



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2054793.1993



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Formulation of a Synthetic Nanofluid for Enhanced Oil Recovery from Oil Reservoirs

Ehsan Jafarbeigi^{1*}

¹ Assistant Professor, Department of Chemical and Petroleum Engineering, Ilam University, Ilam

Received: 1 Mar 2025 Accepted: 23 Apr 2025

Abstract

Synergistic compounds have shown effective results in improving oil production from oil reservoirs due to their high surface properties. In this experimental study, a novel was prepared to alter the wettability and increase oil recovery. In this regard, the nanoparticle was first synthesized and then surface-modified with effective compounds. The structural characteristics of the surface-modified synthetic nanoparticle were analyzed using SEM, FTIR and XRD. The stability of the nanofluid was investigated using zeta potential analysis. Additionally, interfacial tension, contact angle and core flooding tests were done. The results showed that the nanofluid reduced the contact angle and surface tension from the baseline values to 29° and 3.20 mN/m, respectively. The core flooding results indicated that the maximum oil recovery using the synthetic nanofluid was 15%.

Keyword: Nanofluid, Interfacial Tension, Wettability Alteration, Core Flooding, Enhanced Oil Recovery

* e.jafarbigi@ilam.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Jafarbeigi, E., "Formulation of a Synthetic Nanofluid for Enhanced Oil Recovery from Oil Reservoirs", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 89, pp. 5-18, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2054793.1993



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

فرمولاسیون یک نانوسیال سنتزی برای ازدیاد برداشت نفت از مخازن نفتی

احسان جعفری بیگی^{*1}

¹ استادیار گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام، ایلام

دریافت: 1403/12/11 پذیرش: 1404/02/03

چکیده

ترکیبات هم‌افزایی شده به دلیل خواص سطحی بالا نتایج موثری در راستای بهبود تولید نفت از مخازن نفتی از خود نشان داده‌اند. در این مطالعه آزمایشگاهی، یک نانوسیال جدید به منظور تغییر ترشوندگی و ازدیاد برداشت نفت آماده شد. در این راستا، در ابتدا نانوذره سنتز شده و سپس با ترکیباتی موثر مورد اصلاح سطحی واقع گردید. خصوصیات ساختاری نانوذره سنتزی اصلاح سطحی شده با استفاده از آنالیزهای SEM، FTIR و XRD انجام شد. پایداری نانوسیال با استفاده از آنالیز پتانسیل زتا بررسی شد. از طرفی دیگر، آزمایشات کشش سطحی، زاویه تماس و سیلابزنی مغزه انجام شد. نتایج نشان داد که نانوسیال زاویه تماس و کشش سطحی را به ترتیب از مقدار پایه به 29° و $3/20 \text{ mN/m}$ کاهش می‌دهد. نتایج سیلابزنی مغزه نشان داد که حداکثر بازیافت نفت با استفاده از نانوسیال سنتزی به مقدار 15 درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: نانوسیال، کشش سطحی، تغییر ترشوندگی، سیلابزنی مغزه، ازدیاد برداشت نفت

* e.jafarbigi@ilam.ac.ir

1- مقدمه

به طور کلی، بررسی فرآیندهای فیزیکی در مقیاس منافذ از طریق رویکردهای آزمایشگاهی برای توسعه تکنیک‌های ازدیاد برداشت نفت بسیار مهم است. امروزه بسیاری از میدان‌های نفتی به پایان عمر تولیدی خود رسیده‌اند، و از طرفی تکنیک‌های بازیافت اولیه و ثانویه نفت آن کارایی لازم در راستای تولید نفت را ندارند. بنابراین، در این راستا، تکنیک‌های ازدیاد برداشت شیمیایی می‌توانند از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشند. ازدیاد برداشت شیمیایی با افزایش راندمان جابجایی ماکروسکوپی انواع مختلف نفت خام، تولید نفت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [1-4]. بخش قابل توجهی از ذخایر نفت در مخازن کربنات نفت دوست یافت می‌شود. ماهیت نفت دوستی و شوری بالا در این مخازن نیازمند استراتژی‌های موثری است که بتواند ترشوندگی را به حالت آب دوستی تغییر دهد [5]. اخیراً استفاده از سورفکتانت‌ها به‌عنوان عوامل ازدیاد برداشت نفت به دلیل تأثیر قابل توجه آنها بر افزایش بازده نفت، توجه محققان را به خود جلب کرده است [6 و 7]. سورفکتانت‌ها اغلب در محلول‌های نانوذرات گنجانده می‌شوند تا پایداری آنها را بهبود بخشند [8]. علاوه بر این، ظهور فناوری نانو کمک قابل توجهی به پیشرفت در صنعت نفت کرده است. نانو ذرات به دلیل خواص و توانایی‌های منحصر به فردشان در افزایش عملکرد بازیافت نفت نقش مهمی دارند. نانوذرات با وجود مساحت سطح بالا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متمایزی از خود نشان داده‌اند [9 و 10]. یکی از مزایای قابل توجه استفاده از نانوذرات برای بازیافت نفت، توانایی ایجاد گرادیان فشار ساختاری است. این مکانیسم برای ایجاد فشار در سطح مشترک نفت و سنگ است که ترشوندگی را تغییر می‌دهد [11 و 12]. تزریق آب کم‌شور در افزایش بازیافت نفت از مخازن بسیار موثر می‌باشد و به نوعی باعث کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ می‌شود [13 و 14]. تزریق آب کم‌شور در مخازن نفتی به مکانیسم‌هایی همچون ترکیب سیال مخزن، کانی شناسی سنگ مخزن و شیمی آب تزریقی بستگی دارد [15 و 16]. مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از آب کم‌شور به صورت مستقل [17 و 18]، و همچنین به صورت هم‌افزایی شده [19-21] می‌تواند باعث کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ از شرایط نفت دوستی به آب دوستی شود. بهرام نژاد و همکاران دریافته‌اند که نانو ذرات پوشش داده شده با سایر ترکیبات، کاندیدای مناسبی برای کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ به شرایط آب دوستی می‌باشد [22]. رضاوند و همکاران در مطالعه‌ای عملکرد یک نانوهیبرید را در راستای ازدیاد برداشت نفت بررسی نمودند. آنان آزمایشاتی همچون کشش سطحی، زاویه تماس و پتانسیل زتا را انجام دادند. نتایج سیلابزنی نانوسیال نشان داد که نانوسیال با آب کم‌سیال شوری، بالاترین بازیافت نفت را فراهم می‌کند. همچنین مشاهده شد که مقدار کشش سطحی اندازه‌گیری شده بین نانوسیال و نفت خام تابعی از غلظت نانوسیال و شوری سیال پایه است، یعنی با افزایش غلظت نانوسیال و کاهش شوری سیال پایه، مقادیر کشش سطحی و زاویه تماس کاهش یافت [23]. بررسی مطالعات گذشته نشان داد با توجه به عواملی مانند منافذ باریک، ناهمگونی مخزن و سایر عوامل، تغییر ترشوندگی و میانگین نرخ بازیافت از مخازن با نفوذپذیری کم با استفاده از سیلابزنی آبی و سایر نانوذرات سنتزی به مراتب کمتر می‌باشد. در این راستا، برای افزایش نرخ بازیافت نفت، پیاده‌سازی روش‌های نوآورانه و کارآمد ازدیاد برداشت شیمیایی نفت ضروری است. به طور کلی ترکیبات هم‌افزایی شده نواقص موجود در ترکیباتی که به صورت مجزا بکارگیری می‌شوند را ترمیم می‌کنند و در نتیجه کارایی ازدیاد برداشت نفت هیبریدی را افزایش می‌دهند. بنابراین، در این مطالعه، برای اولین بار، یک نانوسیال جدید سنتزی به منظور ازدیاد برداشت نفت فرمولاسیون شده است. در این راستا، از وجود یک غلظت بهینه

