

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

**بررسی تأثیر سورفکتانت‌های نانیل فنول اتوکسیلیت و سدیم دودسیل سولفات بر
روی عملکرد افرون‌های کلوئیدی گازی در حضور نانورس**

رساله دکتری تخصصی

حمیدرضا صادقی علی‌آبادی

استاد راهنما

دکتر محمد امیری

زمستان ۱۳۹۳



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه دکتری رشته مهندسی شیمی آقای حمیدرضا صادقی علی آبادی
تحت عنوان

**بررسی تأثیر سورفکتانت‌های نانیل فنول اتوکسیلیت و سدیم دودسیل سولفات بر روی عملکرد
افرون‌های کلوئیدی گازی در حضور نانورس**

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۱۳ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-----------------------|-----------------------------|
| دکتر محمد امیری | ۱. استاد راهنمای پایان‌نامه |
| دکتر احمد اسدی نژاد | ۲. استاد مشاور پایان‌نامه |
| دکتر علی اکبر دادخواه | ۳. استاد داور داخلی |
| دکتر محمد ژبانی | ۴. استاد داور خارجی |
| دکتر سید فواد آقامیری | ۵. استاد داور خارجی |

دکتر مرتضی صادقی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس مخصوص پروردگار عالمیان است. مشتاقم نمودی به فهمیدن آنچه نمی دانم و توانمندم کردی به آنکه ارزش دانستن را بشناسم.

از پرسنل محترم پژوهشگاه صنعت نفت تهران به پاس همکاری هایی که در طول دوره دکتری داشتند و موجب بالا رفتن دانش اینجانب در زمینه رساله دکتری گردید تشکر و قدردانی دارم.

از ستاد نانو به پاس حمایت مالی پروژه تشکر و قدردانی می نمایم.

همچنین در اینجا از کلیه کسانی که به نحوی به اینجانب در انجام پایان نامه کمک کردند تشکر و قدردانی می کنم.

کلیه حقوق مادی مرتبت بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقدیم به

"کسی که بزرگترین تغییر را در من ایجاد کرد"

فهرست مطالب

فهرست مطالب	هشت
چکیده:	۱
فصل اول: مقدمه	۲
۱-۱ آشنایی با افرون‌های کلوئیدی گاز	۳
۲-۱ تولید افرون	۵
۳-۱ کاربردهای افرون	۶
۴-۱ بیان مسئله	۷
۵-۱ اهداف	۹
فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده	۱۰
۱-۲ پدیده تخلیه	۱۰
۲-۲ اثر نوع ماده فعال سطحی و غلظت آن بر سرعت تخلیه	۱۲
۳-۲ ادغام افرون‌های کلوئیدی گازی	۱۲
۴-۲ پوسته افرونی و فرضیه حاکم بر آن	۱۳
۵-۲ مکانیزم پل زنی افرون	۱۳
۶-۲ افرون‌های کلوئیدی گازی به عنوان سیال حفاری	۱۶
۷-۲ استفاده از ذرات جامد در کف‌های آبی	۲۰
فصل سوم: مواد، دستگاه‌ها و شرح آزمایش‌ها	۲۳
۱-۳ مواد شیمیایی مورد نیاز	۲۳
۱-۱-۳ مواد فعال سطحی	۲۳
۲-۱-۳ نانورس	۲۶
۲-۳ تجهیزات	۲۹
۱-۲-۳ دستگاه مولد افرون	۳۰
۲-۲-۳ دستگاه تعیین کشش سطحی	۳۰
۳-۲-۳ دستگاه اندازه‌گیری و ثبت هدایت الکتریکی EC	۳۰
۴-۲-۳ تجهیزات عمومی	۳۱
۳-۳ روش انجام آزمایش‌ها	۳۱
۱-۳-۳ تهیه سیال پایه	۳۱
۲-۳-۳ تهیه افرون‌های کلوئیدی گازی	۳۱
۳-۳-۳ منحنی تخلیه	۳۲

۳۳	..... ۴-۳-۳ زمان نیمه عمر
۳۴	..... ۵-۳-۳ میزان انباشتگی گاز
۳۴	..... ۶-۳-۳ روش طراحی آزمایش، مدل سازی با استفاده از طراحی آزمایش ها
۳۵	..... ۷-۳-۳ روش سطح پاسخ RSM
۳۶	..... ۸-۳-۳ روش تولید افرون در شرایط عملیاتی و هندسی متفاوت
۳۹	..... فصل چهارم: نتایج و تحلیل آزمایش ها
۴۰	..... ۱-۴ اثر نانو رس به همراه سورفکتانت ها
۴۰	..... ۱-۱-۴ استفاده از سورفکتانت SDS
۶۱	..... ۲-۱-۴ استفاده از سورفکتانت NPE
۶۶	..... ۲-۴ اثر پارامترهای هندسی و شرایط عملیاتی بر روی رفتار افرون ها
۶۷	..... ۱-۲-۴ نتایج پارامترهای هندسی بر اساس منحنی تخلیه مایع شفاف و ارتفاع کف
۷۷	..... ۲-۲-۴ نتایج اثر شرایط هندسی بر حسب انباشتگی گاز و زمانه نیمه عمر
۸۰	..... ۳-۲-۴ مدل سازی
۸۵	..... فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۵	..... ۱-۵ نتیجه گیری
۸۷	..... ۲-۵ پیشنهادات
۸۸	..... مراجع:

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ تصویر افرون‌های کلوئیدی گازی در محلول..... ۴
- شکل ۱-۲ لوله جمین به همراه حباب‌های گاز و مایع..... ۱۴
- شکل ۲-۲ سیال حفاری افرونی در حین حفاری..... ۱۶
- شکل ۱-۳ ساختمان مولکول SDS..... ۲۴
- شکل ۲-۳ ساختمان مولکول NPE..... ۲۵
- شکل ۳-۳ ساختار مونت‌مورلونیت و حضور کاتیون‌های قابل تعویض و آب در اطراف آن..... ۲۷
- شکل ۴-۳ تصویر شماتیک دستگاه مولد افرون..... ۲۹
- شکل ۵-۳ منحنی تخلیه ارتفاع مایع شفاف بر حسب زمان..... ۳۲
- شکل ۶-۳ تعیین زمان نیمه عمر سوسپانسیون افرونی به صورت تصویری..... ۳۳
- شکل ۷-۳ تصویری از نحوه تأثیر متغیرهای ورودی و خروجی بر روی یک فرایند..... ۳۵
- شکل ۸-۳ پارامترهای هندسی مورد بررسی در دستگاه مولد افرون..... ۳۷
- شکل ۱-۴ فرآیند تخلیه در سه مرحله زمانی متفاوت در حین آزمایش در استوانه مدرج (۱) ابتدای آزمایش (۲) پس از ۱۰ دقیقه (۳) پس از ۲۰ دقیقه..... ۴۱
- شکل ۲-۴ نحوه تغییر شکل افرون‌ها با گذشت زمان در زیر میکروسکوپ (A) ابتدای آزمایش (B) پس از ۳ دقیقه (C) پس از ۶ دقیقه..... ۴۲
- شکل ۳-۴ منحنی تخلیه برای سیال پایه با غلظت‌های مختلف نانو رس بر حسب درصد وزنی (در درون شکل نشان داده شده است) و غلظت سورفکتانت ثابت (۰/۰۵٪ وزنی SDS)..... ۴۳
- شکل ۴-۴ کشش سطحی محلول ۰/۰۵ درصد وزنی SDS بر حسب غلظت‌های مختلف نانو رس..... ۴۵
- شکل ۵-۴ مقدار EC به صورت انتگرالی برای سیال پایه با غلظت‌های مختلف نانو رس (در درون شکل بر حسب درصد وزنی نشان داده شده است) در غلظت ثابت سورفکتانت (۱٪ SDS) (وزنی)..... ۴۵
- شکل ۶-۴ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۰۶۲۵ درصد وزنی نانو رس و ۰/۱٪ وزنی SDS
۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲..... ۴۸
- شکل ۷-۴ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۱۲۵ درصد وزنی نانو رس و ۰/۱٪ وزنی SDS
۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲..... ۴۹

- شکل ۴-۸ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۲۵ درصد وزنی نانورس و ۰/۱٪ وزنی SDS
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲ ۵۰
- شکل ۴-۹ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نانورس و ۰/۱٪ وزنی SDS
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲ ۵۱
- شکل ۴-۱۰ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نانورس و ۰/۱۱۶٪ وزنی SDS
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲ ۵۲
- شکل ۴-۱۱ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نانورس و ۰/۲۳٪ وزنی SDS
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲ ۵۳
- شکل ۴-۱۲ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نانورس و ۰/۲۶٪ وزنی SDS
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲ ۵۴
- شکل ۴-۱۳ طرح پیشنهادی گرفتگی ترافیکی که به وسیله لخته‌های مرکب از سورفکتانت و نانو ذره در یک مرز پلاتیو ایجاد شده
- ۱: ۵۶
- شکل ۴-۱۴ منحنی تخلیه برای سیال پایه با غلظت ثابت از نانورس، ۰/۵ درصد وزنی و چهار غلظت متفاوت از سورفکتانت SDS
- (غلظت بر حسب درصد وزنی، روی شکل نشان داده شده است) ۵۷
- شکل ۴-۱۵ منحنی EC برای سیال پایه با غلظت ثابت از نانورس، ۰/۵ درصد وزنی و چهار غلظت متفاوت از سورفکتانت (غلظت بر حسب درصد وزنی، روی شکل نشان داده شده است) ۵۸
- شکل ۴-۱۶ کشش سطحی آب مقطر بر حسب غلظت SDS در حضور نانورس ۰/۵ درصد وزنی نانورس ۵۹
- شکل ۴-۱۷ کشش سطحی آب مقطر بر حسب غلظت SDS (در حضور ■ و غیاب نانورس ●) ۶۰
- شکل ۴-۱۸ منحنی تخلیه برای سیال پایه با غلظت ثابت از سورفکتانت NPE، ۰/۳۳ درصد وزنی و چهار غلظت متفاوت از نانورس
- (غلظت بر حسب درصد وزنی، شکل نشان داده شده است) ۶۲
- شکل ۴-۱۹ تغییر کشش سطحی ۰/۳۳ درصد وزنی NPE با تغییر غلظت نانورس ۶۳

