



مروری بر کاربرد و نقش نانوذرات در اصلاح ترشوندگی سنگ‌های مخزنی به منظور بهبود فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت

احمد رضا عبدشاهی^{۱*}، محمد معین شهریار^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، گرایش حفاری، دانشگاه امیرکبیر

ahmadreza.abdshahi@aut.ac.ir

۲. کارشناس مهندس نفت، دانشگاه صنعت نفت m.moein.shahriary@gmail.com

چکیده

مخازن کربناته بخش قابل توجهی از ذخایر نفتی جهان را در خود جای داده‌اند، اما به دلیل ماهیت غالباً نفت‌دوست یا ترشوندگی مختلط، بازیافت نفت از آن‌ها با چالش‌های جدی همراه است. چسبندگی ترکیبات قطبی نفت خام به سطح کربناته، کاهش آب‌آشامی خودبه‌خودی و باقی‌ماندن نفت در منافذ ریز و ماتریس سنگ از مهم‌ترین عواملی هستند که راندمان برداشت را محدود می‌کنند. از این رو، اصلاح ترشوندگی سطح سنگ از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست، یکی از راهکارهای مؤثر در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت محسوب می‌شود.

هدف این مقاله، مرور و تحلیل نقش نانوذرات در تغییر ترشوندگی مخازن کربناته و بررسی عوامل مؤثر بر کارایی آن‌ها در بهبود برداشت نفت است. در این راستا، عملکرد نانوذرات مختلف از جمله SiO_2 ، TiO_2 ، ZrO_2 و NiO ، اثر اصلاح سطح، شرایط شوری و دمای بالا، و همچنین هم‌افزایی نانوذرات با سورفکتانت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات به دلیل اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و قابلیت جذب روی سطح سنگ، می‌توانند با تغییر انرژی سطحی، کاهش زاویه تماس، افزایش فشار نازک‌فیلم و جداسازی لایه نفتی جذب‌شده، سطح کربناته را آب‌دوست‌تر کنند. همچنین نانوذرات اصلاح‌شده سطحی نسبت به نمونه‌های خام، پایداری کلوئیدی و عملکرد بهتری در شرایط سخت مخزنی دارند. ترکیب نانوذرات با سورفکتانت‌ها نیز می‌تواند با کاهش کشش بین‌سطحی و تقویت اصلاح ترشوندگی، آب‌آشامی خودبه‌خودی و راندمان جابه‌جایی نفت را افزایش دهد. به‌طور کلی، نانوذرات راهکاری امیدبخش برای بهبود ازدیاد برداشت از مخازن کربناته هستند، مشروط بر آنکه فرمولاسیون آن‌ها متناسب با شرایط واقعی مخزن طراحی شود.

واژگان کلیدی: ترشوندگی، نانوذرات، ازدیاد برداشت نفت، مخازن کربناته

۱. مقدمه

در چشم‌انداز کنونی صنعت نفت و گاز، بیش از دوسوم ذخایر هیدروکربنی جهان در مخازن کربناته قرار دارند که به دلیل ماهیت ناهمگن و رفتار ترشوندگی پیچیده، با چالش‌های جدی در بازیابی نفت مواجه هستند. ترشوندگی^۱، به عنوان پارامتر حاکم بر توزیع سیال در حفرات محیط متخلخل و نیروی محرکه اصلی در فرآیندهای تخلیه خودبه‌خودی، نقشی تعیین‌کننده در راندمان تولید ایفا می‌کند. با این حال، مخازن نفتی در طول عمر زمین‌شناسی خود و در اثر مهاجرت نفت خام، اغلب از حالت آب‌دوست به حالت نفت‌دوست تغییر می‌یابند [۱، ۲].

یکی از عوامل اصلی و مخرب در تغییر ترشوندگی سنگ‌های مخزن، رسوب‌گذاری اجزای قطبی و سنگین نفت خام، به‌ویژه آسفالتین است. جذب سطحی مولکول‌های آسفالتین بر روی دیواره حفرات، انرژی سطحی سنگ را به‌طور چشمگیری تغییر داده و منجر به کاهش پتانسیل برداشت می‌شود. برای مقابله با این پدیده و بازگرداندن ترشوندگی به حالت مطلوب (آب‌دوست)، استفاده از سورفکتانت‌ها به عنوان بازدارنده‌های شیمیایی، دهه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، سورفکتانت‌های متداول در شرایط مخزنی با دما و شوری بالا، دچار افت عملکرد، تجزیه حرارتی و جذب بیش از حد روی سطح سنگ می‌شوند که از لحاظ اقتصادی و عملیاتی چالش‌برانگیز است [۳-۶].

ظهور فناوری نانو و استفاده از نانوذرات^۲ به عنوان یک پارادایم نوین، رویکرد جدیدی را در مهندسی مخزن ایجاد کرده است. نانوذرات به واسطه ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انرژی سطحی زیاد، و قابلیت اصلاح خواص فیزیکوشیمیایی در مقیاس مولکولی، بر محدودیت‌های روش‌های سنتی فائق آمده‌اند. مکانیسم‌های متعددی برای فعالیت نانوذرات در محیط متخلخل پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آن‌ها ایجاد فشار جدایش ساختاری^۳، کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر مورفولوژی سطح سنگ است که منجر به جدا شدن لایه نفت از سطح سنگ می‌شود [۱، ۷].

تحقیقات اخیر نشان داده است که عملکرد نانوذرات به شدت تحت تأثیر پارامترهای فیزیکی مانند اندازه ذرات و غلظت تزریقی است. علاوه بر این، جهت دستیابی به بالاترین کارایی، رویکردهای ترکیبی شامل استفاده هم‌زمان از نانوذرات تغییر شکل یافته و سورفکتانت‌ها به شدت مورد توجه قرار گرفته است؛ چرا که این هم‌افزایی^۴ نه تنها باعث افزایش پایداری نانوسیالات در شرایط سخت مخزنی می‌شود، بلکه نفوذپذیری و بازدهی عملیات ازدیاد برداشت را به میزان قابل توجهی ارتقا می‌دهد [۸-۱۰].

با وجود پیشرفت‌های گسترده در مطالعات آزمایشگاهی، هنوز شکاف‌های دانشی قابل توجهی در درک رفتار بلندمدت نانوذرات در محیط‌های متخلخل واقعی وجود دارد. از این رو، هدف از این مقاله مروری، ارائه تحلیلی جامع بر نقش نانوذرات در اصلاح ترشوندگی سنگ‌های مخزنی است. در این مطالعه، ضمن طبقه‌بندی مکانیسم‌های حاکم بر تعامل نانوذرات با سطوح کربناته و ماسه‌سنگی، تأثیر عوامل عملیاتی بر پایداری نانوسیالات بررسی شده و چشم‌اندازی روشن برای توسعه نسل بعدی سیالات هوشمند جهت عملیات ازدیاد برداشت ارائه می‌گردد.