و مقرون به صرفه در راستای آزمایشات بهره برده شده است. تست‌های که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند شامل کشش سطحی، پایداری، زاویه تماس و سیلابزنی مغزه می‌باشد.

2- مواد و روش

2-1- مواد مورد استفاده

مواد بکارگیری شده در روند سنتز شامل تیتانیوم ایزو پروپوکسید، ایزوپروپانول، نمک پتاسیم لائورات، اتانول، استیک اسید، تریتون ایکس-100 و آب دیونیزه شده می‌باشد. همچنین مواد بکارگیری شده به منظور آماده نمودن آب کم‌شور مهندسی شده شامل سدیم کلرید (12/788 درصد وزنی)، پتاسیم کلرید (0/559 درصد وزنی)، کلسیم کلرید دی هیدرات (0/882 درصد وزنی)، کلرید منیزیم هگزا هیدرات (5/997 درصد وزنی)، سولفات سدیم (3/409 درصد وزنی) و سدیم هیدروژن کربنات (0/168 درصد وزنی) می‌باشد. به طور کلی، از نمونه نفت خام یکی از مخازن غرب ایران (دانسیته $0/831 \text{ gr/cm}^3$)، ویسکوزیته (15/41 cp و $\text{API}=38/7$) جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

2-2- روند سنتز و آماده‌سازی نانوسیال

روند کلی سنتز و تهیه نانوسیال بدین صورت می‌باشد که در ابتدا تیتانیوم دی‌اکسید سنتز شد. به طور کلی، در روند فرآیند از یک عامل اسیدی (استیک اسید) استفاده شد. در این راستا، در ظرفی مقدار 2/5 میلی‌لیتر تیتانیوم ایزوپروپوکسید به 225 میلی‌لیتر ایزوپروپانول اضافه شد و به مدت 20 دقیقه در دمای 30 درجه سانتی‌گراد هم‌زده شد. سپس محلولی حاوی 2/5 میلی‌لیتر اتانول و 1/2 میلی‌لیتر استیک اسید در حین هم‌زدن اضافه شد. سپس محلول فوق به مدت 1 ساعت تحت هم‌زدن قرار گرفته شد تا ژل تشکیل شود. در ادامه به منظور سنتز ترکیب نانوذره اصلاح سطحی شده 1/8 میلی‌لیتر سورفکتانت و مقدار نمک پتاسیم لائورات به مخلوط قبلی اضافه شد و محلول به مدت 1 ساعت هم‌زده شد تا یک محلول ژل مانند متراکم تشکیل شود. سپس در آون در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 1 ساعت قرار داده شد. در این راستا، مخلوطی از پودر خشک شده تشکیل شد. در نهایت، پودر در دمای 300 درجه سانتی‌گراد به مدت 1 ساعت در یک کوره کلسینه و فرآیند ترکیب سنتزی اصلاح سطحی شده آماده شد. در مرحله بعد، به منظور آماده‌سازی نانوسیال، نانوذره سنتزی اصلاح سطحی شده با آب کم‌شور مهندسی شده به صورت هم‌افزایی شده آماده شد. به منظور هم‌گن‌سازی نانوسیال در غلظت‌های مختلف (50، 100، 150، 200، 250 و 300 پی پی ام) از دستگاه اولتراسونیک استفاده شد. پایداری نانوسیالات هم‌افزایی شده در یک دوره 30 ساعته بررسی شد.

2-3- آنالیز پایداری

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌ها برای اعتبارسنجی پایداری نانوسیال اندازه‌گیری پتانسیل زتا است [23]. به طور کلی، محدودیتی که در نانوذره تیتانیوم دی‌اکسید وجود دارد این است که به صورت سوسپانسیون تجمع پیدا می‌کند و در این راستا از پایداری کمتری برخوردار است. این رویکرد اثربخشی آن را در بازیافت نفت را کمتر می‌نماید. بنابراین، در این راستا، با استفاده از رویکرد اصلاح سطحی شده در حضور ترکیباتی خاص محدودیت پایداری به حداقل ممکن رسانده شد. پس از تهیه نانوسیال اصلاح سطحی شده، پایداری شش غلظت (50، 100، 150، 200، 250 و 300 پی پی ام) مورد بررسی قرار گرفت. برای این اندازه‌گیری‌ها از دستگاه زتا سایزر مدل نانو ZS استفاده شد. در این راستا،

