



## استفاده از نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت

رضا غریب‌شاهی، آرزو جعفری<sup>۱</sup>، علی حق‌طلب<sup>۲</sup> تهران، دانشگاه تربیت مدرس،

چکیده

نانو سیالات از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی که به‌عنوان سیال پایه جهت پخش شدن نانوذرات در آن به کار می‌روند، به دست می‌آیند. در سال‌های اخیر با پیشرفت علم نانو، استفاده از نانوذرات در بخش‌های مختلف صنعت نفت مورد توجه قرار گرفته است. به کمک نانو سیالات می‌توان جدایش نفت و گاز در داخل مخزن را تسهیل نمود و میزان برداشت نفت را نسبت به روش‌های فعلی افزایش داد. با افزودن نانو ذرات به یک سیال، خواص آن از قبیل چگالی، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و گرمای مخصوص را می‌توان به حالت بهینه تنظیم کرد. لذا در این تحقیق، ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانو ذرات مطالعه و بررسی شده است. بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه شامل تأثیر سیلاب‌زنی با نانوذرات بر خواص سنگ و سیال، افزایش ضریب برداشت نفت با استفاده از نانو سیالات و مواد فعال سطحی همراه با نانو ذرات و شبیه‌سازی و مدل‌سازی این فرایند می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهند که با افزودن نانو ذرات به یک سیال، می‌توان ضریب برداشت نفت را افزایش داد. قابل توجه است که این سیال‌ها طوری طراحی می‌شوند که با سیال‌های داخل مخزن سازگار بوده و از نظر زیست‌محیطی مناسب باشند. نانو سیال‌ها یا نانو امولسیون‌ها در طول زمان بسیار پایدار بوده و این ویژگی، پتانسیل بسیار مفیدی برای ازدیاد برداشت نفت است. به‌طور کلی، نانو ذرات از طریق تغییر ترشوندگی از نفت تر به آب تر، کاهش کشش سطحی، کاهش گرانروی نفت و ایجاد یک نسبت پویایی مناسب در سیال تزریقی می‌توانند برای مدت طولانی باعث استخراج نفت از مخازن شوند.

واژگان کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، نانوذرات، ترشوندگی، کشش سطحی.

### مقدمه

مخازن بسته به نوع شرایط ممکن است از همان ابتدا وارد مرحله سوم تولید از مخزن شوند [۱].

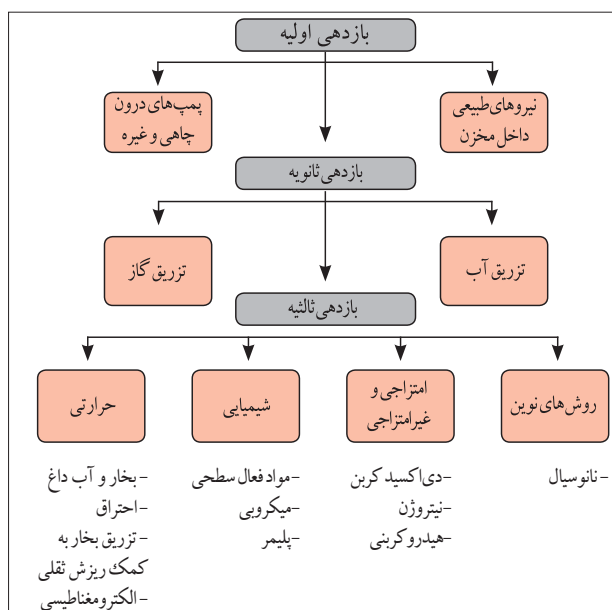
در مرحله اولیه، نیروهای طبیعی درون مخزن که حاصل رانش گاز محلول<sup>۱</sup>، رانش کلاهک گازی<sup>۲</sup>، رانش آبد<sup>۳</sup>، انبساط سنگ و سیال<sup>۴</sup> و ریزش ثقلی<sup>۵</sup> می‌باشند، سبب تولید نفت از مخزن می‌شوند [۲]. بعد از این مرحله، به دلیل افت فشار مخزن، به‌منظور تثبیت و حفظ فشار مخزن و افزایش تولید از آن، تزریق یک سیال به‌صورت امتزاجی و یا غیرامتزاجی انجام می‌شود. در این مرحله، عمدتاً ازدیاد برداشت به دو صورت سیلاب‌زنی با آب و گاز صورت می‌گیرد [۲]. روش‌های استخراج ثالثیه عموماً به تکنیک‌هایی اطلاق می‌شود که برای بازیابی بیشتر نفت از مخزن بعد از مراحل بازیابی اولیه و ثانویه و با هدف افزایش تولید صورت می‌گیرند. این روش‌های برداشت شامل روش‌های حرارتی، شیمیایی، امتزاجی و غیرامتزاجی و روش‌های نوین است. در این مرحله بسته به عواملی از جمله در دسترس بودن سیال، قیمت و نحوه‌ی تزریق آن و شکل زمین‌شناسی مخزن از گازهای

عوامل مختلفی از جمله آگاهی از خصوصیات سازندی و زمین‌شناسی و توزیع سیالات درون مخزن، در فرایند تولید بهینه از یک مخزن نفتی، تأثیرگذار هستند. در طول دوره فعالیت یک مخزن نفتی، مراحل مختلفی وجود دارد که در هر دوره نیروهای مختلفی بر تولید از آن مخزن موثر هستند و باعث سرازیر شدن نفت از درون مخزن به سمت چاه‌های تولیدی می‌شوند. در مرحله تخلیه طبیعی، نیروهای طبیعی موجود در مخزن به‌صورت جداگانه یا همزمان با هم عمل می‌کنند. با توجه به شرایط مخزن و نوع نیروی اعمال شده، در این مرحله نمی‌توان نفت زیادی به‌دست آورد و به‌طور معمول کمتر از ۲۰ درصد از نفت درجای موجود در مخزن را می‌توان برداشت کرد. به همین دلیل برای برداشت بیشتر از مخزن باید نیروهایی را از خارج مخزن به درون آن اعمال کرد تا تولید از مخزن ادامه یابد که به مجموع این روش‌ها، روش‌های ازدیاد برداشت<sup>۱</sup> نفت می‌گویند. هیچ الزامی وجود ندارد که ابتدا مرحله اولیه صورت گیرد. در بعضی از