¹ Wettability

² Nanoparticles

³ Structural Disjoining Pressure

⁴ Synergy

۲. پیشینه پژوهش

ابوالفضل دهقان‌منفرد و همکاران در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی که با هدف بررسی مکانیزم و کارایی نانوذرات سیلیکا در اصلاح ترشوندگی کلسیت‌های نفت‌دوست انجام دادند، نشان دادند که نانوسیال‌های سیلیکا می‌توانند به‌صورت معناداری ترشوندگی سطح سنگ را از حالت شدیداً نفت‌دوست به سمت آب‌دوست تغییر دهند و این تغییر، تابعی از غلظت نانوذرات، زمان تماس، شوری محیط و پایداری سامانه بود. بر اساس نتایج ارائه‌شده در مقاله، در غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، زاویه تماس کلسیت از ۱۵۶ درجه به ۷/۴۱ درجه کاهش یافت که بیانگر یک تغییر بسیار شدید از وضعیت نفت‌دوست به آب‌دوست است. نویسندگان نشان دادند که با افزایش غلظت نانوذرات، شدت تغییر ترشوندگی بیشتر می‌شود و این اثر تنها به حضور نانوذره محدود نیست، بلکه با گذشت زمان نیز تقویت می‌شود؛ به عبارت دیگر، فرآیند اصلاح ترشوندگی ماهیتی وابسته به زمان دارد و سامانه در بازه‌های زمانی طولانی‌تر به سمت زاویه تماس کمتر و حالت آب‌دوست‌تر حرکت می‌کند. همچنین حضور نمک، برخلاف آنچه در برخی سامانه‌های حساس به الکترولیت مشاهده می‌شود، در این مطالعه نقش تقویت‌کننده در تغییر ترشوندگی داشت و نشان داد که در شرایط شورتر نیز نانوذرات سیلیکا می‌توانند عملکرد خود را حفظ کنند. این مسئله از آن جهت مهم است که پایداری نانوسیال در محیط‌های شور یکی از چالش‌های اصلی کاربرد آن‌ها در مخازن کربناته است. از منظر مکانیزمی، این پژوهش صرفاً به گزارش تغییر زاویه تماس اکتفا نکرده، بلکه نویسندگان با تکیه بر دو معادله پیشنهادی و استفاده از ابزارهای تحلیلی مختلف، سازوکار حاکم بر تغییر ترشوندگی را تبیین کرده‌اند. مطابق جمع‌بندی مقاله، نانوذرات سیلیکا با ایجاد برهم‌کنش‌های سطحی مؤثر، تغییر انرژی بین‌سطحی و مساعد کردن شرایط برای گسترش فاز آبی روی سطح سنگ، موجب کاهش پایداری فیلم نفتی جذب‌شده بر سطح کلسیت می‌شوند. از سوی دیگر، افزایش غلظت نانوذرات تا محدوده ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نشان داد که در محدوده بررسی‌شده، شدت اصلاح ترشوندگی همچنان روند افزایشی دارد و از این حیث، غلظت یک پارامتر کلیدی در طراحی نانوسیالات EOR محسوب می‌شود. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که نانوذرات سیلیکا در غلظت‌های پایین تا متوسط، به‌ویژه در حضور شرایط شوری کنترل‌شده، قادرند ترشوندگی کلسیت‌های نفت‌دوست را به‌طور چشمگیر اصلاح کنند و این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت در مخازن کربناته تبدیل می‌کند [۴].

ون یوئه تانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی که با هدف بررسی هم‌افزایی نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده سطحی و سورفکتانت در تغییر ترشوندگی کلسیت در شرایط شوری و دمای بالا انجام دادند، نشان دادند که اصلاح شیمیایی نانوذرات سیلیکا می‌تواند پایداری کلئیدی آن‌ها را در آب‌نمک‌های بسیار شور حفظ کرده و هم‌زمان موجب بهبود چشمگیر اصلاح ترشوندگی شود. در این مطالعه، دو سامانه آب‌نمکی مخزنی با شوری ۷/۱۶ درصد کل جامدات محلول در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ۷/۲۵ درصد کل جامدات محلول در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که نانوذرات اصلاح‌شده با گروه‌های کاتیونی در غلظت ۱ وزنی درصد توانستند زاویه تماس سنگ کلسیتی را از محدوده ۱۲۵ تا ۱۵۹ درجه، که بیانگر ترشوندگی شدید نفت‌دوست بود، به محدوده ۶۹ تا ۸۵ درجه برای نفت خام سبک و ۷۱ تا ۱۰۷ درجه برای نفت خام سنگین کاهش دهند و بدین ترتیب سطح سنگ را به سمت حالت ترشوندگی متوسط سوق دهند. همچنین سورفکتانت تترا دسیل تری‌متیل آمونیوم بروماید در غلظت ۱ وزنی درصد توانست ترشوندگی را تا حالت آب‌دوست‌تر ارتقا دهد، به‌طوری‌که زاویه تماس به ۴۱ تا ۵۹ درجه برای نفت خام سبک و ۷۰ تا ۹۰ درجه برای نفت خام سنگین کاهش یافت. افزون بر این، ترکیب نانوذرات اصلاح‌شده با سورفکتانت، اثر هم‌افزایی قابل توجهی نشان داد و باعث کاهش اضافی حدود ۱۰ درجه در زاویه تماس شد. از نظر پایداری، اندازه هیدرودینامیکی نانوذرات در مدت ۱۴ روز فقط افزایش جزئی نشان داد که حاکی از پایداری مناسب سامانه حتی در شوری ۷/۲۵ درصد و دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد بود. به طور کلی، این پژوهش



نشان داد که استفاده توأمان از نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده سطحی و سورفکتانت می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود تغییر ترشوندگی کلسیت در شرایط مخزنی سخت باشد [۹].

احسان جعفریگی و همکاران در سال ۲۰۲۶ در مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی تأثیر یک نانوسیال جدید بر اصلاح ترشوندگی سنگ، پایداری مولکولی آسفالتن و بهبود برداشت نفت، نشان دادند که استفاده از نانوسیال می‌تواند به‌صورت هم‌زمان چند سازوکار مؤثر در ازدیاد برداشت نفت را فعال کند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوسیال پیشنهادی قادر است ترشوندگی سطح سنگ را از حالت شدیداً نفت‌دوست به حالت آب‌دوست تغییر دهد؛ به‌طوری‌که زاویه تماس از ۱۵۲ درجه به ۲۷ درجه کاهش یافت. این کاهش چشمگیر زاویه تماس بیانگر تغییر محسوس انرژی سطحی سنگ و افزایش تمایل فاز آبی به گسترش روی سطح جامد است که می‌تواند خروج نفت محبوس‌شده در محیط متخلخل را تسهیل کند. همچنین، اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی نشان داد که مقدار IFT از ۲۴/۱۹ میلی‌نیوتن بر متر به ۱۰/۱ میلی‌نیوتن بر متر کاهش یافته است. چنین کاهش در کشش بین‌سطحی باعث کاهش نیروهای موئینگی مقاوم در برابر حرکت نفت شده و در نتیجه، جابه‌جایی نفت در منافذ سنگی را بهبود می‌بخشد. جعفریگی و همکاران همچنین پایداری آسفالتن را در حضور نانوسیال بررسی کردند و گزارش دادند که مقدار آسفالتن در حضور ذرات سنگ به حداقل ۵۵/۰ درصد رسید. این نتیجه نشان می‌دهد که نانوسیال مورد استفاده علاوه بر اصلاح ترشوندگی و کاهش کشش بین‌سطحی، می‌تواند در کنترل ناپایداری آسفالتن و کاهش رسوب‌گذاری آن نیز نقش داشته باشد. از آنجا که رسوب آسفالتن یکی از عوامل مهم کاهش تراوایی، آسیب سازند و افت راندمان تولید در مخازن نفتی است، بهبود پایداری مولکولی آسفالتن می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر حفظ یکپارچگی مخزن و افزایش کارایی فرآیندهای EOR داشته باشد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان داد که نانوسیال پیشنهادی با تأثیر هم‌زمان بر سه عامل کلیدی شامل تغییر ترشوندگی، کاهش کشش بین‌سطحی و تثبیت آسفالتن، می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای افزایش بازیافت نفت در شرایط شبیه‌سازی‌شده مخزنی باشد [۳].