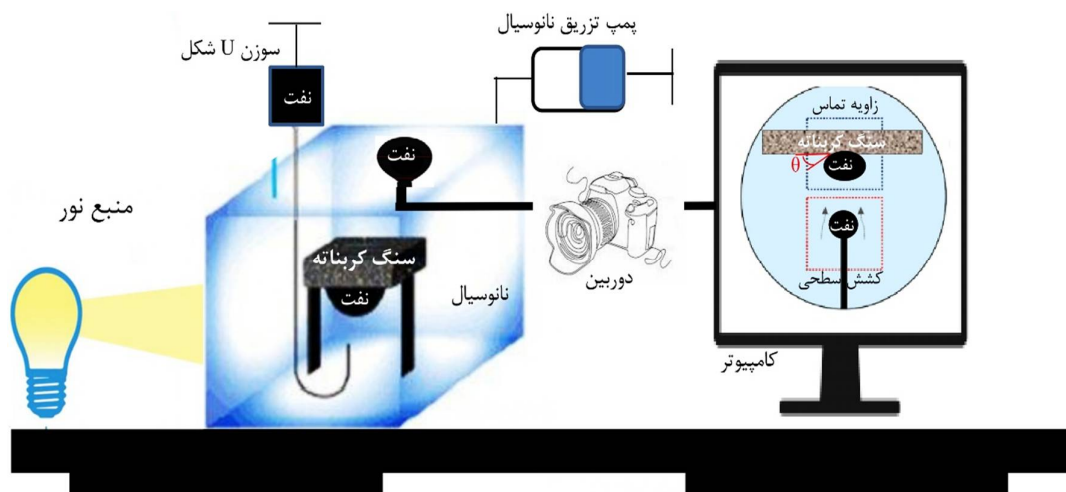
با بررسی پایداری نانوسیالات، نانوسیال پایدار شناسایی شد. بنابراین، نانوسیال 150ppm از بالاترین پایداری برخوردار بود. از این مقدار غلظت پایدار برای آزمایش‌های زاویه تماس، کشش سطحی و سیلابزنی مغزه استفاده شد. از طرفی برای مشاهده فرم‌های یونی محلول‌ها از روش اندازه‌گیری هدایت الکتریکی استفاده شد. در این راستا، هدایت الکتریکی سیالات برای یافتن پایداری نانوسیال اندازه‌گیری شد. به طور کلی، اگر رسانایی الکتریکی نانوسیال‌ها انحراف کوچکی از خود نشان دهد، نانوسیال پایدار خواهد بود.

2-4- اندازه‌گیری کشش سطحی

یکی از روش‌های شناخته شده برای اندازه‌گیری کشش سطحی بین آب و نفت روش قطره آویز است. به طور کلی، دستگاه کشش سطحی مورد مطالعه، دارای پمپ برای تزریق سیالات، منبع نور، محفظه شیشه‌ای دما بالا-فشار بالا، سوزن U شکل، دوربین و کامپیوتر جهت آنالیز داده‌های خروجی است. به منظور انجام آزمایش، در ابتدا نانوسیال در غلظت‌های مختلف 50، 100 و 150، 200، 250 و 300 پی‌پی‌ام تهیه شد. سپس، محفظه دستگاه که در معرض نور قرار می‌گیرد، با نانوسیال پر شد. سپس با استفاده از دوربین تصویر قطره ثبت شد. در ادامه، تصویر قطره توسط نرم‌افزار ایمیج جی تجزیه و تحلیل شد.

2-5- اندازه‌گیری زاویه تماس

بعد از مشخص شدن نمونه پایدار نانوسیال و تکمیل فاز اولیه آزمایش‌ها در فاز بعدی تاثیر نانوسیالاتی که پایداری مناسبی را داشتند بر روی تغییر ترشوندگی سنگ بررسی شدند. به طور کلی، برای تعیین تغییر ترشوندگی و اندازه‌گیری زاویه تماس از روش قطره چسبیده استفاده شد. بدین منظور، به منظور انجام آزمایش، مغزه به شکل برش‌های نازک آماده شد. در ادامه، برش‌های کربناته به طور کامل دوره پیرسازی را سپری نمودند. سپس مغزه‌های به جهت نزدیک شدن به شرایط مخزن درون سیلندر مخصوص پیر کردن قرار گرفته شدند. فرآیند پیر کردن در دمای 70 درجه سانتی‌گراد، فشار اتمسفر و به مدت 35 شبانه روز انجام شد [24]. اندازه‌گیری زاویه تماس برش‌های کربناته پس از دوره پیر کردن در نانوسیالات انجام شد. برای اندازه‌گیری زاویه تماس، برش‌های کربناته در نانوسیال غوطه‌ور شدند و سپس از زیر دستگاه نمونه نفت خام به سیستم تزریق شد و قطره به گونه‌ای در زیر نمونه سنگی قرار گرفت که حالت ترشوندگی نفت‌دوستی آن حفظ شود. در ادامه با گذر زمان در حضور نانوسیال زاویه تماس بین نفت و نمونه سنگی اندازه‌گیری شد. سپس، تصاویر جانبی از قطرات نفت خام گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار ایمیج جی تحلیل و آنالیز شد. به طور کلی، در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری زاویه تماس انجام شد. لازم به ذکر است که ترشوندگی سطح با توجه به زاویه تماس در سیستم سه فاز (آب، نفت و سنگ)، یعنی آب‌دوست (در محدوده 0-75°)، حالت میانی (در محدوده 75°-115) و نفت‌دوست (در محدوده 115-180°) درجه تعریف می‌شود [25]. در شکل 1 شماتیک دستگاه اندازه‌گیری کشش سطحی و زاویه تماس نشان داده شده است.



شکل 1- دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی

6-2- سیلابزنی مغزه

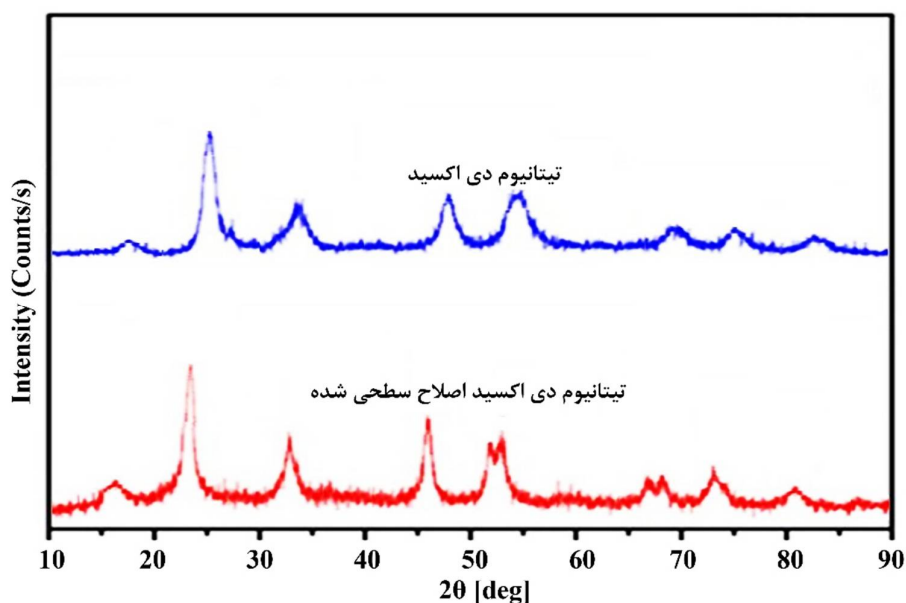
در این بخش در ابتدا تخلخل و نفوذپذیری مغزه نیز همراه با ارزیابی ابعاد مغزه و وزن خشک آن اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، آزمایش سیلابزنی از سر گرفته شد. در این راستا، آب کم‌شور با سرعت ثابت $0/2$ میلی‌لیتر بر دقیقه، تقریباً 2 برابر حجم فضای خالی تزریق شد. حجم پسابها (نفت و آب) هر 5 دقیقه ثبت شد. سیلابزنی آب کم‌شور (بازیابی ثانویه) تا زمانی ادامه یافت که نفت دیگر تولید نشد. در مرحله بعد، تزریق با سرعت ثابت $0/2$ میلی‌لیتر در دقیقه برای تقریباً 3-4 برابر حجم فضای خالی نانوسیال به عنوان حالت بازیافت تالشیه ادامه یافت. سیلابزنی نانوسیال در غلظت‌های مختلف تا زمانی که دیگر نفت تولید نشود، انجام شد. در ادامه، بازیافت تجمعی نفت محاسبه شد. به این ترتیب، در پایان نسبت بازیافت نفت پس از سیلابزنی نانوسیال به بازیافت کلی نفت محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