- شکل ۴-۲۰ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۰۶۲۵ درصد وزنی نانو رس و ۳۳٪ وزنی NPE
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲..... ۶۴
- شکل ۴-۲۱ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۱۱۶ درصد وزنی نانو رس و ۳۳٪ وزنی NPE
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲..... ۶۵
- شکل ۴-۲۲ منحنی تخلیه افرون‌های حاصل از سیال‌های پایه مختلف با غلظت ۰/۲۵ درصد وزنی نانو رس و ۳۳٪ وزنی NPE
- ۱: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال پایه
 - ۲: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۱
 - ۳: نمودار تخلیه سوسپانسیون افرونی ساخته شده از سیال تخلیه شده از سوسپانسیون افرونی مرحله ۲..... ۶۶
- شکل ۴-۲۳ پارامترهای اندازه گیری خصوصیات افرون، H_F : ارتفاع کف، H_D : ارتفاع مایع تخلیه شده..... ۶۷
- شکل ۴-۲۴ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۶۰ ثانیه، فاصله بافل ۲۰ MM، قطر ۵۰ MM و غلظت‌های مختلف از سورفکتانت..... ۶۸
- شکل ۴-۲۵ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۶۰ ثانیه، فاصله بافل ۲۰ MM، غلظت سورفکتانت PPM ۳۰۰۰ و قطرهای مختلف دیسک..... ۶۹
- شکل ۴-۲۶ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۶۰ ثانیه، غلظت سورفکتانت PPM ۳۰۰۰، قطر دیسک ۵۰ MM و فاصله بافل‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۲۷ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۱۵۰ ثانیه، فاصله بافل ۲۰ MM، غلظت سورفکتانت PPM ۴۵۰۰ و قطرهای مختلف دیسک..... ۷۲
- شکل ۴-۲۸ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۱۵۰ ثانیه، غلظت سورفکتانت PPM ۴۵۰۰، قطر دیسک ۵۰ MM و فاصله بافل‌های مختلف..... ۷۳
- شکل ۴-۲۹ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۱۵۰ ثانیه، غلظت سورفکتانت PPM ۳۰۰۰، قطر دیسک ۳۷ MM و فاصله بافل‌های مختلف..... ۷۵
- شکل ۴-۳۰ (A) منحنی تخلیه (B) منحنی کف برای زمان همزدن ۲۴۰ ثانیه، فاصله بافل ۲۰ MM، قطر ۵۰ MM و غلظت‌های مختلف از سورفکتانت..... ۷۶
- شکل ۴-۳۱ مقدار زمان نیمه عمر بر حسب میزان انباشتگی گاز برای شرایط مختلف عملیاتی و هندسی..... ۷۹

فهرست جدول‌ها

۲۴.....	جدول ۱-۳ خواص فیزیکی SDS.....
۲۶.....	جدول ۲-۳ خواص فیزیکی NPE-20.....
۲۸.....	جدول ۳-۳ مشخصات نانو رس.....
۲۹.....	جدول ۴-۳ آنالیز شیمیایی نانو رس.....
۳۸.....	جدول ۵-۳ آزمایش‌های مربوط به تأثیر پارامترهای هندسی و شرایط عملیاتی مختلف بر روی افرون.....
۷۸.....	جدول ۶-۴ مقادیر انباشتگی گاز و زمان نیمه‌عمر برای شرایط عملیاتی و هندسی مختلف.....
۸۱.....	جدول ۷-۴ تحلیل واریانس برای مدل‌سازی زمان نیمه‌عمر برحسب شرایط عملیاتی و پارامترهای هندسی مختلف.....
۸۲.....	جدول ۸-۴ تحلیل واریانس برای مدل‌سازی زمان نیمه‌عمر برحسب شرایط عملیاتی و پارامترهای هندسی مختلف.....

