



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Study of natural cationic and anionic surfactants in interaction with divalent ions and their effects on the environment

Mohammad Reza Saniee¹, Amir Hossein Saeedi Dehaghani^{1,*}

¹ Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

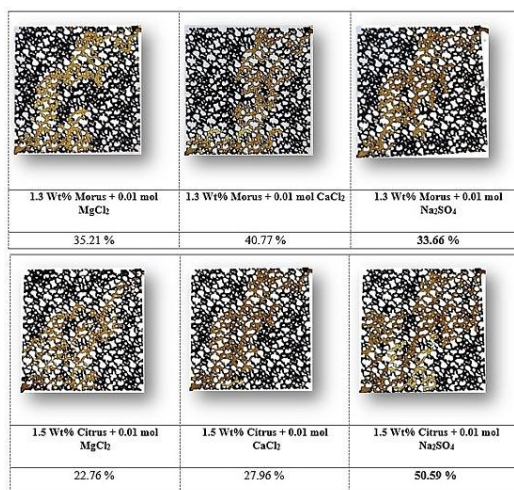
ARTICLE INFO

Received 2025-03-02
Accepted 2025-04-25
Available online 2025-01-21
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Natural Surfactants
leaf of Morus
leaf of Citrus
Interfacial Tension
Biodegradable

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: In recent decades, water and gas injection have gained significant attention for enhancing oil recovery. However, some engineers believe that alternative methods can play a more pivotal role in this field. The use of surfactants is considered an innovative technique that has had a notable impact on the oil industry. Nevertheless, the large-scale production of such materials is financially costly. Additionally, their synthesis results in the generation of toxic and hazardous waste, posing various threats to human health and the environment, ultimately leading to widespread and irreparable pollution. The use of natural surfactants has emerged as a viable solution with relatively high efficiency. These natural surfactants are extracted from the leaves of native plants, offering a cost-effective approach. Moreover, they are biodegradable and pose no risks to human health or the environment.

Research approach: The combination of these natural surfactants in oil-related experiments has yielded satisfactory results, demonstrating their effectiveness in reducing interfacial tension between water and oil, as well as modifying the viscosity of crude oil. This study specifically examined the interaction between surfactants and divalent ions at their lowest concentrations. One of the testing processes involved injecting these solutions into a micromodel, which was subsequently analyzed.

Main results: The combination of these surfactants with divalent ions and crude oil significantly reduced interfacial tension. Notably, the combination of Morus leaf extract with calcium ions reduced the interfacial tension of crude oil to 15.6 mN/m, while Citrus extract with sulfate ions reduced it to 13.6 mN/m. Additionally, in many viscosity tests, a reduction in crude oil viscosity was observed. The combination of calcium ions with Morus extract resulted in approximately 41% oil recovery, whereas sulfate ions with Citrus extract led to a 50% final recovery rate.

* Corresponding author: asaeeedi@modares.ac.ir



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

بررسی سورفکتانت‌های طبیعی کاتیونی و آنیونی در برهم‌کنش با یون‌های دوظرفیتی و اثر آن‌ها بر محیط زیست

محمد رضا صنیعی^۱، امیرحسین سعیدی دهقانی^{۱*}

^۱ گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: در دهه‌های اخیر، تزریق آب و گاز در بهبود بازیافت نفت مورد توجه زیادی بوده است، اما برخی از مهندسان معتقدند که روش‌های جایگزین بهتری می‌توانند نقش محوری در این زمینه ایفا کنند. استفاده از موادی مانند سورفکتانت‌ها به عنوان روشی نوآورانه در نظر گرفته می‌شود که تأثیر قابل توجهی بر بخش نفتی گذاشته است؛ با این حال، تولید در مقیاس بزرگ چنین موادی از نظر مالی بسیار گران است. علاوه بر این ساخت این مواد منجر به تولید پسماندهای سمی و خطرناکی می‌شود که می‌توانند تهدیدهای مختلفی را برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد کنند و در نهایت منجر به آلودگی گسترده و غیرقابل جبران می‌شوند. استفاده از سورفکتانت‌های طبیعی به عنوان راه‌حلی مناسب با کارایی نسبتاً بالایی ظاهر می‌شوند. این سورفکتانت‌های طبیعی از برگ گیاهان بومی استخراج می‌شوند که می‌توانند به عنوان روشی مقرون به صرفه استفاده شوند. همچنین، این مواد زیست تخریب پذیر هستند و تهدیدی برای سلامت انسان و محیط زیست ایجاد نمی‌کنند. **روش تحقیق:** ترکیب این سورفکتانت‌های طبیعی در آزمایش‌های مرتبط با نفت، نتایج رضایت بخشی را به همراه داشته است که اثربخشی آن‌ها را در کاهش کشش سطحی بین آب - نفت و اصلاح گرانشی نفت خام نشان می‌دهد. در این پژوهش برهم‌کنش میان سورفکتانت‌ها با پایین‌ترین غلظت یون‌های دوظرفیتی مورد بررسی قرار گرفت. یکی از فرایندهای آزمایش، تزریق این محلول‌ها در یک میکرومدل بود که در ادامه مورد بررسی قرار گرفت. **نتایج اصلی:** ترکیب این نوع سورفکتانت‌ها در کنار یون‌های دوظرفیتی با نفت خام، کشش بین سطحی را به طور قابل توجهی کاهش داد. نکته قابل توجه این است که ترکیب عصاره برگ توت با یون کلسیم کشش بین سطحی نفت خام را به عدد ۱۵/۶ میلی نیوتن بر متر کاهش داد، در حالی که برگ نارنج با یون سولفات آن را به عدد ۱۳/۶ میلی نیوتن بر متر رساند. همچنین در بسیاری از موارد آزمون‌های گرانشی، کاهش گرانشی نفت خام مشاهده شد. ترکیب یون کلسیم با عصاره برگ توت منجر به بازیابی حدود ۴۱٪ نفت شد، در حالی که یون سولفات با برگ نارنج منجر به ۵۰٪ بازیابی نهایی شد.