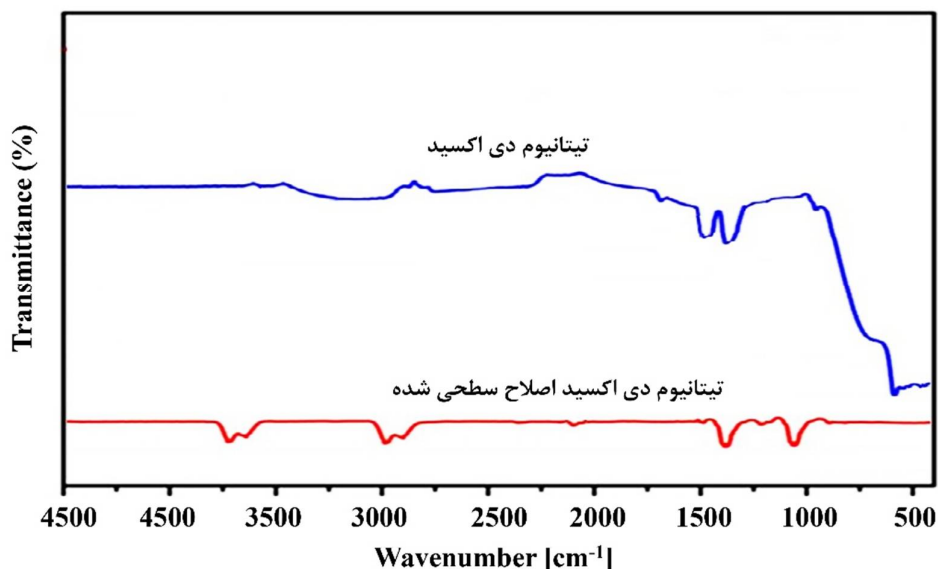
3-1- خصوصیات ساختاری و مورفولوژی ترکیب سنتزی

در این بخش نتایج حاصل از آنالیزهای مادون قرمز تبدیل فوریه، پراش پرتوی ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی گزارش شده است. شکل 2 تمام الگوهای پراش پرتوی ایکس ساختارهای کریستالی را نشان می‌دهد. در این راستا، نانوذره اصلاح سطحی شده جهت‌گیری آناز را نشان می‌دهد، که ممکن است به دلیل استفاده از استیک اسید است. همچنین، در شکل 3 طیف مادون قرمز تبدیل فوریه نانوذره تیتانیوم دی‌اکسید و نانوذره اصلاح سطحی شده در محدوده 400 cm^{-1} - 4500 cm^{-1} نشان داده شده است (شکل 3 الف و ب). کاهش شدت تمام پیک‌ها در مورد نانوذره در حالت اصلاح سطحی شده در شکل 3 ب مشاهده شد. در شکل 3 الف ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل در محدوده سیگنال بین 3100 cm^{-1} تا 3600 cm^{-1} قرار دارد [26 و 27]. پیک‌های 1125 cm^{-1} ، 1070 cm^{-1} و 1040 cm^{-1} مربوط به گروه OR تترا ان بوتیل اورتوتیتانات است [28]. همچنین، گروه‌های O-Ti-O و Ti-O-Ti در محدوده 500 cm^{-1} تا 1000 cm^{-1} می‌باشند (شکل 3 الف) [29 و 30]. با توجه به شکل 3 الف، پیک وسیع در 3450 cm^{-1} و پیک در محدوده 1600 cm^{-1} تا 1640 cm^{-1} مربوط به آب جذب‌شده سطحی و گروه‌های هیدروکسیل مربوطه است [31]. پیک در محدوده 1074 cm^{-1} به دلیل ارتعاش کششی C-O است. گروه Ti-OH مربوط به

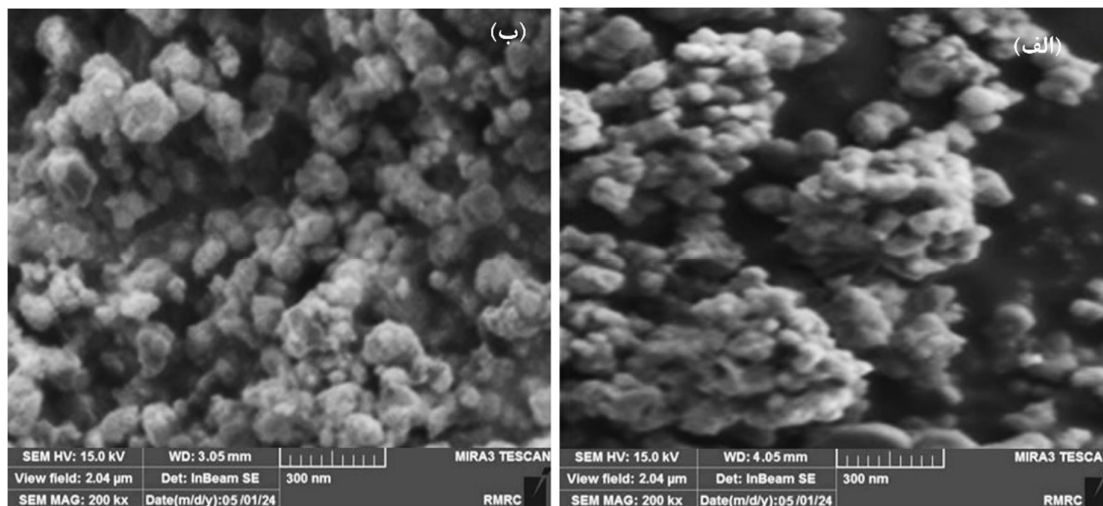
ارتعاشات خمشی قوی 1420 cm^{-1} است [32]. با توجه به شکل 3 ب، در ساختار نانوذره اکسید اصلاح سطحی شده سیگنال در محدوده 3300 cm^{-1} گروه هیدروکسیل را نشان می‌دهد. به نوعی ساختار آب‌دوستی خیلی قوی در ترکیب جدید حاصل شد. شکل 4 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تیتانیوم دی‌اکسید و تیتانیوم دی‌اکسید اصلاح سطحی شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 4 ب مورفولوژی سطح تیتانیوم دی‌اکسید اصلاح سطحی شده نشان دهنده وجود سورفکتانت در ساختار سنتزی، بهبود تجمع و کاهش اندازه ذرات است.



