مطالعه و مروری بر تشکیل و روش‌های حذف رسوبات معدنی در فرآیند بازیافت نفت

بهروز میرزایی[۱،*]، سیدعلی موسوی دهقانی[۲]، سیدحسین هاشمی[۳]، محمود دین محمد[۴]

[۱] عضو هیأت علمی گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران

[۲] پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران

[۴] پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۱۰/۸ پذیرش: ۹۴/۲/۲۶

چکیده

امروزه با توجه به افزایش بهره‌وری اقتصادی و کاهش بهره برداری طبیعی نفت، به‌کارگیری روش‌های بازیافت نفت، پیشرفت چشمگیری داشته است. این در حالی است که این روش معمولاً با پدیده تشکیل رسوبات معدنی در سازند تولید هیدروکربن و تاسیسات میادین نفتی همراه است. به همین دلیل در این مطالعه روند شکل‌گیری رسوبات معدنی در طول عملیات بازیابی نفت مورد بررسی قرار گرفته شده است. براساس نتایج این پژوهش در صورت تزریق آب، گاز و مواد شیمیایی به مخازن، تشکیل رسوبات معدنی با وجود شرایط دمایی و فشاری خاص در تأسیسات سطحی و زیر سطحی میادین نفتی دور از انتظار نیست. هم‌چنین در این مطالعه روش‌های حذف رسوبات معدنی به کمک روش‌های شیمیایی، مکانیکی و ترکیبی (شیمیایی و مکانیکی) با توجه به موقعیت مکانی رسوب و خواص فیزیکی آن، به منظور رفع اثرات رسوبات معدنی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

کلمات کلیدی : رسوبات معدنی، بازیافت نفت، حذف رسوبات معدنی

مقدمه

امروزه بهبود بازیافت نفت از مخازن میادین نفتی با توجه به چالش‌های کشف و توسعه میادین حوزه نفتی و هزینه های ناشی از آن، از ارجعیت و اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین دلیل کنترل آب تولید شده در سازند تولید هیدروکربن (نفت وگاز) در میادین نفتی به منظور مدیریت مخازن و بهره‌برداری بهینه نفت

*mirzayib@uma.ac.ir

بیش‌تر از پیش مورد توجه واقع شده است. آب تولید شده در منابع زیرسطحی به آب نمک معروف هستند که حاوی ذرات حل شده کاتیونی و آنیونی در خود می‌باشند. از جمله کاتیون‌های مرسوم محلول در آب سازند می‌توان به سدیم، کلسیم و آهن اشاره کرد. در بین آنیون‌های موجود در آب تولید شده سازندها یون-های کلرید، سولفات و کربنات بیش‌تر از سایر آنیون‌ها به چشم می‌خورند [۱و۲]. آب طبیعی ناخالص (حاوی مواد معدنی وگازهای حل شده) سازند زیرسطحی، به طور معمول تحت تأثیر شرایط دما و فشار محیط اطراف خود قرار دارد. لذا در زمان بهره‌برداری نفت از طریق ستون چاه، به دلیل تغییرات درجه حرارت و فشار جریان استخراجی از مخازن، شرایط برای تشکیل رسوبات معدنی در طول عملیات فراهم می‌شود [۵-۲].

عمدتاً نفت باقی مانده در سازند تولید هیدروکربن با توجه به افت فشار در خلل و فرج محبوس شده می-باشد. ازاین‌رو برای نگهداری پایدار فشار، سیستم ازدیاد برداشت در میادین نفتی به منظور تحرک نفت به‌کار گرفته می‌شود. از جمله روش‌های مرسوم در عملیات بازیافت نفت می‌توان به تزریق آب و تزریق مواد شیمیایی اشاره کرد [۷،۶]. این دو روش با وجود نتایج موفقیت آمیز در بهبود بازیافت نفت از مخازن زیر سطحی، می‌توانند زمینه ساز تشکیل رسوبات معدنی و سبب مشکلات زیادی در میادین نفتی شوند [۱۱-۸]. به طور معمول تشکیل رسوبات معدنی زمانی اتفاق می‌افتد که آب نمک موجود در سازند با توجه به تغییرات غلظت، دما و فشار، فوق اشباع (محلولی دارای غلظت بیش‌تر نسبت به غلظت تعادلی ماده حل شونده) گردد[۱۳،۱۲]. از رسوبات مرسوم غیر آلی می‌توان به کلسیم کربنات، سولفید آهن، باریم سولفات و رسوبات سیلیکاتی اشاره نمود [۱۵،۱۴،۹،۶]. در حال حاضر رسوبات معدنی از مخازن تولید هیدروکربن تا تاسیسات سطحی و زیر سطحی در صنعت نفت وجود دارند و با به‌کارگیری روزافزون در روش‌های بازیافت نفت برای بهره‌برداری بهینه نفت، روند شکل‌گیری و روش‌های حذف رسوبات معدنی از اهمیت زیادی برخوردار شده است. در این پژوهش علل شکل‌گیری رسوبات معدنی از طریق سیستم تزریق آب، موادشیمیایی و گاز بررسی می‌شود و در ادامه راه‌حل‌های حذف اثرات آن ارائه خواهد شد.

تشکیل رسوبات معدنی در طول بازیافت نفت

در روند بازیافت و جابه جایی پایدار نفت در سازند زیرسطحی، به خصوص زمانی که روش‌های تزریق آب، مواد شیمیایی و تزریق گاز به‌کارگرفته می‌شود؛ ممکن است زمینه تشکیل رسوبات معدنی در مخزن تولید هیدروکربن و تجهیزات سطحی و زیرسطحی فراهم شده و باعث بروز مشکلات متعددی شود[۱۶و۱۷].

