

## کاربرد نانوذرات در انواع سنگ مخازن نفتی و گازی

عارفه نقی زاده<sup>۱</sup>، رضا آذین<sup>۲\*</sup>، شهریار عصفوری<sup>۳</sup>، روح‌اله فاتحی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه خلیج فارس

۲- دانشیار مهندسی نفت، دانشگاه خلیج فارس

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه خلیج فارس

۴- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه خلیج فارس

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۶

پیام‌نگار: reza.azin@pgu.ac.ir

### چکیده

در سال‌های اخیر با پیشرفت علم نانو، بهره‌گیری از نانوذرات در حوزه‌های مختلف صنعت نفت و گاز، بخصوص در واقع ازدیاد برداشت از مخزن مورد توجه قرار گرفته است. عوامل مختلفی، از جمله نوع سنگ مخزن و خصوصیات سازندی و زمین‌شناختی، ترشوندگی سطوح و توزیع سیالات درون مخزن در فرایند تولید بهینه از مخزن تأثیرگذارند. استفاده از نانوذرات برای بهبود ترشوندگی سطح روشی و به‌شمار می‌آید. تغییر ترشوندگی سنگ مخزن موجب افزایش آهنگ تولید و کاهش اشباع باقی‌مانده سیال در محیط متخلخل می‌شود. سطح سنگ مخزن از کانی‌های زیادی با شیمی سطح و خواص جذب متفاوتی است که می‌توانند ترشوندگی سنگ را تحت تأثیر قرار دهند. در این پژوهش، پس از توضیح ترشوندگی، توانایی نانوذرات مختلف در تغییر ترشوندگی انواع سنگ‌های مختلف مخزنی، از جمله کربناته و ماسه سنگی با هدف ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز مطالعه و بررسی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** ازدیاد برداشت، ترشوندگی، جنس سنگ، مخازن نفت و گاز، نانوذرات.

### ۱. مقدمه

طبیعی مخزن به کمک تزریق آب یا گاز انجام می‌شود [۱]. استخراج مرحله سوم، عموماً به روش‌هایی اطلاق می‌شود که برای بازیابی بیشتر سیال از مخزن بعد از مراحل بازیابی اولیه و ثانویه و با هدف افزایش تولید صورت می‌گیرند. این روش‌های برداشت شامل روش‌های گرمایی، شیمیایی، امتزاجی، غیر امتزاجی و روش‌های نوین است [۲-۴]. در حال حاضر با به‌کار بردن تکنیک‌های پیچیده ازدیاد برداشت نفت و گاز مانند سیلاب‌زنی با آب، گاز، روش‌های گرمایی، حجم چشمگیری از نفت و گاز در مخزن به جا می‌ماند که به طور عمده ناشی از شرایط ترشوندگی نامطلوب،

معمولاً هر میدان در طول دوره فعالیت خود مراحل مختلفی را طی می‌کند. در برداشت اولیه از انرژی طبیعی مخزن برای تولید استفاده می‌شود که این انرژی‌ها شامل انبساط سنگ و سیال، رانش با نیروی گاز محلول، رانش کلاهدک گازی، رانش آبد و ریزش گرانی است. مرحله دوم تولید معمولاً بعد از کاهش انرژی مخزن و در نتیجه کاهش تولید، استفاده می‌شود. برداشت ثانویه با افزایش انرژی

\* بوشهر، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، گروه مهندسی نفت

## ۱-۲ روش‌های مختلف اندازه‌گیری ترشوندگی

اندرسن و همکاران برای تعیین روش‌های مختلف اندازه‌گیری ترشوندگی سطح مطالعات جامعی انجام دادند. اطلاعات ارزشمندی از هر کدام از روش‌ها به منظور ارزیابی این فرایند حاصل می‌شود [۹].

### ۱-۱-۲ اندازه‌گیری زاویه تماس

زاویه بین سطح جامد (سنگ) با خط مماس وارد بر سطح تماس دو سیال که معمولاً نسبت به سیال چگال‌تر اندازه‌گیری می‌شود، زاویه تماس نام دارد. معادله یانگ برای توصیف تغییر ترشوندگی به کار می‌رود:

$$\cos(q) = \frac{s_{os} - s_{ws}}{s_{ow}} \quad (1)$$

در این معادله  $\sigma_{os}$ ،  $\sigma_{ws}$  و  $\sigma_{ow}$ ، به ترتیب، کشش سطحی و بین سطحی میان فازهای نفت-سطح، آب-سطح و آب-نفت‌اند. مقادیر زاویه تماس کم‌تر از زاویه قائمه نمایان‌گر آب‌دوستی سنگ و زوایای بزرگ‌تر از قائمه، بیانگر نفت‌دوستی و در حالت قائم ترشوندگی از نوع خنثی است [۱۰]. اندازه‌گیری زاویه تماس یکی از روش‌های سریع و به صرفه است. حساسیت زیاد نسبت به آلودگی و یافتن سطحی که بیانگر مشخصه‌های مخزن باشد، می‌تواند از جمله محدودیت‌های این روش باشد. بسیاری از مطالعات نشان دادند که ترکیب سطح و کانی‌شناسی اثر چشمگیری روی ترشوندگی دارند. یکی از روش‌های رایج برای رسیدن به حداقل خطا، تکرار اندازه‌گیری در نقاط مختلف سطح است. شارما و مهانتی بیان کردند که نتایج مثبت اندازه‌گیری زاویه تماس به طور قطع نمی‌تواند تولید بیشتر را تضمین کند. آن‌ها از مواد فعال سطحی برای تغییر ترشوندگی سطح کلسیت استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های زاویه تماس، تغییر ترشوندگی را نشان می‌داد، اما آزمایش‌های تراوایی با شکست مواجه شد [۱۱].

### ۲-۱-۲ تراوایی خودبه‌خودی

فرایند تراوایی، توانایی فاز ترکنده برای جابه‌جایی فاز غیرتر در شرایط استاتیکی (ایستا) را بررسی می‌کند. رابطه بین فشار موینگی

ناهمگنی سنگ مخزن است. در این زمینه، پیدایش فناوری نانو در چارچوب روش‌های ازدیاد برداشت از جمله تغییر ترشوندگی نقش بسزایی داشته است. نانوذرات با بهبود ترشوندگی که یکی از عوامل تأثیرگذار در توزیع سیالات و اشباع باقی‌مانده سیال در محیط متخلخل است، موجب افزایش تولید در مخازن نفتی می‌شوند [۵]. علاوه بر مخازن نفتی، در مخازن گاز میعانی نیز روش نوی برای کاهش انباشت میعانات نزدیک دهانه چاه، پوشش‌دهی سطح با نانوذرات است که به علت انرژی سطحی کم می‌تواند خاصیت مایع‌گریزی در آن سطح ایجاد کند. یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر تولید، شیمی سطح جامد است. سطح سنگ مخزن نفتی و گازی از کانی‌های زیادی با شیمی سطح و خواص جذب متفاوتی است که می‌تواند ترشوندگی سنگ را تحت تأثیر خود قرار دهند [۶]. در مخازن نفتی، هدف از این فرایند، بهبود بخشیدن ترشوندگی سطح به سمت آب‌دوستی بیشتر و در نتیجه افزایش تولید نفت است. در مخازن گاز میعانی تغییر ترشوندگی به سمت مایع‌گریزی، موجب تغییر تراوایی نسبی گاز و میعانات شده که موجب افزایش تحویل‌پذیری چاه می‌شود [۷]. هدف از این تحقیق، مروری بر بهره‌گیری از نانوذرات مختلف برای تغییر ترشوندگی سنگ‌های مختلف و مقایسه امکان بالقوه این نانوذرات برای ازدیاد برداشت از مخازن مختلف کربناته و ماسه سنگی است.

