

## بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید سیلیسیم در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کربناته در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران

امین احمدی<sup>۱</sup>، میرحسن موسوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مسجدسلیمان ■ هادی نظارات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

### چکیده

در این تحقیق تغییر ترشوندگی مخازن نفتی کربناته آسماری که دهه‌های آخر عمر خود را طی می‌کند با استفاده از نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات با گروه‌های عامل دار مناسب‌ترین ذرات برای این منظور هستند که سبب تغییر زاویه تماس، تغییر کشش سطحی، ایجاد سطح با انرژی آزاد کم، ایجاد زبری بر روی سطح و تغییر ترشوندگی مخازن از نفت دوستی به آب دوستی/خنثی شده که نتیجه نهایی تغییرات ناشی از تزریق نانوذرات، افزایش تولید نفت، افزایش تراوایی مطلق و نسبی، افزایش نسبت تحرک را به همراه دارد. آنالیز تصویربرداری و قطره روی سطح کوچکی از سنگ به همراه آنالیز کشش سطحی سیالات در این تحقیق انجام شده است. سه نوع نانو ذره سیلیسیم اکسید با قطرهای به ترتیب در محدوده ۱۵-۱۰، ۵۰-۴۰ و ۱۰۰-۸۰ نانومتر در غلظت‌های وزنی مختلف محلول در آب از ۰٫۱ درصد وزنی تا ۲ درصد وزنی به کار گرفته شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که همه نانوذرات از پایداری مناسبی پس از حل شدن در آب سازندی برخوردار هستند. نتایج تغییر ترشوندگی نشان می‌دهد که بیشتر کاهش زاویه تماس مربوط به نانو ذره با قطر کوچک‌تر و در حد ۱۵-۱۰ نانومتری است. همچنین نتایج نشان دادند که نانوذرات سیلیکا در غلظت یک درصد موثرترین کاهش زاویه تماس یا آب دوستی محیط را نتیجه می‌دهند. علاوه بر این در همین غلظت وزنی بیشترین کاهش در انرژی بین سطحی نفت و آب رخ می‌دهد. بنابراین استفاده از این نانوذره در ازدیاد برداشت موثر است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۱۰/۲۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۱۲/۲۶

### واژگان کلیدی:

نانوذرات سیلیسیم، کاهش زاویه تماس آب با سطح، کاهش انرژی بین سطحی، افزایش برداشت نفت.

### مقدمه

یکی از روش‌های قابل اطمینان در بین دیگر تکنیک‌های ازدیاد برداشت نفت است که در این روش‌ها پلیمرها، سورفکتانت‌ها و آلکالین یا ترکیبی از آنها استفاده می‌شود. [۲] گرایش‌های اخیر صنایع در سراسر دنیا به مینیاتوریزه کردن و استفاده از نانومواد به صورت چشمگیری افزایش یافته است. در این حالت، مقیاس مواد در حد نانومتری خواص جدید و در اکثر مواقع بهتری نسبت به مقیاس‌های ماکرو ارائه می‌دهد. از آنجا که فرآیند ازدیاد برداشت نفت مشابه دیگر فرآیندهای صنعتی همراه با چالش‌ها و در راستای رویکرد ارتقای تکنولوژی است، از این پیشرفت علمی مستثنی نبوده و پژوهشگران فعال در این عرصه برای مرتفع کردن مشکلات فرآیند برداشت نفت به کمک نانوفناوری تلاش می‌کنند. از جمله مطالعات در این زمینه می‌توان به استفاده از نانوذرات آلی و غیر آلی در راستای افزایش بیشتر درصد برداشت نفت نسبت به مواد سنتی مورد استفاده در این فرآیند شامل پلیمر، سورفکتانت و آلکالین اشاره کرد. [۳] در این مطالعه، با بررسی مشکلات عمده و رایج در فرآیند برداشت نفت به کمک مواد شیمیایی، نقش نانوذرات در بهبود نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه به عنوان نتیجه کلی می‌توان گفت که حضور نانوذرات در خلال فرآیند