شکل 2- الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه تیتانیوم دی‌اکسید سنتز شده و اصلاح سطحی شده



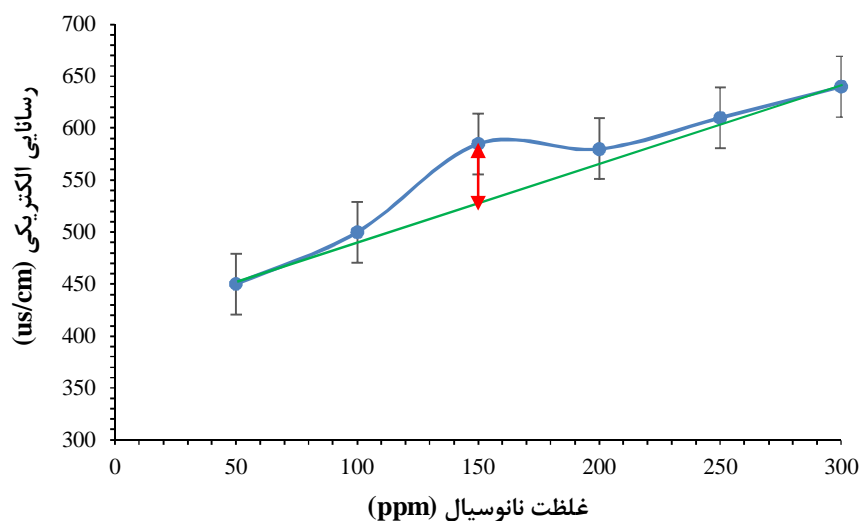
شکل 3- آنالیز مادون قرمز تبدیل فوریه برای نمونه تیتانیوم دی‌اکسید سنتز شده و اصلاح سطحی شده



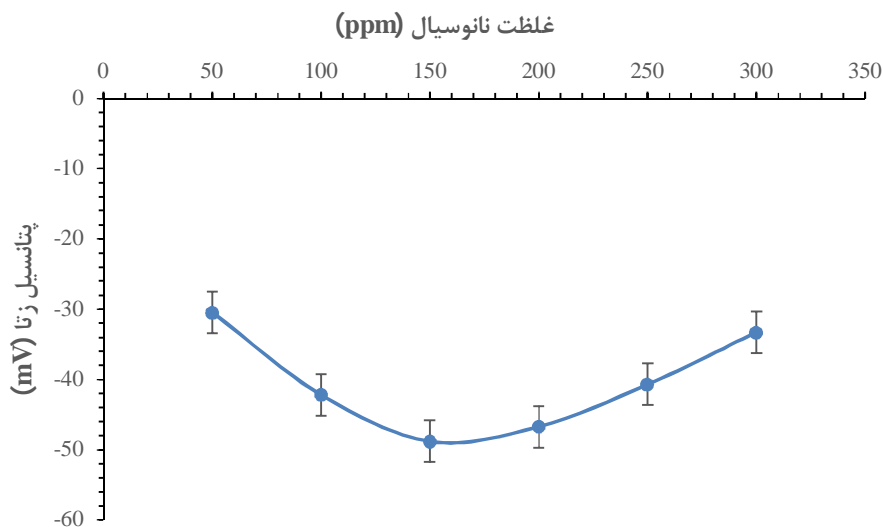
شکل 4- شماتیک میکروسکوپ الکترونی روبشی از تیتانیوم دی اکسید (الف) قبل از اصلاح سطحی و (ب) بعد از اصلاح سطحی

2-3- آنالیز پایداری و رسانایی الکتریکی

در این پژوهش رسانایی الکتریکی نانوسیال در 6 غلظت آماده شده مورد بررسی قرار گرفت (شکل 5). با توجه به شکل 5 یک رابطه خطی بین غلظت و رسانایی الکتریکی وجود دارد که با یک خط قرمز نشان داده شد. این رفتار غیرعادی نشان می‌دهد که رسانایی الکتریکی محلول با رسیدن به غلظت 150 پی پی ام افزایش می‌یابد. این ناسازگاری در مقیاس نانو از رسانایی الکتریکی مؤثر سوسپانسیون‌های کلئیدی در سیالات ناشی می‌شود که منعکس کننده یک برهمکنش پیچیده از عواملی مانند آزادسازی یون و سایر خواص فیزیکی و شیمیایی است [22]. در این غلظت این رویکرد غیرعادی، برهمکنش‌های خیلی قوی ایجاد می‌نماید. از طرفی دیگر همچنین در شکل 6 نتایج حاصل از آزمایش پتانسیل زتا گزارش شده است. در این راستا، در میان نانوسیالات آماده شده، پتانسیل زتا مربوط به نانوسیال 150 پی پی ام دارای مقدار 48/8- میلی‌ولت (پایدارترین غلظت) است.