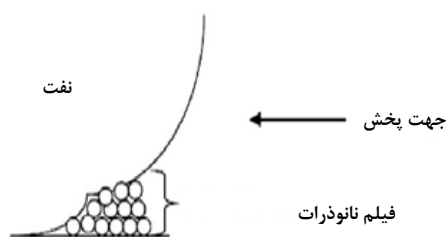
## ۲. ترشوندگی

تمایل بر سیال به پخش شدن یا چسبیدن به سطح جامد در حضور سیال و یا سیالات غیرقابل امتزاج دیگر را ترشوندگی می‌گویند که حاصل کشش سطحی بین سیالات و نیروی چسبندگی جامد و سیال است [۸]. تغییر ترشوندگی موجب تغییر نمودارهای فشار موینگی و تراوایی نسبی می‌شود و نقش مهمی در جریان‌های چندفازی و در نتیجه بازدهی مخازن ایفا خواهد کرد. ترشوندگی سنگ مخزن به عواملی از قبیل کانی‌شناسی سنگ، کیفیت سنگ (تراوایی)، خواص و ترکیب سیال مخزن، خواص و ترکیب آب سازند، شوری، دما، فشار مخزن، اشباع و تاریخچه اشباع مخزن بستگی دارد [۵-۸]. در مخازن گاز میعانی ترشوندگی به سمت مایع‌گریزی و در مخازن نفتی ترشوندگی از حالت نفت‌دوستی به حالت آب‌دوستی به عنوان ترشوندگی مطلوب در نظر گرفته می‌شود.

### ۳. نانوذرات

#### ۳-۱ مزایای نانوذرات در تغییر ترشوندگی

نسبت سطح به حجم نانوذرات با وجود اندازه بسیار کوچک ۱nm تا ۱۰۰ nm بسیار زیاد است که می‌تواند بدون گیر افتادن در حفره‌ها وارد آن‌ها شوند. از این رو، استفاده از آن‌ها، مقدار ماده تزریقی مورد نیاز و میزان صدمات ناشی از کاهش تراوایی در طی فرایندهای سیلاب‌زنی را کاهش می‌دهد [۱۴]. نانوذرات به سه صورت آبدوست، آب‌گریز و خنثی یافت می‌شوند و بر اساس اندازه، غلظت و ترشوندگی ذرات از یکدیگر متمایز می‌شوند. نانوذرات در مقایسه با مواد به‌کار رفته در روش‌های شیمیایی ازدیاد برداشت، با محیط زیست سازگاری بیشتری دارند و برای تغییر شکل دادن و از بین رفتن به مصرف انرژی زیادی نیاز دارند که این امر به استفاده بهتر از نانو ذرات در مخازن عمیق و تحت دما و فشار زیاد می‌انجامد. با این کار مدت زمان مؤثر بودن سیال تزریقی طی فرایندهای سیلاب‌زنی نیز افزایش خواهد یافت [۱۵]. به طور کلی، مطالعات صورت گرفته در زمینه ازدیاد برداشت با نانوذرات را می‌توان در مخزن نفتی و گازی، به ترتیب، با دو هدف آبدوستی بیشتر و مایع‌گریزی بیشتر انجام داد. مروری بر تغییر ترشوندگی سنگ‌های مختلف مخزنی با بهره‌گیری از نانوذرات مختلف، دیدی جامع برای انتخاب بهترین نانوذره برای تغییر ترشوندگی سنگ خاص با هدف و کاربرد خاص و مطلوب نانوذره به ما ارائه خواهد داد.



شکل ۱. پخش نانو سیال بر روی سطح در اثر نیروهای ساختاری [۱۶].

#### ۳-۲ سازوکار نانوذره برای ایجاد تغییر ترشوندگی

یکی از تأثیرات اساسی نانوذرات، تغییر دادن میزان ترشوندگی سنگ مخزن از طریق جذب روی سطوح جامد و در نتیجه تغییر در انرژی آزاد سطح است. بنابراین، شناخت سازوکارهای جذب و نیز عوامل

و اشباع فاز تر به شدت تحت تأثیر ترشوندگی سنگ است. تحت شرایط ایستا، تراوایی خودبه‌خودی بیانگر دو نیروی گرانش و موینگی در طول تغییر ترشوندگی است. مثلاً، در سیستم آب-نفت، آب به آسانی برای سنگ آبدوست، نفت را جابه‌جا می‌کند و دارای فشار موینگی مثبتی است. اما در سیستم نفت‌دوست فشار موینگی منفی است و آب به داخل محیط متخلخل تراوایی نمی‌کند. مثلاً، با اندازه‌گیری مقادیر سیال حاصل از مغزه اشباع از سیال، به کمک فرایند تراوایی و تخلیه خودبه‌خود و اجباری، با بهره‌گیری از سل آموت<sup>۱</sup> برای نگهداری مغزه در حالت عمودی در داخل محلول، می‌توان شاخص ترشوندگی را محاسبه کرد. با ترسیم نمودار تولید نفت برحسب زمان، منحنی تراوایی حاصل می‌شود که برای تفسیر خصوصیات ترشوندگی مغزه به‌کار می‌رود [۱۷].

#### ۳-۱-۲ آزمونهای تصویر برداری سطح

شیوه‌های تصویربرداری از سطح مثل میکروسکوپ الکترونی نوری (SEM)<sup>۲</sup>، میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM)<sup>۳</sup> و تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR)<sup>۴</sup>، دید درستی از تغییرات سطح سنگ در نتیجه تغییر ترشوندگی در اختیارمان خواهند نهاد. بسیاری از پژوهشگران در انجام آزمایش‌های خود از تصاویر میکروسکوپی بهره می‌گیرند. مثلاً، کریمی و همکاران از تصاویر (SEM) برای تحقیق در حوزه جذب نانوذره زیرکونیم بر روی سنگ سود جستند [۱۲].

#### ۳-۱-۴ اندازه‌گیری پتانسیل زتا<sup>۵</sup>

آزمایش‌های اندازه‌گیری پتانسیل زتا برای مشاهده تغییر نیروی الکتروستاتیکی انجام می‌شوند. مثلاً، تغییر پتانسیل زتا از مقدار مثبت به مقدار منفی برای سنگ‌های کربناته، سازوکار تغییر ترشوندگی توسط مواد فعال سطحی آنیونی را بیان می‌کند. در حقیقت تغییر ترشوندگی فرایندی پیچیده است که موجب تغییر در خصوصیات سطح می‌شود. بعضی از این روش‌های یاد شده مثل استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی و یا اندازه‌گیری پتانسیل زتا می‌تواند روش‌های در دسترس اما پرهزینه‌ای باشد [۱۳].

1. Amott Cell
2. Scan Electron Microscopy
3. Atomic Force Microscopy
4. Nuclear Magnetic Resonance
5. Zeta Potential

با بهره‌گیری از اندازه‌گیری زاویه تماس، تراوایی خودبه‌خودی و سیلاب‌زنی مغزه بررسی کردند. نتایج زاویه تماس نشان داد که از بین نانوذرات یادشده، نانوذرات کلسیم کربنات، سیلیکا و تیتانیوم اکسید بیشترین میزان تأثیر در تغییرات ترشوندگی سطح را دارند. همچنین، با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های تراوایی خودبه‌خودی و سیلاب‌زنی مغزه پی بردند که نانوذرات کلسیم کربنات و سیلیکا در ازدیاد برداشت نفت در سنگ کربناته از پتانسیل زیادی برخوردارند. میزان بازیابی تولید پس از بهره‌گیری از نانوذرات، به ترتیب،  $8/7$  و  $7/7$  درصد نسبت به حالت سیلاب‌زنی با آب افزایش یافته است [۲۰]. یو و همکاران، در سال ۲۰۱۲، با استفاده از آزمایش‌های سیلاب‌زنی، جذب نانوذرات سیلیکا در سه سنگ کربناته آهکی، دولومیت و ماسه سنگ را بررسی کردند. پس از ۲۴ ساعت، هنگامی که فرایند جذب به تعادل رسید، مشاهده کردند که جذب تعادلی برای این سه نوع سنگ، به ترتیب،  $5/501$ ،  $0$  و  $1/272$  میلی‌گرم به ازای هر گرم سنگ بوده است که بیشترین مقدار جذب نانوذره برای سنگ آهکی به علت وارد آمدن نیروی الکتروستاتیکی بین سنگ و نانوذره محقق شد. مقدار اندک جذب روی ماسه سنگ، به علت وجود شیل و رانش الکتروستاتیکی بین نانوذره سیلیکا و ماسه سنگ بوده است. جذب نانوذره روی سنگ دولومیت نیز صورت نگرفته است [۲۱]. شاهریزان و همکاران در سال ۲۰۱۶، اثر دو نانوذره آلومینیم اکسید و زیرکونیم را به تنهایی و با بهره‌گیری از ماده فعال سطحی کاتیونی، با آزمایش‌های مختلف زاویه تماس بر روی تغییر ترشوندگی سنگ دولومیت بررسی و مشاهده کردند که نانوذرات به تنهایی نمی‌توانند موجب تغییر ترشوندگی این نوع سنگ شوند، اما سیلاب‌زنی نانوذره آلومینیم اکسید با CTAB، زاویه تماس را از  $129^\circ$  به  $40^\circ$  و سیلاب‌زنی نانوذره زیرکونیم با CTAB زاویه تماس را از  $126^\circ$  به  $47^\circ$  کاهش می‌دهد و این تغییر زاویه تماس برای ماده آلومینیم اکسید به علت اندازه کوچک ذرات و سطح تماس بیشتر در مقایسه با نانوذره زیرکونیم بیشتر بوده است [۲۲]. تاجمیری و همکاران، در سال ۲۰۱۶، در آزمایش‌های خود با استفاده از نانوذره اکسید روی مخزن نفت سنگین را بررسی کردند. بازیابی نفت برای سه مغزه ماسه سنگی و مغزه کربناته، به ترتیب،  $20/74$ ،  $4/3$ ،  $3/5$  و