کلیدواژه‌ها

سورفکتانت‌های طبیعی
برگ درخت توت
برگ درخت نارنج
کشش بین سطحی
زیست تخریب پذیر

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵
دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: asaeeedi@modares.ac.ir

کپی رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

استفاده از فرایندهای تولید متعارف، بسته به نیروهای محرکه طبیعی منجر به بازیابی تنها ۳۰ درصد از نفت کل مخازن را شامل می‌شوند که این امر قادر به برآوردن تقاضای روبه‌رشد انرژی نیست. به همین دلیل با استفاده از فناوری‌های جدید و مدرن میزان تولید از مخازن را افزایش می‌دهند. تزریق سورفکتانت‌ها به عنوان رویکرد بازیابی نفت افزایش یافته است؛ به‌طوری که با کاهش کشش سطحی میان آب و نفت منجر به افزایش راندمان جابه‌جایی می‌شوند. سورفکتانت‌ها یا مواد فعال سطحی موادی هستند که هنگامی که به مقدار بسیار اندک استفاده می‌شوند، کشش سطحی سیالات را تغییر می‌دهند [۱]. سورفکتانت‌ها جزو مواد آلی طبقه‌بندی می‌شوند و به لحاظ ساختاری دوگانه‌دوست هستند؛ یعنی شامل دو گروه آب‌گریز و آب‌دوست هستند. به عبارت دیگر، سورفکتانت‌ها یک جزء نامحلول در آب و یک جزء محلول در آب دارند. سورفکتانت‌ها کشش سطحی را در مرز مشترک بین دو فاز به حداقل رسانده و همین امر لزوم استفاده از آن‌ها را در محلول بسیار آشکار می‌کند [۲]. با توجه به تأثیر سورفکتانت‌ها در کاهش کشش سطحی و افزایش تحرک‌پذیری نفت خام و تأثیر بر قسمت‌های قطبی نفت خام، کمک شایانی به فرایند کار می‌کنند. استفاده از ظرفیت‌های پایین نمک‌ها، یکی از فرایندهای متناسب با صنعت است؛ چرا که هر چه میزان یون‌های محلول کمتر باشد، واکنش میان مواد به حداقل می‌رسد؛ یعنی استفاده از ظرفیت‌های کم شوری باعث تقویت کارایی موادی مثل سورفکتانت‌ها می‌شود بنابراین با بهره‌گیری از این امر می‌توان با استفاده از ظرفیت‌های پایین یون‌های دوظرفیتی کمک شایانی به بهره‌وری از مخازن نفتی کرد و همچنین یون‌های تعیین‌کننده (منیزیم، کلسیم و سولفات) در محلول سورفکتانتی با توجه به بار الکتریکی یون‌ها و ترکیب شیمیایی سورفکتانت‌ها (ساپونین) قادر به بهبود یا کاهش اثرگذاری این مواد هستند. با توجه به اینکه استخراج این مواد از برگ گیاهان صورت می‌گیرد، زیست‌تخریب‌پذیر هستند و سلامتی انسان و محیط‌زیست را به خطر نمی‌اندازند و تولید این گونه مواد زیستگاه طبیعی را دچار آسیب نمی‌کند و ترکیب آن‌ها با یون‌های دوظرفیتی نیز ایجاد مشکل نمی‌کند [۳].

در پژوهش‌های پیشین، برهم‌کنش میان سورفکتانت‌های طبیعی با یون‌های تک‌ظرفیتی و همچنین با نانوموادی مثل سیلیس مورد ارزیابی قرار گرفت که در بسیاری از موارد پاسخ مثبتی از نتایج آزمون‌ها دریافت شد، و برهم‌کنش سورفکتانت‌ها با نانومواد اثر جذبی بهتری را در حضور نانوسیلیس به نمایش گذاشت [۴].

