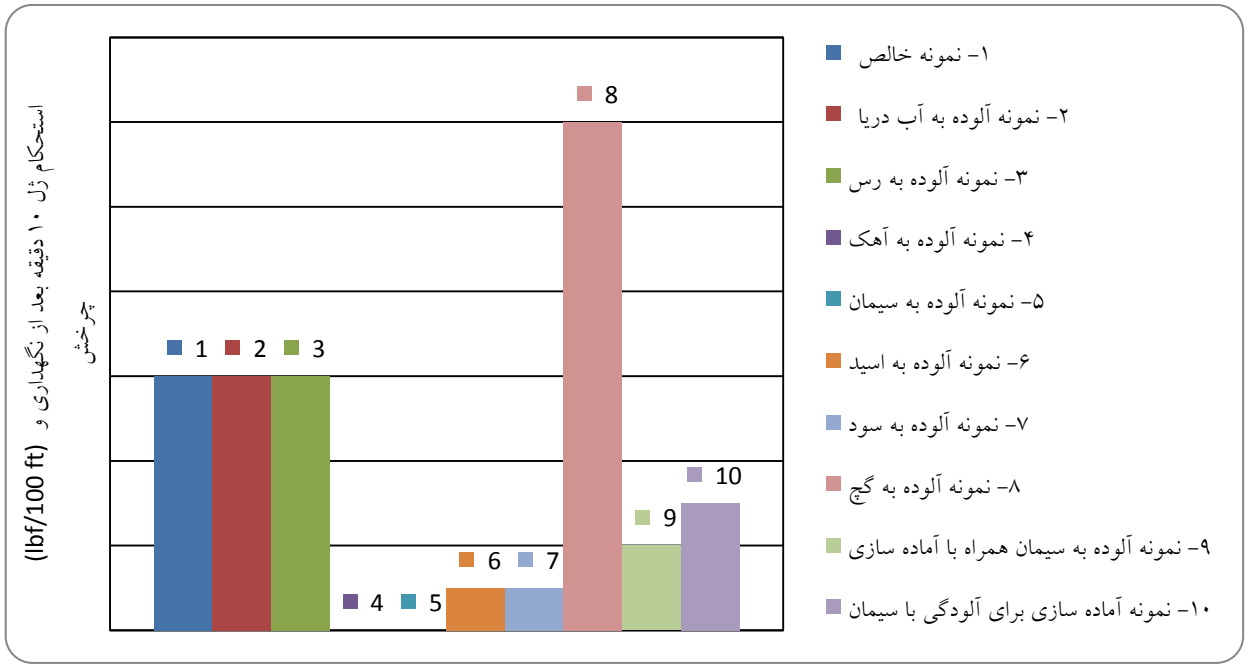
نمودار۵- اثر آلاینده های مختلف بر افت صاف آب گل پیشنهادی

نمودار (۵) نشان می دهد که نمونه آلوده به آهک دارای بیشترین افت صاف آب بعد از نگهداری و چرخش می باشد.