تشکیل رسوبات معدنی در طول تزریق آب

مخلوط شدن آب سازند با آب عملیات سیلاب‌زنی می‌تواند، زمینه ساز شکل گیری رسوبات معدنی در مخزن زیرزمینی و چاه بهره برداری و خطوط لوله انتقال شود. آب عملیات تزریق عمدتاً آب دریا است و از آن‌جایی که آب دریا حاوی مواد معدنی از جمله سولفات و کربنات است و آب سازند حاوی کاتیون‌های از قبیل کلسیم و باریم می‌باشد، می‌توان تشکیل این رسوبات را در صورت وجود حالت فوق اشباع با توجه به شرایط

جدول ۱. عوامل اثر گذار بر شکل گیری رسوبات مرسوم معدنی و نقاط مهم تشکیل آن‌ها در میاین نفتی

نقاط مهم تشکیل در میادین نفتی	عامل اثر گذار بر روند تشکیل	رسوبات معدنی
در نزدیکی دهانه چاه، ستون چاه نفت و تجهیزات سرچاهی و خطوط انتقال نفت	دما، فشار جزئی از CO_2، pH	کلسیم کربنات
محیط متخلخل مخزن، ستون چاه نفت	دما، فشار، غلظت سیال	کلسیم سولفات
ستون چاه نفت، نزدیکی دهانه چاه و تجهیزات سرچاهی میادین نفتی	دما، فشار	باریم سولفات
ستون چاه نفت	دما، فشار	استرانسیم سولفات
دهانه چاه در مخزن، خطوط انتقال نفت	دما، فشار و pH	منیزیم کربنات

محیطی لازم انتظار داشت [۱۸و ۱۹]. سولفات‌ها و کربنات‌ها از شایع‌ترین رسوبات معدنی موجود در تأسیسات میادین نفتی به شمار می‌آیند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کلسیم سولفات، باریم سولفات، استرانسیم سولفات و هم‌چنین کلسیم کربنات‌ها اشاره کرد. رسوبات کربنات‌ها و سولفات‌ها بسیار مساله‌ساز بوده و عمدتاً به عنوان رسوبات مخزن شناخته می‌شوند، هرچند تشکیل رسوبات کربناتی و سولفاتی در ستون چاه بهره‌برداری و تجهیزات سرچاهی با وجود شرایط دمایی و فشاری مناسب دور از انتظار نیست. در جدول ۱ به عوامل اثر گذار و نقاط مهم شکل‌گیری رسوبات معدنی سولفاتی و کربناتی مرسوم اشاره شده است.

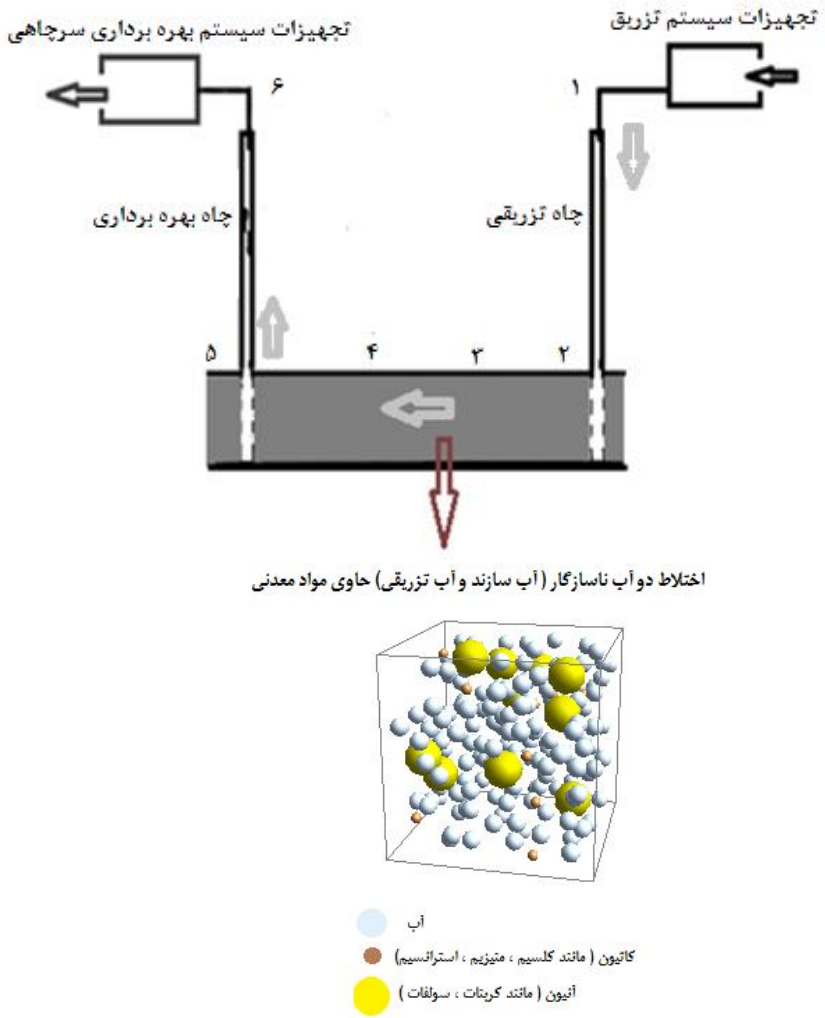
در میادین نفتی ایران با توجه به استفاده روز افزون عملیات تزریق آب با وجود کاتیون‌های منیزیم، باریم، کلسیم و استرانسیم تشکیل رسوبات کربناتی هم‌چون منیزیم کربنات و کلسیم کربنات و رسوبات سولفاتی هم‌چون کلسیم سولفات بدون آب (انیدریت) و کلسیم سولفات دوآبه (سنگ گچ)، استرانسیم سولفات و باریم سولفات بیشتر محسوس بوده است [۱۹].

براساس مطالعات اخیر [۱۹] برای تشکیل رسوبات معدنی سولفاتی در میادین نفتی، با افزایش درجه حرارت میزان رسوبات کلسیم سولفات و استرانسیم سولفات افزایش و رسوبات باریم سولفات با کاهش همراه است. هم‌چنین بر اساس این نتایج، افزایش فشار کاهش فوق اشباعی را در رسوبات سولفاتی به دنبال خواهد داشت. از مشکلات ناشی از این رسوبات می‌توان به خاموش کردن اضطراری، افزایش هزینه تعمیر و نگهداری اشاره کرد [۱۸]. در شکل ۱ روند کلی شکل‌گیری رسوبات معدنی در طول سیستم تزریق آب نشان داده شده است.