با استفاده از روش‌های متعددی می‌توان غلظت بحرانی سورفکتانت‌های طبیعی را تعیین کرد که شامل روش‌هایی مانند کشش سطحی، کشش بین‌سطحی، روش حلقه و روش رسانایی الکتریکی برای تعیین این نقطه از مواد اهمیت دارند و پرکاربرد هستند [۴]. در پژوهش‌های گذشته اثر هم‌افزایی یون‌های دوظرفیتی در کنار سورفکتانت‌های طبیعی مورد ارزیابی قرار نگرفته است و همچنین ساپونین استخراج‌شده از برگ نارنج برای اولین بار در سری آزمون‌های پژوهشی و اثرات آن با نفت خام ارزیابی شد.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نفت خام مورد استفاده از قسمت جنوبی میدان آزادگان است که از جمله هیدروکربن‌های سنگین به شمار می‌آید، گرانروی نفت خام با دستگاه رئومتر آنتون پار (ساخت کشور اتریش) اندازه‌گیری شد و عدد ۵۷۰ سنتی پواز گزارش شد و همچنین کشش بین‌سطحی آن عدد ۲۹/۸ میلی‌نیوتن بر متر گزارش شد، این نمونه نفت خام دارای ۱۶ درصد آسفالتین بود. نرخ تنش برشی که برای سیال نیوتنی نفت خام در نظر گرفته شد بین ۱ تا ۱۰۰۰ بود و تعداد نقطه‌های انتخابی ۳۰۰ عدد در نظر گرفته شد. جدول ۱ ویژگی نمونه نفت خام را شرح می‌دهد.

جدول ۱ کشش بین سطحی، ویسکوزیته، میزان آسفالتین و عدد اسیدی این نمونه نفت [۶]

Table 1 Interfacial Tension, viscosity, acid number, and asphaltene content of this oil sample [6]

component	Interfacial Tension (mN/m)	Viscosity (cP)	Asphaltenes	Acidity
Crude Oil	29.8	570	16%	0.6

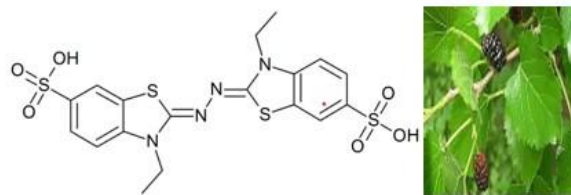
۲-۲ ساپونین استخراج‌شده از برگ گیاهان

ساپونین، ماده‌ای گلیکوزیدی است که از گیاهان مختلف به‌دست می‌آید و در اثر حرکت دادن آن با آب کف تولید می‌شود. ساپونین‌ها ساختار شیمیایی منحصربه‌فردی دارند که در صورت مخلوط‌شدن با آب مانند مواد شوینده کف تولید می‌کنند. همچنین می‌توانند به مولکول‌های آب و ترکیبات روغنی و چربی‌ها متصل شوند.

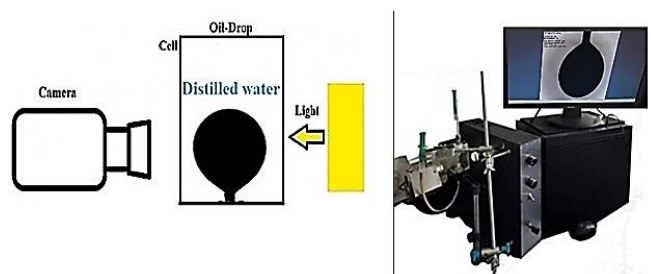
با استفاده از خشک‌شده برگ گیاهان توت، و نارنج، ترکیب آن‌ها با آب مقطر، به مدت ۲۰ روز داخل آون ۹۰ درجه قرار گرفت و سپس با استفاده از کاغذ صافی، محلول آن‌ها خالص‌سازی شده و بعد از خشک‌کردن، مواد اصلی کار یعنی ساپونین‌ها به‌دست می‌آیند. نقطه غلظت بحرانی این مواد یعنی برگ توت ۱/۵ درصد وزنی، و برگ نارنج ۱ درصد وزنی به‌دست آمد. در این پژوهش برای برگ توت ۱/۳ درصد وزنی و برگ نارنج ۱/۵ درصد وزنی برای محلول‌سازی در نظر گرفته شد و این غلظت‌ها به گونه‌ای ثابت در نظر گرفته شد تا بتوان اثرگذاری غلظت پایین یون‌های دوظرفیتی را روی مواد سورفکتانت‌ها و ترکیب آن‌ها با نفت خام مشاهده کرد. یون‌های دوظرفیتی مورد استفاده در این پژوهش شامل یون منیزیم، کلسیم و سولفات است که با استفاده از رابطه‌ی استوکیومتری محاسبه غلظت آن‌ها، غلظت انتخابی ثابت ۰/۰۱ درصد وزنی از آن‌ها در آزمایش‌ها منظور شد. معادله ۱ محاسبه میزان درصد وزنی از برگ گیاهان استفاده‌شده را شرح می‌دهد، همچنین شکل ۱ نمایی از برگ درخت توت و بخش ساپونین آن را نمایش می‌دهد.