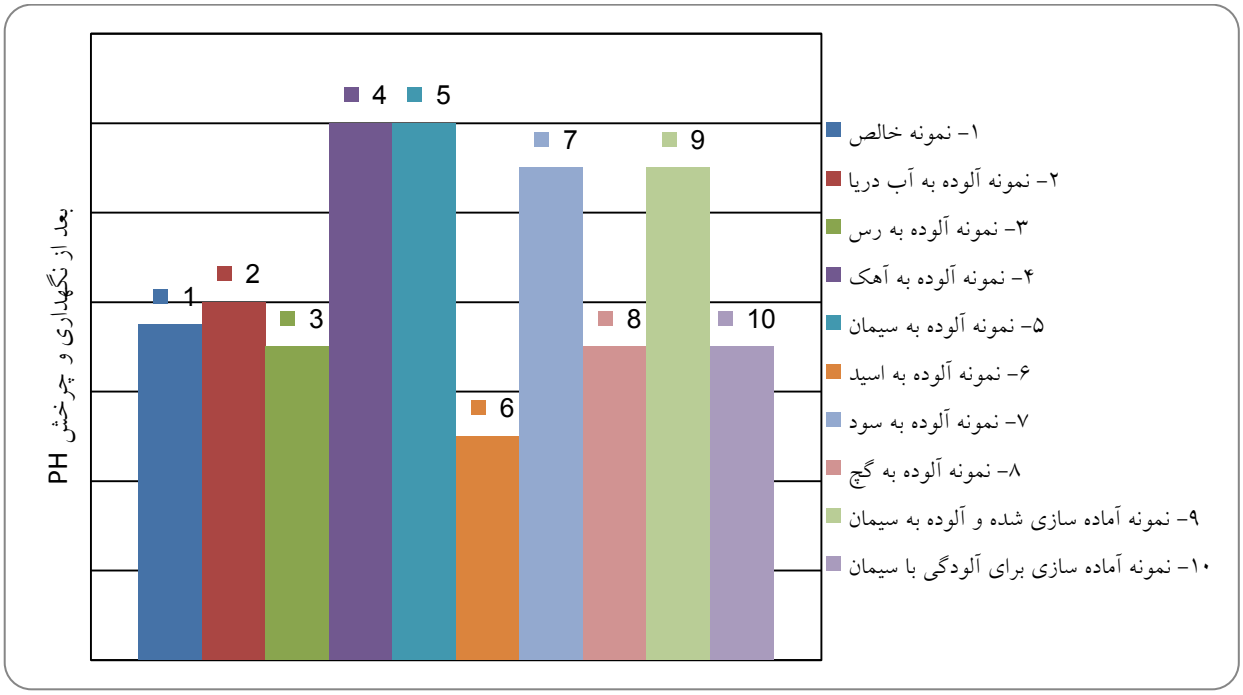
نمودار۶- اثر آلاینده های مختلف بر استحکام ژله ای ۱۰ ثانیه گل پیشنهادی

اثر آلاینده های مختلف بر استحکام ژله ای ۱۰ ثانیه گل پیشنهادی در نمودار(۶) نشان می دهد که سیمان، آهک، اسید و سود دارای کمترین استحکام ژله ای ۱۰ ثانیه و نمونه آلوده به گچ دارای بیشترین استحکام ژله ای ۱۰ ثانیه می باشد.



نمودار۷- اثر آلاینده های مختلف بر استحکام ژله ای ۱۰ دقیقه گل پیشنهادی

اثر آلاینده های مختلف بر استحکام ژله ای ۱۰ دقیقه گل پیشنهادی در نمودار(۷) نشان می دهد که سیمان، آهک، اسید و سود داراری کمترین استحکام ژله ای ۱۰ دقیقه و نمونه آلوده به گچ دارای بیشترین استحکام ژله ای ۱۰ دقیقه می باشد.



نمودار۸- اثر آلاینده های مختلف بر pH گل پیشنهادی

اثر آلاینده های مختلف بر pH گل پیشنهادی در نمودار (۸) نشان می دهد که نمونه آلوده به سیمان و آهک بعد از نگهداری و چرخش داراری بالاترین pH می باشند و نمونه آلوده به اسید دارای کمترین pH می باشد.

۱۵. رفع مشکل آلودگی به سیمان و آهک

در حین حفاری احتمال آلودگی سیال حفاری با سیمان یا آهک وجود دارد. سیمان، کمپلکس سیلیکات آهک است. سیمان و آهک هنگام انحلال در آب طبق واکنش برگشتی، یون کلسیم آزاد می کنند:

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

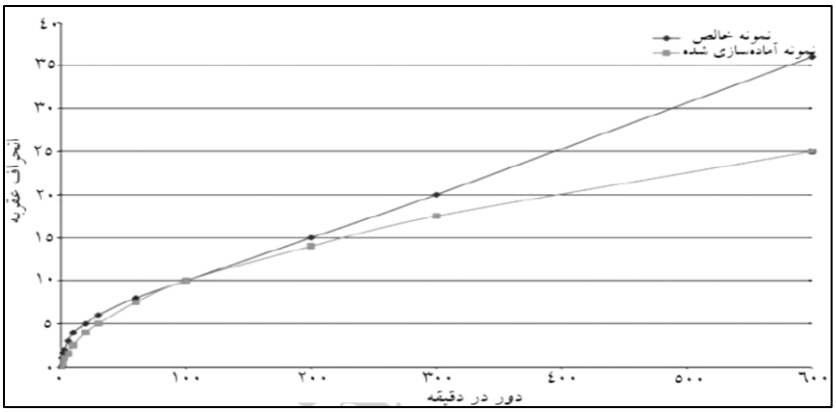
هیدروکسید کلسیم، pH را تا حدود ۱۲ بالا می برد و موجب می شود که پلیمرهای موجود در گل، هیدرولیز شده و سپس توسط کلسیم رسوب داده شوند وکارکرد خود را از دست بدهند. بنابراین کاهش pH و حذف کلسیم برای حل مشکل پیشنهاد می شوند. برای رفع مشکل مذکور باید سیال حفاری پیشنهادی قبل از حفاری سیمان برای کاهش pH با استفاده اسید سیتریک و بی کربنات سدیم برای رسوب دادن کلسیم آماده سازی شود. اسید سیتریک طبق معادله زیر عمل می کند:

$$2(H_3C_6H_5O_7.H_2O) + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca_3(C_6H_5O_7)_2 + 8H_2O$$

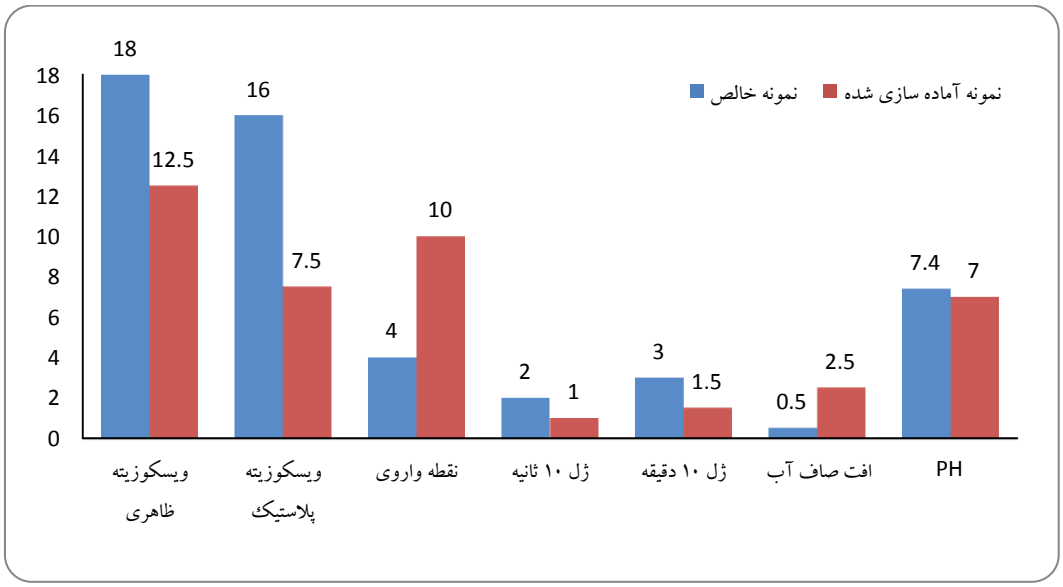
$$NaHCO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow NaOH + H_2O + CaCO_3$$

به منظور رفع مشکل گل پیشنهادی، قبل از آلودگی، نمونه ها با افزودن ۱/۵ گرم اسید سیتریک و ۱/۵ گرم سوداش آماده سازی می شوند. در ادامه دو نمونه ساخته و آماده سازی شده و یکی از آن ها با ۱۰/۵ گرم سیمان آلوده شد. خواص نمونه ها قبل و بعد از آلوده شدن و بعد از ۱۶ ساعت چرخش در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری شدند. در شکل های ۱۱ و ۱۲ تاثیر آماده سازی بر رئولوژی و خواص سیال حفاری نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، آماده سازی سیال پیشنهادی اثر تخریبی بر خواص آن ندارد.