حسینی و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مطالعه‌ای بر روی اصلاح ترشوندگی مخازن کربناته نفت‌دوست با استفاده از نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم اصلاح‌شده سطحی، نتیجه گرفتند که اصلاح سطح نانوذرات TiO_2 با عامل AEAPTMS می‌تواند پایداری نانوسیال را در شرایط سخت مخزنی افزایش داده و هم‌زمان ترشوندگی سنگ را به‌طور مؤثر از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست تغییر دهد. در این پژوهش، پایداری نانوسیال با استفاده از آزمون‌های پتانسیل زتا و پراکندگی نور دینامیکی بررسی شد و نتایج نشان داد که نانوسیال تهیه‌شده در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۲۰ درصد وزنی از پایداری مناسبی برخوردار است. همچنین، نتایج اندازه‌گیری زاویه تماس نشان داد که سنگ اولیه دارای رفتار شدیداً نفت‌دوست بوده و زاویه تماس پیش‌رونده و پس‌رونده آن به‌ترتیب ۱/۱۶۵ و ۲/۱۶۶ درجه گزارش شده است. پس از تیمار سطح با ۳ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 اصلاح‌شده، زاویه تماس پیش‌رونده به ۶/۳۷ درجه و زاویه تماس پس‌رونده به ۲/۴۸ درجه کاهش یافت که بیانگر تغییر قابل‌توجه ترشوندگی به سمت حالت آب‌دوست است. این پژوهش همچنین نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره، توانایی سامانه در اصلاح ترشوندگی افزایش می‌یابد. بر این اساس، نویسندگان نتیجه گرفتند که نانوذرات TiO_2 اصلاح‌شده سطحی به دلیل پایداری مناسب در دما و شوری بالا و توانایی چشمگیر در کاهش زاویه تماس، می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مؤثر برای بهبود فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت در مخازن کربناته مورد استفاده قرار گیرند [۱۰].



۳. بحث و نتایج

۱.۳. نقش اصلاح سطح نانوذرات در بهبود عملکرد نانوسیال‌ها در اصلاح ترشوندگی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های استفاده از نانوذرات در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت، حفظ پایداری آن‌ها در محیط‌های پیچیده و سخت مخزنی است. نانوذرات به دلیل اندازه بسیار کوچک و سطح ویژه بالا، از نظر تئوری ظرفیت زیادی برای برهم‌کنش با سطح سنگ و تغییر ویژگی‌های بین‌سطحی دارند؛ با این حال، همین ویژگی‌ها باعث می‌شود که آن‌ها از نظر ترمودینامیکی مستعد تجمع و ناپایداری باشند. این مسئله به‌ویژه در شرایط شوری بالا، حضور یون‌های دوزرفیتی مانند کلسیم و منیزیم، دمای زیاد و محیط متخلخل سنگ‌های کربناته شدت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، نانوذرات خام ممکن است به‌سرعت دچار آگلومراسیون شده، رسوب کنند یا در گلوگاه‌های ریز محیط متخلخل تجمع یابند و در نتیجه کارایی آن‌ها در تغییر ترشوندگی و بهبود برداشت نفت کاهش یابد. از این رو، اصلاح سطح نانوذرات به‌عنوان یکی از راهکارهای کلیدی برای افزایش پایداری نانوسیال و بهبود عملکرد آن در محیط مخزن مطرح شده است [۹، ۱۰].

اصلاح سطح نانوذرات به معنای تغییر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی سطح آن‌ها از طریق اتصال گروه‌های عاملی، مواد آلی، ترکیبات سیلانی یا سایر عوامل اصلاح‌کننده است. هدف اصلی از این فرآیند، کنترل برهم‌کنش نانوذره با فاز آبی، فاز نفتی، سطح سنگ و سایر افزودنی‌ها مانند سورفکتانت‌هاست. در واقع، با اصلاح سطح می‌توان بار سطحی، آب‌دوستی یا آب‌گریزی، پایداری الکترواستاتیکی، ممانعت فضایی، و قابلیت جذب نانوذره بر سطح سنگ را تنظیم کرد. این ویژگی‌ها مستقیماً بر توانایی نانوسیال در تغییر ترشوندگی اثر می‌گذارند؛ زیرا اصلاح ترشوندگی تنها به حضور نانوذره وابسته نیست، بلکه به پایداری آن در سیال تزریقی، قابلیت حرکت در محیط متخلخل و توانایی برهم‌کنش مؤثر با سطح سنگ نیز بستگی دارد [۷، ۱۰].

از دیدگاه پایداری کلوئیدی، نانوذرات اصلاح‌شده معمولاً نسبت به نانوذرات خام مقاومت بیشتری در برابر تجمع از خود نشان می‌دهند. در محیط‌های شور، یون‌های موجود در آب سازندی می‌توانند لایه الکتریکی اطراف نانوذرات را فشرده کرده و نیروی دافعه بین ذرات را کاهش دهند. کاهش نیروی دافعه، احتمال برخورد مؤثر و چسبیدن ذرات به یکدیگر را افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به تشکیل توده‌های بزرگ‌تر و رسوب نانوذرات می‌شود. اصلاح سطح می‌تواند با ایجاد بار سطحی مناسب یا ایجاد ممانعت فضایی، از نزدیک شدن بیش از حد نانوذرات به یکدیگر جلوگیری کند. به همین دلیل، نانوذرات اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه‌های اصلاح‌نشده، قابلیت بیشتری برای حفظ پراکندگی پایدار در دما و شوری بالا دارند. این موضوع در کاربردهای مخزنی اهمیت زیادی دارد، زیرا نانوسیالی که پیش از رسیدن به نواحی هدف دچار ناپایداری شود، توانایی لازم برای تغییر ترشوندگی در مقیاس مخزن را نخواهد داشت [۹، ۱۰].

از دیدگاه بین‌سطحی، اصلاح سطح می‌تواند انرژی سطحی نانوذره را تغییر داده و بر نحوه جذب آن روی سطح سنگ اثر بگذارد. سنگ‌های کربناته مانند کلسیت و آهک معمولاً به دلیل بار سطحی و ترکیب شیمیایی خاص خود، تمایل زیادی به برهم‌کنش با ترکیبات قطبی نفت خام، به‌ویژه رزین‌ها و آسفالتین‌ها دارند. این ترکیبات می‌توانند روی سطح سنگ جذب شده و آن را به حالت نفت‌دوست تبدیل کنند. زمانی که نانوذرات اصلاح‌شده وارد محیط می‌شوند، در صورت داشتن گروه‌های عاملی مناسب می‌توانند با سطح سنگ برهم‌کنش برقرار کرده و بخشی از ترکیبات نفت‌دوست جذب‌شده را جابه‌جا کنند یا یک لایه جدید با ماهیت آب‌دوست روی سطح تشکیل دهند. در نتیجه، انرژی سطحی سنگ تغییر می‌کند و تمایل آن به تماس با آب افزایش می‌یابد. کاهش زاویه تماس در مطالعات مختلف، نشان‌دهنده همین تغییر در تعادل انرژی‌های بین‌سطحی سنگ، نفت و آب است [۳، ۴].



نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش زاویه تماس داشته باشد. برای نمونه، در مطالعه حسینی و همکاران، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم اصلاح شده سطحی با عامل AEPTMS در شرایط سخت شامل دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۲۰ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح سطح باعث افزایش پایداری نانوسیال و بهبود توانایی آن در تغییر ترشوندگی سنگ کربناته نفت‌دوست شده است. در این مطالعه، زاویه تماس پیش‌رونده سنگ اولیه از ۱/۱۶۵ درجه به ۶/۳۷ درجه و زاویه تماس پس‌رونده از ۲/۱۶۶ درجه به ۲/۴۸ درجه کاهش یافت. چنین کاهش قابل توجهی بیانگر آن است که نانوذرات اصلاح شده توانسته‌اند سطح سنگ را از حالت شدیداً نفت‌دوست به حالت آب‌دوست تغییر دهند. این نتیجه اهمیت اصلاح سطح را به‌ویژه در مخازن کربناته با شوری و دمای بالا نشان می‌دهد؛ زیرا در چنین شرایطی بسیاری از نانوذرات خام پایداری کافی ندارند [۱۰].

در پژوهش تانگ و همکاران نیز اهمیت اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا در حضور سورفکتانت بررسی شد. در این مطالعه، نانوذرات سیلیکای اصلاح شده سطحی در محیط‌های دارای شوری زیاد و دمای بالا عملکرد مناسبی از خود نشان دادند و در ترکیب با سورفکتانت توانستند باعث کاهش بیشتر زاویه تماس شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که نانوذرات اصلاح شده سیلیکا در غلظت ۱ درصد وزنی، زاویه تماس را برای نفت سبک از محدوده ۱۲۵ تا ۱۵۹ درجه به حدود ۶۹ تا ۸۵ درجه و برای نفت سنگین به حدود ۷۱ تا ۱۰۷ درجه کاهش دادند. همچنین ترکیب نانوذره اصلاح شده با سورفکتانت باعث کاهش اضافی زاویه تماس در حدود ۱۰ درجه شد. این موضوع نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات نه تنها موجب افزایش پایداری آن‌ها می‌شود، بلکه می‌تواند شرایط لازم برای هم‌افزایی با سورفکتانت را نیز فراهم کند [۹].

هم‌افزایی میان نانوذرات اصلاح شده و سورفکتانت‌ها از جنبه‌های مهم عملکرد این سامانه‌هاست. سورفکتانت‌ها معمولاً با کاهش کشش بین سطحی نفت و آب و تغییر برهم‌کنش‌های سطحی، به جداسازی نفت از سطح سنگ کمک می‌کنند. از سوی دیگر، نانوذرات اصلاح شده می‌توانند با جذب روی سطح سنگ، تشکیل لایه آب‌دوست، افزایش فشار جداسازی در ناحیه سه‌فازی و پایداری لایه نازک آبی، فرآیند جدایش نفت را تقویت کنند. زمانی که این دو عامل به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند، عملکرد آن‌ها می‌تواند مکمل یکدیگر باشد. اصلاح سطح نانوذرات در این میان نقش مهمی دارد، زیرا باعث بهبود سازگاری نانوذرات با سورفکتانت و جلوگیری از ناپایداری سامانه می‌شود. در صورتی که نانوذره خام با سورفکتانت ناسازگار باشد، ممکن است تجمع، رسوب یا کاهش کارایی سورفکتانت رخ دهد؛ اما اصلاح سطح مناسب می‌تواند این مشکلات را کاهش داده و سامانه‌ای پایدارتر و مؤثرتر ایجاد کند [۹، ۶].

یکی دیگر از مزایای اصلاح سطح، کنترل جذب نانوذرات در محیط متخلخل است. در فرآیندهای ازدیاد برداشت، نانوذرات باید بتوانند تا حد مناسبی درون محیط متخلخل حرکت کنند و به نواحی هدف برسند. اگر جذب نانوذرات روی سطح سنگ بیش از حد باشد، بخش زیادی از آن‌ها در نزدیکی ناحیه تزریق باقی می‌ماند و به عمق مخزن نفوذ نمی‌کند. از طرف دیگر، اگر جذب بسیار کم باشد، امکان تشکیل لایه مؤثر روی سطح سنگ و تغییر ترشوندگی کاهش می‌یابد. بنابراین، یک تعادل مطلوب میان پایداری، تحرک‌پذیری و جذب سطحی لازم است. اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند این تعادل را تنظیم کند. به بیان دیگر، با انتخاب عامل اصلاح‌کننده مناسب می‌توان نانوذره‌ای طراحی کرد که هم در سیال تزریقی پایدار باشد، هم در محیط متخلخل حرکت کند و هم در تماس با سطح نفت‌دوست سنگ بتواند برهم‌کنش لازم برای تغییر ترشوندگی را ایجاد نماید [۹، ۷].

از نظر مکانیسمی، عملکرد نانوذرات اصلاح شده در تغییر ترشوندگی را می‌توان به چند فرآیند اصلی نسبت داد. نخست، جذب نانوذرات روی سطح سنگ و پوشاندن نواحی نفت‌دوست است. دوم، تغییر انرژی سطحی و افزایش تمایل سنگ به فاز آبی است. سوم، ایجاد فشار جداسازی در فیلم نازک بین نفت و سطح سنگ است که می‌تواند به جدا شدن قطرات نفت از سطح کمک کند. چهارم، کاهش چسبندگی ترکیبات سنگین نفت خام مانند آسفالتین‌ها و رزین‌ها به سطح معدنی است. پنجم،



افزایش پایداری نانوسیال و جلوگیری از رسوب ذرات در شرایط مخزنی است. اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند هر یک از این مکانیسم‌ها را تقویت کند؛ زیرا ماهیت سطحی نانوذره تعیین می‌کند که چگونه با آب، نفت، سورفکتانت و سطح سنگ برهم‌کنش داشته باشد [۴، ۳].

با وجود مزایای قابل توجه، اصلاح سطح نانوذرات باید با دقت طراحی شود. نوع عامل اصلاح‌کننده، مقدار آن، بار سطحی ایجادشده، سازگاری با آب سازندی، پایداری در دماهای بالا و رفتار آن در حضور یون‌های چندظرفیتی از عوامل تعیین‌کننده هستند. اصلاح سطح نامناسب ممکن است باعث کاهش آب‌دوستی نانوذره، افزایش جذب غیرمطلوب، کاهش پایداری یا حتی اختلال در عملکرد سورفکتانت شود. بنابراین، نمی‌توان هر نوع اصلاح سطحی را الزاماً مفید دانست. طراحی نانوذرات اصلاح‌شده باید بر اساس نوع سنگ، ترکیب آب سازندی، نوع نفت، دما، شوری و هدف فرآیند ازدیاد برداشت انجام گیرد [۹، ۱۰].

در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات یکی از عوامل کلیدی در افزایش کارایی نانوسیال‌ها برای اصلاح ترشوندگی سنگ‌های مخزنی است. نانوذرات اصلاح‌شده به دلیل پایداری کلئیدی بهتر، مقاومت بیشتر در برابر شوری و دما، قابلیت جذب کنترل‌شده روی سطح سنگ و امکان ایجاد هم‌افزایی با سورفکتانت‌ها، نسبت به نانوذرات خام عملکرد مؤثرتری دارند. این نانوذرات می‌توانند زاویه تماس سنگ‌های نفت‌دوست را به‌طور چشمگیری کاهش داده و سطح را به سمت حالت آب‌دوست یا ترشوندگی میانی مطلوب سوق دهند. بنابراین، در طراحی نانوسیال‌های پیشرفته برای ازدیاد برداشت نفت، اصلاح سطح نانوذرات باید به‌عنوان یک پارامتر اساسی در نظر گرفته شود؛ زیرا موفقیت نهایی فرآیند نه تنها به نوع نانوذره، بلکه به ویژگی‌های سطحی، پایداری و نحوه برهم‌کنش آن با سیستم سنگ، نفت و آب وابسته است [۷، ۱۰].