$$Wt\% = \frac{Soluble (g)}{Solution (g)} * 100 \quad (1)$$

تماس باشند، مایعات تمایل دارند کمترین سطح ممکن را به دست آورند. سطح مایع مانند ورق کشسان رفتار می‌کند. آزمون کشش بین‌سطحی یکی از آزمون‌های مهم در مهندسی نفت به حساب می‌آید که با در نظر گرفتن گرانش سیال و آزمون‌های تزریق در میکرومدل می‌توان به نتایج ارزشمندی دست پیدا کرد. شکل ۲ دستگاه سنجش قطره آویزان همراه با تجهیزات همراه را نشان می‌دهد.



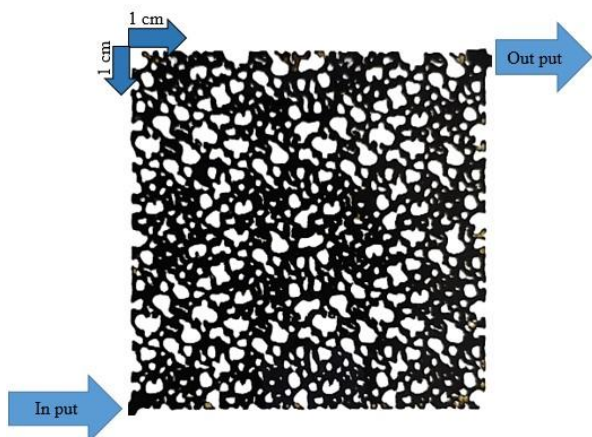
شکل ۱ ساختار شیمیایی ساپونین و نمای کلی برگ توت [۱۲]
Figure 1 The structure of Saponin and leaf of Morus [12]



شکل ۲ دستگاه قطره آویزان (راست) و طرح واره قطره آویزان نفت (چپ)
Figure 2 Devices of pendant drop (Right) and Schematic of pendant drop of oil (Left)

۲-۶ آزمون تزریق در میکرومدل

آزمون تزریق در میکرومدل شیشه‌ای به منظور فهم و مشاهده سازوکار ازدیاد برداشت نفت مورد توجه محققین قرار گرفته است. میکرومدل این امکان را فراهم می‌کند تا با مشاهده حرکت سیال، بازده جابه‌جایی در مقیاس حفرات بررسی شود. در قدم اول میکرومدل با هیدروکسید سدیم اشباع شد و بعد از یک ساعت استراحت، با آب مقطر شست‌وشو داده و خشک شد، سپس در آن ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد، در قدم بعدی میکرومدل را با تری‌کلرومتیل‌سیلان و تولوئن به غلظت‌های به ترتیب ۲ و ۹۸ درصد مخلوط کرده و میکرومدل مجدد با ترکیب ذکر شده اشباع شد و بعد از ۵ دقیقه استراحت، با متانول شست‌وشو داده و به مدت ۲۴ ساعت داخل آن ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس میکرومدل را از نفت خام اشباع نموده و گونه‌های مختلف مواد در جدول ۴ تزریق شد و در نهایت میزان نهایی بازیابی محاسبه شد. با استفاده از پمپ تزریق و تنظیم دستگاه، بعد از گذشت چهار ساعت، یک سی‌سی از محلول‌های سورفکتانت‌ها تزریق شد [۱۷ و ۱۹]. شکل ۳ طرح‌واره میکرومدل استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳ طرح‌واره میکرومدل [۱۹]
Figure 3 Schematic of Micromodel [19]