روش‌های تولید نفت از میادین نفتی عمدتاً به سه دسته تولید اولیه<sup>۱</sup>، تولید ثانویه<sup>۲</sup> و ازدیاد برداشت ثالثیه<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های ازدیاد برداشت نیز خود به پنج دسته کلی کنترل تحریک‌پذیری<sup>۴</sup>، حرارتی<sup>۵</sup>، شیمیایی<sup>۶</sup>، امتزاجی<sup>۷</sup> و میکروبی<sup>۸</sup> تقسیم می‌شوند. هر کدام از روش‌های یاد شده ازدیاد برداشت نفت، برای برخی میادین با خصوصیات خاص مناسب است. افزون بر این برخی روش‌های ازدیاد برداشت همراه با مسایل زیست‌محیطی نیز هستند. به عنوان مثال در روش تزریق بخار به مخازن نفتی، مشکلاتی همچون آلودگی‌های حاصله از تولید بخار در سطح و نیز دفع میعانات آبی همراه نفت در چاه تولیدی وجود دارد. با توجه به اینکه ۹۰ درصد مخازن نفتی ایران از نوع کربناته و اکثر آنها شکافدار هستند [۱] در این مطالعه به بررسی امکان‌سنجی کاربرد روش‌های ازدیاد برداشت نفت مبتنی بر نانو در مخازن کربناته شکاف پرداخته می‌شود. به طور تخمینی می‌توان گفت که در هنگام استفاده از روش‌های مرسوم برداشت نفت (مراحل اولیه و ثانویه)، حدود ۷۰-۵۰ درصد نفت در یک مخزن دست‌نخورده باقی می‌ماند، بنابراین انتظار می‌رود که روش‌های ازدیاد برداشت نفت در اکثر مخازن نفتی جهت بازیافت مقدار زیادی از نفت استفاده شود. روش‌های ازدیاد برداشت نفت به کمک مواد شیمیایی<sup>۹</sup>

آلومینا پتانسیل بیشتری برای تغییر قابلیت ترشوندگی سنگ دارند. در این تحقیق به تعیین میزان غلظت بهینه از ذرات نانو اکسید سیلیسیم جهت تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کربناته آسماری می‌پردازیم.

### روش تحقیق

در این پژوهش تغییر ترشوندگی سنگ مخزن نفتی کربناته آسماری که دهه‌های آخر عمر خود را طی می‌کند با استفاده از نانوذرات سیلیسیم اکسید مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، ۴ مغزه‌ی کربناته از یکی از میداین جنوب‌غربی انتخاب شده است. زاویه تماس اندازه‌گیری شده برای همه نوع مغزه‌ها باید در دامنه یکسانی قرار می‌گرفت که این مهم در این مطالعه رخ داده و همگنی تایید شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق هدف، تعیین خصوصیات سطح و سیالات است و تست‌های تزریقی به مغزه صورت نگرفته است میزان تخلخل و تراوایی سنگ‌ها به ترتیب ۱۳ درصد و تراوایی ۱۸ میلی‌داری گزارش شده است. در شکل ۱ نمونه مغزه کربناته نشان داده شده است. نانوذرات با گروه‌های عامل‌دار مناسب‌ترین ذرات برای این منظور هستند که سبب تغییر زاویه تماس، تغییر کشش سطحی، ایجاد سطح با انرژی آزاد کم، ایجاد زبری بر روی سطح و تغییر ترشوندگی مخازن از نفت‌دوستی به آب‌دوستی/اخنثی شده که نتیجه نهایی تغییرات ناشی از تزریق نانوذرات، افزایش تولید نفت، افزایش تراوایی مطلق و نسبی، افزایش نسبت تحرک را به همراه داشته است. آنالیز تصویربرداری و قطره روی سطح کوچکی از سنگ به همراه آنالیز کشش سطحی سیالات در این تحقیق انجام شد. خواص سیالات مورد استفاده در این تحقیق در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. در این تحقیق از نانوذرات آب‌دوست سیلیسیم اکسید جهت تغییر ترشوندگی سطح مغزه کربناته استفاده شده است. از سه نوع نانوذره سیلیکا با اندازه‌های در محدوده ۱۵-۱۰، ۵۰-۴۰ و ۱۰۰-۸۰ نانومتر در این مطالعه استفاده شده است. تا اثرات قطر نانو و غلظت آنها با هم بررسی شود. به صورت انتخابی تصویر محدوده ۱۵-۱۰ و ۱۰۰-۸۰ در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