۲.۳. مکانیسم‌های تغییر ترشوندگی توسط نانوذرات

تغییر ترشوندگی سنگ مخزن توسط نانوذرات یک فرآیند چندمکانیسمی است که در مقیاس مولکولی تا حفره‌ای رخ می‌دهد. در مخازن کربناته، ترشوندگی نفت‌دوست معمولاً ناشی از جذب ترکیبات قطبی نفت خام، به‌ویژه آسفالتین‌ها و رزین‌ها، بر سطح سنگ است. این جذب سبب کاهش انرژی سطحی سنگ نسبت به فاز آبی و در نتیجه افزایش زاویه تماس آب می‌شود. نانوذرات با ورود به این سامانه می‌توانند از طریق تغییر برهم‌کنش‌های سطحی، بازآرایی ساختار بین‌سطحی و اصلاح انرژی آزاد سطح، این وضعیت را معکوس کرده و سنگ را به سمت حالت آب‌دوست سوق دهند [۹].

۱. جذب و پوشش‌دهی سطح سنگ

یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها، جذب نانوذرات روی سطح سنگ و ایجاد یک لایه پوششی نازک است. نانوذرات، به‌ویژه انواع سیلیکا و اکسیدهای فلزی، تمایل بالایی به برهم‌کنش با سطح کربناته دارند. پس از جذب، این ذرات می‌توانند گروه‌های عاملی آب‌دوست خود را در معرض فاز آبی قرار دهند و در نتیجه انرژی سطحی سنگ را تغییر دهند. تشکیل این لایه جدید سبب کاهش تمایل سطح به برهم‌کنش با ترکیبات نفتی و افزایش تمایل به فاز آبی می‌شود [۴]. این پوشش می‌تواند مانع از بازجذب ترکیبات نفتی روی سطح شود و به همین دلیل، علاوه بر تغییر اولیه ترشوندگی، در پایداری حالت آب‌دوست نیز نقش دارد.

۲. تغییر انرژی سطحی و کاهش زاویه تماس

از دیدگاه ترمودینامیکی، ترشوندگی تابعی از انرژی‌های بین‌سطحی میان سه فاز سنگ، نفت و آب است. طبق رابطه ۱:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{so} - \gamma_{sw}}{\gamma_{ow}} \quad 1$$



که در آن:

- γ_{so} انرژی بین سطحی سنگ-نفت
- γ_{sw} انرژی بین سطحی سنگ-آب
- γ_{ow} کشش بین سطحی نفت-آب
- θ زاویه تماس

حضور نانوذرات می‌تواند با کاهش γ_{sw} و در برخی موارد کاهش γ_{ow} مقدار $\cos\theta$ را افزایش دهد و در نتیجه زاویه تماس را کاهش دهد. کاهش زاویه تماس به معنای حرکت سیستم به سمت آب‌دوستی است. بنابراین، نانوذرات با اصلاح انرژی آزاد سطحی و تغییر تعادل نیروهای بین‌سطحی، مستقیماً در ترشوندگی دخالت می‌کنند [۶].

۳. جداسازی و جابه‌جایی لایه نفتی جذب‌شده

در سنگ‌های نفت‌دوست، معمولاً یک لایه نازک از ترکیبات آلی قطبی روی سطح سنگ تشکیل می‌شود. نانوذرات می‌توانند با نفوذ به مرز مشترک نفت-سنگ، این لایه را ناپایدار کنند. چند سازوکار در این زمینه مطرح است:

- رقابت برای سایت‌های جذب سطحی
- ایجاد نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین سطح و ترکیبات نفتی
- افزایش فشار نازک‌فیلیم در لایه آبی بین نفت و سنگ

افزایش فشار نازک‌فیلیم می‌تواند فیلم نفتی را از سطح جدا کرده و باعث جایگزینی آن با فیلم آبی شود. این فرآیند نقش مهمی در تبدیل سطح از نفت‌دوست به آب‌دوست دارد [۶].

۴. اصلاح زبری مؤثر سطح در مقیاس نانو

نانوذرات پس از جذب، می‌توانند ریزساختار سطح را تغییر دهند. افزایش زبری مؤثر در مقیاس نانو، همراه با ماهیت آب‌دوست ذرات، می‌تواند رفتار ترشوندگی را تقویت کند. بر اساس مدل‌های ونزل و کُسی-باکستر، زبری سطح می‌تواند تمایل ذاتی سطح به آب‌دوستی یا نفت‌دوستی را تشدید کند. بنابراین اگر نانوذرات ذاتاً آب‌دوست باشند، افزایش زبری ناشی از حضور آن‌ها می‌تواند آب‌دوستی را تقویت کند [۱۰].

۵. پایداری کلئیدی و نقش اصلاح سطح نانوذرات

یکی از عوامل کلیدی در کارایی نانوذرات، پایداری آن‌ها در محیط شور و داغ مخزن است. در صورت تجمع و ته‌نشینی، اثرگذاری ذرات کاهش می‌یابد و حتی ممکن است باعث انسداد منافذ شود. اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های عاملی مناسب می‌تواند:

- پایداری کلئیدی را افزایش دهد.
- از تجمع در شوری بالا جلوگیری کند.
- جذب هدفمند روی سطح سنگ را تقویت کند.

در نتیجه، نانوذرات اصلاح‌شده معمولاً توانایی بیشتری در تغییر پایدار ترشوندگی نسبت به ذرات خام دارند [۱۰].

۶. تأثیر بر نیروهای موئینگی و آب‌آشامی خودبه‌خودی

ترشوندگی مستقیماً با فشار موئینگی مرتبط است که در رابطه ۲ آورده شده است:

$$P_c = \frac{2\gamma_{ow} \cos \theta}{r} \quad ۲$$

که در آن θ شعاع مؤثر حفره است. با کاهش زاویه تماس و افزایش $\cos \theta$ ، فشار موئینگی مثبت‌تر شده و تمایل آب برای ورود به منافذ افزایش می‌یابد. در نتیجه، فرآیند آب‌آشامی خودبه‌خودی تقویت شده و نفت محبوس‌شده راحت‌تر جابه‌جا می‌شود. بنابراین، تغییر ترشوندگی توسط نانوذرات نه تنها یک پدیده سطحی، بلکه عاملی مؤثر در بهبود بازیافت در مقیاس سنگ مخزن است [۸].

۷. پایداری حالت آب‌دوست

یکی از مزایای مهم نانوذرات نسبت به برخی مواد شیمیایی متداول، توانایی آن‌ها در حفظ حالت آب‌دوست در طول زمان است. جذب نسبتاً پایدار نانوذرات روی سطح سنگ می‌تواند از بازگشت سریع سطح به حالت نفت‌دوست پس از تماس مجدد با نفت جلوگیری کند. این ویژگی برای کاربردهای میدانی بسیار مهم است، زیرا پایداری اثر اصلاح ترشوندگی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بلندمدت روش‌های ازدیاد برداشت دارد.

مکانیسم‌های تغییر ترشوندگی توسط نانوذرات شامل مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی از جمله جذب و پوشش‌دهی سطح، تغییر انرژی آزاد بین‌سطحی، افزایش فشار نازک‌فیلیم، اصلاح ریزساختار سطح، کاهش کشش بین‌سطحی و تقویت نیروهای موئینگی است. این سازوکارها در کنار هم موجب کاهش زاویه تماس، افزایش آب‌دوستی سطح سنگ و بهبود آب‌آشامی خودبه‌خودی می‌شوند. با این حال، کارایی نهایی به نوع نانوذره، ویژگی‌های سطحی آن، شرایط دما و شوری، و خصوصیات سنگ و نفت بستگی دارد [۸].