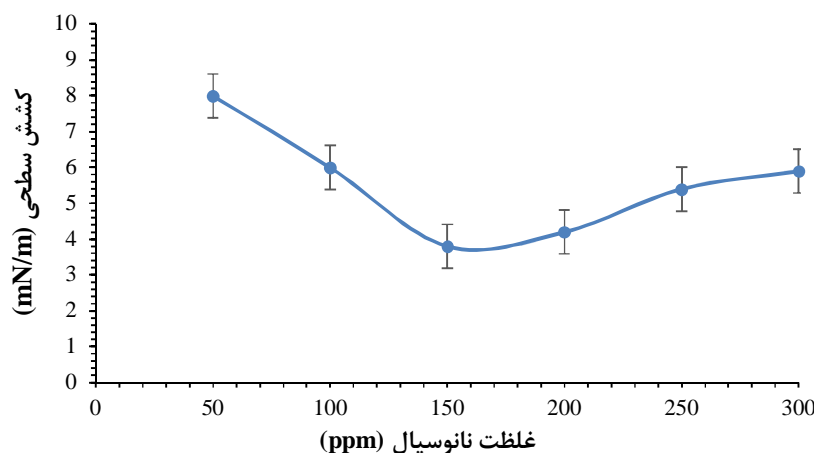
شکل 5- آنالیز رسانایی الکتریکی نانوسیال



شکل 6- آزمایش پتانسیل زتا برای نانوسیال در غلظت‌های مختلف

3-3- آزمایش کشش سطحی

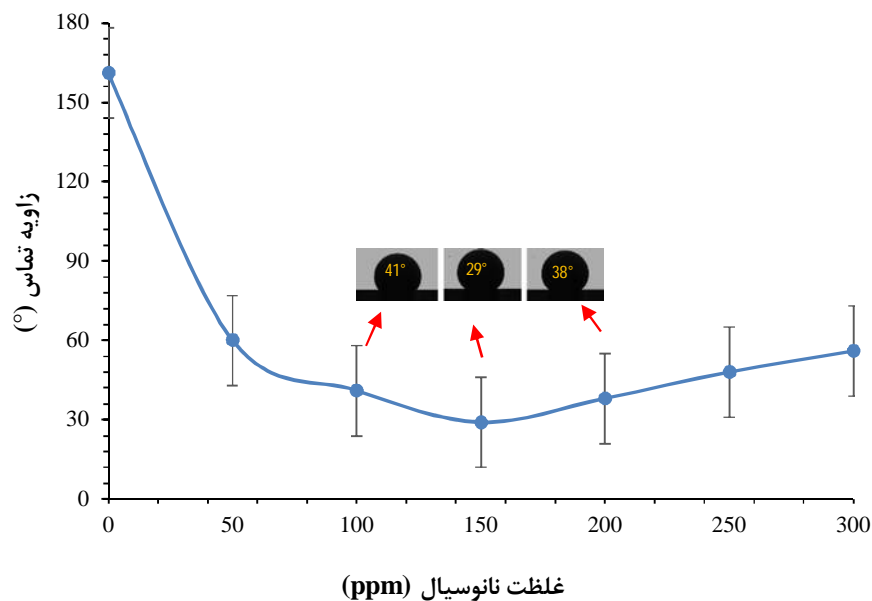
شکل 7 نمودار کشش سطحی نانوسیال را در غلظت‌های مختلف نشان می‌دهد. در این راستا، در حالت اولیه، اندازه کشش سطحی در برابر نفت خام $21/24 \text{ mN/m}$ است. این مقدار به عنوان یک مقدار مرجع در برای نانوسیال استفاده شد. بنابراین در آزمایش کشش سطحی در غلظت‌ها مختلف (50، 100، 150، 200، 250 و 300 پی‌پی‌ام) مقادیر 8، 6، $3/80$ ، $5/40.4/20$ و $5/90 \text{ mN/m}$ به دست آمد. نتایج نشان داد که میزان کاهش کشش سطحی در غلظت 150 پی‌پی‌ام نسبت به سایر غلظت‌ها بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که فاز آبی به دلیل وجود عوامل فعال سطحی باعث کاهش کشش سطحی می‌شود. همچنین، وجود گروه‌های عاملی آب دوست در فازهای آبی و آلی در یک راستا قرار می‌گیرند و همچنین یون‌های هم افزایی شده آب کم‌شور موجود در نانوسیال در سطح تماس با نفت جذب و باعث کاهش کشش سطحی می‌شوند.



شکل 7- کشش سطحی بین نفت و نانوسیال سنتزی در غلظت‌های مختلف

4-3- آزمایش زاویه تماس

در شرایط اولیه زاویه تماس نفت 161 درجه است. همچنین، زاویه تماس در غلظت‌های 50، 100، 150، 200، 250 و 300 پی‌پی‌ام اندازه‌گیری شد (شکل 8). به طوری که با توجه به شکل 8 در غلظت 150 پی‌پی‌ام زاویه تماس بین قطره نفتی و سنگ به حداکثر خود رسیده و به نوعی باعث جدایش نفت از سنگ مغزه شده است. بنابراین در این غلظت (150 پی‌پی‌ام) تغییر معناداری در ترشوندگی سنگ مغزه از شرایط نفت دوستی به آب دوستی با تغییر زاویه تماس از 161 درجه به 29 درجه ایجاد شد. به طور کلی، نانوسیال سنتزی تمایل به تشکیل یک فیلم مثلثی شکل در سطح تماس سه فاز ایجاد می‌نماید، این امر باعث می‌شود فیلم مثلثی شکل به سمت جلو حرکت کند و باعث جدایش قطرات نفت از سطح منافذ سنگ شود. به طور کلی، عنصرهای هیدروکسیل در ساختار سنگ کربناته و همچنین عنصرها (هیدروژن، اکسیژن، تیتانیوم) و یون‌های موجود در ساختار نانوذره سنتزی تمایل به برهمکنش دارند. همچنین، لایه نانوسیال بین نفت و سطح سنگ ظاهر می‌شود و مولکول‌های نانوسیال به دلیل برهمکنش‌های $\pi-\pi$ بر روی سطح سنگ جذب می‌شوند. وجود گروه‌های عاملی آب‌دوست و یون‌های موجود در نانوسیال منجر به تغییر سطح سنگ به حالت آب دوستی شد. و این فرآیند منجر به بازیافت بیشتر نفت می‌شود.



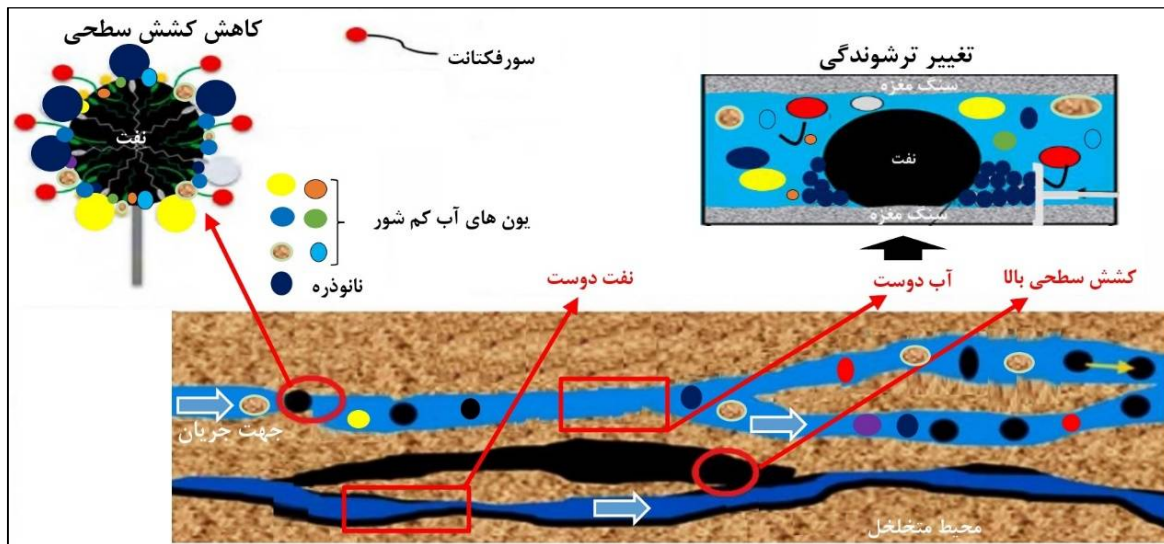
شکل 8- زاویه تماس بین نفت و نانوسیال سنتزی در غلظت‌های مختلف

5-3- سیلابزنی مغزه

در این بخش، بازیافت کل نفت پس از تزریق حدود پنج برابر حجم منافذ 47 درصد به دست آمد. همچنین، بازیافت نفت اضافی حاصل از تزریق نانوسیال (150 پی‌پی‌ام) 7 درصد بود. به طور کلی، نسبت بازیافت نفت به بازیافت کلی نفت پس از سیلابزنی آب کم‌شور و نانوسیال به ترتیب 85 و 15 درصد حاصل شد.