\*نویسنده‌عهددار مکاتبات (ajafari@modares.ac.ir)

ازدیاد برداشت دارای معایبی هستند (از جمله هزینه بالای تزریق، پتانسیل خوردگی، تلفات مواد تزریق در طی حرکت درون مخزن، کاهش تراوایی به علت گیر افتادن در گلوگاهها و ...) که موجب شده کاربرد محدودی در عملیات میدانی ازدیاد برداشت داشته باشند. نانو ذرات علی‌رغم اندازه‌ی بسیار کوچک ۱۰۰-۱ نانومتر دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی هستند که می‌توانند بدون گیر افتادن در حفره‌ها وارد آن‌ها شوند. از این رو، مقدار ماده‌ی تزریقی موردنیاز و نیز میزان صدمات ناشی از کاهش تراوایی در طی فرآیندهای سیلاب‌زنی کاهش می‌یابد [۱۰]. ذرات نانو در مقایسه با بقیه مواد استفاده شده در روش‌های شیمیایی ازدیاد برداشت با محیط سازگارتر بوده و به انرژی بالایی برای تغییر شکل دادن و از بین رفتن نیاز دارند که این، باعث استفاده بهتر از نانو ذرات در مخازن عمیق و تحت دما و فشار بالا می‌شود. با این کار مدت زمان مؤثر بودن سیال تزریقی در طی فرآیندهای سیلاب‌زنی نیز افزایش خواهد یافت. با افزودن نانو ذرات به یک سیال، خواص آن از قبیل چگالی، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و گرمای مخصوص را می‌توان به حالت بهینه تنظیم کرد [۱۱]. لذا نانو سیالات را می‌توان به صورت کنترل شده تر نسبت به مواد فعلی به مخزن اضافه کرده و در نتیجه، نفت بیشتری به دست آورد.

پایدارسازی امولسیون با نانو ذرات بهبود یافته سطحی، می‌تواند به عنوان روشی کارآمد جهت کاهش ویسکوزیته یک سیال، مورد استفاده قرار گیرد [۱۲]. این نوع امولسیون‌ها می‌توانند در دمای بالای



انواع روش‌های تولید از مخازن و روش‌های ازدیاد برداشت نفت

هیدروکربنی، گازهای حاصل از سوخت، دی‌اکسید کربن، نیتروژن، پلیمرها، مواد فعال سطحی<sup>۷</sup>، حلال‌های هیدروکربنی و نانو سیالات استفاده می‌شود. برهم کنش بین سیالات و مواد تزریقی با سیستم سنگ و سیال موجود باعث می‌شود تا شرایط مطلوب تری از جمله تغییر ترشوندگی<sup>۸</sup>، کاهش کشش بین سطحی<sup>۹</sup>، کاهش گرانبوی نفت و ... ایجاد شود [۳]. در شکل ۱- تقسیم‌بندی انواع روش‌های تولید از مخازن و روش‌های ازدیاد برداشت نفت نشان داده شده است.

### ۱- ازدیاد برداشت با استفاده از نانو مواد

نانو تکنولوژی یعنی تولید و کاربرد اجسام یا وسایل با مقیاس فوق‌العاده ریز و کوچک. این گونه اجسام یا وسایل در حد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (nm) هستند. از آنجا که نانو ذرات فلزی می‌توانند به طور مؤثر پلی بین مواد در مقیاس بزرگ و ساختارهای اتمی و مولکولی باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد در مقیاس بزرگ بدون توجه به اندازه، دارای خواص فیزیکی ثابت هستند، اما این قضیه در مقیاس نانو صدق نمی‌کند. با نزدیک شدن اندازه مواد به مقیاس نانو و افزایش قابل توجه درصد اتم‌ها در سطح ماده، خواص مواد تغییر می‌کند. نانو ذرات تنها بخشی از خواص ماده در حالت توده را از خود نشان می‌دهند. بسیاری از محققان و سیاستمداران جهان معتقدند که علم نانو می‌تواند تحولات اساسی در صنعت جهانی ایجاد کند و صنعت نفت نیز از پیشرفت این فناوری بهره‌مند خواهد شد [۴]. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که نانو ذرات قابلیت بسیار بالایی برای بهبود خواص سیال و کاربردهای حرارتی دارند [۵-۷]. در ادامه، مروری بر پتانسیل‌های بالقوه‌ی نانو ذرات در بهبود ازدیاد برداشت نفت ارائه شده است.

### ۱-۱- پتانسیل‌های نانو ذرات در بهبود ازدیاد برداشت نفت

در حال حاضر، حتی با به کار بردن تکنیک‌های پیچیده ازدیاد برداشت نفت مانند سیلاب‌زنی با آب، گاز، مواد شیمیایی و نیز روش‌های حرارتی، حجم قابل توجهی از نفت و گاز بدون استفاده در مخزن به جا می‌ماند. در سال‌های اخیر با پیشرفت علم نانو و ظهور پتانسیل‌های بالقوه‌ی آن، محققان، استفاده از نانو ذرات در بهبود برداشت نفت را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که نانو تکنولوژی می‌تواند به جدایش مؤثرتر نفت و آب کمک نماید [۸]. با استفاده از فناوری نانو و به کمک نانو سیالات (ذرات نانو معلق در یک سیال پایه) می‌توان میزان برداشت نفت را نسبت به روش‌های فعلی افزایش داد [۹]. به طور کلی، روش‌های شیمیایی

مخزن در یک بازه‌ی زمانی طولانی دوام بیاورند که در این صورت، تعداد مخازنی که می‌توان این روش ازدیاد برداشت را در مورد آن‌ها اجرا کرد، افزایش می‌یابد. نانو امولسیون‌ها با قطر قطره در حدود ۲۰۰-۱ نانومتر، بدون فیلتراسیون دارای تزریق‌پذیری و نفوذپذیری خوبی هستند و در طول زمان بسیار پایدار بوده و در مقابل به‌هم پیوستگی و تعویض فاز توزیع بین قطرات مقاوم هستند [۱۳].