۳.۳. تأثیر نوع نانوذره بر تغییر ترشوندگی سنگ مخزن

نوع نانوذره یکی از عوامل تعیین‌کننده در کارایی سامانه‌های نانوسیالی برای اصلاح ترشوندگی سنگ‌های مخزنی است، زیرا ماهیت شیمیایی، انرژی سطحی، بار الکتریکی، قابلیت جذب سطحی و پایداری کلئیدی هر نانوذره مستقیماً بر نحوه تعامل آن با سطح سنگ، آب سازندی و نفت خام اثر می‌گذارد. به بیان دیگر، صرف حضور نانوذره برای تغییر ترشوندگی کافی نیست، بلکه ترکیب شیمیایی و ساختار سطحی آن مشخص می‌کند که آیا ذره می‌تواند روی سطح سنگ جذب شود، لایه آب‌دوست ایجاد کند، آسفالتین‌ها را جابه‌جا کند یا در شرایط شور و دمای بالا پایدار باقی بماند. از این‌رو، مقایسه انواع نانوذرات نشان می‌دهد که عملکرد آن‌ها در تغییر ترشوندگی یکسان نیست و بسته به جنس ذره، اصلاح سطح، غلظت و شرایط مخزنی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد [۱، ۲].

در میان نانوذرات مختلف، نانوذرات سیلیکا (SiO_2) یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین گزینه‌ها برای اصلاح ترشوندگی سنگ‌های کربناته گزارش شده‌اند. در مطالعه دهقان‌منفرد و همکاران، نانوسیلیکای خام توانست ترشوندگی کلسیت نفت‌دوست را به‌طور محسوس تغییر دهد، به‌طوری‌که زاویه تماس از ۱۵۶ درجه به ۴۱.۷ درجه کاهش یافت. این نتایج نشان داد که سیلیکا به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت برهم‌کنش مناسب با سطح کلسیت، توانایی خوبی در انتقال سطح از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست دارد. افزون بر این، افزایش غلظت نانوسیال، زمان تماس و شوری نیز شدت این تغییر را افزایش داد، که نشان می‌دهد SiO_2 نه تنها از نظر شیمیایی فعال است، بلکه در شرایط محیطی مختلف نیز قابلیت مؤثری برای بهبود ترشوندگی دارد [۴].

با این حال، عملکرد نانوسیلیکای اصلاح‌نشده در شرایط سخت مخزنی همواره پایدار و کافی نیست؛ به همین دلیل، اصلاح سطح سیلیکا به‌عنوان راهکاری برای تقویت کارایی آن مطرح شده است. در مطالعه تانگ و همکاران، نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده سطحی با گروه‌های شیمیایی مختلف در شوری‌های بسیار بالا و دماهای بالا آزمایش شدند و نتایج نشان داد که این نانوذرات نسبت به سیلیکای خام پایداری و کارایی بهتری دارند. برای نمونه، نانوسیلیکای اصلاح‌شده در غلظت ۱ درصد وزنی توانست زاویه تماس را در نفت سبک از محدوده ۱۲۵ تا ۱۵۹ درجه به ۶۹ تا ۸۵ درجه و در نفت سنگین به ۷۱ تا ۱۰۷ درجه کاهش دهد. همچنین ترکیب این نانوذرات با سورفکتانت TTAB باعث کاهش اضافی حدود ۱۰ درجه شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوع نانوذره، به‌ویژه وقتی با اصلاح سطح همراه باشد، نقش مستقیمی در شدت تغییر ترشوندگی و حفظ عملکرد در محیط‌های شور و داغ دارد [۹].

در کنار سیلیکا، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) نیز از نظر اصلاح ترشوندگی عملکرد قابل‌توجهی نشان داده‌اند. در مطالعه حسینی و همکاران، TiO_2 اصلاح‌شده سطحی با عامل AEAPTMS در شرایط سخت شامل ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰ درصد وزنی شوری بررسی شد. نتایج نشان داد که در حالت بدون اصلاح، زاویه تماس پیش‌رونده و پس‌رونده به‌ترتیب ۱۶۵.۱ و ۱۶۶.۲ درجه بود، اما پس از استفاده از ۳ درصد وزنی TiO_2 اصلاح‌شده سطحی این مقادیر به ۳۷.۶ و ۴۸.۲ درجه کاهش یافتند. این تغییر شدید بیانگر آن است که TiO_2 ، به‌ویژه در حالت اصلاح‌شده، می‌تواند یکی از نانوذرات بسیار مؤثر برای تبدیل سطح سنگ‌های کربناته از حالت شدیداً نفت‌دوست به حالت آب‌دوست باشد. در واقع، تفاوت عملکرد TiO_2 خام و اصلاح‌شده نشان می‌دهد که جنس نانوذره به‌تنهایی کافی نیست و ویژگی سطحی آن تعیین‌کننده اصلی کارایی نهایی است [۱۰].

از سوی دیگر، مطالعات انجام‌شده روی نانوذرات ZrO_2 و NiO نیز نشان می‌دهد که نوع نانوذره می‌تواند در کنار سورفکتانت، اثر متفاوتی بر اصلاح ترشوندگی داشته باشد. در پژوهش نویدی و همکاران، این دو نانوذره در سامانه‌های ترکیبی با سورفکتانت‌های TX-100 و C16TAB برای سنگ آهک نفت‌دوست بررسی شدند. اگرچه در این مطالعه عدد زاویه تماس نهایی به‌صورت خلاصه شده در استخراج موجود نیست، اما نتایج کلی نشان داد که حضور نانوذرات ZrO_2 و NiO همراه با سورفکتانت می‌تواند ترشوندگی سطح را به سمت حالت آب‌دوست‌تر سوق دهد. این موضوع اهمیت انتخاب نوع نانوذره را برجسته می‌کند، زیرا نانوذرات مختلف با توجه به ترکیب شیمیایی، انرژی سطحی و رفتار جذب متفاوت، الزاماً عملکرد یکسانی در تماس با سطح کربناته ندارند [۶].

یکی از یافته‌های مهم در مطالعات اخیر آن است که نانوذرات اصلاح‌شده سطحی معمولاً عملکرد بهتری نسبت به نانوذرات خام دارند. برای مثال، نانوسیلیکای اصلاح‌شده در مطالعه Shi و همکاران نه‌تنها در عبور از هسته‌های آهکی با تراوایی mD ۱۸ بدون ایجاد مانع موفق بود، بلکه توانست تراوایی ایجاد شده را نیز بهتر از سورفکتانت حفظ کند. در این مطالعه، اگرچه SiNP به‌تنهایی تغییر شدید ترشوندگی اولیه ایجاد نکرد، اما پس از پیرسازی نفتی، توانست سطح را در وضعیت مناسب‌تر برای آب‌دوستی نگه دارد. این نتیجه نشان می‌دهد که در برخی موارد، نوع نانوذره بیشتر از آنکه تغییر ترشوندگی آنی و شدید ایجاد کند، در تثبیت حالت ترشوندگی مطلوب نقش دارد. از این منظر، انتخاب بین NiO یا ZrO_2 ، TiO_2 یا SiO_2 باید بر اساس هدف فرآیند ازدیاد برداشت، یعنی تغییر اولیه یا حفظ بلندمدت ترشوندگی، انجام شود [۷].