برداشت نفت به کمک مواد شیمیایی عمدتاً باعث افزایش پایداری و اثرگذاری مواد شیمیایی در شرایط سخت مخزن نفتی در قالب سه سازوکار کنترل تحرک پذیری، کاهش کشش بین سطحی سنگ مخزن نفتی و تغییر ترشوندگی سطح سنگ مخزن شده که در نهایت به افزایش بیشتر درصد بازیافت نفت نسبت به حالت سنتی منجر می‌شود. جهت پاسخ به تقاضای روزافزون انرژی و با توجه به آمار موجود درباره کمبود آن، باید به موازات اکتشاف مخازن جدید، برداشت حداکثری از مخازن انجام شود. [۱] زید و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بر روی مخلوطی از ZnO و سورفکتانت سدیم دو دسیل سولفات (SDS10) به‌عنوان عامل برداشت نفت از مغزه مطالعه‌ای انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان می‌دهد که به میزان ۱۴٫۵ درصد افزایش بازیافت نفت به کمک نانوسیال حاوی ذرات بزرگ‌تر ZnO نسبت به اندازه کوچک‌تر و بالعکس، ۶۳ درصد افزایش بازیافت نفت به کمک تزریق نانوسیال  $Al_2O_3$  با اندازه ذرات کوچک‌تر نسبت به اندازه ذرات بزرگ‌تر حاصل می‌شود. همچنین باید اشاره کرد که تشکیل محلول کدر در طول آزمایش‌ها نشان از امولسیون‌سازی است که می‌توان نتیجه گرفت مقدار خیلی کم کشش سطحی برای تشکیل امولسیون خودبه‌خودی در فرآیند نانوسیال دی الکتریک نیاز نیست. احتسابی و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای از نانوسیال متشکل از نانوذرات  $TiO_2$  جهت بهبود برداشت نفت سنگین از مغزه‌های ماسه‌سنگی استفاده کردند. در این پژوهش به کمک محلول ۰/۱ درصد وزنی از  $TiO_2$  و تزریق ۲ حجم حفرات، درصد برداشت به ۸۰ درصد رسیده است. جهت درک سازوکار برداشت نفت توسط نانوذرات  $TiO_2$  زاویه تماس سیال با سطح سنگ اندازه‌گیری شد. نتایج آنها نشان داد که خاصیت ترشوندگی سنگ از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست به دلیل برهم‌کنش و جذب نانوذرات به سطح سنگ (وجود گروه‌های هیدروکسیل) تغییر کرده است. اما باید توجه داشت که با افزایش غلظت نانوسیال به یک درصد وزنی برداشت نفت به دلیل افت فشار و مسدود شدن حفرات کاهش می‌یابد. Al-Anssari و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کربناته با استفاده از ترکیب نانوذرات و سیلاب‌زنی سورفکتانت پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که فرمولاسیون سدیم دودسیل سولفات و نانوذرات سیلیکا می‌تواند قابلیت ترشوندگی نفت‌دوستی کلسیت را به شدت از نفت‌دوست به آب‌دوستی سنگ مخزن تغییر دهد. حسینی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی آزمایشگاهی اثر نانو ذرات سیلیس و آلومینا پراکنده در کشش بین سطحی پرداخته‌اند. نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان داد که نانوذرات باعث تغییر ترشوندگی سنگ‌های ماسه‌سنگی و کربناته از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست می‌شوند. همچنین در نمونه‌های ماسه‌سنگی بیش از نمونه‌های سنگ کربناته اثر می‌گذارند و نانوذرات

۱ ویژگی‌های نفت استفاده شده

چگالی (ml/g)	ویسکوزیته (CP)	فشار آزمایش (psi)	دمای آزمایش (°C)	محتوای آسفالتین (درصد)
۰.۸۹	۸	۱۴.۷	۲۵	۰.۴