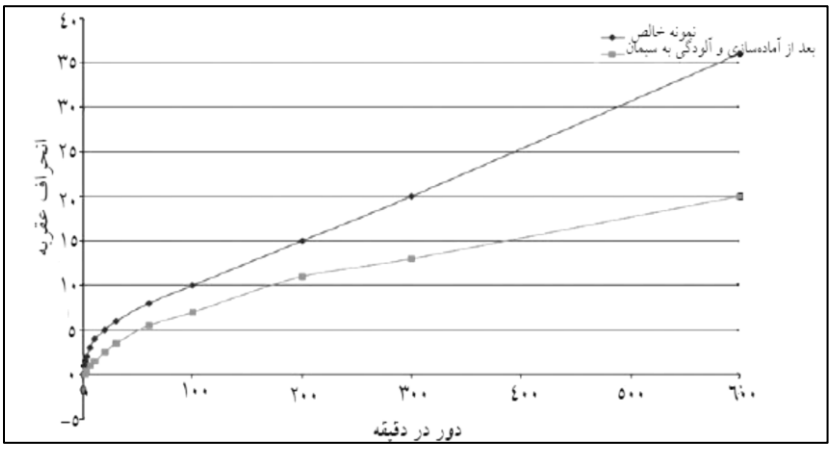
در نمودارهای (۱۱) و (۱۲) اثرات آلودگی به سیمان بر خواص سیال حفاری آماده شده نشان داده شده است. به طوری که که مشاهده می شود، آماده سازی سیال حفاری اثرات تخریبی آلودگی سیمان را تا مقدار قابل قبولی کاهش داده است، لذا پیشنهاد می شود در مواقعی که احتمال آلودگی سیال حفاری به این نوع آلاینده ها وجود دارد، مثل زمان حفاری پاشنه لوله های جداری و آستری بعد از سیمان کاری، ابتدا سیال حفاری بدین روش آماده سازی شده و سپس عملیات حفاری انجام شود.



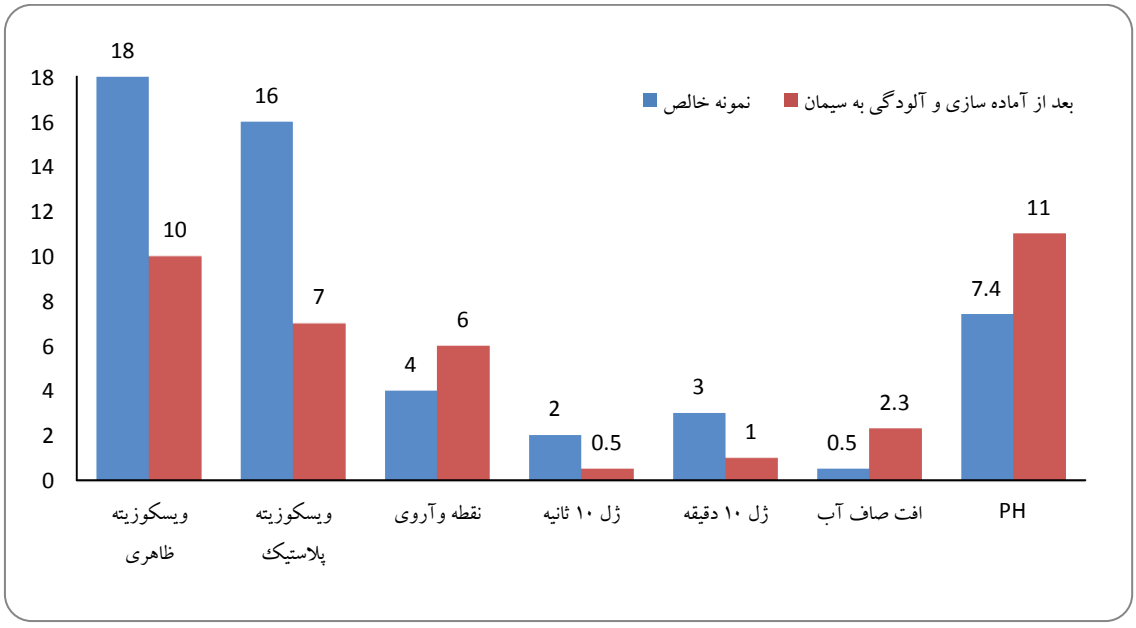
نمودار۹- اثر آماده سازی بر رئولوژی گل پیشنهادی



نمودار۱۰- اثر آماده سازی بر خواص گل پیشنهادی



نمودار۱۱- اثر آلودگی بر رئولوژی گل پیشنهادی



نمودار۱۲- اثر آماده سازی و آلودگی بر خواص گل پیشنهادی

۱۶. خاصیت کاهش فعالیت رس ها به واسطه تعویض یونی و عدم آسیب به سازند در نمونه گل ساخته شده