مقایسه کلی مطالعات نشان می‌دهد که نوع نانوذره بر شدت کاهش زاویه تماس، پایداری نانوسیال، سازگاری با سورفکتانت و ماندگاری اثر ترشوندگی تأثیر مستقیم دارد. در میان انواع بررسی‌شده، سیلیکا به دلیل دسترسی بالا، امکان اصلاح سطح گسترده و سازگاری مناسب با محیط‌های آبی، بیشترین استفاده را داشته است. TiO_2 نیز به‌ویژه در حالت اصلاح‌شده، توان کاهش قابل‌توجه زاویه تماس را نشان داده است. در مقابل، نانوذراتی مانند ZrO_2 و NiO بیشتر در سامانه‌های ترکیبی نانوذره-سورفکتانت بررسی شده‌اند و عملکرد آن‌ها تا حد زیادی به فرمولاسیون و شرایط محیطی وابسته بوده است. بنابراین،

نمی‌توان یک نانوذره را به‌طور مطلق بهترین گزینه دانست، بلکه باید نوع سنگ، شرایط شوری، دما، نوع نفت و هدف فرآیند را در انتخاب نانوذره لحاظ کرد [۷].

از منظر مکانیزمی نیز نوع نانوذره تعیین می‌کند که تغییر ترشوندگی از چه مسیری رخ دهد. برخی نانوذرات بیشتر از طریق جذب سطحی و جایگزینی ترکیبات نفت‌دوست عمل می‌کنند، برخی دیگر با ایجاد لایه آب‌دوست پایدار روی سطح سنگ، و برخی نیز با تقویت اثر سورفکتانت و کاهش کشش بین‌سطحی به بهبود ترشوندگی کمک می‌کنند. در این میان، نانوذرات اصلاح‌شده سیلیکا و TiO_2 نشان داده‌اند که می‌توانند هر دو نقش پایداری کلوئیدی و تغییر سطح را هم‌زمان ایفا کنند. این در حالی است که نانوذراتی مانند ZrO_2 و NiO بیشتر در چارچوب سامانه‌های ترکیبی و وابسته به سورفکتانت ارزیابی شده‌اند. بنابراین، تفاوت در ماهیت نانوذره مستقیماً مسیر مکانیسمی تغییر ترشوندگی را نیز تغییر می‌دهد [۲، ۴].

در مجموع، شواهد موجود نشان می‌دهد که نوع نانوذره یکی از متغیرهای کلیدی در موفقیت فرآیند اصلاح ترشوندگی است و اثر آن صرفاً به اندازه یا غلظت محدود نمی‌شود، بلکه به ترکیب شیمیایی، قابلیت اصلاح سطح، پایداری در شوری و دمای بالا، و رفتار آن در حضور سورفکتانت نیز وابسته است. از بین نانوذرات بررسی‌شده، سیلیکا و TiO_2 اصلاح‌شده عملکرد بسیار برجسته‌ای داشته‌اند و توانسته‌اند زاویه تماس را به‌طور چشمگیر کاهش دهند، در حالی که ZrO_2 و NiO بیشتر در قالب فرمولاسیون‌های ترکیبی بررسی شده‌اند. بنابراین، برای طراحی نانوسیال مناسب در مخازن کربناته، انتخاب نوع نانوذره باید بر مبنای سازگاری با شرایط مخزن و هدف عملیاتی انجام شود تا بیشترین اثر در تغییر ترشوندگی و در نهایت افزایش بازافت نفت حاصل گردد.

۴.۳. هم‌افزایی نانوذرات و سورفکتانت‌ها در اصلاح ترشوندگی

استفاده هم‌زمان از نانوذرات و سورفکتانت‌ها یکی از رویکردهای مؤثر در اصلاح ترشوندگی سنگ‌های مخزنی، به‌ویژه مخازن کربناته نفت‌دوست، محسوب می‌شود. در این سامانه‌های ترکیبی، هر یک از اجزا نقش متفاوت اما مکملی ایفا می‌کنند. سورفکتانت‌ها عمدتاً از طریق کاهش کشش بین‌سطحی میان نفت و آب، تضعیف چسبندگی نفت به سطح سنگ و تسهیل جدایش لایه نفتی عمل می‌کنند. در مقابل، نانوذرات با تغییر انرژی سطحی سنگ، ایجاد لایه‌های پایدار روی سطح و افزایش تمایل سطح به فاز آبی، فرآیند تغییر ترشوندگی را تقویت می‌کنند. بنابراین، ترکیب این دو ماده می‌تواند اثری فراتر از عملکرد جداگانه هر یک ایجاد کند [۱].

در مخازن کربناته، سطح سنگ معمولاً به دلیل برهم‌کنش قوی با ترکیبات قطبی نفت خام، به‌ویژه آسفالتین‌ها و رزین‌ها، حالت نفت‌دوست پیدا می‌کند. این وضعیت باعث کاهش راندمان جابه‌جایی نفت توسط آب و محدود شدن بازیافت می‌شود. حضور سورفکتانت در نانوسیال می‌تواند با کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر تعادل نیروهای سطحی، جدا شدن نفت از سطح سنگ را آسان‌تر کند. هم‌زمان، نانوذرات می‌توانند روی سطح سنگ جذب شده و با ایجاد یک پوشش نازک و پایدار، سطح را به سمت آب‌دوستی تغییر دهند. این عملکرد هم‌زمان باعث کاهش زاویه تماس و افزایش تمایل آب به پخش شدن روی سطح سنگ می‌شود [۱].

یکی از مزایای مهم سامانه‌های نانوذره-سورفکتانت، بهبود پایداری عملکرد در شرایط سخت مخزنی است. در بسیاری از مخازن، دمای بالا، شوری زیاد و حضور یون‌های دوزوفیتی مانند کلسیم و منیزیم می‌تواند عملکرد سورفکتانت‌ها یا نانوذرات را به‌تنهایی کاهش دهد. تجمع نانوذرات، رسوب‌گذاری، کاهش پایداری کلوئیدی و افت کارایی سورفکتانت از جمله مشکلات رایج در چنین شرایطی هستند. با این حال، طراحی مناسب فرمولاسیون ترکیبی می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش دهد.



سورفکتانت‌ها می‌توانند به پخش بهتر نانوذرات کمک کنند و نانوذرات نیز می‌توانند پایداری ساختار بین‌سطحی و اثر اصلاح ترشوندگی را افزایش دهند [۵].

از نظر مکانیزمی، هم‌افزایی نانوذرات و سورفکتانت‌ها از چند مسیر اصلی قابل توضیح است. نخست، سورفکتانت با کاهش کشش بین‌سطحی، انرژی لازم برای جدا شدن نفت از سطح سنگ را کاهش می‌دهد. دوم، نانوذرات با جذب روی سطح سنگ، ویژگی‌های سطحی آن را تغییر داده و مانع بازگشت سریع سطح به حالت نفت‌دوست می‌شوند. سوم، حضور هم‌زمان این دو جزء می‌تواند ساختار لایه‌های جذب‌شده در مرز نفت-آب و آب-سنگ را تغییر دهد و باعث ناپایداری فیلم نفتی چسبیده به سطح شود. در نتیجه، فاز آبی راحت‌تر وارد خلل‌و فرج شده و نفت محبوس‌شده با کارایی بیشتری جابه‌جا می‌شود [۵].

این اثر ترکیبی همچنین می‌تواند موجب افزایش آب‌آشامی خودبه‌خودی در سنگ‌های کربناته شود. در محیط‌های شکاف‌دار یا کم‌تراوا، آب‌آشامی خودبه‌خودی یکی از سازوکارهای مهم تولید نفت است. هرچه سطح سنگ آب‌دوست‌تر شود، نیروی موینگی برای ورود آب به ماتریس سنگ افزایش می‌یابد و نفت بیشتری از منافذ خارج می‌شود. بنابراین، کاهش زاویه تماس توسط فرمولاسیون‌های نانوذره-سورفکتانت تنها یک شاخص آزمایشگاهی نیست، بلکه می‌تواند به‌طور مستقیم با بهبود باز یافت نفت مرتبط باشد [۱۰].