مؤثر بر میزان جذب نانوذرات روی سطح سنگ مخزن ضروری است. نیروهای ساختاری یا فشار واگرایی ساختاری، عامل پخش نانوذرات بر روی سطح به‌شمار می‌آیند. فشار واگرایی از سه مؤلفه نیروهای ربایشی و اندروالس، نیروهای رانشی الکتروستاتیکی و نیروهای ساختاری تشکیل شده است. در واقع، نانوذرات از طریق نیروهای ربایشی و اندروالس و نیروهای الکتروستاتیکی که اغلب در لبه پیوندگاه قطره رخ می‌دهد به سطح جذب می‌شوند (شکل (۱)) [۱۶]. با جذب بیشتر نانوذره، جدایش ساختاری از نیروی چسبندگی قطره مایع بزرگتر می‌شود و در نتیجه تمایل قطره مایع به جدا شدن از سطح افزایش می‌یابد و پس از آن نانوذرات در معرض سطح جدید قرار می‌گیرد و بر روی آن جذب خواهند شد. ساختار قرار گرفتن ذرات به صورت لایه‌ای در ناحیه فیلم ایجاد شده بین دو فاز نفت و سطح، به ایجاد یک فشار اضافی نسبت به ناحیه حجم سیال منجر می‌شود که این فشار واگرایی ساختاری موجب جدایش نفت از سطح خواهد شد. اندازه و چگالی بار الکتریکی ذرات بر اندازه این نیرو تأثیر می‌گذارد، به طوری که با کوچک شدن اندازه ذرات، چگالی بار الکتریکی افزایش می‌یابد و موجب افزایش نیروی رانشی بین ذرات می‌شود. همانند دیگر سیستم‌های کلوییدی، اندازه ذرات، دما، شوری، سیال جابه‌جا کننده و نوع سطح بر میزان نیروی گسستگی تأثیرگذار می‌گذارد [۱۷].

#### ۴. کاربرد نانوذرات در تغییر ترشوندگی مخازن نفتی

بیشترین مقدار نفت و گاز جهان در مخازن ماسه سنگی و کربناته قرار دارد. مخازن کربناته حدود ۶۰ درصد از نفت و ۴۰ درصد از گاز کل ذخایر نفت و گاز جهان را دربر می‌گیرد [۱۸]. مخازن کربناته شکافدار، نفت‌دوست یا دارای ترشوندگی میانه‌اند که به دلیل فشار مویینی نامطلوب در آن‌ها، نیروی رانشی ناشی از مویینی ضعیف است و به کاهش بازیابی نفت طی فرایند سیلاب‌زنی با آب منجر می‌شود [۱۹]. تغییر ترشوندگی سطوح سنگ کربناته به سمت شرایط آب‌دوستی می‌تواند به عنوان یک گزینه در افزایش بازیابی نفت در این مخازن مطرح شود. نظری مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۵، در مطالعات خود اثر نانوذرات مختلف آلومینیم اکسید، منیزیم اکسید، کلسیم کربنات، سیلیکا، زیرکونیم، تیتانیوم دی‌اکسید و نانوذره سریم اکسید را بر تغییرات ترشوندگی سنگ کربناته،

۰ درصد در غیاب نانوذره، به  $3/2$ ،  $17/57$ ،  $20/68$  و  $8/89$  درصد در حضور آن افزایش یافت. آنان در تحقیق خود نشان دادند که با اضافه کردن این نانوذره، نقطه تقاطع نمودارهای تراوایی نسبی در هر دو نوع مغزه به سمت راست جابه‌جا می‌شود که حاکی از تغییر ترشوندگی سنگ به سمت آب‌دوستی است [۲۳].

#### ۴-۱ عوامل مؤثر بر عملکرد نانوسیال در برداشت نفت

##### ۴-۱-۱ اثر غلظت نانوذره در مخازن نفتی

مغزی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲، به تحقیق روی تأثیر غلظت‌های متفاوت نانوذرات سیلیکا بر تغییرات ترشوندگی ماسه‌سنگ با بهره‌گیری از اندازه‌گیری زاویه تماس به روش قطره چسبیده<sup>۱</sup> پرداختند. آنان مشاهده کردند که با تزریق نانوسیال با غلظت  $0/1$  درصد وزنی، میزان بازیابی نهایی حدود  $8/7$  درصد در مقایسه با سیلاب‌زنی با آب افزایش می‌یابد که این میزان بازیابی با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا از  $0/1$  به  $3$  درصد وزنی، به مقدار  $26$  درصد، خواهد رسید. آنان برای انجام آزمایش خود از میکرو مدل شیشه‌ای به‌منظور مشاهده حرکت سیال در محیط متخلخل بهره بردند که با استفاده از روش جدید بر پایه فناوری لیزر تهیه شده است [۲۴].

یکی از مهم‌ترین عوامل در تزریق نانوسیال به محیط متخلخل، غلظت این ذرات است. افزایش غلظت نانوذرات و نشست آن‌ها بر روی سطح، موجب کاهش تخلخل، تراوایی و در نتیجه موجب کاهش بازیابی نفت به علت انسداد حفره‌ها و گلوگاه‌ها می‌شود [۲۵]. ژو و همکاران در سال ۲۰۰۹، به انجام مطالعات آزمایشگاهی و مدلسازی در زمینه تغییر ترشوندگی و تغییرات تراوایی مطلق ناشی از جذب نانوذرات پلی‌سیلیکون آب‌دوست و آب‌گریز بر روی سطح ماسه سنگی پی بردند. بر اساس آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه پی بردند که نانوذرات آب‌دوست در اندازه  $10$  تا  $500$  نانومتر موجب افزایش بازیابی نفت به میزان  $9$  درصد نسبت به حالت سیلاب‌زنی با آب می‌شوند. آنان بر اساس مدلسازی، غلظت  $2$  تا  $3$  درصد وزنی را به عنوان مناسب‌ترین غلظت معرفی کردند [۲۶]. ژو و فان در سال ۲۰۱۲، با بررسی اثر LHPN<sup>۲</sup> بر ترشوندگی ماسه‌سنگ پی بردند که با وجود تغییر ترشوندگی ماسه سنگ به سمت آب‌دوستی، بازیابی نفت کاهش می‌یابد. انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی نشان داد که