۲ خواص آب‌سازندی

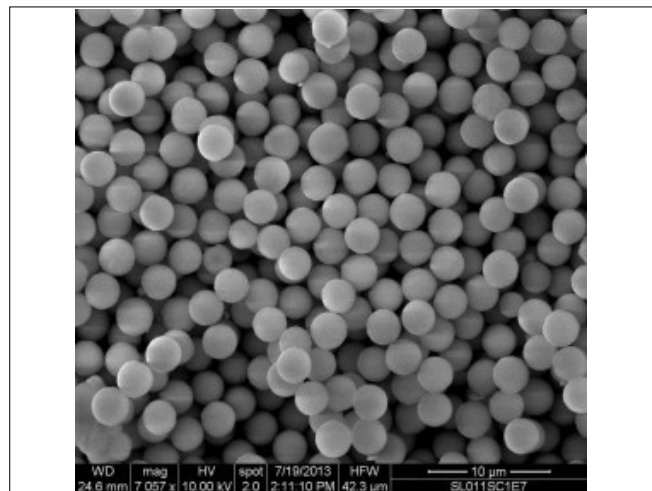
چگالی (ml/g)	ویسکوزیته (CP)	فشار آزمایش (psi)	دمای آزمایش (°C)	محتوای کل یون‌ها (ppm)
۰.۹۶	۲	۱۴.۷	۲۵	۴۳۲۰۰۰

## بحث و نتایج

در ابتدا نانوذرات در قطرهای مختلف و غلظت‌های مختلف دسته‌بندی شدند و در دستگاه التراسونیک<sup>۱۱</sup> قرار داده می‌شوند. پس از هم زدن نانوذرات در دستگاه التراسونیک میزان پایداری آنها اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از میزان پایداری نشان می‌دهد میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۵-۱۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف ۰,۱ درصد وزنی تا ۲ درصد وزنی را بعد از گذشت ۴۸ ساعت نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که طی گذشت دو شبانه‌روز نانوذرات از پایداری مناسبی برخوردار بوده‌اند. در شکل ۴ نتایج میزان پایداری نشان داده می‌شود. شکل ۵ میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۰۰-۸۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف ۰,۱ درصد وزنی تا ۲ درصد وزنی را بعد از گذشت ۴۸ ساعت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طی گذشت دو شبانه‌روز نانوذرات از پایداری مناسبی برخوردار بوده‌اند. همچنین شکل ۶ میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۰۰-۸۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف ۰,۱ درصد وزنی تا ۲ درصد وزنی را بعد از گذشت ۷ شبانه‌روز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود طی گذشت این مدت زمان نانوذرات به ناپایداری کامل رسیده و کاملاً ته‌نشست کرده‌اند. از تست‌های پایداری ذرات نانو این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که نانوذرات سیلیس موجود به‌طور قابل‌قبولی پایدار بوده و سطح پایداری آنها به‌گونه‌ای است که در مخزن تزریق شود و تحت جریان سیال درون مخزن ته‌نشست نگردد.



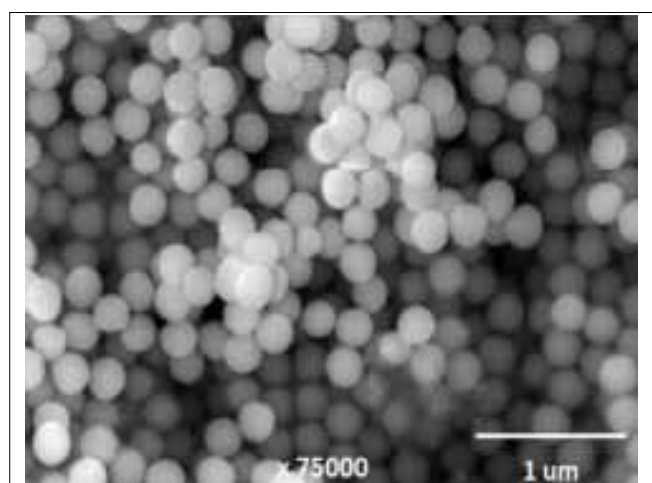
شکل ۱ | نمونه مغزه‌های کربناته



شکل ۲ | نانوذرات در قطر ۱۵-۱۰ نانومتر



شکل ۳ | میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۵-۱۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف در طی ۴۸ ساعت