خاصیت دیگر سیالات بازدارنده، تبدیل رس ها به کانی هایی با فعالیت کمتر می باشد، این امر با تعویض یک کاتیون موجود در فضای بین ورقه های رس با یون دیگری که پتانسیل آماس کانی رسی را کاهش می دهد، انجام می پذیرد. توانایی یک کاتیون برای جایگزین شدن به جای کاتیون دیگر به طبیعت کاتیون ها و غلظت های نسبی آنها بستگی دارد. استفاده از نمک پتاسیمی در این گل باعث جایگزینی کاتیون پتاسیم می شود که سبب پایداری بیشتر سنگ شیلی می شود.[۵] افزایش سختی کنده های حفاری رول شده در نمونه گل، نشانه کارکرد مناسب سیال حفاری است. کاهش آسیب وارده به سازند در این سیال حفاری با استفاده از پلیمرهای مناسب و ممانعت از نفوذ آسیب رساننده ها به سازند با کاهش افت صاف آب سیال حفاری و ساخت کیک نازک با نفوذپذیری کم انجام می گیرد، هر چند رفع آسیب های احتمالی به واسطه قابل حل بودن تمام افزودنی های این سیال در اسیدهای متداول، ساده می باشد.

۱۷. بررسی خاصیت روان سازی نمونه گل ساخته شده

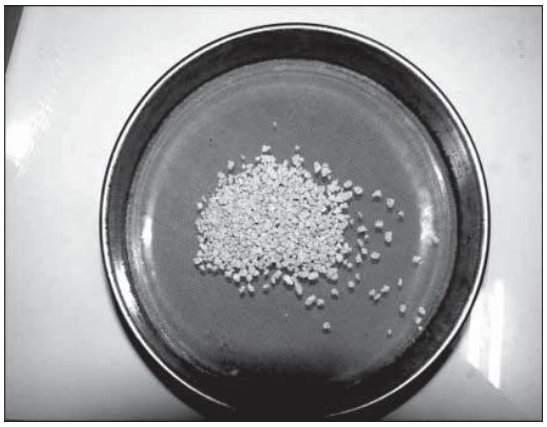
یک سیال حفاری مناسب باید خاصیت روان سازی و کاهش اصطکاک بین رشته حفاری و چاه را داشته و نیروهای مقاوم گشتاور و اصطکاک را کاهش دهد. افزایش این اصطکاک به خصوص در حفاری های انحرافی مشاهده می شود. در سیال پیشنهادی استفاده از مواد خاص مثل گلیکول و پلیمر ها به نمونه گل خاصیت روانی می دهند. این خاصیت گل در آزمایشگاه به وسیله دستگاهE-P MUD TESTER اندازه گیری شد .برای این نمونه گل، مقاومت ضریب پوسته گل با یک نمونه گل روغنی مقایسه شد که جدول (۵) نتایج این مقایسه را نشان می دهد.

جدول۵- مقایسه خاصیت روان سازی سیال ساخته شده با گل روغنی

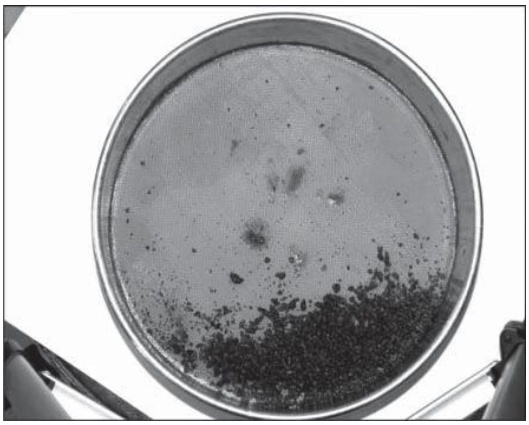
مقاومت ضریب پوسته	
گل روغنی (psi)	گل گلیکولی (psi)
۳۶۴۶۵	۳۵۵۳۳