استفاده از این نانوذره موجب اثر منفی بر تراوایی می‌شود. تغییر رنگ نانوذره تزریقی از ابری رنگ به بی‌رنگ، بیانگر جذب نانوذرات روی سطح سنگ است و به کاهش تراوایی مطلق سنگ می‌انجامد [۲۷]. نانوذره LHPN بر خلاف مخازن آب‌دوست، تأثیر مثبتی بر ازدیاد برداشت از مخازن نفت‌دوست کربناته نهاده است. سید محمدی و همکاران در سال ۲۰۱۴، در تحقیقات خود تغییرات ترشوندگی یکی از مخازن کربناته ایران را با بهره‌گیری از غلظت‌های متفاوت نانوذرات بررسی کردند. آنان مشاهده کردند که بیشترین تغییرات زاویه تماس، در غلظت  $0/5$  درصد وزنی است و نیز پی بردند که با تزریق نانوسیال با این غلظت، میزان بازیابی نفت حدود  $11/25$  درصد نسبت به سیلاب‌زنی با آب افزایش خواهد داشت [۲۸]. صفری و جامی‌الاحمدی در سال ۲۰۱۳، پس از مطالعه تأثیر نانوذرات LHPN با غلظت‌های ( $0/1$  تا  $0/5$ ) درصد وزنی بر سنگ کربناته، مشاهده کردند که بازیابی سیلاب‌زنی مغزه با بهره‌گیری از آب‌نمک تا مقدار  $44$  درصد بوده است، افزایش نانوذرات به آب‌نمک، به ترتیب، با درصد وزنی  $0/1$ ،  $0/05$  و  $0/1$  باعث افزایش بازیابی، به ترتیب، تا  $5/8$ ،  $9/1$  و  $20/3$  و  $6/5$  درصد شده است. با افزایش غلظت نانوذره تا  $0/1$  درصد، زاویه تماس کاهش و بازیابی نفت افزایش می‌یابد، اما با افزایش غلظت نانوذره بیش از  $0/1$  به علت بسته شدن محیط متخلخل بازیابی نفت کاهش می‌یابد [۲۹]. گیرالدو و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی تأثیر نانوذره آلومینیم اکسید، بر مخازن ماسه سنگی پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که نتایج زاویه تماس از  $104^\circ$  تا  $142^\circ$  به میزان  $0^\circ$  تا  $15^\circ$  کاهش می‌یابد و میزان اشباع باقی‌مانده در نمونه از  $7$  به  $23$  درصد افزایش می‌یابد که این هم دلیلی بر آب‌دوست شدن نمونه است. بنابراین، نتایج نانوذره آلومینا در غلظت کمتر از  $500$  ppm توانایی بیشتری برای تغییر ترشوندگی ماسه سنگ دارد [۳۰]. هندرینگرات<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳، با تزریق محلولی از نانوذرات به داخل میکرو مدل شیشه‌ای و کاهش کشش سطحی بین نفت و آب، به تله افتادن ذرات نانو و کاهش تراوایی سنگ را مطالعه کردند، آنان نتیجه گرفتند که نانوذرات به همراه ماده فعال سطحی بر کشش بین سطحی تأثیر خواهند گذاشت. همچنین، نانوذرات موجب افزایش  $8$  درصدی تولید در مقایسه با سیلاب‌زنی با آب شدند [۳۱]. مکلفرش<sup>۴</sup> و همکاران در

3. Hendraningrat  
4. Mcelfresh

1. Sessile Drop  
2. Lipophobic-Hydrophilic Polysilicon Nanoparticles

گرانروی به افزایش بازیابی نفت تا میزان ۲۹/۱ درصد منجر شود. همچنین، سیلیسیم اکسید آب‌گریز و دارای سیلان با تغییر ترشوندگی و اتانول به تنهایی با کاهش کشش بین سطحی موجب افزایش برداشت به میزان ۲۸/۳ و ۲۵/۸ درصد شدند. روی اکسید و منیزیم اکسید پخش شده در آب مقطر و آب نمک به دلیل کم کردن تراوایی نتایج قابل قبولی در ازدیاد برداشت برای آنها مشاهده نشد [۳۵]. روستایی و همکاران در سال ۲۰۱۵، با بررسی دو نوع نانوذره پلی‌سیلیکون نفت‌دوست (HLP)<sup>۳</sup> و خنثی (NWP)<sup>۴</sup> در تغییر ترشوندگی ماسه‌سنگ آب‌دوست، پی بردند که بازیابی نفت برای این نانوذرات، به ترتیب، حدود ۳۲/۲ و ۲۸/۵۷ درصد نسبت به سیلاب‌زنی با آب افزایش خواهد یافت. میزان ازدیاد برداشت نفت به علت بهبود ترشوندگی سنگ مخزن و نیز کاهش کشش سطحی بین دو فاز آب و نفت از ۲۶/۳ به ۱/۷۵ و ۲/۵۵ میلی نیوتون بر متر، به ترتیب، بعد از تزریق نانوذرات HLP و NWP (پراکنده در اتانول) است. همچنین، نتایج نشان داد که NWP اثر قوی‌تری بر ترشوندگی سطح دارد، در حالی که HLP تأثیر زیادی بر کاهش کشش سطحی آب و نفت دارد [۳۶].

اونیکونو<sup>۵</sup> و اگولو در سال ۲۰۱۲، با بررسی اثر سه نوع نانوذره HLP، NWP و LHP بر میزان ازدیاد برداشت و چگونگی اثر هر یک بر نمونه‌های شنی آب‌دوست دلتا نیجر مشاهده کردند که HLP و NWP با تغییر ترشوندگی و کاهش کشش سطحی در حضور اتانول، ازدیاد برداشت را بهبود می‌بخشند و موجب افزایش تولید سازند آب‌دوست می‌شوند، در حالی که LHP برای سازندهای آب‌دوست مناسب نیست و با بهره‌گیری از آن اثر چشمگیری در افزایش تولید مشاهده نشد [۳۷]. شهرآبادی و همکاران در سال ۲۰۱۲، با بررسی اثر نانوذره چربی‌دوست پلی‌سیلیکون بر مخازن ماسه‌سنگی مطالعات خود را انجام دادند. این نانوذرات به همراه سیال حامل خود، با دو سازوکار کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی موجب ازدیاد برداشت شدند. این نانوذرات موجب کاهش زاویه تماس از ۱۲۳° به ۹۹° می‌شوند و کشش سطحی آب و نفت را تا ۱۰ برابر کاهش می‌دهند. بنابر نتایج به دست آمده، قبل از تزریق نانوذره میزان بازدهی ۶۹/۲۷ درصد بوده در حالی که بعد از تزریق نانوذره میزان بازدهی تا ۸۸/۵۸ درصد افزایش یافته است [۳۸]. تحقیقات

سال ۲۰۱۲، از نانو سیال با غلظت ۱۰ درصد وزنی و محلول آب نمک برای ازدیاد برداشت بهره گرفتند و مشاهده کردند که بازده نهایی یکسانی بر اثر دو فرایند حاصل می‌شود، اما با بهره‌گیری از نانوسیال ۱۰ درصد وزنی، بازده نهایی در مدت زمان کوتاه‌تری حاصل می‌شود [۳۲].

#### ۴-۱-۲ اثر اندازه نانو ذرات در سنگ مخازن نفتی

اندازه کوچک نانوذرات احتمال ورود آن‌ها به منافذ سنگ را افزایش می‌دهد و سطح بیشتری از سنگ تحت تأثیر نانوذره قرار خواهد گرفت. امالفرش و همکاران از نانوذرات پایدار شده با اندازه (۴ تا ۲۰) نانومتر برای تغییر ترشوندگی ماسه سنگ استفاده کردند. نتایج نشان داد که اندازه ذره به همراه چگالی بار بر توان فشار گسیختگی تأثیر می‌گذارد و کاهش اندازه نانو ذرات، به افزایش چگالی بار آن‌ها و نیروی رانش الکتروستاتیکی بین ذرات خواهد شد که به تولید بیشتر سیال مخزن می‌انجامد.

هندرینگرات، بنابر مطالعاتی پی برد که کاهش اندازه نانوذرات به افزایش بازده فرایند جابه‌جایی منجر خواهد شد [۳۳]. گائو و همکاران در سال ۲۰۰۷ نیز به این نتیجه رسیدند که میزان جذب برای ذرات با اندازه کوچک نیز با افزایش غلظت افزایش می‌یابد [۳۴]. بنابراین، اندازه ذرات خیلی بزرگ، موجب بسته شدن گلوگاه‌ها و اندزه ذرات خیلی کوچک موجب پخش آن‌ها خواهد شد و برای افزایش تولید باید اندازه نانوذرات بهینه باشد.