شکل ۴ | نانوذرات در قطر ۱۰۰-۸۰ نانومتر



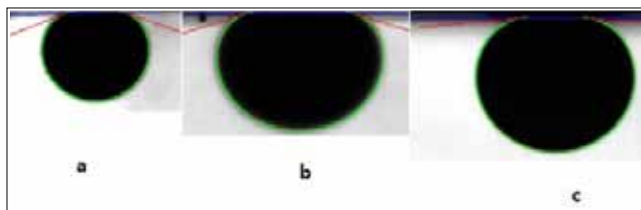
شکل ۵ | میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۰۰-۸۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف در طی ۴۸ ساعت

### بررسی آب‌گریزی و نفت‌گریزی

پس از بررسی پایداری نانوذرات تست زاویه تماس در سطح نمونه تین‌سکشن مغزه انجام شده است. ابتدا زاویه تماس نفت در حضور آب سازندی حاوی نانوذره اندازه‌گیری شد. شکل ۷ تصویر زاویه تماس نفت را نشان می‌دهد که در تصویر C نمونه بدون نانوذره، زاویه سطح با قطره نفت ۲۲ درجه است اما در نمونه a که برای ۱٫۵ درصد غلظت نانوذره ۱۰ نانومتری محلول در آب سازند گرفته شده است، زاویه قطره نفت در حضور آب به ۴۳ درجه افزایش یافته است که به معنی نفت‌گریز شدن محیط است. در شکل ۸ تصاویر قطرات قرار گرفته بر سطوح کربناته را برای نانوذرات در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمام نانوذرات با افزایش غلظت قطره آب میل به ترشوندگی و پخش‌شوندگی بیشتری بر روی سطح دارد که به معنی آب‌دوست شدن محیط توسط نانوذرات است.



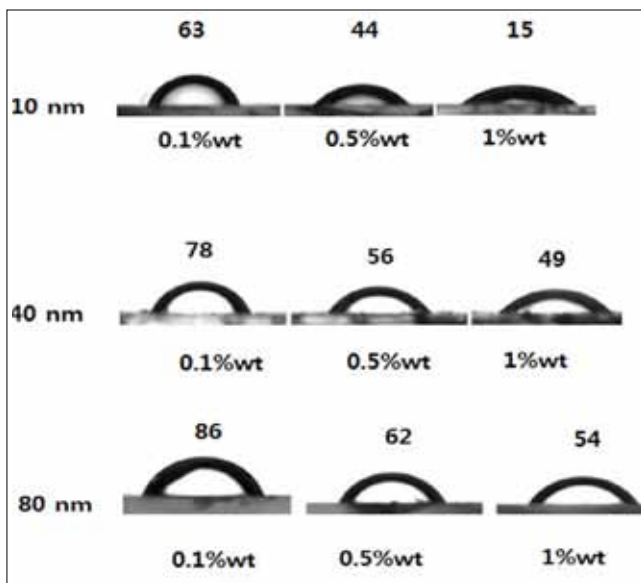
شکل ۶ | میزان پایداری نانوذرات سیلیس با قطر ۱۰۰-۸۰ نانومتر برای ۴ غلظت مختلف در طی یک هفته



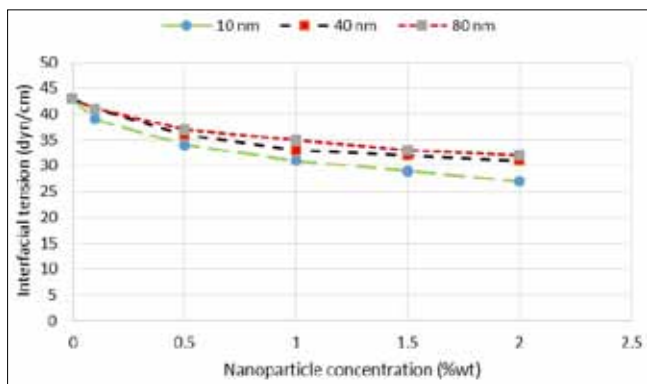
شکل ۷ | زاویه تماس قطره نفت با سطح سنگ در حضور آب