محققان [۱۴] مکانیزم‌های احتمالی اثر نانو ذرات بر بازدهی نفت را به چهار دسته کلی تقسیم‌بندی می‌کنند:

۱. کاهش زاویه تماس سیال با سنگ که باعث تغییر ترشوندگی از نفت‌تر به آب‌تر می‌شود.
۲. کاهش کشش سطحی بین سیال و نفت
۳. کاهش گرانروی نفت که باعث گسیل راحت‌تر نفت در مخزن می‌شود.
۴. ایجاد یک نسبت پویایی مناسب در سیال تزریقی

## ۲-۱- مطالعات صورت گرفته در زمینه ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانو ذرات

پاسخگویی به رشد روزافزون تقاضا برای نفت به دو روش امکان‌پذیر است: یافتن منابع جدید هیدروکربنی و ازدیاد برداشت از مخازن نفتی موجود. به‌ر حال، روند اکتشاف از حوزه‌های نفتی در حال کاهش است و بسیاری از مخازن نفتی نیز در انتهای بازه‌ی تولید خود قرار دارند. اهمیت اصلاح و بهبود روش‌های ازدیاد برداشت از این روست که در بسیاری از مخازن نفتی دنیا حدود دو سوم از نفت مخزن درجا و بدون استفاده در مخزن باقی می‌ماند و به کمک روش‌های مرسوم نمی‌توان آن را برداشت کرد. با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر نانو تکنولوژی در سال‌های اخیر، برخی از محققان به مطالعه و بررسی این روش پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از مواد در مقیاس نانو و اضافه کردن آن به سیالاتی مثل آب، الکل و... نانو سیالات را تولید و در مقیاس آزمایشگاهی به نتایج بسیار خوبی رسیده‌اند. به‌طور کلی، مطالعات صورت گرفته در زمینه ازدیاد برداشت نفت با نانو ذرات را می‌توان به چهار گروه زیر تقسیم‌بندی کرد:

### ۱-۲-۱- تأثیر سیلاب‌زنی با نانو ذرات بر خواص سنگ و سیال

از جمله کاربردهای مهم نانو ذرات در این زمینه می‌توان به استفاده از نانومواد جهت تسهیل جدایش نفت و گاز در داخل مخزن و استفاده از نانوردیاب‌ها در داخل سنگ مخزن اشاره کرد. این نانو ذرات هنگامی که با سنگ‌های حاوی نفت خام تماس پیدا می‌کنند، باعث

باز یافت نفت می‌شوند. طبق مطالعات انجام شده، یکی از تأثیرات اساسی نانو ذرات، تغییر دادن میزان ترشوندگی سنگ مخزن است. لذا، در تحقیقات، تأثیر نانو سیالات بر ترشوندگی سنگ کربناته به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در ازدیاد برداشت نفت مورد بررسی قرار گرفته و بدین منظور از نانو ذرات  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $CaCO_3$ ,  $SiO_2$  و... استفاده می‌شود [۱۵]. جو<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۶] نشان دادند که استفاده از نانو ذرات پلی سیلیکون می‌تواند سنگ مخزن را از حالت نفت‌دوست به آب دوست تغییر دهد. مغزی و همکاران [۱۷] با استفاده از روش قطره چسبیده<sup>۱۱</sup> زاویه تماس بین آب با درصد وزنی‌های متفاوت از نانو ذرات سیلیکا را اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که بعد از سیلاب‌زنی با نانو ذرات، شرایط ترشوندگی سنگ مخزن به سمت شرایط آب‌دوست قوی تغییر می‌کند. آن‌ها برای انجام آزمایش از میکرومدل شیشه‌ای جهت مشاهده نحوه حرکت سیال در محیط متخلخل استفاده کردند که با استفاده از روش جدید بر پایه فناوری لیزر تهیه شده است [۱۸]. صفری [۱۹] نیز در تحقیقات خود تغییرات ترشوندگی مخازن کربناته ایران را با استفاده از نانو ذرات سیلیس بررسی کرد و دریافت که با استفاده از این نانو ذره می‌توان ترشوندگی سطوح سنگ‌های کربناته در مخازن را تغییر داد و از حالت نفت‌دوست به متوسط و آب‌دوست تغییر داد. او با محاسبه زاویه تماس نتیجه گرفت که با افزایش غلظت نانو ذرات، زاویه تماس کاهش می‌یابد که این، به معنای افزایش آب‌دوستی سنگ مخزن است. در این مطالعه یک رابطه‌ی تجربی نیز پیشنهاد گردید که از طریق آن می‌توان برای هر سنگ مشخص در غلظت مشخصی از نانو ذرات، میزان ترشوندگی سنگ مخزن را تعیین نمود.

مخازن نفت سنگین بخش قابل توجهی از منابع نفت دنیا را تشکیل می‌دهند که به دلیل بالا بودن گرانروی نفت موجود در آن‌ها تنها درصد کمی از نفت در جای قابل استخراج است. از این رو، برای کاهش گرانروی نفت سنگین و افزایش ضریب برداشت از این نوع مخازن، باید از روش‌ها و فناوری‌های جدید کمک گرفت. شاکرلو<sup>۱۲</sup> و همکاران [۲۰] دریافتند که اضافه کردن نانو ذرات به نفت سنگین باعث کاهش بیشتر گرانروی نفت در مقیاسه با میکرو ذرات خواهد شد. آن‌ها همچنین نشان دادند که انتقال حرارت در نفت سنگین وقتی نانو ذرات فلزی مس به آن اضافه می‌شود، افزایش می‌یابد. مهرآبادی [۲۱] از نانو ذرات فلزی اکسید مس برای افزایش هدایت حرارتی دی‌اکسید کربن فوق بحرانی به‌عنوان سیال پایه تزریقی به نفت سنگین و در نتیجه کاهش گرانروی نفت استفاده کرد. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که خواص حرارتی نانو ذرات فلزی

شده قادر به انجام وظایف خود نیستند، بسیار مفید خواهد بود و موجب برداشت بیشتر نفت می‌گردد.