#### ۴-۱-۳ استفاده از نانوذرات به همراه مواد فعال سطحی

نانوسیال با پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه طراحی می‌شود. نانوسیال نیز به خصوصیات سیال سوسپانسیونی، ترکیب شیمیایی و اندازه pH وابسته است. سیال سوسپانسیونی نانوذرات، سیال‌هایی چون آب، آب نمک و محلول ماده فعال سطحی‌اند. در واقع، سیال پایه به کار رفته در فرایند تزریق به نوع ترشوندگی ذرات بستگی دارد. اگولو<sup>۲</sup> و همکاران نانوذرات آلومینیم، منیزیم، روی، قلع اکسید و نانو ذره سیلیسیم را در سیال پایه‌های مختلفی چون آب مقطر، آب نمک، اتانول و دیزل بر ماسه سنگ به کار گرفتند. آنان مشاهده کردند که آلومینیم اکسید در آب مقطر می‌تواند با کاهش

3. Hydrophobic and Lipophilic Polysilicon  
4. Naturally Wet Polysilicon  
5. Onyekonwu

1. Log Jammining  
2. Ogolo

نشان می‌دهند که نانو مواد فعال سطحی موجب کاهش فشار مویبگی در ناحیه شکست مخزن می‌شوند و جریان یافتن سیال مخزن را در این ناحیه بهبود می‌بخشند [۳۹]. کیو و همکاران در سال ۲۰۱۰، به مطالعه آزمایشگاهی استفاده از نانوذرات به همراه ماده فعال سطحی در مخازن سنگین نفتی ماسه سنگی آلاسکا پرداختند. آنان مشاهده کردند که سیلاب‌زنی این امولسیون، تولید را از ۷۶/۲ درصد به میزان ۹۵/۴ درصد افزایش می‌دهد. کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۲، اثر نانوذره روی اکسید و مخلوط مواد فعال سطحی غیریونی ۵ درصد وزنی را بر ازدیاد برداشت از سنگ کربناته مطالعه کردند. از پراش پرتو ایکس<sup>۱</sup> (XRD) و میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای آنالیز سنگ استفاده شد. آنان می‌پندند که زبری سطح، نسبت سطحی بافت نانو و درصد نسبی مواد تشکیل‌دهنده نانوذرات، عوامل مهم تأثیرگذار در تغییر ترشوندگی به‌شمار می‌آیند. بنابر نتایج به‌دست آمده، نانو سیال زیرکونیم موجب افزایش تولید ۶۰ درصدی نفت نسبت به تولید ۵ درصدی در غیاب از نانوذرات خواهد شد. در ظاهر، ماده فعال سطحی نقش مهمی در بازیابی داشته است [۴۰].

جوادی‌فر و همکاران در سال ۲۰۱۳ به تحقیق بر تأثیر دو نوع ماده فعال سطحی آنیونی (SDS) و کاتیونی (C<sub>12</sub>TAB) و نیز مواد فعال سطحی پایه آبی حاوی نانوذرات سیلیکا بر بازده میکروسکوپیکی و ماکروسکوپیکی برداشت نفت سنگین در محیط متخلخل شکافدار پنج نقطه‌ای در فرایند تزریق پرداختند. آنان با استفاده از تصاویر میکروسکوپیکی مشاهده کردند که استفاده از نانوذره به همراه ماده فعال سطحی باعث تغییر ترشوندگی به سمت آبدوستی و تولید چشمگیر نفت می‌شود [۴۱]. نراهی و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز از یک نانو ماده فعال سطحی استفاده کردند و آثار تزریق آن در غلظت‌های مختلف نشان داد که با کاهش غلظت نانو ماده فعال سطحی، میزان کشش سطحی کاهش و ترشوندگی مخزن از حالت نفت‌دوستی به آبدوستی تغییر می‌کند [۴۲]. لی و همکاران در سال ۲۰۱۱، برای بررسی ازدیاد برداشت مخازن نفت سنگین میدان نفتی دراگون<sup>۲</sup> در دمای زیاد در مقیاس آزمایشگاهی، از ترکیب مواد فعال سطحی و نانوذرات استفاده و مشاهده کردند که در حضور نانوذرات کشش بین سطحی به یک چهارم مقدار اولیه

کاهش و بازده جایگزینی افزایش می‌یابد [۴۳]. کاظمی و حسینی در سال ۲۰۱۷، نانوذره SiO<sub>2</sub>/ZnO سنتز شده با روش سل-ژل<sup>۳</sup> را برای تغییر ترشوندگی سنگ کربناته از نفت‌دوستی به آبدوستی قوی بررسی کردند. از اندازه‌گیری زاویه تماس قبل و بعد از تغییر ترشوندگی و آزمون SEM و آزمون XRD برای اطمینان از جذب نانوذرات روی سطح سنگ بهره بردند. آنان نانوسیال با درصد وزنی مختلف ۰/۰۱، ۰/۰۳۳، ۰/۰۷ و ۰/۳۳ را نیز برای تغییر ترشوندگی به‌کار بردند. نتایج زاویه تماس پس از بهبود سطح با نانوسیال با درصد‌های وزنی یادشده نشان داد که زاویه تماس از صفر، به ترتیب، به ۱۵۰، ۱۶۱، ۱۶۴ و ۱۷۰ افزایش می‌یابد که این امر حاکی از تغییر ترشوندگی به سمت آبدوستی است [۴۴].

الانصاری و همکاران در سال ۲۰۱۷، عملکرد ماده فعال سطحی آنیونی (SDS) و نانوذرات سیلیسیم اکسید (SiO<sub>2</sub>) را روی تغییر ترشوندگی سطح سنگ کربناته در شرایط مخزن بررسی کردند. آنان برای این کار از سیلندر فشار زیاد ۲۰MPa و دمای بالا (۷۰°C) بهره گرفتند. غلظت‌های مختلف نانوذرات، مواد فعال سطحی و شوری‌های متفاوت آزموده شد. اندازه‌گیری زاویه تماس و آزمایش تراوایی روی هر دو نمونه بهبود یافته و بهبود نیافته به منظور بررسی اثر ناهمگونی سنگ بررسی شد. آزمون SEM و EDS نیز از نمونه سنگ‌ها گرفته شد. نتایج زاویه تماس و تراوایی خودبه‌خودی نشان دادند که استفاده از نانوذرات به همراه مواد فعال سطحی موجب تغییر ترشوندگی سطح سنگ از نفت‌دوستی به آبدوستی قوی می‌شود [۴۵].

#### ۴-۲ کاربرد نانو ذرات در مخازن گاز میعانی

در مخازن گاز میعانی با کاهش فشار مخزن به زیر نقطه شبنم<sup>۴</sup> گاز شروع به مایع شدن می‌کند و به صورت قطرات مایع روی سنگ مخزن پدیدار می‌شود. با کاهش بیشتر فشار، مقدار این میعانات افزایش می‌یابد. وجود میعانات در ناحیه نزدیک چاه، به ایجاد مشکلاتی از قبیل کاهش تولید گاز، افت فشار شدید بین مخزن و چاه، کاهش تراوایی نسبی گاز و مایع و در نتیجه کاهش تولید می‌شود. به منظور رفع این میعانات و یا کاهش آن به

3. Sol-Gel  
4. Dew Point

1. X-Ray Powder Diffraction  
2. Dragon

آزمایش‌های SEM که از سطح سنگ گرفته شده نیز ساختارهای زیر ایجاد شده توسط نانوذرات بر روی سطح را تأیید می‌کنند [۴۹]. اسماعیل‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۶، با انجام آزمایش‌های زاویه تماس و اندازه‌گیری‌های تراوایی خودبه‌خودی، با بهره‌گیری از دو نانوذره  $CoBST$  و  $CeBST$  به همراه مواد شیمیایی فلئوئوردار (PFOS) و (PTFE)، ترشوندگی سطح کربناته را به سمت فوق مایع‌گریزی تغییر دادند. این نانوذرات حتی برای مایعاتی با انرژی سطحی حدود  $72/3 - 23$  mN/m، از توانایی ایجاد خاصیت مایع‌گریزی برخوردارند. تصاویر SEM نیز وجود زبری ایجاد شده روی سطح را نشان داد. این مواد با انرژی سطحی کم می‌توانند به صورت عملی برای کاهش تجمع میعانات، استفاده شده و تولید گاز را افزایش می‌دهند [۵۰].