۲-۳ نمک‌های دوظرفیتی

در این پژوهش اثر هم‌افزایی یون‌های دوظرفیتی همراه با سورفکتانت‌های طبیعی و آب مقطر مورد بررسی قرار گرفت و به طریقی با این نمک‌ها، آب هوشمند ساخته شد و اثر آن‌ها روی نفت بررسی شد. نمک‌های دوظرفیتی شامل Na_2SO_4 ، CaCl_2 ، MgCl_2 بودند. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، در صنعت هر چه میزان نمک‌ها کمتر باشد بهتر و مقرون به صرفه‌تر هستند؛ چرا که روش تولید و خالص‌سازی این نوع نمک‌ها بسیار پرهزینه است. بنابراین در اینجا با در نظر گرفتن غلظت کمی از نمک‌های دوظرفیتی به فرایند انجام آزمون‌ها پرداختیم که غلظت ۰/۰۱ مولار از نمک‌های دو ظرفیتی بود. بحث دیگر، وجود قدرت یونی است؛ زمانی که نمک‌ها در آب حل می‌شوند، یونیزه می‌شوند و به دو قسمت آنیون‌ها و کاتیون‌ها تقسیم می‌شوند که این عامل در نمک‌های دوظرفیتی بیشتر به چشم می‌خورد. به همین دلیل با استفاده از آن‌ها، آب هوشمند تهیه شد و این عمل یونیزاسیون بین سورفکتانت‌ها و نفت اتفاقاتی را به همراه داشت. برای اینکه نتایج حاصل را بتوان تفسیر کرد و چگونگی تغییرات نفت خام با عملکرد بین نمک‌ها و سورفکتانت‌ها را ثبت نمود، غلظت نمک‌ها و غلظت سورفکتانت‌ها باید بین تمامی آزمون‌ها یکسان باشد. جدول ۲ میزان نمک‌های دوظرفیتی حل‌شده در ۲۵ سی‌سی از محلول سورفکتانت را نشان می‌دهد.

جدول ۲ درصد ۰/۰۱ مول یون‌های دو ظرفیتی برای ۲۵ سی‌سی محلول سورفکتانت‌ها

Table 2 % 0.01 mol of divalent ions for 25 cc solution of surfactants

component	ppm
MgCl_2	2033
CaCl_2	1110
Na_2SO_4	1420.4

۲-۴ آزمون گرانشی

گرانشی عبارت است از مقاومت سیال در برابر اعمال تنش برشی. این نوع آزمون با استفاده از دستگاه آنتون پار ساخت کشور اتریش (رئومتر سنجیده می‌شود و نتایج اثرگذاری آن حائز اهمیت است. قطعه کپ (مخزن)، اسپیندل، سیستم و کامپیوتر از سری قطعات دستگاه رئومتر است. تمامی آزمون‌های گرانشی گرفته‌شده از مواد بین نرخ تنش برشی ۱ تا ۱۰۰۰ بوده و ۳۰۰ نقطه برای تمامی آزمون‌ها در نظر گرفته شد.

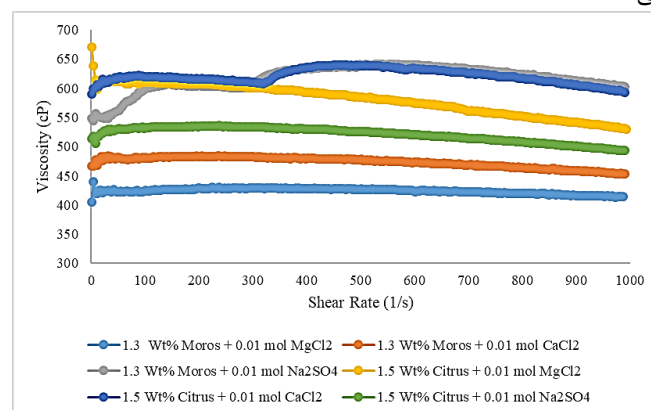
۲-۵ آزمون کشش بین‌سطحی

کشش بین‌سطحی، تمایل سطح سیالات در کوچک‌شدن به کمترین سطح ممکن است. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که سطح مایع با فاز دیگری در

۳ بحث و نتایج

۳-۱ کاهش گرانیوی

افزودن یون‌های دوظرفیتی به سورفکتانت‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با نفت باعث کاهش گرانیوی نفت خام شد و این امر نشان‌دهنده‌ی سازگاری یون‌های دوظرفیتی با سورفکتانت‌ها را نشان می‌دهد و اثر آن‌ها را بهبود می‌بخشد. زمانی که گرانیوی سیالات نیوتنی مثل نفت کم می‌شود، میزان گرانیوی سیال کاهش پیدا می‌کند و این موضوع نشان‌دهنده این است که سیال به راحتی از خلل و فرج سنگ‌ها خارج می‌شود و در نتیجه نفت بیشتری از مخازن برداشت می‌شود. کاهش گرانیوی بدین معناست که بار سورفکتانت‌ها و بار یون‌های دوظرفیتی مشخص است؛ در نتیجه برهم‌کنش میان نفت و محلول‌ها، باعث این مطلب شده‌است که بخش سنگین نفت خام که شامل آسفالتین‌ها و رزین‌های سنگین می‌شود در قسمت فاز امولسیون، و بخش سبک هیدروکربن‌ها در قسمت بالایی نفت خام یا قسمت بالک نفت خام تجمع پیدا کرده، و در نتیجه این مطالب باعث کاهش گرانیوی نفت خام شده است. شکل ۴ تغییرات گرانیوی نفت خام بر حسب نرخ تنش برشی در مجاورت محلول سورفکتانت‌ها و ۰/۰۱ مول از یون‌های دوظرفیتی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ گرانیوی نفت خام بر حسب نرخ تنش برشی، تغییرات ویسکوزیته نفت خام در مجاورت محلول‌های برگ توت و نارنج با ۰/۰۱ یون‌های تعیین‌کننده
Figure 4 Viscosity according to shear rate, Changes in oil viscosity in the vicinity of Morus and Citrus leaf solutions with 0.01 determining ions