چکیده:

افرون‌های کلونیدی گازی، حباب‌هایی با پوسته ضخیمی هستند که در سال ۱۹۷۱ توسط سبا^۱ تولید شدند. آن‌ها داری ویژگی‌های منحصر به فردی می‌باشند و مطالعات زیادی از آن زمان تاکنون برای استفاده آن‌ها در فرآیندهای مختلف انجام شده است. جدیدترین کاربرد افرون‌های کلونیدی گازی استفاده در حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد، چون یکی از مشکلات مهم در عملیات حفاری هرزروی گل حفاری است. به این مفهوم که قسمتی از گل در حین حفاری در خلل و فرج حفره‌های دیواره چاه وارد می‌شود و باعث اتلاف گل حفاری می‌گردد. به علاوه، ورود گل حفاری به درون خلل و فرج چاه باعث مسدود شدن حفره‌ها به‌طور دائم می‌گردد. افرون‌های کلونیدی گازی انتخابی خوب برای جلوگیری از مسدود شدن حفره‌های دیواره چاه می‌باشند. مکانیزم عملکرد افرون‌ها به این صورت است که آن‌ها می‌توانند به‌طور کامل حفره‌های دیواره چاه را در اثر پدیده تخلیه پرکنند؛ اما این انسداد حفره‌ها موقتی است و پس از مدت کوتاهی در اثر تخریب کف حفره‌ها دوباره باز می‌شوند. بنابراین، موضوع پایداری افرون‌های کلونیدی گازی در حفاری مهم و سرنوشت‌ساز است. هدف از این تحقیق بررسی اثر عوامل مهم بر روی عملکرد سوسپانسیون افرون‌ها است. برای دستیابی به این هدف روش منحنی تخلیه برای تفسیر نتایج به‌کاربرده شد. پارامترهای مورد مطالعه عبارت بودند از: غلظت و نوع سورفکتانت، زمان همزدن، قطر دیسک مولد افرون، فاصله بافل از شفت (موقعیت بافل) و اثر نانو ذرات. در این تحقیق دو نوع سورفکتانت نانیل فنول اتوکسیلیت و سدیم دودسیل سولفات در حضور نانو رس برای تولید افرون‌های کلونیدی گازی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که حضور نانو رس بر روی پایداری افرون‌های تولیدی از سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات به‌طور چشمگیری تأثیر داشته درحالی‌که تأثیر نانو رس بر روی پایداری افرون‌های کلونیدی گازی تولیدی از سورفکتانت غیر یونی نانیل فنول اتوکسیلیت مشاهده نشد. از این نظر زمان نیمه‌عمر (که معیاری برای پایداری افرون‌ها است) سوسپانسیون افرونی تولیدی از سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات از ۲۵۰ ثانیه بدون حضور نانو رس به ۳۰۵ ثانیه در حضور نانو رس افزایش یافته است. این یافته برای اولین بار در این پایان‌نامه گزارش شده است و چگونگی نقش نانو رس در پایداری سوسپانسیون افرونی از جنبه‌های مختلف مورد توضیح داده شد. معلوم شد که وجود نانو رس باعث کاهش کشش سطحی محلول سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات می‌گردد. بیشترین پایداری سوسپانسیون افرونی هنگامی مشاهده شد که کشش سطحی سیال پایه، کمترین مقدار بوده است (۳۶ mN/m) برای فرمولاسیون ۰/۱٪ وزنی سورفکتانت SDS و ۰/۵٪ وزنی نانو رس). همچنین اثر هندسه مولد افرون بر روی پایداری سوسپانسیون افرونی گازی مورد بررسی قرار گرفت و معلوم شد که قطر دیسک همزن نسبت به موقعیت بافل در محفظه مولد افرون بر روی پایداری افرون‌ها نقش مؤثرتری بازی می‌کند. جزئیات کامل نتایج آزمایشات را می‌توان در متن این پایان‌نامه یافت.

کلمات کلیدی: ۱- افرون‌های کلونیدی گازی ۲- پایداری ۳- منحنی تخلیه ۴- انباشتگی گاز ۵- نانو رس

¹ Sebba

فصل اول: مقدمه

امروزه در بسیاری از میدان‌های نفتی، فشار مخازن به زیر فشار هیدرواستاتیک که توسط ارتفاع سیال حفاری مایع در حین حفاری معمولی^۱ و عملیات مربوط به تعمیر چاه^۲ اعمال می‌شود، افت پیدا کرده است. استفاده از حفاری فراتعادلی^۳ در چنین مخازن کم‌فشار اغلب منجر به زیان دهی بهره‌برداری چاه نفت، به دلیل آسیب سازند^۴ می‌شود. به صورت مشابه، با اتلاف سیال حفاری و زیان دهی در حین حفاری مخازن کربنات شکاف دار^۵ در صورت به کارگیری سیال حفاری معمولی مواجه می‌شویم. معمولاً، حجم زیادی از سیال حفاری و مواد گردشی که به درون چاه پمپ می‌شوند درون سازند می‌روند [۱]. معمولاً به منظور رسیدن به تولید حداکثر برای یک چاه چندین ماه به طول می‌کشد، چراکه سیال نفوذ کرده به سنگ سازند مخزن نفتی، جلوی هیدروکربن‌ها را مسدود کرده است. چالش حفاری مخزن کم‌فشار نه تنها به اجرای فناوری‌های پیشرو و گرانتیمنت همانند حفاری مدیریت کنترل فشار^۶ یا حفاری فروتعادلی نیاز دارد، بلکه همچنین