با توجه به شکل۱، دو مکانسیم اصلی برای شکل‌گیری رسوبات معدنی در میادین نفتی قابل توجه است:

۱- کاهش یا افزایش درجه حرارت و فشار محلول(حاوی آب و مواد معدنی) در نتیجه کاهش حلالیت مواد معدنی

۲- مخلوط شدن دو جریان آب (آب دریا به عنوان سیال تزریقی و آب سازند) حاوی موادمعدنی



شکل ۱. روند تشکیل رسوبات معدنی در طول عملیات بازیافت نفت از طریق سیستم تزریق آب (ناحیه ۱- ۲: افزایش فشار و دما؛ ناحیه ۲-۳: کاهش فشار و تداوم افزایش دما؛ ناحیه ۲-۵: تبادلات محلول معدنی و واکنش با سنگ مخزن سازند؛ ناحیه ۳-۵: اختلاط محلول معدنی در مخزن؛ ناحیه ۴-۶: کاهش فشار و درجه حرارت و در نتیجه آزادشدن کربن دی اکسید و تبخیر آب به سبب کاهش فشار درصورت وجود فازگاز؛ ناحیه ۵-۶ : تشکیل رسوب معدنی با وجود افت فشار و کاهش دما در ستون چاه بهره برداری) [۲۰]

این دو مکانسیم، شرایط را برای تشکیل رسوب معدنی در تأسیسات سطحی و زیر سطحی فراهم خواهند نمود که می‌تواند کاهش جریان بهره‌برداری را در پی داشته باشد. درجه سختی رسوبات معدنی در محلول آبی سازند میادین نفتی نیز همواره از اهمیت ویژگی برخوردار بوده است. به گونه‌ای که سختی کربناتی با توجه به نوع سنگ مخزن و با وجود غلظت یون‌های کربنات، سیلیس، کلسیم و منیزیم محلول در آب سازند، شرایط را برای تشکیل قابل توجهی از رسوب معدنی در مخزن فراهم می‌نماید؛ که در نتیجه حذف رسوب را با مشکل جدی روبه‌رو می‌کند.

جدول ۲. تجزیه نمونه های رسوبات آلی و معدنی در مراحل مختلف روش سیلاب‌زنی ASP [۲۵]

مراحل سیستم بازیافت نفت	رسوبات آلی ٪	$CaCO_3$ %	MgO %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	SiO_2 %
مرحله اولیه	۱۵/۹	۵۵/۳	۰/۸۴	۰/۲۵	۰/۵۱	۲۰/۰۹
مرحله میانی	۱۰/۵۷	۱۶/۹۳	۰/۲۷	۰/۱۵	۲/۹۶	۶۶/۹۶
مرحله نهایی	۹/۹	۱۴/۹	۰/۶۲	۰/۱۴	۱/۱	۷۰/۸

تشکیل رسوبات معدنی در طول سیستم سیلاب‌زنی شیمیایی ASP

به‌کارگیری سیستم سیلاب زنی شیمیایی در حال حاضر یکی از روش‌های موفقیت آمیز و مقرون به صرفه در افزایش بازیافت نفت از سازند زیرزمینی، بعد از روش ترزیق آب است. روش تزریق آب معمولاً در مخازن شکافدار کارآمد نیستند؛ از اینرو روش سیلاب‌زنی شیمیاییASP (قلیایی - سورفکتانت - پلیمر) به عنوان یک فرآیند مقرون به صرفه با توجه به افزایش جابه جایی نفت، در این مخازن به‌کار گرفته خواهد شد. با این حال کارایی مطلوب این روش به سنگ مخزن و خواص سیال مخزن تولید هیدروکربن در ارتباط است [۲۲،۲۱].

اثرهای متقابل هر یک از مواد ترزیقی در روش شیمیایی ASP از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل نتایج مطالعات چند دهه اخیر حاکی از این است که ماده قلیایی در این روش با تحت تاثیر قرار دادن جذب سطحی، سبب بهبود کیفیت و کارایی مطلوب این سیستم تزریقی خواهد داشت[۲۲]. هم‌چنین پلیمر تزریقی با افزایش ویسکوزیته آب و سورفکتانت با کاهش نیروی کشش سطحی بین نفت مخزن و سیال تزریقی نقش بسزایی در روند افزایش راندمان جابه جایی پایدار نفت خواهد داشت [۲۳،۲۱].

هرچند روش سیلاب‌زنی شیمیایی ASP با جابه جایی نفت محبوس شده در محیط خلل و فرج مخزن تولید هیدروکربن، عاملی برای افزایش بازیافت نفت خواهد بود ولی وجود مواد قلیایی ترزیقی در آن زمینه‌ساز تشکیل رسوبات معدنی خواهد شد. کاربرد مواد قلیایی از جمله هیدروکسید سدیم و کربنات سدیم [۲۲] در این روش با واکنش با سنگ مخزن سازند سبب تخریب تدریجی آن می‌شود و در نهایت انحلال برخی از مواد سنگ مخزن میادین نفتی را موجب می‌شود. در نتیجه انتقال این مواد انحلالی به واسطه سیال سازند و با وجود آب سیلاب‌زنی می‌توان در طی عملیات بهره برداری با توجه به تغییرات دما و فشار محیطی، تشکیل رسوبات معدنی و ته‌نشینی آن‌ها را در چاه بهره‌برداری نفت و تجهیزات سطحی انتظار داشت [۲۴،۸].

از مشکلات به وجود آمده در تجهیزات میادین نفتی به علت تشکیل رسوبات معدنی در طول عملیات سیستم سیلابزنی شیمیایی از جمله ASP گزارش‌های متعددی [۲۴،۲۲] ارائه شده است. در جدول ۲ تشکیل رسوبات معدنی در یک نمونه ستون چاه بهره‌برداری نفت در مراحل مختلف ازدیادبرداشت به روش تزریق شیمیایی ASP ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ نمایان است؛ در مرحله اول شکل‌گیری رسوبات معدنی، وجود این رسوبات با بیش‌ترین میزان در رسوب کلسیم کربنات قابل تأمل است. این درصورتی است که در پایان عملیات بازیافت میزان رسوب SiO_2 روند افزایشی فوق العاده‌ای داشته و از میزان ٪ ۲۰/۰۹ به ٪ ۷۰/۸ رسیده است. هرچند در میزان رسوب کلسیم کربنات از مراحل اولیه نسبت به مرحله نهایی عملیات کاهش قابل توجهی مشاهده می‌شود. در نتایج مطالعه فوق میزان دو رسوب SiO_2 و $CaCO_3$ تحت تأثیر عوامل مهمی از جمله وجود مخازن کربناتی و سیلیسی سازند و تخریب سنگ مخزن این مخازن توسط مواد قلیایی تزریقی در روش سیلاب‌زنی ASP بیش‌تر از رسوبات Al_2O_3، MgO و Fe_2O_3 بوده است.