#### ۱-۲-۲- افزایش ضریب برداشت نفت با استفاده از نانو سیالات

امروزه نسل جدیدی از سیالات مورد توجه محققان در صنایع نفت و گاز قرار گرفته‌اند که نانو سیالات نام دارند و از افزودن نانو ذرات با غلظت‌های حجمی کم به سیالات به منظور افزایش و بهبود خواص آن‌ها به دست می‌آیند. از مهمترین خواص نانو سیالات می‌توان به این مورد اشاره کرد که خواص آنها به شدت تابع ابعاد نانو ذرات موجود در آن‌هاست. چنین سیالاتی می‌توانند با تغییر ترشوندگی، کاهش نیروی کششی و نیز استحکام ماسه، فرآیند ازدیاد برداشت از مخازن را بهبود دهند [۲۵]. اگلو<sup>۱۹</sup> و همکاران [۱۵] با در نظر گرفتن نانو مواد شامل اکسیدهای آلومینیوم، روی، منیزیم، آهن، زیرکونیوم، نیکل، قلع و سیلیکون و در نظر گرفتن چهار سیال شامل آب مقطر، آب نمک، اتانول و دیزل به عنوان محیط مخلوط شدن<sup>۲۰</sup> مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را طراحی کردند. اگلو و همکاران [۱۵] دریافتند که انتخاب یک سیال به عنوان محیط پخش شدن، نقش مهمی در بازدهی نفت به کمک نانو ذرات ایفا می‌کند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین و بیشترین بازدهی به ترتیب با استفاده از آب مقطر و اتانول به دست می‌آید. هندرینگرات و همکاران [۲۶] با استفاده از نانو ذرات آب دوست سیلیکا<sup>۲۱</sup> نشان دادند که نانو سیالات، پتانسیل بالایی در بازدهی نفت به عنوان بازدهی ثانویه در مقایسه با بازدهی ثالثیه دارند و با استفاده از نانو سیالات، به طور میانگین بازدهی نفت به روش ثانویه ۸ درصد و به روش ثالثیه ۲ درصد افزایش خواهد یافت. هارون<sup>۲۲</sup> و همکاران [۲۷] با استفاده از نانو ذرات  $\text{CuO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{NiO}$  نتیجه گرفتند که همیشه بازدهی نفت با برقراری یک جریان الکتریسته در دو طرف مغزه بیشتر خواهد شد. روستایی و همکاران [۲۳] با آزمایش روی ذرات چربی دوست و آب گریز<sup>۲۳</sup> و ذرات خنثی پلی-سیلیکون<sup>۲۴</sup> دریافتند که با تزریق نانو سیال میزان بازدهی نفت به ترتیب برای ذرات HLP و NWP حدود ۳۲/۲ و ۲۸/۵۷ درصد نسبت به سیلاب زنی با آب افزایش خواهد داشت. مغزی و همکاران [۱۷] نیز نشان دادند که برای سیال با ۰/۱ درصد وزنی از نانو ذرات سیلیکای ۸/۷ درصد و برای ۳ درصد وزنی از ذرات سیلیکای ۲۶ درصد بازدهی علاوه بر سیلاب زنی با آب به دست خواهد آمد.

راشیت<sup>۲۵</sup> و همکاران [۲۸] روشی نوین به منظور کاهش گرانروی نفت سنگین با استفاده از نانو ذرات فلزی ارائه کردند. آن‌ها از نانو ذرات فلزی برای بهبود هدایت گرمایی دی‌اکسید کربن فوق بحرانی<sup>۲۶</sup>

اکسید مس، خواص شیمیایی و حلالیت مواد فعال سطحی و خواص امتزاج پذیری دی‌اکسید کربن فوق بحرانی به کاهش گرانروی نفت سنگین و تسهیل در استخراج آن کمک می‌کنند. رشیدی و همکاران [۲۲] از نانو کاتالیست مولیبدن دی‌سولفید ورقه‌ای به صورت سیال تزریقی برای کاهش گرانروی، افزایش تحرک پذیری و جداسازی نفت خام سنگین و غیر قابل استحصال استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از این نانو کاتالیست، به کاهش گرانروی نفت سنگین و تسهیل در استخراج آن کمک می‌کند. روستایی و همکاران [۲۳] با استفاده از سه نوع نانو ذره پلی‌سیلیکون آب دوست، آب گریز و خنثی نشان دادند که این ذرات باعث کاهش زاویه تماس و آب دوست شدن سنگ مخزن می‌شوند. هندرینگرات<sup>۲۳</sup> و همکاران [۲۴] محلولی از نانو ذرات را به داخل میکرو مدل شیشه‌ای تزریق کرده و کاهش کشش سطحی بین نفت و آب، به تله افتادن<sup>۱۴</sup> ذرات نانو و کاهش تراوایی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که غلظت نانو ذرات تأثیر مهمی بر کشش بین سطحی دارد و تعادل بین نانو سیال و نفت سریع تر از نفت و آب نمک رخ می‌دهد. ماک<sup>۱۵</sup> و همکاران [۳۰] نتیجه گرفتند که میزان برداشت زیاد نفت با استفاده از ژل پراکنندگی کلوییدی<sup>۱۶</sup> (CDG) نسبت تحرک نفت و آب را کاهش می‌دهد و البته CDG برای کنترل تراوایی در مخازن عمیق بسیار مناسب است. مطالعه بر مغزه‌های تازه‌ی مخازن نشان می‌دهد که میانگین افزایش بازدهی نفت با استفاده از مواد CDG، ۴۰ درصد خواهد بود [۳۱]. اسکيج<sup>۱۷</sup> و همکاران [۳۲] این ذرات را در مقیاس ۱۰۰ نانومتر به کار بردند و مکانیزم‌های انحراف میکروسکوپی را با مقایسه خواص تحرک پذیری نفت با نانو ذرات سیلیکا و ذرات CDG در مقیاس نانو مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که ذرات CDG به انرژی بیشتری برای تغییر شکل و از بین رفتن نیاز دارند. به همین دلیل می‌توان از آن‌ها در مخازن عمیق که دارای دما و فشار بالایی هستند، استفاده کرد. محمدی مفرد و همکاران [۳۳] نیز به بررسی خواص تحرک پذیری نفت با نانو ذرات سیلیکا و نانو ذرات CDG و تأثیر آن‌ها در انحرافات میکروسکوپی جریان، روش‌های پیشرفت انحرافات میکروسکوپی شامل گرفتگی منافذ و انحرافات سیالات تزریقی پرداختند. در بیشتر آزمایش‌ها مشاهده شد که تولید نفت افزایش یافته و نسبت تحرک آب به نفت کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که ژل‌های کلوییدی ابزاری مناسب برای کنترل نفوذ پذیری در عمق زیاد هستند. آن‌ها همچنین دریافتند که استفاده از نانو ذرات CDG برای تولید نفت از مخزن دارای سنگ مخزن آب دوست در شرایطی که ذرات سیلیکا و پلی‌اکریل آمید هیدرولیز



دو نوع ماده فعال سطحی آنیونی (SDS) و کاتیونی (C12TAB) و همچنین مواد فعال سطحی پایه آبی حاوی نانوذرات سیلیکا را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حضور نانوذره در محلول ماده فعال سطحی به طرز چشمگیری باز یافت نفت را افزایش می‌دهد. همچنین تصاویر میکروسکوپی نشان داد که نانوذرات سیلیکا، ترشوندگی محیط را از نفت دوست به آب دوست تغییر می‌دهند.