^۱ Conventional drilling

^۲ Workover operations

^۳ Overbalanced drilling

^۴ Formation damage

^۵ Fractured carbonate reservoirs

^۶ Managed Pressure Drilling (MPD)

به توسعه سیستم سیال حفاری برای کنترل مؤثر چاه نیاز دارد.

نتایج نمونه‌های میدانی مختلف از کاربرد کف‌های آبی در بسیاری از عملیات حفاری، اثبات کرده است که استفاده از کف‌های آبی پایدار به‌عنوان سیال حفاری مناسب‌ترین سیال برای حفاری، عملیات تکمیلی چاه و مخازن تخلیه‌شده است. کف‌های آبی یک ترکیب همگن از هوا و یا گاز و همچنین یک سیال کف‌ساز مناسب (فاز مایع و عامل کف‌ساز) که در آن مایع فاز پیوسته و هوا یا گاز فاز گسسته است. کف‌های آبی از ساختارهای حبابی تشکیل می‌شوند که آن‌ها را به یک سیال با خواص بی‌نظیر به همراه دانسیته پایین در محدوده ۰/۲ تا ۰/۷۸ چگالی ویژه^۱ تبدیل می‌کند. این خاصیت دانسیته پایین و خواص ویسکوزیته ویژه کف‌ها آن‌ها را به سیالات مناسبی برای کاربردهای ویژه به‌خصوص در صنعت حفاری تبدیل کرده است [۱].

بخش‌مقدماتی این تحقیق ما را با افرون‌های کلوئیدی گازی، نحوه تولیدشان و خصوصیات افرون‌های کلوئیدی گازی آشنا می‌سازد. همچنین، این مقدمه پیرامون مشکلاتی که باعث انگیزه انجام این تحقیق شده و رفع آن‌ها برای اهداف صنعت نفت است را بررسی می‌کند.

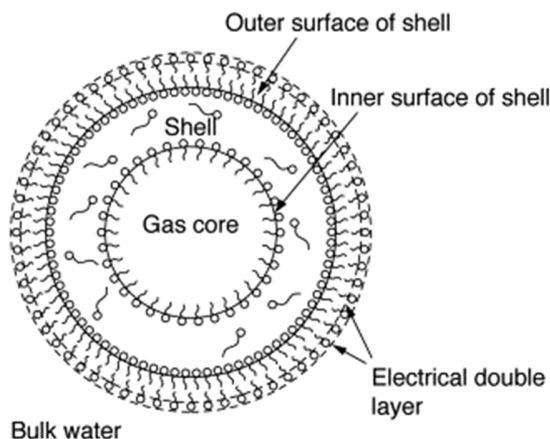
۱-۱ آشنایی با افرون‌های کلوئیدی گاز

افرون‌های کلوئیدی گازی^۲ (CGA) اولین بار توسط سبا^۳ در سال ۱۹۷۱ معرفی گردید [۲]. افرون در لغت یونانی به معنای کف است که سبا به‌منظور متمایز کردن کشف جدید خود از کف‌های معمولی نام افرون را برای آن برگزید. همان‌گونه که از نام افرون پیداست، با حباب‌های میکرونی روبرو هستیم که توسط یک لایه ویسکوز مایع (به‌موجب وجود مولکول‌های ماده فعال سطحی)، گاز (هوا) را درون خود محبوس کرده و پایدار شده‌اند. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد سوسپانسیون افرونی مقاومت آن در برابر دوفازی شدن است (پایداری). از آنجایی که افرون‌ها دارای پوسته محافظ حداقل دولایه‌ای هستند، نسبت به کف‌های معمولی که پوسته حفاظتی تک لایه دارند، پایدارتر می‌باشند [۳، ۴]. این پوسته محافظ مایع شامل مولکول‌های ماده فعال سطحی است که موجب بوجود آمدن یک سد مؤثر در برابر ادغام شدن با افرون مجاور می‌شود. این غشاء دربرگیرنده افرون، فیلم کشسانی صابونی و محافظ افرون است به‌گونه‌ای که به افرون‌ها قابلیت جذب به یکدیگر و تشکیل اجتماع پیچیده‌ای را می‌دهد بدون آنکه در یکدیگر ادغام شوند (شکل ۱-۱).