جین و ونگ در سال ۲۰۱۶، برای تغییر ترشوندگی سطح ماسه سنگ از مواد فعال سطحی فلئوئوردار و مواد بسپاری حاوی فلئوئور بهبود یافته با نانوذرات سیلیکا با اندازه ۴۰ نانومتر بهره بردند. آنان از اندازه‌گیری تراوایی، زاویه تماس، تعیین انرژی آزاد سطح و بالارفتن سیال در داخل لوله مویینه سود جستند. همچنین، نتایج زاویه تماس آب نمک و دکان نرمال نشان داد زاویه تماس، به ترتیب، از ۲۳ و ۰ به ۱۵۲ و ۱۲۷ افزایش می‌یابد که ناشی از گازدوست شدن سطوح است. همچنین، نتایج انرژی آزاد سطح کاهش آن از ۷۰ به ۰/۶۱ میلی نیوتون بر متر را نشان داد. آنالیز تصاویر SEM و TEM نیز جذب نانوذرات سیلیس را نشان داد که نقش مهمی در گاز دوست کردن سطح دارند [۵۱].

صبوری و همکاران در سال ۲۰۱۷، با بهره‌گیری از نانوسیال سیلیس فلئوئوردار تغییر ترشوندگی سنگ کربناته را از مایع‌دوستی به گازدوستی بررسی کردند. آنان از آزمون زاویه تماس پیش‌رو<sup>۵</sup> و پس‌رو<sup>۶</sup> برای مقایسه و بررسی تغییر ترشوندگی و محاسبه انرژی آزاد سطح سود جستند. آزمایش تراوایی آب، نفت و میعان نیز برای دو حالت قبل و بعد از تغییر ترشوندگی سنگ انجام شد. نتایج آزمایش تراوایی نشان داد که تراوایی آب، میعان و نفت به داخل سنگ، به ترتیب، بیش از ۸۷، ۸۸ و ۸۰ درصد کاهش پیدا می‌کند که این امر نشان‌دهنده تغییر ترشوندگی از سمت مایع‌گریزی به سمت گازدوستی است [۵۲].

حداقل میزان، روش‌های گوناگونی در دسترس‌اند که اکثر آنها در حوزه ازدیاد برداشت‌اند. در دهه اخیر تغییر ترشوندگی مخازن از میعان‌دوستی به گازدوستی با بهره‌گیری از مواد شیمیایی مورد توجه خاصی قرار گرفته است که نتیجه نهایی آن، افزایش تولید گاز، کاهش میعانات در نزدیکی دیواره چاه، افزایش تراوایی مطلق و نسبی و افزایش نسبت تحرک را به همراه داشته است [۴۶].

موسوی و همکاران در سال ۲۰۱۳، برای تغییر ترشوندگی سنگ آهک در نزدیکی دهانه چاه و در مخازن گاز میعانی، با بهره‌گیری از نسبت‌های مولی متفاوت FAS/TEOS<sup>۱</sup>، چهار نوع متفاوت نانوذرات سیلیس محلول در اتانول تهیه کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت مولی FAS/TEOS از ۱:۵ به ۲:۵، سنگی که در تماس با نسبت مولی ۱:۵ این محلول قرار گرفته بود، آب‌گریزی بیشتری نسبت به بقیه در آن ایجاد شد. آزمایش‌های سیلاب‌زنی نشان داد که تغییر ترشوندگی این سنگ با بهره‌گیری از نانوذرات سیلیکا فلئوئوردار به گازدوستی موجب کاهش مایع به دام افتاده و کاهش افت فشار به میزان ۳۰ درصد می‌شود [۴۷]. نجفی و همکاران در سال ۲۰۱۶، با اندازه‌گیری زاویه تماس در دو حالت ساکن و پویا و آزمایش‌های تراوایی، تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربناته و ماسه‌سنگ را در حضور نانوسیال به همراه گروه فلئوئوردار بررسی کردند. آنان با اندازه‌گیری میکروسکوپ الکترونی و پراش پرتو ایکس پی بردند وجود نانوذره باعث افزایش زبری سطح و وجود فلئوئور موجب کاهش انرژی آزاد سطح خواهد شد که این امر باعث تغییر ترشوندگی سنگ به سمت گازدوستی می‌شود. پس از بررسی اشباع اولیه نفت به این نتیجه رسیدند که وجود اشباع اولیه نفت موجب کاهش گازدوستی سطح خواهد شد [۴۸]. اسماعیل‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۵، با سودجستن از نانوساختارهای تیتانیم و سیلیس با انجام آزمایش‌های تراوایی و اندازه‌گیری زاویه تماس، به بررسی مایع‌گریزی سطح سنگ کربناته پرداختند. زاویه تماس برای قطره آب از صفر به ۱۶۱°، ۱۶۴°، ۱۶۳°، به ترتیب، افزایش می‌یابد، در صورتی که تغییر چشمگیری برای زاویه تماس قطره میعان ایجاد نشد. به همین علت از ماده انرژی سطحی کم دارای گروه فلئوئور به همراه نانوذره استفاده کردند. زاویه تماس قطره میعان در حضور این نانوذرات، به ترتیب، از صفر به ۱۵۱°، ۱۴۷°، ۱۴۴° افزایش یافت.

3. Co-doped Barium Strontium Titanate  
4. Ce-doped Barium Strontium Titanate  
5. Advancing  
6. Receding

1. Tetraethoxysilane  
2. Nanofluorohydroxyltriethoxy



پیش رو کمک شایانی می‌کند. در جدول‌های (۱) و (۲)، به ترتیب، ازدیاد برداشت به کمک نانوذرات در مخازن نفتی و گازی در سنگ‌های مختلف را بر اساس مطالعات پیشین درج شده است.

۵. غربالگری نانوذرات به کار رفته در انواع سنگ مخزن انتخاب نانوذره مناسب برای فرایند ازدیاد برداشت نفت، موکول به مطالعات ساختار یافته در این زمینه است. جدول غربالگری نانوذرات با توجه به نوع سنگ مخزن برای هدفمندسازی آزمایش‌های

جدول ۱. غربالگری استفاده از نانوذرات در انواع سنگ مخزن نفتی.

مرجع	آزمون	سیال پایه	نانوذره / میزان مصرفی	نوع سنگ
[۳۴]	سیلاب‌زنی - تراوایی-SEM	آب	SiO <sub>2</sub> / ۱۰ درصد وزنی	ماسه سنگ
[۳۰]	زاویه تماس - تراوایی	ماده فعال سطحی آنیونی	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / ۱۰۰-۱۰۰۰ ppm	
[۲۱]	سیلاب‌زنی - TEM-DLS-SEM	آب	SiO <sub>2</sub> / ۵۰۰۰ ppm	
[۲۳]	تراوایی	آب	ZNO / ۲ درصد وزنی	
[۳۸]	زاویه تماس - کشش سطحی	آب	پلی سیلیکون HLP	
[۳۷]	سیلاب‌زنی	اتانول	LHP - HLP - NWP / ۲-۳ g/L	
[۳۱]	سیلاب‌زنی - زاویه تماس - EDX-SEM - تراوایی	آب	LHP	
[۳۶]	تراوایی - سیلاب‌زنی	اتانول	NWP - HLP / ۴ g/L	
[۲۶]	سیلاب‌زنی	آب	پلی سیلیکون / ۲-۳ درصد وزنی	
[۳۵]	سیلاب‌زنی	آب مقطر - آب - دیزل - اتانول	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> - MgO - ZrO <sub>2</sub> - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / ۳ g/L / SnO	
[۲۴]	سیلاب‌زنی - زاویه تماس - TEM	آب	SiO <sub>2</sub> / درصد وزنی (۵-۱۰)	میکرو مدل
[۳۱]	سیلاب‌زنی - کشش سطحی	آب	HNP / درصد وزنی (۱-۱۰)	
[۲۰]	زاویه تماس - تراوایی - سیلاب‌زنی مغزه	آب	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> - MgO - CaCO <sub>3</sub> - ZrO <sub>2</sub> - TiO <sub>2</sub> - CNT - CeO <sub>2</sub> / LHPN	کرینانه
[۲۹]	زاویه تماس	آب	۰/۱-۰/۵ درصد وزنی	
[۳۱]	تصاویر میکروسکوپیکی	آب - SDS - CTAB	SiO <sub>2</sub>	
[۲۳]	تراوایی	آب	ZnO / ۲ درصد وزنی	
[۲۱]	سیلاب‌زنی - TEM-SEM-DLS	آب	SiO <sub>2</sub> / (۵۰۰) ppm	کلسیت
[۲۸]	زاویه تماس - سیلاب‌زنی	آب	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / ۵ درصد وزنی g	
[۴۰]	زاویه تماس - تراوایی - XRD-SEM	ماده فعال سطح غیر یونی	ZrO <sub>2</sub>	
[۲۲]	زاویه تماس	آب - CTAB	ZrO <sub>2</sub> - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	دولومیت
[۲۱]	سیلاب‌زنی - TEM-SEM-DLS	آب	SiO <sub>2</sub> / ۵۰۰۰ ppm	