تشکیل رسوبات معدنی در طول عملیات تزریق گاز

در عملیات ازدیاد برداشت به روش تزریق گاز، گاز دی اکسید کربن ، نیتروژن و گازهای هیدروکربنی تحت فشار بالا به مخزن تولید هیدروکربن ترزیق می‌شوند. در نتیجه مخلوط شدن گاز تزریقی با نفت، کاهش ویسکوزیته نفت و جابه‌جایی پایدار آن را صورت می‌گیرد. این روش یکی از روش‌های متداول عملیات ازدیاد برداشت به شمار می‌آید. به گونه ای که امروزه ۵۰ ٪ عملیات بازیافت نفت در آمریکا به روش تزریق گاز انجام می‌پذیرد. تغییرات درجه حرارت و فشار و افزایش دی اکسید کربن سبب تشکیل فازهای جامد - مایع و گاز – مایع در سازند تولید هیدروکربن خواهد شد. دی اکسید کربن تزریقی در روش تزریق گازی، با هر دو فاز نفت و آب (حاوی مواد معدنی) قابل حل خواهد بود [۲۸-۲۶]. لذا با توجه به انحلال گاز تزریقی در محلول آب نمک، اثرگذاری آن بر روی خواص فاز هیدروکربن قابل ملاحظه است.

دی اکسید کربن از مهم‌ترین گازهای تزریقی در فرآیند بازیافت نفت با تزریق گاز است که اثرگذاری آن در فرآیند بازیابی نفت به آب سازند و نفت وابسته می‌باشد. دی اکسید کربن در آب سازند و نفت قابل حل است و از این‌رو میزان گاز حل شده در محلول آب ناخالص سازند می‌تواند روند افزایش بازیافت نفت را با توجه به تغییرات دما، فشار و شوری آب تحت تأثیر قرار دهد. به گونه‌ای که با افزایش فشار و کاهش درجه حرارت، افزایش حلالیت گاز ترزیقی در فاز آب نتیجه خواهد شد. به طور کلی هرچه نسبت انحلال گاز تزریقی در فاز محلول آب نمک کم‌تر باشد، می‌توان افزایش راندمان ازدیادبرداشت را از طریق روش تزریق گاز انتظار داشت [۲۹]. تزریق گاز در راستای فرآیند بازیافت نفت علاوه بر تشکیل رسوب معدنی، می تواند زمینه تشکیل رسوبات غیر آلی (با توجه به حل شدن آن در نفت خام سازند) هم‌چون آسفالتین و واکس را در میادین نفتی فراهم نماید.

روش‌های حذف رسوبات معدنی در میادین نفتی

روش‌های شیمیایی

روش شیمیایی مقرون به صرفه‌ترین روش در حذف رسوبات معدنی در میادین نفتی شناخته شده است. برخی از رسوبات معدنی از جمله کربنات کلسیم وسولفید آهن را می‌توان با اسید رفع نمود. از مرسوم‌ترین اسید کاربردی می‌توان به اسید هیدروکلریک اشاره کرد. این در حالی است واکنش شیمیایی سولفید آهن با اسید

هیدروکلریک منجر به تولید سولفید هیدوژن خواهد شد که یک گاز سمی است[۲]. رسوبات باریم سولفات در برابر روش‌های شیمیایی مقاومت قابل توجهی دارند که از این‌رو با استفاده از تکنولوژی مکانیکی، حذف آن انجام می‌گیرد. برخی از گزارش‌های اخیر حاکی از اثر مطلوب روش‌های شیمیایی براساس EDTA در حذف رسوبات ته نشین شده در میادین نفتی داشته است[۳۲-۳۰]. حذف شیمیایی رسوبات معدنی براساس EDTA هرچند نسبت به مواد شیمیایی اسیدی هم چون اسید سولفوریک و اسید هیدروکلریک دارای قیمت گران‌تری می‌باشد ولی نتایج بسیاری از مطالعات انجام گرفته از موفقیت آمیز بودن آن در حذف رسوبات معدنی از جمله رسوبات بی کربناتی تاکید دارد. ماده شیمیایی u-104 و u-105 به عنوان دو ماده شیمایی توسعه یافته EDTA شناخته شده است که در بهبود رفع اثر رسوبات معدنی از جمله کربنات کلسیم کارایی مطلوبی از خود نشان داده‌اند [۱۲].

برای حذف شیمیایی رسوبات کلسیم سولفات در صنعت نفت و گاز، ۲ مرحله مورد توجه است [۳۳]:

۱- به‌کارگیری تبدیل کننده‌های معدنی از جمله هیدروکسیدها به منظور واکنش با کلسیم سولفات و تبدیل به کلسیم هیدروکسید

۲- حذف نهایی با به‌کارگیری اسید هیدروکلریک برای انحلال کامل کلسیم هیدروکسید تولیدشده از مرحله قبل

هرچند اخیراً به‌کارگیری حلال‌ها به منظور رفع اثر مشکل ناشی از رسوبات معدنی کلسیم سولفات، در صنعت بیش‌تر مورد توجه بوده است.