¹ Specific gravity

² Colloidal Gas Aphron

³ Sebba



شکل ۱-۱ تصویر افرون‌های کلونیدی گازی در محلول [۵]

به‌طور کلی کلیه فعالیت‌های علمی و تحقیقاتی راجع به افرون‌های کلونیدی گازی را از زمان کشف توسط سبا تاکنون به دو دسته می‌توان تقسیم کرد:

۱- تحقیقات انجام گرفته بر روی افرون‌ها با محوریت رفتارشناسی (ساختار شناسی^۱) محلول افرونی

۲- مطالعات صورت گرفته در خصوص کاربردهای متفاوت افرون

تعداد فعالیت‌های تحقیقاتی صورت گرفته در زمینه کاربردهای متفاوت افرون در مقایسه با رفتارشناسی آن قابل توجه است که خود نشان‌دهنده پتانسیل تحقیقاتی موجود در زمینه رفتارشناسی افرون است. از طرفی دیگر تنوع کاربردهای افرون‌های کلونیدی گازی، قابلیت آن‌ها را در زمینه‌های متفاوت بیان می‌دارد.

با نگاهی اجمالی به تلاش‌های محققین در راستای شناسایی ساختار سوسپانسیون افرونی می‌توان دریافت که تحقیقات صورت گرفته بیشتر با محوریت بررسی تأثیر پارامترهای متفاوت به هنگام تولید، بر ساختار سوسپانسیون افرونی انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به اثر مکان قرار گرفتن دیسک چرخان [۶]، اضافه کردن ترکیبات متفاوت به محلول ماده فعال سطحی، pH و ... اشاره کرد [۳، ۷-۱۱]. مطالعه تغییر خواص فیزیکی و جریانی سیال افرونی نیز مدنظر تعداد اندکی از محققین قرار گرفته است [۱۲، ۱۳]. همچنین روش مرسوم در بررسی ساختار سوسپانسیون افرونی استفاده از روش‌های میکروسکوپی مانند انتشار اشعه ایکس یا استفاده از میکروسکوپ الکترونی بوده است [۴].

به‌طور کلی می‌توان گفت مهم‌ترین پدیده در رفتارشناسی افرون‌های کلونیدی گازی، بررسی پایداری آن‌ها است [۶]. بررسی پایداری افرون‌های کلونیدی گازی به کمک ارزیابی نحوه دوفازی شدن سوسپانسیون و یا تخلیه مایع از درون

¹ Characterization

محلول افرونی میسر است [۱۵, ۱۴, ۱۰].

افرون‌های کلوئیدی گازی قطر متوسطی برابر ۵۰ میکرون دارند. افرون‌ها به علت دانسیته ی کمتر از مایع در اثر گذر زمان به سمت بالا حرکت می‌کنند و همچنین مایع درون این سیال دوفازی، به‌عنوان فاز پیوسته، به دلیل نیروی ثقل به سمت پایین حرکت می‌کند که به این پدیده اصطلاحاً تخلیه^۱ گفته می‌شود. لازم به ذکر است که تمرکز این تحقیق بر روی افرون‌های کلوئیدی گازی است و از این به بعد منظور از افرون‌ها همان افرون‌های کلوئیدی گازی می‌باشد.

۲-۱ تولید افرون

برای اولین بار افرون‌ها توسط سبا به‌وسیله جریان پیدا کردن سریع محللول حاوی ماده فعال سطحی در داخل گلوگاه و نتوری، که در آن نقطه هوا از طریق روزنه باریک وارد می‌شد، تولید گردیدند. اگرچه این روش توانست حباب‌هایی را با غلظت ۶۵ درصد حجمی گاز در آب، با توزیع اندازه قطری بین ۵۰-۲۵ میکرون تولید کند، اما پمپ قوی به‌منظور حبس کردن حباب‌های گاز لازم بود تا آب را به داخل گلوگاه و نتوری بفرستد [۲]. امروزه این روش از رده خارج شده و روش جدیدی جایگزین آن شده است.

در روش جدید که توسط سبا پیشنهاد شده، افرون‌ها با استفاده از یک دیسک چرخان با سرعت زیاد تولید می‌گردند [۱۶]. این دستگاه شامل یک دیسک افقی است که با بیش از ۶۰۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد. این دیسک چرخان حدوداً ۲ سانتی‌متر زیر سطح مایع سازنده افرون که درون یک ظرف سه لیتری است، قرار می‌گیرد. دیسک چرخان توسط شافت به موتوری با توان کسری از اسب بخار متصل است. دو محافظ عمودی^۲ (موج گیر) از جنس پلاستیک جامد به‌گونه‌ای بر روی شافت نصب شده‌اند که امکان برخورد دیسک چرخان را با دیواره‌های ظرف از بین ببرد. برای جلوگیری از لرزش، شافت توسط بلبرینگ‌هایی محافظت می‌شود و کل سیستم بر روی یک پایه یا حفاظ قوی نصب می‌گردد.