۱۸. بررسی نتایج واکنش سیال حفاری با نمونه های شیل

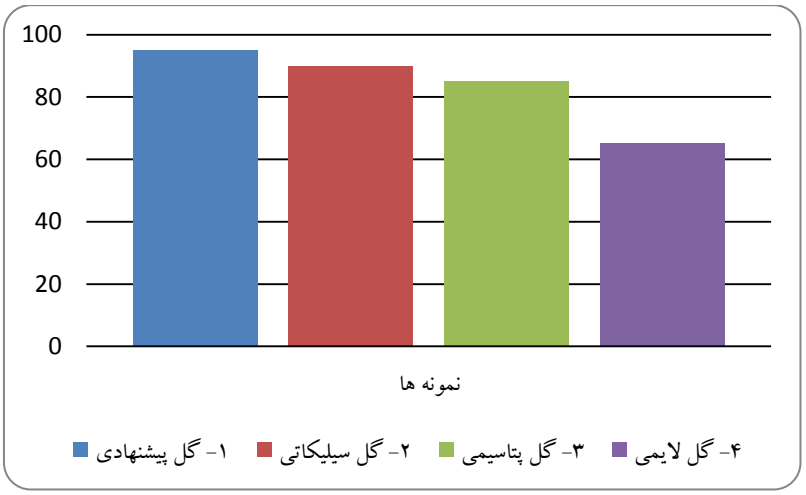
بررسی نتایج واکنش سیال حفاری با نمونه شیل از روش های متداول در طراحی سیال حفاری مناسب شیل ها است که با استفاده از دستگاه های مختلف آزمایشگاهی انجام شد. در این آزمایش از استاندارد- Recovery Hot Rolling(API 13I) برای بررسی خاصیت بازدارندگی سیال پیشنهادی استفاده می شود. ۱۹/۱ گرم از دانه های شیل بین مش های ۵ و ۱۰ انتخاب شدند (شکل ۹) و به مدت ۱۷ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد داخل گل طراحی شده رول شدند. دانه های شیل بازیافتی روی توری مش ۳۵، بعد از خشک شدن در گرم کن ۱۸/۱ گرم بوده اند (شکل۱۰). درصد بازیافتی دانه های شیل ۹۴/۷۴ درصد می باشد. مقایسه نتایج بازیافت کنده های شیلی در تعدادی از انواع مختلف سیالات حفاری در نمودار (۵-۱۳) مشاهده می شود. به طوری که مشخص است بازده این سیال حفاری در حفظ یکپارچگی کنده های حفاری در مقایسه با سایر سیالات حفاری پایه آبی بازدارنده بهتر است.



شکل۹- نمونه شیل قبل از چرخش حرارتی



شکل۱۰- نمونه شیل بعد از چرخش حرارتی



نمودار۱۳- مقایسه درصد بازیافت کنده های شیلی در انواع سیالات حفاری

۱۹. نتیجه گیری

راه های متنوعی برای مقابله با ناپایداری چاه در حین حفاری وجود دارد که انتخاب و استفاده از روش های کنترل کننده ناپایداری، مستلزم شناخت انواع ناپایداری و مکانیسم های مسئول است. در این مقاله تقسیم بندی جدیدی از انواع ناپایداری شیلی ارائه شد. ناپایداری شیلی به دو دسته ناپایداری شیمیایی و ناپایداری مکانیکی تقسیم بندی شده و مکانیسم هر دو نوع ناپایداری تشریح گردید.

لازم است مدل سازی سازند شیلی با توجه به مکانیسم های ناپایداری سنگ بنا شود تا پیش بینی دقیق تری از رفتار این سازند ارائه دهد.

۱- نتایج به دست آمده موید کارکرد مناسب گل طراحی شده در شرایط چاه می باشد.

۲- نتایج آزمایش های انجام شده بیانگر توانایی بالای سیال حفاری ساخته شده در تحمل آلودگی ها به جز آلودگی به سیمان و آهک می باشد. تغییرات جزئی به وجود آمده در خواص سیال حفاری در اثر این آلودگی ها با انجام بهسازی های متداول در محل سکوی حفاری قابل اصلاح می باشد.

۳- نتایج به دست آمده نشان دهنده خاصیت روان سازی خوب و نزدیک گل روغنی به گل طراحی شده می باشد.