با وجود این مزایا، عملکرد سامانه‌های ترکیبی به نوع نانوذره، نوع سورفکتانت، غلظت هر دو جزء، شوری آب، دما، نوع نفت و جنس سنگ وابسته است. برای مثال، نانوذرات سیلیکا، تیتانیا، زیرکونیا و اکسید نیکل می‌توانند رفتار متفاوتی در کنار سورفکتانت‌های کاتیونی، آنیونی یا غیریونی داشته باشند. همچنین افزایش غلظت تا یک مقدار بهینه می‌تواند باعث بهبود تغییر ترشوندگی شود، اما غلظت‌های بیش از حد ممکن است منجر به تجمع ذرات، انسداد منافذ یا کاهش پایداری نانوسیال شود. بنابراین، انتخاب فرمولاسیون مناسب باید بر اساس شرایط واقعی مخزن و با انجام آزمون‌های سازگاری انجام گیرد [۱۰]. در مجموع، استفاده هم‌زمان از نانوذرات و سورفکتانت‌ها یک راهکار امیدبخش برای بهبود ازدیاد برداشت نفت از مخازن کربناته است. این سامانه‌ها می‌توانند از طریق کاهش کشش بین‌سطحی، اصلاح انرژی سطحی، افزایش پایداری ترشوندگی آب‌دوست و تقویت آب‌آشامی خودبه‌خودی، راندمان جابه‌جایی نفت را افزایش دهند. با این حال، برای کاربرد میدانی موفق، لازم است پایداری کلئیدی، سازگاری با آب سازند، اثر دما و شوری، احتمال جذب یا اتلاف مواد شیمیایی و تأثیر آن‌ها بر تراوایی سنگ به‌دقت بررسی شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، نقش نانوذرات در اصلاح ترشوندگی مخازن کربناته با هدف بهبود ازدیاد برداشت نفت بررسی شد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات به دلیل اندازه کوچک، سطح ویژه بالا و توانایی جذب روی سطح سنگ، می‌توانند ترشوندگی سطح را از حالت نفت‌دوست یا مختلط به سمت آب‌دوست تغییر دهند. این تغییر ترشوندگی موجب کاهش چسبندگی نفت به سطح سنگ، افزایش تمایل آب به نفوذ در منافذ و در نتیجه بهبود جابه‌جایی نفت می‌شود.

مکانیسم اصلی عملکرد نانوذرات شامل جذب سطحی روی سنگ، تغییر انرژی آزاد سطح، کاهش زاویه تماس، جداسازی لایه نفتی از سطح و افزایش فشار نازک‌فیلم است. این فرآیندها باعث می‌شوند فیلم آبی پایداری بیشتری میان سطح سنگ و نفت تشکیل شود و نفت محبوس‌شده راحت‌تر از محیط متخلخل جدا گردد. بنابراین، اصلاح ترشوندگی توسط نانوذرات می‌تواند نقش مهمی در افزایش آب‌آشامی خودبه‌خودی و بهبود راندمان تولید از مخازن کربناته، به‌ویژه مخازن شکاف‌دار، داشته باشد.



همچنین نتایج نشان می‌دهد که کارایی نانوذرات به عواملی مانند نوع نانوذره، غلظت، اندازه ذره، ویژگی‌های سطحی، شوری، دما و نوع سنگ و نفت وابسته است. نانوذراتی مانند SiO_2 ، TiO_2 ، ZrO_2 و NiO در مطالعات مختلف توانسته‌اند زاویه تماس را کاهش داده و سطح سنگ را آب‌دوست‌تر کنند. با این حال، عملکرد نانوذرات خام در شرایط سخت مخزنی ممکن است به دلیل تجمع، ناپایداری کلوئیدی یا ته‌نشینی کاهش یابد.

از این رو، اصلاح سطح نانوذرات اهمیت زیادی دارد. نانوذرات اصلاح‌شده سطحی معمولاً پایداری بیشتری در شوری و دمای بالا دارند و می‌توانند اثر اصلاح ترشوندگی را بهتر حفظ کنند. علاوه بر این، ترکیب نانوذرات با سورفکتانت‌ها می‌تواند اثر هم‌افزایی ایجاد کند؛ به‌طوری‌که سورفکتانت‌ها با کاهش کشش بین‌سطحی و نانوذرات با تغییر انرژی سطحی و تثبیت حالت آب‌دوست، موجب بهبود بیشتر آب‌آشامی خودبه‌خودی و افزایش راندمان جابه‌جایی نفت می‌شوند.

در مجموع، نانوذرات یک روش مؤثر و امیدبخش برای افزایش برداشت نفت از مخازن کربناته محسوب می‌شوند. با این وجود، برای کاربرد موفق در مقیاس میدانی، باید پایداری نانوسیال، غلظت بهینه، سازگاری با آب سازند، کنترل تجمع ذرات، هزینه اقتصادی و احتمال آسیب به تراوایی سنگ به‌دقت بررسی شود. بنابراین، طراحی فرمولاسیون مناسب بر اساس شرایط واقعی مخزن، شرط اصلی استفاده موفق از نانوذرات در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت است.

۵. مراجع

1. Eltoun, H., Yang, Y.L. and Hou, J.R., *The effect of nanoparticles on reservoir wettability alteration: a critical review*. Petroleum Science, 2021. **18**(1): p. 136–153.
2. Ratanpara, A.a.K., M., *Wettability alteration mechanisms in enhanced oil recovery with surfactants and nanofluids: A review with microfluidic applications*. Energies, 2023. **16**(24): p. 8003.
3. Jafarbeigi, E., Sahraei, E. and Maroufi, K., *An experimental investigation of rock wettability alteration, asphaltene molecular stability, and enhanced oil recovery using a new nanofluid*. Colloid and Interface Science Communications, 2026. **72**: p. 100887.
4. Dehghan Monfared, A., Ghazanfari, M.H., Jamialahmadi, M. and Helalizadeh, A., *Potential application of silica nanoparticles for wettability alteration of oil-wet calcite: a mechanistic study*. Energy & Fuels, 2016. **30**(5): p. 3947–3961.
5. Ramezani, M., Abedini, R. and Lashkarbolooki, M., *Experimental study about the effect of SiO_2 nanoparticle in surfactant performance on IFT reduction and wettability alteration*. Chemical Engineering Research and Design, 2023. **192**: p. 350–361.
6. Nwidee, L.N., Lebedev, M., Barifcani, A., Sarmadivaleh, M. and Iglauer, S., *Wettability alteration of oil-wet limestone using surfactant-nanoparticle formulation*. Journal of Colloid and Interface Science, 2017. **504**: p. 334–345.
7. Shi, Y., Wang, X. and Mohanty, K., *Effect of a nanoparticle on wettability alteration and wettability retainment of carbonate reservoirs*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. **215**: p. 110684.



8. Abe, K., Negishi, K. and Fujii, H., *Experimental investigation of the effects of the sizes and concentrations of SiO₂ nanoparticles on wettability alteration and oil recovery*. Energy & Fuels, 2023. **37**(10): p. 7122–7129.
9. Tang, W., Wu, P., Da, C., Alzobaidi, S., Harris, J., Hallaman, B., Hu, D. and Johnston, K.P., *Synergy of surface modified nanoparticles and surfactant in wettability alteration of calcite at high salinity and temperature*. Fuel, 2023. **331**: p. 125752.
10. Hosseini, M.S., Khazaei, M., Misaghi, M. and Koosheshi, M.H., *Improving the stability of nanofluids via surface-modified titanium dioxide nanoparticles for wettability alteration of oil-wet carbonate reservoirs*. Materials Research Express, 2022. **9**(3): p. 035005.