جدول ۲. غربالگری کاربرد نانوذرات در سنگ مخزن گازی.

مرجع	آزمون	نانوذره / میزان مصرفی	نوع سنگ
[۴۷]	سیلاب-زنی-زاویه تماس SEM-FTIR-EDX	سیلیکا فلئوئردار	کلسیت
[۴۸]	زاویه تماس ساکن و پویا- آزمون تراوایی SEM-EDX	نانوذرات با گروه‌های فلئوئردار	کربناته
[۴۹]	زاویه تماس- SEM	TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , CNT	
[۵۰]	زاویه تماس- تراوایی SEM-EDX	(CoBST) و (CeBST)	
[۵۲]	زاویه تماس- تراوایی - انرژی آزاد سطح- EDX	SiO <sub>2</sub>	
[۵۱]	زاویه تماس- تراوایی - انرژی آزاد سطح- بالارفتن سیال در لوله مویینه- SEM-EDX	FG40-FP2 بهبود یافته با نانوذرات سیلیکا	ماسه سنگ

## ۶. نتیجه‌گیری کلی

ترشوندگی یکی از مشخصه‌های مهم سیستم سنگ- سیال است که در توزیع سیالات و اشباع باقی‌مانده آن‌ها در محیط متخلخل و در نتیجه در بازدهی نفت نقش مهمی بازی می‌کند. در این مطالعه، مزایای ازدیاد برداشت نفت و گاز با استفاده از نانوذرات بررسی شد. نانوذرات با بهبود بخشیدن خصوصیات سیال تزریقی، از جمله افزایش گرانشی، کاهش کشش سطحی، تغییر چگالی، رسانش گرمایی و نیز برقراری برهم‌کنش سنگ و سیال (تغییر ترشوندگی) موجب افزایش ازدیاد برداشت در مخازن نفتی می‌شود و در واقع، با کاهش انرژی سطح و ایجاد زبری به مایع‌گریزی و افزایش تولید گاز در مخازن گاز میعانی خواهند انجامید.

- هر نوع نانوذره‌ای موجب ازدیاد برداشت در هر نوع سنگ مخزن نمی‌شود. بنابراین، با توجه به نوع سنگ باید در انتخاب نوع نانوذره دقت کرد که این انتخاب وابسته به شناخت شرایط سنگ، نوع سنگ، سیال مخزن و سازوکارهای اثرگذاری نانوسیال، نوع نانوذره، نوع سیال پایه، غلظت نانوذره است.

- اندازه کوچک نانوذرات در مقایسه با اندازه حفره‌ها و گلوگاه‌های مخزن، موجب کاربرد بیشتر آن‌ها در مقایسه با مواد فعال سطحی و سپارها می‌شود. این نانوذرات به آسانی در محیط متخلخل نیز جابه‌جا می‌شوند به سازند آسیبی نمی‌رسانند. به همین علت، با استفاده از نانوذرات در مقایسه با سایر مواد شیمیایی کاهش تراوایی نیز کمتر مشاهده می‌شود.

- هنگامی که غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد بازیابی نفت بیشتر می‌شود. افزایش غلظت نانوذرات ممکن است با کاهش تراوایی نیز همراه باشد. بنابراین، برای رسیدن به افزایش تولید، غلظت بهینه نانوذرات ضروری است.

- کاربرد نانوذرات به همراه مواد فعال سطحی و سپارها با هدف بهبود خواص مواد فعال سطحی، موجب افزایش بازیابی تولید نیز می‌شود و نقش بسیار مؤثری در افزایش تولید از مخازن ایفا می‌کند.

- جدول غربالگری تغییر ترشوندگی با بهره‌گیری از نانوذرات، موجب می‌شود با توجه به جنس سنگ مخزن، بهترین نانوذره را برای تغییر ترشوندگی آن و در نتیجه ازدیاد برداشت مخازن نفتی و گازی اختیار کنیم که این امر صرفه‌جویی در وقت و هزینه را نیز فراهم می‌آورد.

## مراجع

- [1] Alvarado, V., Manrique, E., "Enhanced oil recovery: field planning and development strategies": Gulf Professional Publishing, (2010).
- [2] Lakatos, I., "Role of chemical ior/eor methods in the 21st century," in 18th World Petroleum Congress, (2005).
- [3] Thomas, S., "Enhanced oil recovery-an overview, Oil & Gas Science and Technology-Revue de l'IFP", Vol. 63, pp. 9-19, (2008).
- [4] Fletcher, A., Davis, J., "How EOR can be transformed by nanotechnology", in SPE Improved Oil Recovery Symposium, (2010).