۳-۲ تغییرات کشش بین‌سطحی

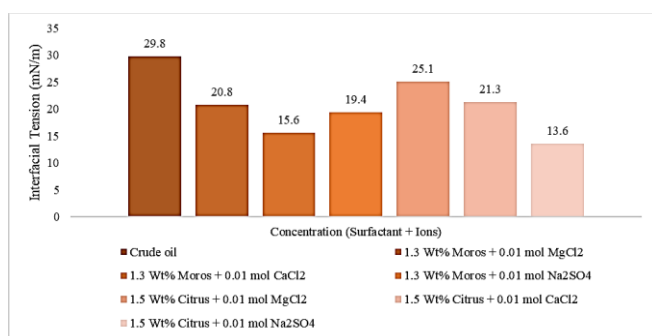
با توجه به جدول ۳ و تصاویر قطره‌های آویزان کشش بین‌سطحی، بهترین سازگاری را برگ توت با یون کلسیم، و برگ نارنج با یون سولفات داشته است و باعث کاهش کشش بین‌سطحی شده‌اند و بهترین سازگاری را از خود نشان داده‌اند. در بسیاری از موارد، کاهش کشش بین‌سطحی میان دو فاز باعث جدایش دو محلول از یکدیگر می‌شود و هر چه میزان کشش بین‌سطحی آب و نفت کاهش پیدا کند، بدان معناست که طبق فرایندهای آشام یا تزریق در میکرومدل میزان بازیابی نهایی نفت بیشتر می‌شود و در این شرایط هر چه میزان بازیابی نهایی نفت بیشتر باشد اثر مثبت و سازگاری سورفکتانت‌ها و یون‌ها را در برهم‌کنش میان محلول‌ها و نفت آشکار می‌کند. به‌طور کلی، افزودن یون‌های دوظرفیتی به سورفکتانت‌ها باعث افزایش کارایی سورفکتانت‌ها در سری آزمون‌های مربوط به نفت خام شد و با کاهش کشش بین‌سطحی همراه بودند اما نوع برهم‌کنش میان سورفکتانت‌ها و

یون‌های دوظرفیتی مهم است؛ هرچه سورفکتانت‌ها سازگاری بهتری از خود در مقابل یون‌ها از خود نشان دهند کارایی آن‌ها بیشتر می‌شود. با توجه به شکل ۵، یون‌های کلسیم و سولفات با سورفکتانت‌های برگ توت و برگ نارنج بهترین سازگاری را نشان دادند و بیشترین بهره را در آزمون‌های میکرومدل داشته‌اند (شکل ۶).

جدول ۳ تصاویر قطره‌های آویز

Table 3 Images of pendant drops

1.3 Wt% Morus + 0.01 mol MgCl ₂	1.3 Wt% Morus + 0.01 mol CaCl ₂	1.3 Wt% Morus + 0.01 mol Na ₂ SO ₄	1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol MgCl ₂	1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol CaCl ₂	1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol Na ₂ SO ₄
20.8 (mN/m)	15.6 (mN/m)	19.4 (mN/m)	25.1 (mN/m)	21.3 (mN/m)	13.6 (mN/m)



شکل ۵ نمودار تغییرات کشش بین‌سطحی بر حسب تغییرات غلظت

سورفکتانت‌ها همراه با یون‌های دوظرفیتی

Figure 5 The diagram of interfacial tension according to changes in the concentration of surfactant with divalent ions

۳-۳ محاسبه ضریب بازیابی نهایی

با استفاده از نرم افزار فتوشاپ، تعداد تمام پیکسل‌های نفت خام را محاسبه کرده و آن‌ها را به عنوان تعداد کل پیکسل‌ها در نظر می‌گیریم. سپس این فرایند را برای بقیه میکرومدل‌ها تکرار می‌کنیم و با استفاده از یک تقسیم ساده، مقدار بازیابی نهایی را محاسبه می‌کنیم و همچنین آزمون‌های میکرومدل تأییدکننده آزمون‌های کشش بین‌سطحی و نشان‌دهنده سازگاری یون‌ها و سورفکتانت‌ها است.