اسید سولفوریک از ارزان‌ترین مواد شیمیایی اسیدی است که به منظور حذف رسوبات معدنی در صنعت نفت و گاز به‌کار گرفته می‌شود. معمولاً در سیستم جریان بهره برداری زمانی که pH بیش از حد کم باشد می‌توان وجود مشکل خوردگی را در تجهیزات میادین نفت انتظار داشت. لذا برای کنترل و نگهداری پایدار pH در بازه بین ۷/۲ – ۷/۵، مواد شیمیایی از قبیل اسید سیتریک و اسید سولفوریک به‌کار گرفته خواهد شد. این در شرایطی است که حذف رسوبات سولفاتی از جمله باریم سولفات، استرانسیم سولفات با روش شیمیایی با توجه به مواد اسیدی موجود، موفقیت آمیز نخواهد بود. با استفاده از عوامل کیلیت ساز از جمله EDTA می‌توان را برای رفع مطلوب‌تر مشکلات ناشی از اثرات رسوبات معدنی، اقدام کرد[۳۵،۳۴]. محیط خلل و فرج در مخازن زیرسطحی به عنوان محیطی مناسب برخلاف سطوح بدون منفذ به منظور به‌کارگیری روش شیمیایی برای رفع مشکل رسوبات معدنی در میادین نفتی شناخته شده است[۳۵].

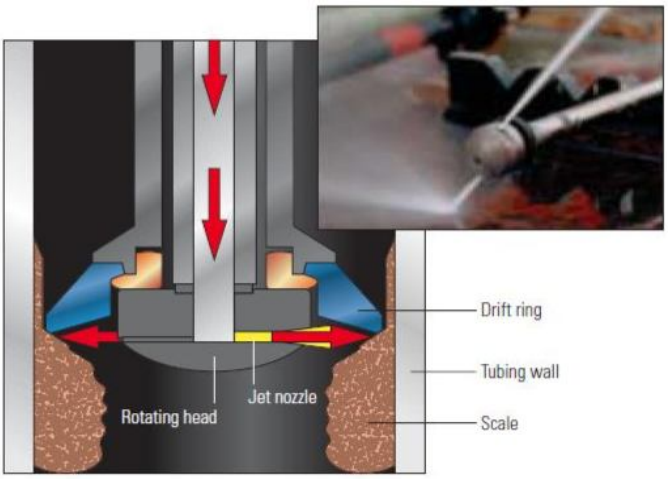
در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده به نمک‌های فلزی به عنوان راه حلی کارآمد به منظور حذف رسوبات سیلیس در میادین نفتی اشاره شده است. کاتیون‌های چندظرفیتی با ایجاد یک پل بین ذرات کلوئیدی سیلیس و با توجه به کاهش حلالیت آن‌ها زمینه‌ساز حذف سریع‌تر و آسان این رسوبات خواهد شد[۳۶]. از فلزهای معدنی مورد استفاده در این پژوهش‌ها می‌توان به آلومینیوم [۳۸،۳۷]، آهن [۳۹]، روی[۴۱،۴۰]، مولیبدنوم [۴۲] اشاره کرد. حلالیت سیلیس در آب به pH بسیار وابسته است؛ به ویژه بالاتر از ۸ و در حضور غلظت زیاد سیلیس تشکیل رسوب سیلیکاتی به میزان قابل توجهی خواهد بود در pH و تمیزکاری آن بسیار

مشکل است؛ که با وجود این شرایط نمک‌های فلزی (آهن،روی، آلومینیوم و مولیبدنوم) نمی‌توانند کارایی مطلوبی داشته باشند. لذا استفاده از مواد شیمیایی اسیدی برای حذف رسوب سیلیکاتی کارآمدتر می‌باشد.

روش‌های مکانیکی

روش مکانیکی به عنوان یک روش موفقیت آمیز در رفع اثر مشکلات ناشی از رسوبات معدنی در صنعت نفت و گاز قلمداد می‌شود. این در حالی این روش دارای محدودیت در کاربرد است. یکی از روش‌های موجود در راه حل مکانیکی استفاده از مواد منفجره است که با توجه به تولید انرژی زیاد دارای کارایی مطلوبی است ولی معمولاً سبب خسارت به لوله تجهیزات میادین نفتی می‌شود[۴۳].

روش سیستم جت تحت فشار (jetting) از روش‌های مرسوم در کاربرد تکنولوژی مکانیکی به منظور حذف رسوبات معدنی در میادین نفتی است. معمولاً در حذف رسوبات کلسیم و باریم سولفات که با اسید واکنش نمی دهند از تکنولوژی Jetting و Pigging استفاده می‌شود [۴۳،۴۲،۳۴]. از نمونه‌های مرسوم تکنولوژی جت می‌توان به Halliburton's Hydroblast اشاره کرد که در ستون چاه بهره برداری نفت از آن استفاده می-شود. در این تکنولوژی جریان پرفشاری از سیال به محل تشکیل رسوب معدنی در چاه بهره برداری به وسیله یک ابزار (ورود آن به درون چاه به وسیله لوله مغزی سیار انجام می‌شود) در حال چرخش پمپ می‌شود که با توجه به فشاری مداومی که به رسوبات معدنی ایجاد شده می‌آورد سبب تخریب تدریجی و در نهایت متلاشی شدن ساختار رسوب خواهد شد. سیستم جت تحت فشار آب از مهم‌ترین تکنولوژی تحت فشار است که برای رفع اثر رسوب سدیم کلرید مؤثر است ولی برای رسوبات سخت هم چون کلسیم کربنات و باریم سولفات اثرگذار نمی‌باشد [۴۳]. شکل ۲ روند حذف رسوبات معدنی را با توجه به تکنولوژی جت نشان می‌دهد.