#### ۱-۲-۴- شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانو ذرات

با توجه به مطالعات اندک صورت گرفته در مورد تأثیر سیلاب‌زنی با نانوذرات به‌ویژه در مقیاس میکروسکوپی، مکانیزم‌های تأثیر نانوذرات بر بازدهی نفت کاملاً مشخص نیستند. به همین دلیل شبیه‌سازی و مدل‌سازی فرایند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانو ذرات و مطالعه تأثیر پارامترهای موثر بر راندمان ازدیاد برداشت و حرکت نانوذرات در محیط متخلخل در طی عملیات سیلاب‌زنی به صورت اندک انجام شده است و نیاز به انجام مطالعات بیشتری در این خصوص به‌خوبی احساس می‌شود.

یوسف<sup>۳۵</sup> و همکاران [۳۷] یک مدل ریاضی برای حرکت و گیر افتادن نانوذرات در مخازن نفتی تحت شرایط دفع کامل ارائه دادند. با استفاده از این مدل توسعه داده شده، می‌توان غلظت‌های متفاوت ذرات در محلول و رسوب را محاسبه و با استفاده از آن، عمق نفوذ و انتشار و تجمع نانوذرات در هر نقطه از مخزن را به دست آورد. وو<sup>۳۶</sup> و همکاران [۳۸] در یک مطالعه تمرکز اصلی خود را بر روی فهمیدن نقش نانوذرات در محلول‌های دوتایی آب-نفت در نانو کانال محدود قرار دادند. آن‌ها از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که با کوچک شدن نانو کانال، فشار وارد شدن یک مخلوط دوتایی نفت-آب به درون آن به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. آن‌ها دریافتند شبیه‌سازی دینامیک مولکولی می‌تواند نقش نانوذرات در حرکت نفت در محیط‌های متخلخل و در مقیاس نانو را بهتر نشان دهد، اگرچه فهمیدن دقیق این مکانیزم به کاوش‌های بیشتری نیاز دارد. میراندا<sup>۳۷</sup> و همکاران [۳۹] نیز با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، ترشوندگی و نفوذپذیری سیال را در مقیاس مولکولی مورد مطالعه قرار داده و پایداری و تحرک‌پذیری نانوذرات سیلیکای بهبود یافته<sup>۳۸</sup> را برای ازدیاد برداشت نفت، خصوصاً در غلظت نمک و دمای بالا بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش غلظت نمک، ضریب نفوذ نانوذرات افزایش می‌یابد و محاسبات آن‌ها نشان داد که خواص جذب و نمک محلول‌ها تأثیر قابل توجهی

یا سیال تزریقی کاهنده گرانروی<sup>۳۷</sup> و کاهش گرانروی نفت سنگین استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که تزریق دی‌اکسید کربن به تنهایی به ۵۸ درصد باز یافت نفت منجر می‌شود، در حالی که با استفاده از نانوذرات CuO این میزان تا ۷۱ درصد قابل افزایش است.

#### ۱-۲-۳- ازدیاد برداشت با استفاده از نانوذرات همراه با مواد فعال سطحی

تحقیقات نشان می‌دهند که نانو مواد فعال سطحی سبب کاهش فشار موینگی<sup>۳۸</sup> در ناحیه شکست مخزن شده و جریان یافتن سیال مخزن را در این ناحیه بهبود می‌بخشند. زیرا زمانی که ابعاد این مواد در محدوده نانومتری قرار می‌گیرد، توانایی آنها برای نفوذ به درون حفرات سازند و نیز سطح فعال آن‌ها افزایش چشمگیری می‌یابد [۲۹]. کیو<sup>۳۹</sup> و همکاران [۳۴] با مخلوط کردن نانوامولسیون‌ها با نفت سنگین آلاسکا که از قبل آب آن گرفته شده است، به بررسی تغییرات رئولوژی در طی فرایند ازدیاد برداشت پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مواد فعال سطحی امولسیونی تشکیل می‌دهند و هر دو گروه آب دوست و آب گریز را در خود نگه می‌دارند. به همین خاطر می‌تواند کشش سطحی بین آب و نفت را با جذب در سطح تماس مایع-مایع کاهش دهند. ماندال<sup>۳۰</sup> و همکاران [۱۲] برای تهیه امولسیون نفت در آب از ترکیب نفت با یک سری از مواد فعال سطحی اتوکسیله<sup>۳۱</sup> غیر یونی استفاده کردند و چهار نوع ماده فعال سطحی مختلف از خانواده تریجتول و نفت معدنی (۹۸ درصد) به عنوان فازی آلی به کار بردند و نتیجه گرفتند که بازدهی نفت با استفاده از مواد فعال سطحی خانواده تریجتول<sup>۳۲</sup> نسبت به سیلاب‌زنی با آب ۳۱ درصد بیشتر خواهد شد. سلیمانوف<sup>۳۳</sup> و همکاران [۲۵] بیان کردند که ذرات نانو در غلظت ۰/۰۰۷۸-۰/۰۰۴ درصد محلول سولفانول<sup>۳۴</sup>، کشش سطحی را ۷۹-۷۰ درصد کاهش می‌دهند. در حضور ذرات نانو، جذب سولفانول پایدارتر (۱۴/۵ برابر) و جذب ماده فعال سطحی، بیشتر (۱۸/۵ برابر) خواهد شد. نره‌ای و همکاران [۳۵] نیز از یک نانو ماده فعال سطحی کاتیونی استفاده کردند و اثرات تزریق آن در غلظت‌های مختلف نشان داد که با کاهش غلظت نانوماده فعال سطحی، میزان کشش سطحی کاهش و ترشوندگی مخزن از حالت نفت دوست به آب دوست تغییر می‌کند. بدین منظور، یک دستگاه آزمایشگاهی و بومی قابل اتصال به دستگاه سی‌تی‌اسکن چرخشی طراحی و ساخته شد. جوادی‌فر و همکاران [۳۶] نیز بازده میکروسکوپی و ماکروسکوپی برداشت نفت سنگین در محیط متخلخل شکافدار پنج نقطه‌ای در فرایند تزریق

برکشش سطحی دارد.