### تغییرات زاویه تماس و IFT

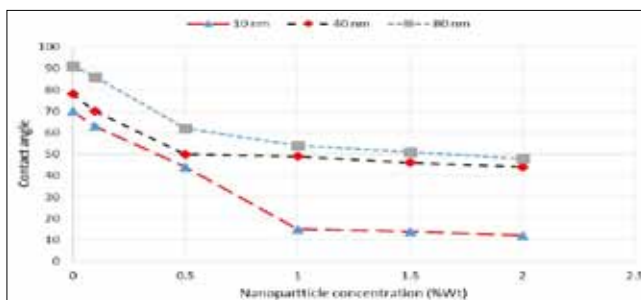
تغییرات زاویه تماس برای غلظت‌های مختلف انواع نانوذره سیلیس در شکل ۹ نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت، روند کاهش زاویه تماس و آب‌دوست شدن محیط ادامه می‌یابد اما بیشترین تغییرات در غلظت یک درصد وزنی برای این نوع نانو می‌باشد و در غلظت‌های بیشتر توجه اقتصادی در این کار نیست چراکه صرفاً اندکی کاهش می‌یابد. تغییرات IFT<sup>12</sup> برای غلظت‌های مختلف انواع نانوذره سیلیس در شکل ۱۰ نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت، روند کاهش زاویه تماس و آب‌دوست شدن محیط ادامه می‌یابد اما بیشترین تغییرات در غلظت یک درصد وزنی برای این نوع نانو دارد و در غلظت‌های بیشتر توجه اقتصادی وجود ندارد، چراکه صرفاً اندکی کاهش می‌دهد.



شکل ۹ | زاویه تماس آب با سطح سنگ برای نانوذرات مختلف



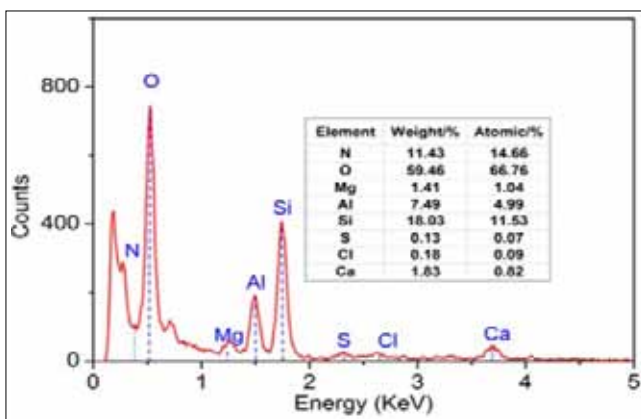
شکل ۱۰ | تغییرات IFT بین نفت و آب با غلظت نانوذرات مختلف



شکل ۱۱ | تغییرات زاویه تماس بین آب با سطح جامد برای غلظت نانوذرات مختلف

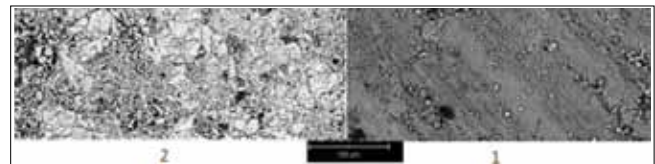
## نتیجه گیری

- ۱- نانوذرات  $\text{SiO}_2$  باعث کاهش کشش سطحی و زاویه تماس نفت با سطح سنگ می شوند که با افزایش غلظت آنها روند کاهش بیشتری می شود.
- ۲- غلظت بهینه نانوذرات برای همه قطره های آن یک درصد وزنی است چراکه در این غلظت به بعد تغییرات چشمگیری مشاهده نمی شود.
- ۳- در غلظت بهینه نانوذره با قطر کمتر عملکرد بهتری دارد که این خود نشان از افزایش سطح تماس آب دوستی است.
- ۴- در غلظت بهینه نانوذره ۱۰ نانومتری توانایی کاهش زاویه تماس آب دوستی از ۷۰ به ۱۴ درجه را دارا می باشد.
- ۵- در غلظت بهینه نانوذره میزان کشش بین سطحی آب و نفت برای نانوذره ۱۰ نانومتری از ۴۳ dyn/cm به ۲۶ dyn/cm می رسد. ■