تقریباً اکثر ذرات شیل بعد از چرخش حرارتی در گل طراحی شده بازیافت می شوند. از طرفی مشاهده شد که ذرات بازیافتی دارای استحکام بالاتری نسبت به قبل شده اند واین به علت اثرات بجامانده از خواص گل بر روی شیل ها است که در شرایط چاه می تواند به پایدارسازی دیواره کمک کند. با توجه به استفاده از نمونه شیل با قدرت آماس بالا، درصد

بازیابی برای این نمونه گل درصد بالایی می باشد که حاکی از توانایی قابل ملاحظه گل طراحی شده در پایدار نگه داشتن سازندهای شیلی است. درصد بازیافت این گل از انواع دیگر بیشتر بوده و تقریباً قابل مقایسه با سیال پایه روغنی است.

۲۰. منابع

۱. بوشهری ع.، راکی ع.، "مطالعه رفتار شیل ها در عملیات حفاری"، جزوه آموزشی، کتابخانه مرکزی شرکت ملی نفت مناطق نفت خیز جنوب، ۱۳۷۴.

۲. سالاریه مجید، خراط ریاض. " تاثیر اصلاح عمده موجود در شهر اهواز بر عملکرد پلیمر اکس ۱۰۰ در تغییرات رفتار شبه پلاستیک گل حفاری"، سومین کنگره ملی مهندسی شیمی، اهواز ۱۳۷۶.

۳. سلیمانی م.، "شناسایی جامع سازندهای شیلی میدان فروزان"، پروژه تحقیقاتی، پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۲.

۴. قجری ع.، "مطالعه لایه های شیلی در عملیات حفاری میادین سیری D و C و راه حل های اجرا جهت جلوگیری از ریزش شیل"، پروژه تحقیقاتی، پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۸.

5. Abdollahi M., Varamesh A. Rekabdar M. & Nasiri A.R., «Synthesis and use of amphoteric carboxymethylcellulose graft copolymers in the environmentally-acceptable water-based drillingf luids as a water-sensitive shale stabilizer», Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 22, No.6, pp., 2010.

6. Aftab A, Ismail A R, Ibupoto Z H, «Enhancing the rheological properties and shale inhibition behavior of water-based mud using nanosilica, multi-walled carbon nanotube, and graphene nanoplatelet», Egyptian Journal of Petroleum, 2016.

7. Chen, X., CSIRO Petroleum; Monash University; Tan, C.P., CSIRO Petroleum; Haberfield, C.M., Monash University, «Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design», SPE Asia pacific Oil and Gas Conference, Adelaide, Australia, 28-31 October 1996.

8. Darely H.C.H. & Gray G.R., «Composition and properties of drilling and completion fluids», 5 th Ed., Gulf Professional Publishing, Houston, Texas, 1983.

9. Drilling Fluid Manual, Baker Hughes Inteq, 1998.

10. Drilling Fluid Manual, AMOCO Production Company.

11. Eslinger E, Pevear D., «Clay minerals for petroleum geologists and engineers», Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, 1988.

12. Hanyi Zhong, Zhengsong Qiu, Weian Huang, Jie Cao, «Shale inhibitive properties of polyether diamine in water-based drilling fluid», Journal of Petroleum Science and Engineering, 6 June 2011.

13. Moslemizadeh A, Shadizadeh S R, «A natural dye in water-based drilling fluids: Swelling inhibitive characteristic and side effects», Petroleum Conference, 23 August 2016.

14. Mohamed Khodja, Jean Paul Canselier, Faiza Bergaya, Karim Fourar, Malika Khodja, Nathalie Cohaut, Abdelbaki Benmounah, «Shale problems and water-based drilling fluid optimisation in the Hassi Messaoud Algerian oil field», Applied Clay Science, 8 June 2010.

15. Muniz E.S, GTEP-PUC-Rio; S.A.B. da Fontoura, PUC-Rio; and R.F.T. Lomba, Petrobras, «Rock-Drilling Fluid Interaction Studies on the Diffusion Cell», SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 20-23 June 2005.

16. Rabia, H. «Well Engineering and Construction, Entrac Consulting Publication», 1997.

17. Shu He, Lixi Liang, Yinjin Zeng, Yi Ding, Yongxue Lin, Xiangjun Liu, «The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability», Petroleum Conference, January 2016.

18. Water-Based Drilling Fluid Systems, Halliburton,2016.