4- مکانیسم

به طور کلی، اجزای نفت خام، به ویژه اسیدهای دارای بار منفی، تمایل دارند به سطوح سنگ بچسبند و در نتیجه سنگ مغزه را نفت دوست نمایند. بنابراین، در این راستا، این مطالعه اثربخشی یک ترکیب سنتزی جدید فرموله شده را نشان می‌دهد که فشار سطحی را در سطح مشترک نفت و آب ایجاد می‌کند و جدا شدن نفت از سطح سنگ را از طریق تبادل یونی و پل کاتیونی افزایش می‌دهند. در غلظت 150 پی‌پی‌ام، نانوسیال به دلیل بار منفی قوی خود مانند یک الکترولیت رفتار می‌کند. بارهای سطحی مثبت سنگ‌های هسته کربناته، نانوسیال با بار منفی را جذب می‌کنند و تغییرات ترشوندگی را تسهیل می‌کنند. برهمکنش بین یون‌های هیدروکسیل در نانوسیال و سطح سنگ منجر به تغییر شرایط آب دوستی، با تشکیل یک لایه گوه در سطح مشترک می‌شود. زمانی که گرادیان فشار ساختاری بین قطرات نفت و سنگ بیشتر شود، جداسازی نفت رخ می‌دهد. این تغییرات ترشوندگی ناشی از فعل و انفعالات مختلف، از جمله نیروهای الکترواستاتیک و واندروالس است. علاوه بر این، وارد کردن یون‌هایی مانند SO_4^{2-} ، Mg^{2+} و Ca^{2+} در نانوسیال جدا شدن اسیده‌ها از سطوح سنگ را افزایش می‌دهند، و از طرفی SO_4^{2-} به طور موثری بارهای مثبت سنگ‌های کربناته را خنثی می‌کند. به طور کلی، یون‌های دو ظرفیتی فضای بیشتری را اشغال می‌کنند، بار سطحی بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند و منجر به کاهش قابل توجه کشش سطحی می‌شوند. در این راستا، در شکل 9 مکانیسم عملکرد نانوسیال در راستای تغییر ترشوندگی و کشش سطحی نشان داده شده است.



شکل 9- مکانیسم عملکرد نانوسیال در راستای تغییر ترشوندگی و کشش سطحی

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی پدیده تاثیر یک نانوسیال جدید سنتزی به منظور بهبود تولید نفت مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، آب کم‌شور مهندسی شده و نانوذره اصلاح سطحی شده با غلظت‌های مختلف به صورت هم‌افزایی شده آماده شد. به منظور تایید ساختار نانوذره سنتزی جدید آنالیزهای مادون قرمز تبدیل فوریه، پراش پرتوی ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. سپس با آزمایشات رسانایی الکتریکی و پتانسیل زتا غلظت بهینه انتخاب شد. در این مطالعه، آزمایشاتی شامل کشش سطحی، زاویه تماس و سیلابزنی مغزه انجام شد. نتایج

نشان داد که نانوسیال زاویه تماس و کشش سطحی را به ترتیب از حالت پایه به 29° و $3/20 \text{ mN/m}$ کاهش می‌دهد. نتایج سیلابزنی مغزه نشان داد که نانوسیال قادر است بازیافت نفت را به مقدار 15 درصد افزایش دهد. به طور کلی، نتایج نشان داد تنها 150 پی‌پی‌ام از این ماده باعث کاهش معقول کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ کربناته می‌شود. به دلیل وجود ساختار آب‌دوست خیلی خوبی این مقدار غلظت (150 پی‌پی‌ام) در روند آزمایشات موثر واقع شد. این مطالعه به درک عمیق‌تر استفاده از نانوسیال به منظور تغییر ترشوندگی سنگ و ازدیاد برداشت نفت در شرایط مختلف کمک می‌کند.

6- منابع

- [1] Y. Noruzi, M. Sharifi, J. Fahimpour, M. Sabet, M. Akbari, and S. Hosseini, "The state-of-the-art of wettability alteration in sandstones and carbonates: A mechanistic review." *Fuel*, vol. 356, pp. 129570, 2024.
- [2] N.K. Abbood, N. Mayahi, A. Obeidavi, and S. Hosseini, Effect of SiO_2 nanoparticles + 1-dodecyl-3-methyl imidazolium chloride on the IFT and wettability alteration at the presence of asphaltenic-synthetic oil." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 12 (11), pp. 3137-3148, 2022.
- [3] E. Jafarbeigi, S. Ayatollahi, Y. Ahmadi, M. Mansouri, and F. Dehghani, "Identification of novel applications of chemical compounds to change the wettability of reservoir rock: A critical review." *Journal of Molecular Liquids*, pp. 121059, 2022.
- [4] E. Jafarbeigi, M. Shahini-Nia, M. Mansouri, T. Kikhavani, N. Setaresheenas, "CuO/ Al_2O_3 /carbomer as a new hybrid agent for wettability alteration and oil recovery in carbonate reservoirs." *Journal of Molecular Liquids* vol. 425, pp. 127270, 2025.
- [5] F. Salimi, E. Jafarbeigi, C. Karami, and E. Khodapanah, "Synthesis of cost-effective Si-CQD for effective oil separation from core rock." *Journal of Molecular Liquids*. vol. 394, pp. 123722, 2024.
- [6] S. Mahmoudi, A. Jafari, and S. Javadian, Temperature effect on performance of nanoparticle/surfactant flooding in enhanced heavy oil recovery, *Petroleum Science*, vol. 16, pp. 1387-1402, 2019.
- [7] S. Hosseini, M. Sabet, A. Zeinolabedini Hezave, M.A. Ayoub, and K.A. Elraies, "Effect of combination of cationic surfactant and salts on wettability alteration of carbonate rock, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*." vol. 46 (1), pp. 9692-9708, 2024.
- [8] A. Khajeh Kulaki, S.M. Hosseini-Nasab, and F. Hormozi, "Low-salinity water flooding by a novel hybrid of nano $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ modified with a green surfactant for enhanced oil recovery." *Scientific Reports*, vol. 14 (1), pp. 14033, 2024.
- [9] R. Gharibshahi, N. Mehrooz, and A. Jafari, "In-Situ Synthesis of Nanoparticles for Enhanced Oil Recovery (EOR) Operations: Current Status and Future Prospects." *IntechOpen*, 2024.
- [10] E. Jafarbeigi, E. Sahraei, K. Maroufi, "A novel functionalized nanoparticle for inhibiting asphaltene precipitation and deposition." *Physics of Fluids*, vol. 37 (1), pp. 017164, 2025.
- [11] A. Keykhosravi, and M. Simjoo, "Insights into stability of silica nanofluids in brine solution coupled with rock wettability alteration: An enhanced oil recovery study in oil-wet carbonates." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 583, pp. 124008, 2019.
- [12] Ali J.A., Kolo K., Khaksar-Manshad A., and Stephen K.D., "Emerging applications of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ /poly (acrylamide) nanocomposites within the engineered water EOR in carbonate reservoirs." *Journal of Molecular Liquids*, vol. 322, pp. 114943, 2021.
- [13] S.N. Hosseini, M.T. Shuker, M. Sabet, A. Zamani, Z. Hosseini, and A. Shabib-Asl, "Brine ions and mechanism of low salinity water injection in enhanced oil recovery: a review." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 11 (11), pp. 1257-1264, 2015.