تئوری تولید این حباب‌های میکرونی به این صورت است که چرخش دیسک با سرعت بالا سبب می‌شود که امواج روی سطح بوجود آمده و با بافل‌ها برخورد کنند و وارد مایع شوند. این فیلم گازی ناپایدار است و به قطرات ریزتر گاز تبدیل می‌شود که به علت وجود ماده سطحی در داخل مایع به‌وسیله پوسته صابونی احاطه شده و افرون تولید گردد. افرون‌های کلوئیدی گازی در عرض چند دقیقه به روش گفته‌شده تولید می‌گردند و سریعاً حجم مایع سه برابر می‌گردد [۱۴].

¹ Drainage

² Baffle

۳-۱ کاربردهای افرون

همان گونه که قبلاً اشاره شد، افرون‌های کلوئیدی گازی به علت داشتن مشخصه‌های منحصر به فردی که از خودشان نشان می‌دهند، کاربردهای وسیعی دارند. تعدادی از مشخصات برجسته افرون‌ها که در مطالعات قبلی اشاره شده‌اند عبارت‌اند از:

- چسبندگی ذرات به پوسته افرونی [۱۷]
- قابل انتقال توسط پمپ از محل تولید تا محل استفاده [۱۸]
- سطح تماس زیاد به علت ریز بودن حباب‌ها [۱۹]
- جدا شدن آسان فاز پیوسته و یا توده مایع [۲۰]

به‌طور کلی کاربردهای فراوانی برای افرون‌ها پیشنهاد گردیده است که از جمله می‌توان به استخراج یون‌های سنگین فلزی، بهبود انتقال جرم، تصفیه سوسپانسیون‌ها، بیوتکنولوژی، سیال حفاری چاه‌های نفت، جدا کردن آلودگی‌های محیط زیست و مهندس بافت اشاره کرد. این کاربردها به شرح زیر می‌باشند [۲]:

- ۱- جداسازی گازهای حل شده در آب
- ۲- جداسازی قطرات روغن پخش شده از آب
- ۳- جدا کردن عناصر زائد از ذغال سنگ
- ۴- جداسازی نفت از ماسه [۲۱]
- ۵- جداسازی پروتئین از پساب کارخانه‌های صنایع غذایی [۲۲]
- ۶- جداسازی ذرات ریز سوسپانسیونی از آب
- ۷- جداسازی فیبرهای سلولزی از پساب کارخانه کاغذ
- ۸- شناورسازی رسوبی و یونی [۲۳]
- ۹- شناورسازی ذرات بسیار ریز آب
- ۱۰- شناورسازی لخته‌های حاوی حباب‌های افرونی
- ۱۱- شناورسازی میکروارگانسیم‌ها
- ۱۲- شویندگی
- ۱۳- آتش‌نشانی

۴-۱ بیان مسئله

نیاز روزافزون به انرژی فسیلی باعث شده است که مدیران صنایع نفت و گاز استخراج از مخازن نفتی که عمر بهره‌برداری آن‌ها زیاد بوده و یا استخراج از چاه‌های نفتی که تا به حال توجیه اقتصادی نداشته‌اند را مورد توجه قرار دهند. برای بازیابی فسیلی از این منابع نیاز به فناوری‌های جدید به‌ویژه در مرحله عملیات حفاری است. در فناوری حفاری چاه‌های مخازن کم‌فشار و یا عملیات حفاری به‌صورت افقی، سیال حفاری نقش مهمی را بازی می‌کند، به‌ویژه برای چاه‌هایی که مدت‌زمانی از عمر بهره‌برداری آن‌ها گذشته است.

در بیشتر مواقع برای چاه‌های نفت، حفاری فروتعدالی امکان‌پذیر نیست. معمولاً دلایل این امر هزینه‌های بالا، مسائل فنی است. حفاری فراتعدالی نیز مشکلات پیچیده خود همانند آسیب سازند و کاهش بهره‌برداری نفت را به دنبال دارد [۱]. این مشکلات در چاه‌های با فشار کم بیشتر مطرح است [۲۴].

حفاری متعادل^۱، حفاری است که فشار سیال حفاری در چاه برابر با فشار سیال داخل سازند است. اگر دانسیته گل حفاری (دانسیته در گردش معادل^۲، ECD) با دقت در جهت حفظ یک شرایط حفاری متعادل کنترل شود، مسائل مرتبط با حفاری فراتعدالی و فروتعدالی می‌تواند برطرف شود. به‌عبارت‌دیگر، آسیب به سازند^۳ (در حفاری فرا تعادلی) و ناپایداری دیواره‌های چاه حفاری^۴ (در حفاری فرو تعادلی) کاهش می‌یابد [۲۵].