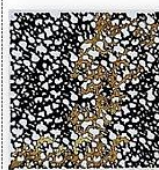
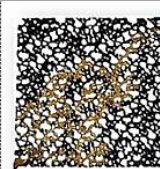
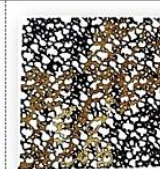
با توجه به شکل ۶ و جدول ۴ نمودارهای دایره‌ای و تصاویر میکرومدل، تزریق محلول‌های سورفکتانت‌ها همراه یون‌های دوظرفیتی منجر به بازیابی نهایی بیشتری شد؛ به‌طوری‌که در آزمون‌های سورفکتانت برگ توت مشاهده شد حدود ۴۱ درصد کارایی از خود نشان داده است و همچنین در تزریق محلول‌های برگ نارنج منجر به بازیابی نهایی حدود ۵۰ درصدی شد. آزمون‌های میکرومدل و کشش بین‌سطحی با هم در ارتباط هستند؛ یعنی هر چه میزان کشش بین‌سطحی نفت خام کمتر شود منجر به بازیابی نهایی بیشتری در تزریق این محلول‌ها در میکرومدل می‌شود.

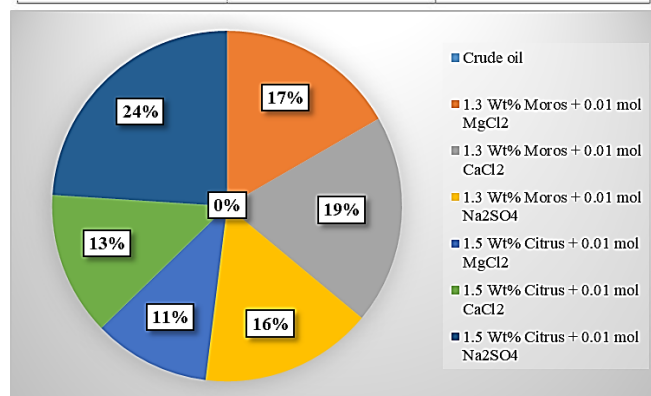
مراجع

- Ahmadi, M. A., Galedarzadeh, M., & Shadizadeh, S. R. Wettability alteration in carbonate rocks by implementing new derived natural surfactant: Enhanced oil recovery applications. *Transport in Porous Media*, 106, 645–667. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0418-0>. 2015.
- Ahmadi, M. A., & Shadizadeh, S. R. Adsorption of novel nonionic surfactant and particles mixture in carbonates: Enhanced oil recovery implication. *Energy & Fuels*, 26(8), 4655–4663. <https://doi.org/10.1021/ef300154h>. 2012.
- Ahmadi, M. A., & Shadizadeh, S. R. Experimental investigation of a natural surfactant adsorption on shale-sandstone reservoir rocks: Static and dynamic conditions. *Fuel*, 159, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.035>. 2015.
- Deymeh, H., Shadizadeh, S., & Motafakkerfard, R. Experimental investigation of Seidlitzia rosmarinus effect on oil-water interfacial tension usable for chemical enhanced oil recovery. *Scientia Iranica*, 19(6), 1661–1664. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.04.020>. 2012.
- Emadi, S. Effect of nano-silica particles on interfacial tension and mobility control of natural surfactant solution in enhanced oil recovery process by nano-surfactant flooding. *Journal of Molecular Liquids*, 248, 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.031>. 2017.
- Tanhaei, H., Saeedi Dehaghani, A. H., & Karami, S. Investigation of microwave radiation in conjugate with acidizing as a novel hybrid method of oil well stimulation. *ScientiaIranica*. <https://doi.org/10.24200/sci.2023.62586.7985>. 2023.
- Emadi, S. Effect of using Zyziphus spina-christi or Cedar extract as a natural surfactant on oil mobility control by foam flooding. *Journal of Molecular Liquids*, 293, 111573. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111573>. 2017.
- Moslemizadeh, A., Dezaki, A. S., & Shadizadeh, S. R. Mechanistic understanding of chemical flooding in swelling porous media using a bio-based nonionic surfactant. *Journal of Molecular Liquids*, 229, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.12.036>. 2017.
- Shadizadeh, S. R., Moslemizadeh, A., & Dezaki, A. S. A novel nonionic surfactant for inhibiting shale hydration. *Applied Clay Science*, 118, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.006>. 2015.
- Tavakoli, P., Shadizadeh, S. R., Hayati, F., & Fattahi, M. Effects of synthesized nanoparticles on oil-water interfacial tension: Nanofluids stability considerations. *Petroleum Science*. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.03.001>. 2020.
- AliAhmadi, M., & Shadizadeh, S. R. Spotlight on the new natural surfactant flooding in carbonate rock samples in low salinity condition. *Scientific Reports*, 8, 10985. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29321-w>. 2018.
- Salehi, N., Saeedi Dehaghani, A. H., & Haghighi, M. Investigation of fluid-fluid interaction between surfactant-ion-tuned water and crude oil: New insight into asphaltene behavior. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 121311. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121311>. 2023.
- Ghalamizade Elyaderani, S. M., Saeedi Dehaghani, A. H., & Razavinezhad, J. Tuned low-salinity waterflooding in carbonate reservoirs: Impact of specific ions. *SPE Journal*. <https://doi.org/10.2118/214299-PA>. 2023.
- Ahmadi, A., & Saeedi Dehaghani, A. H. Study and modeling the effect of brine salinity, composition, and oil type on foam stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. <https://doi.org/10.22078/jpst.2023.4972.1843>. 2022.
- Ahmadi, A., & Saeedi Dehaghani, A. H. Sensitivity analysis and prediction of wettability alteration using response surface methodology and PHREEQC. *Journal of Petroleum Science*