یکی از روش‌های ازدیاد برداشت نفت، تزریق گاز است. بنابراین درک درست حرکت سیال حاوی گاز و نانوذره می‌تواند به افزایش بازدهی روش تزریق گاز کمک کند. الامین<sup>۳۹</sup> و همکاران [۴۰] یک مدل ریاضی را برای توصیف حرکت نانوذرات که توسط دی‌اکسید کربن حمل می‌شوند در یک محیط متخلخل ارائه دادند. نیروهای بویانسی و موینگی<sup>۴۰</sup> و نفوذ براونی<sup>۴۱</sup> در این مدل در نظر گرفته شده‌اند. الامین و همکاران [۴۱] همچنین یک مدل ریاضی برای توصیف حرکت نانوذرات حمل شده توسط یک جریان دوفازی شامل آب و نفت در یک محیط متخلخل به دست آوردند. آن‌ها با استفاده از یک سری آزمایش عددی و با توجه به اضافه کردن نانوذرات، تغییر خواص سیال و جامد و نیز تغییرات اشباع آب، غلظت نانوذرات و نسبت تخلخل را مطالعه کردند. سالاما<sup>۴۲</sup> و همکاران [۴۲] نیز یک مدل ریاضی و شبیه‌سازی عددی برای توصیف جذب سوسپانسیون آب-نانوذرات در جریان دوفازی آب-نفت در یک محیط متخلخل ارائه دادند. این مدل برای در بر گرفتن فشار موینگی منفی و روابط تراوایی نسبی مخلوط گسترش داده شد تا برازش خوبی با سیستم‌های نفت‌دوست-آب‌دوست داشته باشد. نیروهای بویانسی، موینگی و حرکات براونی نیز در این مدل در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها در طول پژوهش خود، تغییرات خواص جامد و سیال را با اضافه کردن نانوذرات به منظور امکان بهبود برداشت نفت با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. نجاتی نژاد و همکاران [۴۳] نیز با در نظر گرفتن مکانیسم‌های فعال طی حرکت نانوذرات درون محیط متخلخل و با حل معادله پیوستگی، معادله نفوذ-جابجایی و معادلات کمکی دیگر از قبیل تغییر تخلخل و تراوایی، یک مدل عددی ارائه کردند. این مدل با محاسبه توزیع غلظت نانوذرات در طول مغزه، قادر است تغییرات تخلخل و تراوایی مطلق را نسبت به زمان تعیین کند. آن‌ها مشاهده کردند که با نشست و انسداد نانوذرات درون محیط متخلخل، تراوایی مطلق سنگ کاهش می‌یابد. این موضوع برای سازندهای با تراوایی بالا مشکل ساز نخواهد بود، اما در مورد سازندهای با تراوایی کم، باید مورد توجه قرار گیرد و توصیه می‌شود که این مدل عددی با یک روش بهینه‌سازی همراه شود. غرب‌شاهی و همکاران [۴۴] شبیه‌سازی فرایند ازدیاد برداشت با استفاده از نانوذرات در میکرومدل را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با اضافه کردن نانوذرات به آب مقطر، اثر پدیده‌ی انگشتی شدن کاهش می‌یابد و افزودن نانوذرات در کسر حجمی‌های بسیار کوچک تأثیر قابل محسوس بر افت فشار ندارد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که تأثیر نانوذرات بر ضریب بازدهی نفت

در حجم منفذهای<sup>۴۳</sup> کم سیال تزریقی قابل محسوس نخواهد بود.

### ۳-۱- چالش‌های پیش رو برای استفاده از نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت

با توجه به اینکه از استفاده از نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت مدت زیادی نمی‌گذرد، به همین دلیل بسیاری از نتایجی که در قسمت قبل ذکر شد، هنوز به طور حتمی اثبات نشده‌اند و نیاز به مطالعه‌ی بیشتری خواهند داشت. به همین دلیل هنوز موانعی بر سر راه استفاده از این روش در پروژه‌های میدانی وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- آیا استفاده از نانوذرات در مقایسه با دیگر روش‌های ازدیاد برداشت نفت از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است؟
  - آیا استفاده از این روش موجب آسیب به سازند و کاهش تراوایی و کاهش تولید نفت می‌شود؟
  - تأثیر استفاده از این روش بر محیط زیست چیست؟
  - آیا نوع سیال پایه بر بازدهی این روش موثر است؟
  - آیا نوع نانوذره که بیشترین بازدهی را داشته باشد، مشخص شده است؟
  - آیا استفاده از نانوسیالات نیاز به تجهیزات خاصی برای انجام عملیات سیلاب‌زنی دارد؟
- البته با توجه به مورد توجه قرار گرفتن این روش در سال‌های اخیر و سرعت بالای مطالعات صورت گرفته در این زمینه، می‌توان امیدوار بود که هرچه سریع‌تر موانع پیش روی استفاده از این روش در کاربردهای میدانی و وسیع برداشته شود.

### نتیجه‌گیری

طبق تحقیقات انجام شده تاکنون، بسیاری از مشکلات و ضعف‌هایی که صنعت نفت و گاز، چه در بخش بالادستی و چه در بخش پایین‌دستی با آنها روبه‌روست، می‌تواند به کمک فناوری نانو مرتفع گردد. نتایج آزمایش‌هایی که در این مقاله مرور شد، نشان می‌دهد که:

۱. هر نوع نانوذره‌ای باعث افزایش بازدهی نفت نمی‌شود. لذا باید در انتخاب نوع ذره کاملاً دقت شود.
۲. نوع سیالی که به عنوان محیط پخش شدن نانو ذرات در نظر گرفته می‌شود، نقش مهمی در موثر بودن ذرات نانو بر بازدهی نفت دارد.
۳. با اضافه کردن نانو ذرات به سنگ مخزن، تغییر ترشوندگی از



نفت-تر به آب-تر مشاهده می‌شود.