برای وجود آوردن شرایطی مناسب در حین حفاری ذرات جامد معلق کم‌ارزش چون پوسته گردو، پشم شتر و... به گل حفاری افزوده می‌شود. هدف از افزودن این مواد، جلوگیری از نفوذ گل حفاری به داخل حفره‌های سازند چاه است تا مانع از مسدود شدن این حفره‌ها شوند و درعین‌حال باعث کاهش هرزروی گل حفاری نیز گردند. این ذرات جامد به‌عنوان جامدات پل زن^۵ شناخته می‌شوند؛ اما حذف کیک فیلتر تشکیل‌شده به‌وسیله جامدات پل زن بعد از تشکیل، مشکل است و می‌توانند درنهایت باعث مسدود شدن برخی از حفره‌ها گردند که در نتیجه پدیده نفوذپذیری^۶ مواد هیدروکربنی بعد از عملیات حفاری کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر استفاده از افرون‌ها در گل حفاری به‌عنوان یک فناوری نوین برای اجتناب از انسداد حفره‌های دیواره چاه مطرح‌شده‌اند [۲۶]. در این راستا پایداری افرون‌ها نقش مهمی را بازی می‌کند که جنبه‌های مختلف آن توسط بعضی از

¹ At balance

² Equivalent Circulating Density

³ Formation invasion

⁴ Borehole instability

⁵ Bridging solids

⁶ Permeability

محققین گزارش شده است (تحمل افرون‌ها در فشارها و دمای بالا) [۲۷].

افرون‌های کلئیدی گازی یک توانایی بی‌همتا برای پل‌زنی منافذ سازند دارند. انتظار می‌رود زمانی که عملیات حفاری شروع می‌شود، این میکرو حباب‌ها به دلیل دانسیته پایین‌تر در جلوی سیال حفاری جابجا شوند. در نتیجه این جابجایی یک تجمعی از میکرو حباب‌ها در جلوی منافذ سازند رخ می‌دهد که روزه‌های سازند را مسدود می‌کند. این میکرو حباب‌ها می‌توانند بعد از عملیات حفاری برای تولید نفت از جداره سازند به راحتی جدا شوند. بنابراین مزیت واقعی میکرو حباب‌ها به‌عنوان عوامل پل‌زن، نبود اثرات منفی جانبی در حین عملیات حفاری است [۲۸].

یکی از مسائل مهمی که باید در استفاده از افرون‌های کلئیدی گازی در گل حفاری مورد توجه قرارداد، بحث پایداری آن‌ها است. به‌طور کلی کف‌های آبی از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند؛ اما افرون‌ها برخلاف کف‌های معمولی، داری پایداری نسبی خوبی هستند به این مفهوم که در فشار و دمای بالا مقاومت خوبی دارند. به‌عبارت‌دیگر، با گذشت زمان مورفولوژی اولیه‌شان را به‌سرعت از دست نمی‌دهند. این پایداری نسبی افرون‌ها ناشی از ابعاد کوچک و ضخامت قابل‌توجه پوسته آن‌ها می‌باشد؛ اما عوامل بسیاری وجود دارند که بر ناپایداری افرون‌ها تأثیرگذار هستند. از جمله این عوامل می‌توان به غلظت سورفکتانت، زمان هم‌زدن و غلظت املاح اشاره کرد. از اینرو، بررسی عوامل و فاکتورهایی که بتوانند پایداری افرون‌ها را ارتقاء بخشند مهم و ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر، مطالعات فراوانی به‌منظور ارتقاء پایداری افرون‌ها انجام شده است. کارهای آزمایشگاهی و تئوری زیادی برای استفاده از افزودنی‌های مناسب، همانند انواع سورفکتانت‌ها و موادی که باعث افزایش ویسکوزیته سیال^۱ و ارتقاء پایداری افرون‌ها می‌شوند، انجام شده است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با بررسی افزودن نانو ذرات بر روی عملکرد افرون‌ها انجام نشده است.

روش تولید افرون‌های کلئیدی گازی به‌وسیله هم‌زدن شدید سیال پایه، متشکل از یک سیال آبی و مواد کف‌زا، است. از اینرو، شرایط هندسی دستگاه مولد افرون نیز یکی از پارامترهایی است که می‌تواند بر روی پایداری افرون‌ها تأثیرگذار باشد. از آنجایی که تاکنون مطالعه‌ای در این ارتباط گزارش نشده است، بررسی اثر پارامترهایی هندسی برای ارزیابی پایداری افرون‌ها در این کار تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است. شناخت بهتر این پارامترها، این امکان را فراهم می‌آورد که طراحی هندسه دستگاه مولد افرون با شناخت بهتری انجام شود.

¹ Viscofier