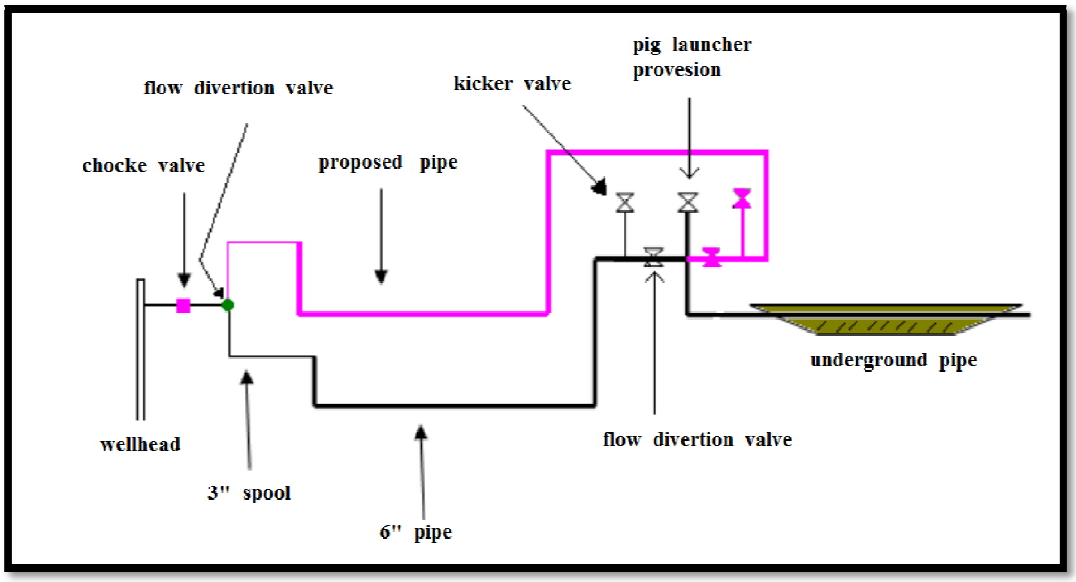


شکل ۲. روش حذف مکانیکی رسوبات معدنی در میادین نفتی[۴۲]

این در حالی است که این روش مکانیکی با تکنولوژی جت صرفاً رسوبات را از محل ته نشینی رسوب جدا می‌کند و برای رفع اثر کامل رسوب شستشوی شیمیایی لازم و ضروری است؛ لذا این روش نمی‌تواند یک روش کارآمد و مقرون به صرفه اقتصادی باشد. به طور کلی روش‌های مکانیکی از جمله سیستم جت با وجود نتایج موفقیت آمیز دارای معایبی از جمله هزینه های زیاد تعمیر، نگهداری و عدم امکان استفاده در حذف رسوبات معدنی در مخزن تولید هیدروکربن می باشند.

روش ترکیبی روش شیمیایی - مکانیکی

این روش توسط التایب و رباح در سال ۲۰۱۳ [۴۴] با تقسیم ناحیه سطحی و زیر سطحی خطوط لوله میدان حوزه نفتی دیفرا، ارائه شد. ناحیه بالای سطح زمین شامل شیر، چوک و خط لوله غیر یکنواخت و ناحیه پایینی شامل خط لوله یکنواخت در نظر گرفته شد. روش به‌کار گرفته شده برای حذف رسوبات میدان نفتی مورد مطالعه، ترکیب دو روش شیمیایی و مکانیکی به طور همزمان می‌باشد. برای ناحیه بالایی روش شیمیایی با پشتیبانی یک خط گذرگاه فرعی در نظر گرفته شد و برای ناحیه پایینی فرآیند مکانیکی pigging استفاده شد. شکل ۲ بخش بندی خطوط لوله منطقه نفتی مورد مطالعه برای به‌کارگیری روش ترکیبی را نشان می دهد.



شکل۳. تقسیم بندی خطوط لوله منطقه مورد مطالعه به منظور استفاده روش ترکیبی (شیمیایی- مکانیکی)[۴۴]

این روش با توجه به کاهش قابل توجه در استفاده از مواد شیمیایی می‌تواند سبب کاهش اثرات زیست محیطی و از همه مهم‌تر مقرون به صرفه در بحث هزینه‌ها باشد. هرچند این روش برای خطوط لوله کارایی خوبی از خود نشان داده است ولی برای محل‌های مهم دیگر از جمله مخزن زیر سطحی تولید هیدروکربن و

در نزدیکی دهانه ورودی ستون چاه نفت که گزینه مناسبی برای تجمع و ته نشینی رسوبات معدنی است؛ اثرگذار نخواهد بود.

روش الکتروکواگولاسیون (Electrocoagulation)

این روش به عنوان تسهیل حذف رسوبات معدنی با توجه به یک جریان الکتریکی از طریق دو صفحه موازی، شناخته شده است. در این روش هیدروکسیدهای فلزی از جمله هیدروکسید آلومینیوم به منظور بهبود حذف رسوب سیلیس استفاده می‌شود. در این روش با ایجاد پل بین کلوئیدهای رسوب سیلیس، می‌توان تجمع و ترکیب سریع‌تر ذرات کوچک‌تر را، به منظور حذف آسان‌تر آن انتظار داشت[۴۷-۴۵]. بحث اقتصادی روش الکتروکواگولاسیون با توجه به کاهش هزینه علمیاتی نسبت به روش شیمیایی می‌تواند آن را در گزینه به‌کارگیری در صنعت نفت و گاز قرار دهد [۴۸]. با این حال مشکل تشکیل لجن با توجه به کاربرد هیدروکسید آلومینیوم در این روش، می‌تواند سبب بی‌توجهی به آن در به‌کارگیری در صنعت نفت و گاز باشد.

نتیجه گیری

امروزه عملیات بازیابی نفت با به‌کارگیری یکی از سه روش تزریق آب، تزریق گاز (معمولاً دی اکسید کربن) و تزریق مواد شیمیایی (قلیایی، سورفکتانت، پلیمر) در میادین نفتی به منظور بهبود بازیافت نفت روند چشمگیری داشته است. روش‌های بازیافت نفت هرچند با جابه‌جایی نفت محبوس شده در سازند، سبب افزایش بازیافت خواهند شد ولی با به‌کارگیری آن تشکیل رسوبات معدنی در سازند و تجهیزات سطحی میادین نفتی، دور از انتظار نیست. وجود این رسوبات می‌تواند سبب خاموش کردن اضطراری و کاهش قابل توجه تولید نفت شود. لذا ضروری به نظر می‌رسد که با توجه به موقعیت مکانی و خواص فیزیکی رسوبات معدنی با اتخاذ راهکارهای کارآمد از جمله به کارگیری روش‌های مرسوم از قبیل روش شیمیایی، مکانیکی، ترکیبی شیمیایی- مکانیکی و الکتروکواگولاسیون مشکلات ناشی از تشکیل این رسوبات را رفع نمود. براساس این مطالعه روش‌شیمیایی نسبت به سه روش دیگر مقرون به صرفه‌ترین روش از جنبه اقتصادی می‌باشد؛ که برای رسوبات کربناتی با توجه به وابستگی آن‌ها به pH از اسیدهای شیمیایی هم‌چون اسیدهیدروکلریک و اسید سولفوریک استفاده می‌شود اما برای رسوبات سولفاتی با توجه به عدم وابستگی آن‌ها به pH، استفاده از مواد اسیدی کارایی نخواهد داشت. هرچند برای کلسیم سولفات می‌توان به کمک تبدیل کننده معدنی مانند هیدروکسید، آن‌ها را به کلسیم هیدروکسید تبدیل نمود و با استفاده از اسیدهیدروکلریک آن را حذف کرد. این در حالی است که به‌کارگیری روش‌های مکانیکی از جمله تکنولوژی تحت فشار با تزریق سیال، شرایط را برای حذف رسوباتی هم‌چون باریم سولفات و استرانسیم سولفات که در برابر روش‌های شیمیایی مقاوم هستند؛ فراهم می‌نماید. روش ترکیبی شیمیایی- مکانیکی روش قابل توجه دیگری در بحث حذف رسوبات معدنی در میادین نفتی می‌باشد که در آن با توجه به کاهش قابل ملاحظه در استفاده از مواد شیمیایی، اثرات زیست محیطی کاهش محسوسی دارد. هم‌چنین روش الکتروگوالاسیون به