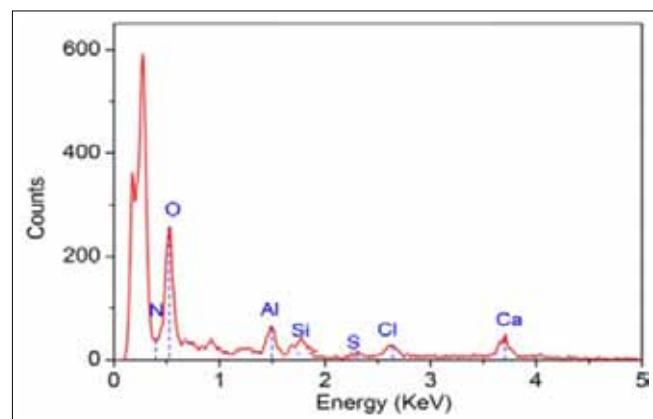


شکل ۱۳ | آنالیز عنصری سطح تین سکشن مغزه بعد از قرارگیری در نانوسیال

سیال قرار داده و سطح تین سکشن را شست و شو می دهیم. پس از آن تصویر  $\text{SEM}^{13}$  را آنالیز می کنیم. در شکل ۱۱ سطح مغزه در شکل سمت چپ ۴ آغشته به نفت است که بعد از شست و شو شکل سمت راست حاصل می شود. همان طور که مشاهده می شود نشست نانوذره بر سطح سبب جدایش بهتر نفت از محیط می شود. اثبات این امر در شکل های ۱۲ و ۱۳ نیز نشان داده شده است و همچنین میزان نشست عنصر سیلیس بر روی سنگ را نشان می دهد که تغییر ترشوندگی حاصل از آن رخ داده است.



شکل ۱۱ | تصویر SEM از سطح مغزه قبل (سمت راست) و بعد (سمت چپ) از شست و شو



شکل ۱۲ | آنالیز عنصری سطح تین سکشن مغزه قبل از قرارگیری در نانوسیال

## پانویس ها

1. Primary recovery
2. Secondary recovery
3. Tertiary recovery or EOR
4. Mobility control
5. Thermal
6. Chemical
7. Miscible
8. MEOR
9. CEOR
10. sodium 2-dodecylbenzene sulfonate
11. Ultrasonic
12. Interfacial tension
13. Scanning Electron Microscope

## منابع

Sheng, R Nanostructured Particles for Controlled Polymer Release in Enhanced Oil Recovery, Tomovska, Energy Technology J., in Press, 2016.  
 [5]. S. Al-Ansari, Lezorgia N. Nwidae, Muhammad Arif, Shaobin Wang, Ahmed Barifcani, Maxim Lebedev, and Stefan Iglauer, 2017, Wettability Alteration of Carbonate Rocks via Nanoparticle-Anionic Surfactant Flooding at Reservoirs Conditions, SPE-189203-MS.  
 [6]. E. Hosseini, F. Hajivand, A. Yaghdous, R. Soltani, 2019, Experimental investigation of the effect of dispersed silica and alumina nanoparticles on oil-aqueous phase interfacial tension, Petroleum science and technology.

[۱]. تمثیلیان، ی.، رضضانی سعادت آبادی، آیت الهی، ش.، ۱۳۹۵، مروری بر کاربرد نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت، ماهنامه فناوری نانو، شماره ۸.  
 [2]. H. M. Zaid, N. Yahya, N. R. A. Latiff J, The Effect of Nanoparticles Crystallite Size on the Recovery Efficiency in Dielectric Nanofluid Flooding, Nano Research, 21 (2013).  
 [3]. H. Ehtesabi, M.M. Ahadian, V. Taghikhani, M H. Ghazanfari, Enhanced Heavy Oil Recovery Using  $\text{TiO}_2$  Nanoparticles: Investigation of Deposition during Transport in Core Plug, Energy & Fuels, 1, 28 (2013).  
 [4]. Y. Tamsilian, A. Ramazani S.A., M. Shaban, Sh. Ayatollahi, J. C. de la Cal, J. J.