- [5] Sheng, J., "Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice: Gulf Professional Publishing", (2010).
- [6] Sheydaemehr, M., Sedaesola, B., Vatani, A., "Gas-condensate production improvement using wettability alteration: A giant gas condensate field case study", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 21, pp. 201-208, (2014).
- [7] Mohammed, M., Babadagli, T., "Wettability alteration: A comprehensive review of materials/methods and testing the selected ones on heavy-oil containing oil-wet systems", *Advances in colloid and interface science*, Vol. 220, pp. 54-77, (2015).
- [8] Fatt, I., Klikoff Jr, W. A., "Effect of fractional wettability on multiphase flow through porous media", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 11, pp. 71-76, (1959).
- [9] Anderson, W., "Wettability literature survey-part 2: Wettability measurement", *Journal of petroleum technology*, Vol. 38, pp. 1,246-1,262, (1986).
- [10] Petrole, F. du., Malmaison, F. R., "Evaluation of reservoir wettability and its effect on oil recovery", *Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery*, p. 319, (1990).
- [11] Sharma, G., Mohanty, K., "Wettability alteration in high-temperature and high-salinity carbonate reservoirs", *SPE Journal*, Vol. 18, pp. 646-655, (2013).
- [12] Schembre, J. M., Tang, G. -Q., Kovscek, A. R., "Interrelationship of Temperature and Wettability on the Relative Permeability of Heavy Oil in Diatomaceous Rocks (includes associated discussion and reply)", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol. 9, pp. 239-250, (2006).
- [13] Hirasaki, G., Zhang, D. L., "Surface chemistry of oil recovery from fractured, oil-wet, carbonate formations", *Spe Journal*, Vol. 9, pp. 151-162, (2004).
- [14] Ayatollahi, S., Zerafat, M. M., "Nanotechnology-assisted EOR techniques: New solutions to old challenges", in *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition*, (2012).
- [15] Krishnamoorti, R., "Extracting the benefits of nanotechnology for the oil industry", *Journal of petroleum technology*, Vol. 58, pp. 24-26, (2006).
- [16] Wasan, D. T., Nikolov, A. D., "Spreading of nanofluids on solids", *Nature*, Vol. 423, p. 156, (2003).
- [17] Kewen, L., Abbas, F., "Experimental study of wettability alteration to preferential gas-wetting in porous media and its effects", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol. 3, pp. 139-149, (2000).
- [18] Ahmed, T., "Reservoir engineering handbook": Gulf Professional Publishing, 2006.
- [19] Kapusta, S., Balzano, L., Te Riele, P. M., "Nanotechnology applications in oil and gas exploration and production", in *International Petroleum Technology Conference*, (2011).
- [20] Nazari Moghaddam, R., Bahramian, A., Fakhroueian, Z., Karimi, A., Arya, S., "Comparative study of using nanoparticles for enhanced oil recovery: wettability alteration of carbonate rocks", *Energy & Fuels*, Vol. 29, pp. 2111-2119, (2015).
- [21] Yu, J., An, C., Mo, D., Liu, N., Lee, R. L., "Study of adsorption and transportation behavior of nanoparticles in three different porous media", in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*, (2012).
- [22] Moslan, M. S., Sulaiman, W., Rosli, W., Ismail, A. R., Jaafar, M. Z., Ismail, I., "Wettability Alteration of Dolomite Rock Using Nanofluids for Enhanced Oil Recovery", in *Materials Science Forum*, pp. 194-198, (2016).
- [23] Tajmiri, M., Mousavi, S. M., Ehsani, M. R., Roayaei, E., Emadi, A., "Wettability Alteration of Sandstone and Carbonate Rocks by Using ZnO Nanoparticles in Heavy Oil Reservoirs", *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 4, pp. 50-66, (2016).
- [24] Maghzi, A., Mohammadi, S., Ghazanfari, M. H., Kharrat, R., Masihi, M., "Monitoring wettability alteration by silica nanoparticles during water flooding to heavy oils in five-spot systems: A pore-level investigation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 40, pp. 168-176, (2012).
- [25] Salem Ragab, A. M., Hannora, A. E., "A Comparative Investigation of Nano Particle Effects for Improved Oil Recovery-Experimental Work", in *SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference*, (2015).
- [26] Ju, B., Fan, T., "Experimental study and mathematical model of nanoparticle transport in porous media", *Powder Technology*, Vol. 192, pp. 195-202, (2009).
- [27] Ju, B., Fan, T., Li, Z., "Improving water injectivity and enhancing oil recovery by wettability control using nanopowders", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 86, pp. 206-216, (2012).
- [28] Seid Mohammadi, M., Moghadasi, J., Naseri, S., "An experimental investigation of wettability alteration in carbonate reservoir using  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles", *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 3, pp. 18-26, (2014).
- [29] Safari, M., Jamialahmadi, M., "Effect of polysilicon nanoparticles on enhanced oil recovery in Iranian oil reservoir", *International Journal of Nano Dimension*, Vol. 3, pp. 199-205, (2013).
- [30] Giraldo, J., Benjumea, P., Lopera, S., Cortés, F. B., Ruiz, M. A., "Wettability alteration of sandstone cores by alumina-based nanofluids", *Energy & Fuels*, Vol. 27, pp. 3659-3665, (2013).
- [31] Torsater, O., Engeset, B., Hendraningrat, L., Suwarno, S., "Improved oil recovery by nanofluids flooding: an experimental study", in *SPE Kuwait international petroleum conference and exhibition*, (2012).
- [32] Mcelfresh, P. M., Holcomb, D. L., Ector, D., "Application of nanofluid technology to improve

- recovery in oil and gas wells", in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, (2012).
- [33] Torsater, O., Li, S., Hendraningrat, L., "Effect of some parameters influencing enhanced oil recovery process using silica nanoparticles: an experimental investigation", in SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition, (2013).
- [34] Gao, C., "Factors affecting particle retention in porous media", Emirates Journal for Engineering Research, Vol. 12, pp. 1-7, (2007).
- [35] Ogolo, N., Olafuyi, O., Onyekonwu, M., "Enhanced oil recovery using nanoparticles", in SPE Saudi Arabia section technical symposium and exhibition, (2012).
- [36] Roustaei, A., Bagherzadeh, H., "Experimental investigation of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on enhanced oil recovery of carbonate reservoirs", Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, Vol. 5, pp. 27-33, (2015).
- [37] Onyekonwu, M. O., Ogolo, N. A., "Investigating the use of nanoparticles in enhancing oil recovery", in Nigeria Annual international conference and exhibition, (2010).
- [38] Shahrabadi, A., Bagherzadeh, H., Roostaie, A., Golghanddashti, H., "Experimental investigation of HLP nanofluid potential to enhance oil recovery: A mechanistic approach", in SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, (2012).
- [39] Qiu, F., "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).
- [40] Karimi, A., Fakhroueian, Z., Bahramian, A., Pour Khiabani, N., Darabad, J. B., Azin, R., "Wettability alteration in carbonates using zirconium oxide nanofluids: EOR implications", Energy & Fuels, Vol. 26, pp. 1028-1036, (2012).
- [۴۱] جوادی فر، ع.، غضنفری، م.، روستا آزاد، ر.، آیت‌اللهی، ش.، "مطالعه آزمایشگاهی اثر مواد فعال سطحی آنیونی و کاتیونی و تأثیر افزودن نانوسیلیکا به آن‌ها در بهبود ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین شکافدار با استفاده از دستگاه میکرومدل"، چهاردهمین کنگره مهندسی ملی شیمی ایران، (۱۳۹۱).
- [۴۲] نره‌ای، م.، قاندی، ع.، مظفریان، م.، "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).
- [43] Le Thi Nhu, Y., Pham Duy, K., Nguyen Tung, P., Le Kim, H., "Design and screening of synergistic blends of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and surfactants for enhanced oil recovery in high-temperature reservoirs", (2011).
- [44] Khazaei, M., Hosseini, M. S., "Synthesis hydrophilic hybrid nanoparticles and its application in wettability alteration of oil-wet carbonate rock reservoir", Petroleum Science and Technology, Vol. 35, pp. 2269-2276, (2017).
- [45] Al-Anssari, S., Nwidae, L. N., Arif, M., Wang, S., Barifcani, A., Lebedev, M., "Wettability Alteration of Carbonate Rocks via Nanoparticle-Anionic Surfactant Flooding at Reservoirs Conditions", in SPE Symposium: Production Enhancement and Cost Optimisation, (2017).
- [۴۶] صبوری، ر.، آذین، ر.، عصفوری، ش.، "مروری بر تغییر ترشوندگی مخازن گاز میعانی با استفاده از نانوذرات"، اولین کنفرانس ملی نانوفناوری در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس بوشهر (۱۳۹۳).
- [47] Mousavi, M., Hassanajili, S., Rahimpour, M., "Synthesis of fluorinated nano-silica and its application in wettability alteration near-wellbore region in gas condensate reservoirs", Applied Surface Science, Vol. 273, pp. 205-214, (2013).
- [48] Najafi-Marghmaleki, A., Barati-Harooni, A., Soleymanzadeh, A., Samadi, S. J., Roshani, B., Yari, A., "Experimental investigation of effect of temperature and pressure on contact angle of four Iranian carbonate oil reservoirs", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 142, pp. 77-84, (2016).
- [49] Esmailzadeh, P., Sadeghi, M. T., Fakhroueian, Z., Bahramian, A., Norouzbeigi, A., "Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 26, pp. 1294-1305, (2015).
- [50] Esmailzadeh, P., Sadeghi, M. T., Bahramian, A., Fakhroueian, Z., Zorbakhsh, A., "Superamphiphobic Surfaces Prepared by Coating Multifunctional Nanofluids", ACS applied materials & interfaces, Vol. 8, pp. 32011-32020, (2016).
- [51] Jin, J., Wang, Y., Wang, K., Ren, J., Bai, B., Dai, C., "The effect of fluorosurfactant-modified nano-silica on the gas-wetting alteration of sandstone in a CH<sub>4</sub>-liquid-core system", Fuel, Vol. 178, pp. 163-171, (2016).
- [52] Saboori, R., Azin, R., Osfoury, S., Sabbaghi, S., Bahramian, A., "Wettability alteration of carbonate rocks from strongly liquid-wetting to strongly gas-wetting by fluorine-doped silica coated by fluorosilane", Journal of Dispersion Science and Technology, (2017).