واسطه جریان الکتریکی، با ایجاد پل بین کلوئیدهای سیلیسی، زمینه حذف آسان‌تر رسوبات سیلیکاتی را فراهم می‌نماید. البته تمام روش‌های ارائه شده دارای محدودیت کاربرد و معایب می‌باشند به گونه‌ای که روش‌های شیمیایی خطرات زیست محیطی در پی دارند. هم‌چنین روش‌های مکانیکی دارای هزینه‌های تعمیر و نگهداری، زمان‌بر بودن عملیاتی و محدودیت کاربرد در مخزن سازند میادین نفتی هستند که این شرایط در روش ترکیبی شیمیایی- مکانیکی هم صادق می‌باشد. روش الکتروگوالاسیون به واسطه کاربرد هیدروکسیدهای فلزی از جمله هیدروکسید آلومینیوم در آن، تشکیل لجن را در فرآیند حذف به همراه دارد. لذا از آنجایی محلول‌های الکترولیتی پیچیده‌ترین نوع محلول‌ها در صنایع شیمیایی از جمله محلول آبی سازند میادین نفتی می‌باشند؛ ضروری به نظر می‌رسد که با توجه به مدل‌های ترمودینامیکی، شرایط اشباعیت رسوب معدنی را در میادین پیش بینی نموده و با اعمال مواد بازدارنده از تشکیل رسوب معدنی جلوگیری کرد. هرچند در صورت تشکیل رسوب، حذف شیمیایی رسوب با حلال و مواد شیمیایی اسیدی نسبت به سه روش مورد مطالعه از ارجعیت بیش‌تری برخوردار است.

تشکر وقدردانی

نهایت تشکر را از همکاری‌های مهندس سیدعبدالرسول هاشمی از شرکت بهره برداری نفت و گاز گچساران داریم.

منابع

۱. مک‌کین، ویلیام، ۱۹۹۰، ویژگی‌های سیال‌های نفتی، خشایار نصری‌فر، محمود مشفقیان، چاپ اول، شیراز: مرکز نشر دانشگاه شیراز،۱۳۷۹.

2. Ken,A ; Maurice,s,. Surface Production Operations Design of Oil Handling Systems. Third Edition, United States of America,Gulf Professional Publishing,2008.

3. Atkinson, G., Oklahoma, U., Raju, K., Aramco, S., Howell R.D, The thermodynamics of scale prediction .1991. SPE 21021, 209-215.

4. Jordan, M. M. and Mackay, J. E, Field Development for Effective Scale Control Throughout the Water Cycle. The SPE Europec/EAGE Annual Conference. 2005. June 13 – 16. Madrid, Spain: SPE 94052, 1 –9.

5. Mackay, J. E,Scale Inhibitor Application in Injection Wells to Protect Against Damage to Production Wells. The SPE European Formation Damage Conference. May 25 – 27. 2005.Scheveningen, Netherlands: SPE 95022, 1 –9.

6.Umar.A.A ., Saaid.M.I., Silicate Scales Formation During ASP Flooding. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. 6(9),pp. 1543-1555.

7. Jing,G ., Tang,S ., Li,X ., Wang, The analysis of scaling mechanism for water-injection pipe columns .Arabian Journal of Chemistry In Press, Corrected Proof, 2013.

8. Umar.A.A ., Saaid,M.I.B, Effects of Temperature on Silicate Scale Inhibition During ASP Flooding.Journal of Applied Sciences.2014. 14,pp. 1769-1774.