- [14] A. Pourakaberian, H. Mahani, and V. Niasar, "The impact of the electrical behavior of oil-brine-rock interfaces on the ionic transport rate in a thin film, hydrodynamic pressure, and low salinity waterflooding effect." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 620 pp. 126543, 2021.
- [15] R. Aziz, V. Niasar, P.J. Martínez-Ferrer, O.E. Godinez-Brizuela, C. Theodoropoulos, and H. Mahani, Novel insights into pore-scale dynamics of wettability alteration during low salinity waterflooding." *Scientific reports*, vol. 9 (1), pp. 9257, 2019.
- [16] M. Golmohammadi, H. Mahani, S. Ayatollahi, "Toward low-salinity waterflooding predictive capability development in carbonates for fast screening of oil-brine-rock candidates." *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 221, pp. 111258, 2023.
- [17] A. Balavi, S. Ayatollahi, and H. Mahani, "The Simultaneous Effect of Brine Salinity and Dispersed Carbonate Particles on Asphaltene and Emulsion Stability." *Energy Fuels*, vol. 37 (8), pp. 5827–5840, 2023.
- [18] A. Rezaei, H. Vatanparast, M. Ahmadi, and A. Shahrabadi, "An experimental approach to investigate oil recovery during ion-tuned water injection: A new insight into the asphaltene effect." *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 227, pp. 211858, 2023.
- [19] S. Habibi, A. Jafari, and Z. Fakhroueian, "Application of novel functionalized Al₂O₃/silica by organosiloxane and amine reagents for enhanced oil recovery." *Applied Nanoscience*, vol. 10, pp. 2085-2100, 2020.
- [20] ا. جعفریگی، ا. صحرای، خ. معروفی، "هم‌افزایی نانوذرات آب کم شور / سورفکتانت: مروری بر کاربردها، مزیت‌ها و مکانیسم‌ها"، 1403.
- [21] S. Habibi, A. Jafari, and Z. Fakhroueian, "Wettability alteration analysis of smart water/novel functionalized nanocomposites for enhanced oil recovery." *Petroleum Science*, vol. 17, pp. 1318-1328, 2020.
- [22] H. Bahraminejad, A. Khaksar-Manshad, M. Riazi, J.A. Ali, S.M. Sajadi, and A. Keshavarz, CuO/TiO₂/PAM as a Novel Introduced Hybrid Agent for Water-Oil Interfacial Tension and Wettability Optimization in Chemical Enhanced Oil Recovery." *Energy & Fuels*, vol. 33 (11), pp. 10547-10560, 2019.
- [23] F. Razavirad, A. Shahrabadi, P. Babakhani Dehkordi, and A. Rashidi, "Experimental pore-scale study of a novel functionalized iron-carbon nanohybrid for enhanced oil recovery (EOR)." *Nanomaterials*, vol. 12 (1), pp. 103, 2021.
- [24] F. Torabi, and A. Gandomkar, "Experimental Evaluation of CO₂-Soluble Nonionic Surfactants for Wettability Alteration to Intermediate CO₂-Oil Wet during Immiscible Gas Injection." *SPE Journal*, pp. 1-16. 2024.
- [25] W.G. Anderson, "Wettability literature survey-part 1: rock/oil/brine interactions and the effects of core handling on wettability." *Journal of Petroleum Technology*. 38 (10), pp. 1125-1144, 1986.
- [26] Y.Q. Hou, D. M. Zhuang, G. Zhang, M. Zhao, and M.S. Wu, "Influence of annealing temperature on the properties of titanium oxide thin film." *Applied Surface Science*. vol. 218, pp. 98-106, 2003.
- [27] G. Socrates, Infrared characteristic group frequencies: tables and charts, 2nd Ed., John Wiley & Sons, England, pp. 62237, 1994
- [28] T. Ivanova, A. Harizanova, and M. Surtchev, "Formation and investigation of sol-gel TiO₂-V₂O₅ system." *Materials Letters*. Vol. 55, pp. 327-333, 2002.
- [29] Z. Liu., Z. Jian, , J. Fang, , X. Xu, , X. Zhu, and, S. Wu, "Low-temperature reverse microemulsion synthesis, characterization, and photocatalytic performance of nanocrystalline titanium dioxide." *International Journal of Photoenergy*, 2012.

- [30] M.M. Ahmad, S. Mushtaq, H.S. Al. Qahtani, A. Sedky, and M.W. Alam, "Investigation of TiO₂ Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Method for Effectual Photodegradation, Oxidation and Reduction Reaction." *Crystals*, vol. 11 (12), pp. 1456, 2021.
- [31] G. Wang, L. Xu, J. Zhang, T. Yin, D. Han, "Enhanced photocatalytic activity of powders (P25) via calcination treatment." *International Journal of Photoenergy*, pp.1–9, 2012.
- [32] Y. Zhao, X. Liu, F. Gu, H. Jiang, W. Shao, L. Zhang, and H. Ying, Synthesis and optical properties of TiO₂ nanoparticles." *Materials Letters*. vol.61 (1), pp. 79–83, 2007.