۴. استفاده از نانوسیالات، افزایش بازدهی نفت بین ۳۵-۵ درصد علاوه بر بازدهی با سیال اصلی را باعث می‌شود که این مقدار به نوع نانوذر و قطر آن، نوع سیال و غلظت نانوذر در آن، نرخ تزریق سیال، هموزن یا هتروژن بودن بستر و شرایط سنگ و نفت بستگی دارد. ۵. نانو ذرات به دلیل اندازه کوچکی که دارند، از گلوگاه حفره‌ها کوچک‌ترند و رسوب خیلی کمی در مخزن دارند و به راحتی می‌توانند در مغزه منتشر شوند. به همین دلیل کاهش تراوایی کمی

بعد از سیلاب‌زنی به وجود می‌آورند.

فناوری نانو، قابلیت‌ها و کاربردهای فراوانی می‌تواند در ازدیاد برداشت نفت داشته باشد و اگر چه بسیاری از این موفقیت‌ها هم اکنون در فاز تحقیق و توسعه در آزمایشگاه‌ها هستند، در صورتی که مشکلات و موانعی که هم‌اکنون مانع به کار گرفته شدن این فناوری در صنعت نفت وجود دارد از میان برداشته شود، این روش می‌تواند به‌طور گسترده‌ای در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد و در این صورت، فواید بسیاری برای کشور به ارمغان خواهد آورد.

## پانویس‌ها

- |                                      |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
| 1. Enhanced Oil Recovery (EOR)       | 17. Skauge                                   | 29. Qiu                                |
| 2. Solution Gas Drive                | 18. Hydrolyzed polyacrylamide (HPAM)         | 30. Mandal                             |
| 3. Gas Cap Drive                     | 19. Ogolo                                    | 31. Ethoxylated                        |
| 4. Aquifer Drive                     | 20. Dispersion Media                         | 32. Tergitol                           |
| 5. Rock and Fluid Expansion          | 21. Hydrophilic Silica                       | 33. Suleimanov                         |
| 6. Gravity Segregation               | 22. Haroun                                   | 34. Sulphanol                          |
| 7. Surfactant                        | 23. Hydrophobic Lipophilic Polysilicon (HLP) | 35. You                                |
| 8. Wettability                       | 24. Neutrally Wet Polysilicon (NWP)          | 36. Wu                                 |
| 9. Interfacial Surface Tension (IFT) | 25. Rusheet                                  | 37. Miranda                            |
| 10. Ju                               | 26. SuperCritical CO2                        | 38. Functionalized Silica Nanoparticle |
| 11. Sessile Drop                     | 27. Viscosity Reduction Injectant (VRI)      | 39. El-Amin                            |
| 12. Shokrlu                          | 28. Capillary Pressure                       | 40. Buoyancy and Capillary Forces      |
| 13. Hendraningrat                    |  | 41. Brownian Diffusion                 |
| 14. Retention                        |  | 42. Salama                             |
| 15. Mack                             |  | 43. Pore Volume                        |

## منابع

- [1] G. P. Willhite and D. W. Green, Enhanced Oil Recovery, vol. 6, 1998.
- [۲] ریاض خراط، "ازدیاد برداشت نفت" انتشارات نهر دانش، ۱۳۹۱.
- [3] J. R. Hite, B. F. Group, S. M. Avasthi, and P. L. Bondor, "Planning Successful EOR Projects," J. Pet. Technol., no. March, pp. 28-29, 2005.
- [4] S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, and P. Koblinski, "Nanofluids," Encycl. Nanosci. Nanotechnol., vol. 6, no. 1, pp. 757-773, 2004.
- [5] T. Tyler, O. Shenderova, G. Cunningham, J. Walsh, J. Drobnik, and G. McGuire, "Thermal transport properties of diamond-based nanofluids and nanocomposites," Diam. Relat. Mater., vol. 15, no. 11, pp. 2078-2081, 2006.
- [6] W. Yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S. U. S. Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements," Heat Transf. Eng., vol. 29, no. 5, pp. 432-460, 2008.
- [7] S. U. S. Choi, "Nanofluids: from vision to reality through research," J. Heat Transfer, vol. 131, no. 3, 2009.
- [8] S. Ayatollahi and M. Zerafat, "Nanotechnology-Assisted EOR Techniques: New Solutions to Old Challenges," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference, 2012, pp. 1-15.
- [9] A. J. P. Fletcher and J. P. Davis, "How EOR can be transformed by nanotechnology," in SPE Improved Oil Recovery Symposium, 2010, no. April, pp. 24-28.
- [10] S. Kapusta, L. Balzano, and P. Te Riele, "Nanotechnology Applications in Oil and Gas Exploration and Production," in International Petroleum Technology Conference, 2011.
- [11] R. Krishnamoorti, "Extracting the benefits of nanotechnology for the oil industry," J. Pet. Technol., vol. 58, no. 11, 2006.
- [12] A. Mandal, A. Bera, K. Ojha, and T. Kumar, "Characterization of Surfactant Stabilized Nanoemulsion and Its Use in Enhanced Oil Recovery," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference, 2012, pp. 1-13.
- [13] S. Ponmani, R. Nagarajan, and J. Sangwai, "Applications of Nanotechnology for Upstream Oil and Gas Industry," J. Nano Res., vol. 24, pp. 7-15, 2013.
- [14] X. Kong, M. M. Ohadi, T. Petroleum, and K. Xiangling,