9. Yu,L ., Wang,B ., Sun,X , Scale Formation of ASP Flooding. Advanced Materials Research.2011. 1406 ,pp. 356-360.

10. Yuan, M., Todd, A.C., Sorbie, K.S, Sulfate scale precipitation arising from seawater injection. Marine and Petroleum Geology .1994.11(1), 24-30.
11. Shams El Din, A.M., Mohammed, R.A, The problem of alkaline scale formation. Desalination.1989. 71, 313-324.
12. Bittner, S., Zemlak, K. and Korotash, B,. coild tubing scale removal of iron sulfide .SPE Paper No.60695, Housten, Texas..2000
13. Ebenezer,S.A, Tracer Behavior in Pipelines with Deposits & Analysis of Pressure Function. Diploma Thesis Work, Petroleum Engineering & Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology Trondheim.2006.
14. Wat, R.M.S., Sorbie, K.S., Todd, A.C., Chen, P., Jiang, P., Kinetics of $BaSO_4$ crystal growth. 1992.SPE 23814, 429-437.
15. Crabtree, M., Eslinger, D., P., Mille, M., Johnson, A. and King, G. Fighting Scale – Removal and prevention, Schlumberger oilfield Review, Autumn, 1999.
16. Sorbie, K.S., Mackay, E.J,.Mixing of injected, connate and aquifer brines in water flooding. Journal of Petroleum Science and Engineering.2000. 27, 85-106.
17. Jiecheng, C., Wanfu ,C., Yushang, Z ., Guangtian, X., Chengfeng, R., Zhangang, P., Wenguang, B., Zongyu, Z., Xin, W., Hairon, F., Qingguo, W., Xianxiao ,Q., Lei, S, principle andscaling prediction in ASP flooding producers .Proceedings of SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia.2011.pp. 1-6.
18. Bin- Merdhah,A.B.M, Scale Formation In Oil Reservoir During Water Injection.Master thesis , Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering Universiti Teknologi Malaysia,2007.
۱۹.صبور، سمانه؛ لطف اللهی، محمد نادر؛ متحدین ، پویا، تعیین مقدار رسوب در فرآیند تزریق آب. نشریه شیمی و مهندسی شیمی، دوره ۳۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱
20. Moghadasi, J., Jamialahmadi, M., Muller-Steinhagen, H., Sharif, A, Formation Damage Due to Scale Formation in Porous Media. The SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage control. February 18-20. Lafayette, Louisiana.2004b. SPE 86524, 1 – 11.
21. Maheshwari.Y.K , .A, Simulation Study of Chemical EOR Methodologies .Master Thesis, NTNU, 2011.
22. Samanta,A Bera.A ., Ojha ,K ., Mandal,A, enhanced oil recovery by alkali–surfactant and polymer flooding. J Petrol Explor Prod Technol.2012. 2,pp.67–74.
23. Abadli,F. SemesterProject, Investigation of Polymer Flooding. NTNU, December .2011.
24. Pan,W ., Xu,O ., Li,H , Silica Scale in ASP Flooding. Advanced Materials Research.2013. 868, pp.580-584.
25. Jiecheng, C., Wanfu ,C., Yushang, Z ., Guangtian, X., Chengfeng, R., Zhangang, P., Wenguang, B., Zongyu, Z., Xin, W., Hairon, F., Qingguo, W., Xianxiao ,Q., Lei, S.Scaling principle andscaling prediction in ASP flooding.,Proceedings of SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia,pp. 1-6,2011.
۲۶. تزریق گاز به مخازن نفتی،شرکت نفت و گاز پارس، www.pogc.ir/Portals/0/maghalat/890423-4.pdf
۲۷.حق طلب، علی؛ تاکی، طوبی. مدلسازی ترمودینامیکی حلالیت گاز دی اکسید کربن. فصلنامه تخصصی فرآیند نو، شماره۳۹ : ۵-۱۴ .۱۳۹۱.

۲۸. عادل زاده، محمدرضا. انواع آسیب‌های وارد بر سازند . مجله اکتشاف و تولید شرکت نفت، شماره ۱۱۵، ۱۳۹۲.

29.Masoudi,R,. Tohidi,B,.Danesh.A., Modelling Gas Solubility in Saline Solutions.13th Oil, Gas & Petrochemical Congress withparticular emphasize on Improved Oil Recovery, Tehran, Iran, 2005.

30. Brown M .Full Scale Attack Review. The BP Technology Magazine (October-December-1998,30:30-32.

31. Bedrikovetsky, G. P., Mackay, E., Monteriro, P. R., Gladstone, M. P. and Rosario, F. F. Prediction of Sulfate Scaling Damage .2006. The SPE International Oilfield Scale Symposium. May 30 –1 June. 2006.Aberdeen, UK: SPE 100611, 1 – 18.

32. Guimaraes, Z., Franca, B. A., Duque, H. L, Souza, D. B. R., Porto, M., Neves, D. and Peixoto, C. Barium Sulfate Scale Removal in Offshore Wells. 2007. Case The SPE/ICOTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition.2007. March 20 – 21. Texas, USA: SPE 107063, 1 – 8.

33. Connell, D. Prediction and Treatment of Scale. Heriot-watt university . M.E. Thesis.1983.

34. Harding, K., D.A. Brikdle,.Chemical descaling of acid dosed desalination plants.Thorne.F. Desalination, 1978. 27(3): p. 273-282.

35. Martel AE and Calvin M, Chemistry of Metal Chelate Compounds, New York, USA: Prentice-Hall, Inc, 1952.

36. Milne,N.A ., O'Reilly,T ., Sanciolo,P ., Ostarcevic,E ., Beighton,M ., Taylor,K ., Mullett,M ., Tarquin,A.J ., Gray,S.R.Chemistry of silica scale mitigation. Water research .2014.65, 107-133.

37. al-Rehaili, A.M. silica removal from RO groundwater feed. Desalination .2003.159,21-31.

38. Sheikholeslami, R., Bright, J. Silica and metals removal. Desalination. 2002.143, 255-267.

39. Bremere, I., Kennedy, M., Mhyio, S., Jaljuli, A., Witkamp, G.-J., Schippers, J. removal of monomer and polymer silica.Desalination.2000. 132, 89-100.

40. Zeng, Y., Yang, C., Pu, W., Zhang, X.Removal of silica from heavy oil wastewater.Desalination.2007. 216, 147-159.

41. Shibayama, H., Imai, S., Tamura, Y. Removal of Silicic Acid from Water . JP4250494, Japan.1991.

42. Pamidimukkala,P.K.Master Thesis, Scaling Potentials In Marcellus Shale Gas Wells, The Pennsylvania State University The Graduate School.2012.

43. Johnson, A., Eslinger, D. and Larsen, H. Abrasive Jetting Scale – Removal system. SPE paper No.46026, March-1998, Housten, Texas.

44.Eltaib, O. E ., Rabah , A.A. Crude Oil Pipeline Scale Deposition: Causes and Removal Methods. Annual Conference of Postgraduate Studies and Scientific Research . 2012. Vol. 1 pp. 38-42

45. Bond, R., Veerapaneni, S. Zero Liquid Discharge for InlandDesalination.American Water Works Association Research Foundation, Sacramento, USA.2007.

46. Potapov, V.V., Karpov, G.A., Podverbnyi, V.M. Removal of silica from geothermal brine. Theor. Found. Chem. Eng.2002. 36,89-95.

47. Den, W., Wang, C.-J. Removal of silica from brackish water by electrocoagulation. Separ. Purif. Technol. 2008.59,318-325.

48. Hamilton, R.L. Treatment of Produced Water.Hamilton Engineering, Denver, USA.2009.