- "Applications of Micro and Nano Technologies in the Oil and Gas Industry-Overview of the Recent Progress," in Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 2010.
- [15] N. A. Ogolo, O. A. Olafuyi, and M. O. Onyekonwu, "Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles," in SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, 2012.
- [16] B. Ju, T. Fan, and M. Ma, "Enhanced oil recovery by flooding with hydrophilic nanoparticles," *China Particology*, vol. 4, no. 1, pp. 41-46, 2006.
- [17] A. Maghzi, S. Mohammadi, M. H. Ghazanfari, R. Kharrat, and M. Masihi, "Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 40, pp. 168-176, Jul. 2012.
- [18] S. Mohammadi, A. Maghzi, M. H. Ghazanfari, M. Masihi, A. Mohebbi, R. Kharrat, and P. Taylor, "On the Control of Glass Micro-model Characteristics Developed by Laser Technology," *Energy Sources*, vol. 35, no. 3, pp. 193-201, 2013.
- [19] مهدی صفری، "مطالعه نانو تکنولوژی در ازدیاد برداشت نفت از مخازن ایران"، اولین همایش ملی نانو مواد و نانو تکنولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، ۱۳۹۰.
- [20] Y. H. Shokrlu and T. Babadagli, "Effects of Nano-Sized Metals on Viscosity Reduction of Heavy Oil/Bitumen During Thermal Applications," in Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 2010, no. Omole 1999.
- [21] عادل مهر آبادی، "استفاده از نانو ذرات فلزی اکسید مس در ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین"، اولین کنفرانس علوم و فناوری نانو، صفحه ۵۱۶-۵۱۲، ۱۳۸۹.
- [22] علیمراد رشیدی، سجاد محمدی لندی، ایمان برونی، "استفاده از مواد نانو ساختار جهت بهبود ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، صفحه ۵-۱، ۱۳۹۱.
- [23] A. Roustaei, J. Moghadasi, H. Bagherzadeh, and A. Shahrabadi, "An Experimental Investigation of Polysilicon Nanoparticles' Recovery Efficiencies through Changes in Interfacial Tension and Wettability Alteration," *Proc. SPE Int. Oilf. Nanotechnol. Conf.*, Jun. 2012.
- [24] L. Hendraningrat, L. Shidong, and O. Torsæter, "A Glass Micromodel Experimental Study of Hydrophilic Nanoparticles Retention for EOR Project," in SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, 2012, no. 2010.
- [25] B. a. Suleimanov, F. S. Ismailov, and E. F. Veliyev, "Nanofluid for enhanced oil recovery," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 78, no. 2, pp. 431-437, Aug. 2011.
- [26] L. Hendraningrat, B. B. Engeset, S. Suwarno, and O. Torsæter, "Improved Oil Recovery by Nanofluids Flooding: An Experimental Study," in 2012 SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, 2012, no. 2006.
- [27] M. M. Haroun, A. Ansari, N. Al Kindy, N. A. Sayed, B. Ali, H. Sarma, S. Alhassan, N. Al Kindy, N. Abou Sayed, and B. Abdul Kareem, "Smart Nano-EOR Process for Abu Dhabi Carbonate Reservoirs," in Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, 2012.
- [28] D. Rusheet and R. Shah, "Application of Nanoparticle Saturated Injectant Gases for EOR of Heavy Oils," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2009, no. August 2003, pp. 4-7.
- [29] B. Y. Jamaloei, "Insight into the chemistry of surfactant-based enhanced oil recovery processes," *Recent Patents Chem. Eng.* vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2009.
- [30] J. C. Mack and J. E. Smith, "In-depth colloidal dispersion gels improve oil recovery efficiency," in SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 1994.
- [31] H. Chang, S. Xingguang, X. Long, L. Heng, G. Zhidong, Y. Yuming, X. Yuguo, C. Gang, S. Kaoping, and J. Mack, "Successful field pilot of in-depth colloidal dispersion gel (CDG) technology in Daqing oil field," in SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, 2004.
- [32] T. Skauge, S. Hetland, K. Spildo, A. Skauge, and U. Cipr, "Nano-sized particles for EOR," in SPE Improved Oil Recovery Symposium, 2010, no. April, pp. 24-28.
- [۳۳] مجوبه محمدی مفرد، اسماعیل اکبری، پریسا حاتمی، مهدی حاتمی، "استفاده از نانو ذرات ژل های کلئوئید (CDG) برای ازدیاد برداشت از مخازن نفتی"، اولین کنفرانس ملی کاربرد نانو تکنولوژی در صنایع نفت و پتروشیمی، صفحه ۶-۱، ۱۳۹۱.
- [34] F. Qiu, "The Potential Applications in Heavy Oil EOR With the Nanoparticle and Surfactant Stabilized Solvent-Based Emulsion," in Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 2010, pp. 1-12.
- [۳۵] مجتبی نره ای، عقیل قانلی، مصطفی مظفریان، "اثر تزریق نانو سورفکتانت کاتیونی در ازدیاد برداشت نفت به روش سیلابزنی توسط سی تی اسکن چرخشی" اولین کنفرانس ملی کاربرد نانو تکنولوژی در صنایع نفت و پتروشیمی، ۱۳۹۱.
- [۳۶] علی اکبر جوادی فر، محمد حسین غضنفری، رضا روستا آزاد، سید شهاب الدین آیت الهی، "مطالعه آزمایشگاهی اثر مواد فعال سطحی آنیونی و کاتیونی و تاثیر افزودن نانو ذرات سیلیکا به آنها در بهبود ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین شکافدار با استفاده از دستگاه میکرو مدل، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، صفحه ۱۲-۱، ۱۳۹۱.
- [37] Z. You, K. Aji, A. Badalyan, and P. Bedrikovetsky, "Effect of Nanoparticle Transport and Retention in Oilfield Rocks on the Efficiency of Different Nanotechnologies in Oil Industry," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference, 2012, no. June, pp. 12-14.
- [38] J. Wu, J. He, O. Torsæter, Z. Zhang, and O. Torsæter, "Effect of Nanoparticles on Oil-Water Flow in a Confined Nanochannel: a Molecular Dynamics Study," in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference, 2012.
- [39] C. Miranda, L. Lara, and B. Tonetto, "Stability and Mobility of Functionalized Silica Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery Applications," *SPE Int. Oilf. ....*, 2012.
- [40] M. El-Amin, S. Sun, and A. Salama, "Modeling and Simulation of Nanoparticle Transport in Multiphase Flows in Porous Media: CO2 Sequestration," ... *Fluid Dyn. Simul. ....*, pp. 1-10, 2012.
- [41] M. El-amin, A. Salama, and S. Sun, "Modeling and Simulation of Nanoparticle Transport in a Two-Phase Flow in Porous Media," *SPE Int. Oilf. ....*, 2012.
- [42] A. Salama, M. El-amin, and S. Sun, "Enhanced Oil Recovery by Nanoparticles Injection: Modeling and Simulation," 18th Middle East Oil Gas Show ..., no. March, pp. 10-13, 2013.
- [۴۳] عاطفه نجاتی نژاد، محمد حسین غضنفری، منوچهر وثوقی، محسن مسیحی، "مطالعه آزمایشگاهی و مدل سازی بهبود ازدیاد برداشت از مخازن نفت در فرآیند تزریق آب حاوی ذرات نانو سیلیکا"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، صفحه ۷-۱، ۱۳۹۱.
- [44] R. Gharibshahi, A. Jafari, Z. Kiaei, "CFD Investigation of Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles", The 8th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, 2014.