جدول ۴ تصاویر میکرومدل به همراه گزارش نتایج

Table 4 Images of Micromodel with reports results

		
1.3 Wt% Morus + 0.01 mol MgCl ₂	1.3 Wt% Morus + 0.01 mol CaCl ₂	1.3 Wt% Morus + 0.01 mol Na ₂ SO ₄
35.21 %	40.77 %	33.66 %
		
1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol MgCl ₂	1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol CaCl ₂	1.5 Wt% Citrus + 0.01 mol Na ₂ SO ₄
22.76 %	27.96 %	50.59 %



شکل ۶ ضریب بازیابی سورفکتانت‌ها

Figure 6 Recovery factor of surfactants

۴ نتیجه‌گیری

(الف) افزودن یون‌های تعیین‌کننده دوظرفیتی به سورفکتانت‌ها به دلیل سازگاری آن‌ها با یکدیگر باعث کاهش کشش بین‌سطحی نفت خام شده است.

(ب) برهم‌کنش محلول سورفکتانت‌ها و یون‌ها با نفت خام باعث کاهش گرانیوی نفت خام شده و اجزای سنگین نفت خام را در قسمت امولسیون‌ی نفت خام نگه داشته‌است.

(ج) کاهش کشش بین‌سطحی نفت خام و تزریق محلول‌ها، بیشترین بهره‌وری را در آزمون‌های میکرومدل ایجاد کردند و میزان بازیابی نهایی افزایش یافت.

(د) با توجه به ماهیت سورفکتانت‌ها از لحاظ دارا بودن بار مثبت یا منفی و ایجاد سازگاری و ارتباط بین سورفکتانت‌ها و یون‌ها می‌توان بیشترین تأثیر و بالاترین بازیابی را در سری آزمون‌ها مشاهده کرد.

(ه) با توجه به کاهش پیدا کردن کشش بین‌سطحی نفت خام و تزریق محلول‌های شامل سورفکتانت‌ها و یون‌های دوظرفیتی در میکرومدل به نتایج بازیابی ۴۱ درصدی در آزمون برگ توت با یون کلسیم و ۵۰ درصدی در آزمون برگ نارنج با یون سولفات دست پیدا کردیم.

- andEngineering. <https://doi.org/10.22078/jpst.2022.4792.1800>. 2021.
16. Ezeabara, C. A., Okeke, C. U., Aziagba, B. O., Ilodibia, C. V., & Emeka, A. N. Determination of saponin content of various parts of six Citrus species. *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, 4(1), 137–143. 2016.
 17. Gao, X., Tang, J., Zhao, J., Zhang, Y., Zhu, L., Cai, Z., Zuo, X., Chen, M., Wang, J., & Shen, Y. Preparation of tea saponin–cinnamaldehyde nanoemulsion and study of its inhibition of citrus. *Journal of Dispersion Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/01932691.2024.2397367>. 2024.
 18. Marrelli, M., Conforti, P., Araniti, F., & Statti, G. A. Effects of saponins on lipid metabolism: A review of potential health benefits in the treatment of obesity. *Molecules*, 21(10), 1404. <https://doi.org/10.3390/molecules21101404>. 2009.
 19. Ramses, S. S. H., & Abdou, R. A. Effect of some fungicides and mulberry total saponin extract on fungal and bacterial diseases. *Egyptian Journal of Agricultural Research*. 2009.
 20. Ukpabi, U. H., & Ukpabi, U. J. Potential of seeds of *Napoleona imperialis* as a source of hemolytic saponin and feed ingredients. *Livestock Research for Rural Development*, 15(12), 103–112. 2003.
 21. De Tommasi, N., Conti, C., Stein, M. L., & Pizza, C. Structure and in vitro antiviral activity of triterpenoid saponins from *Calendula arvensis*. *Planta Medica*. <https://doi.org/10.1055/s-2006-960084>. 1991.
 22. Latha, P., Reddy, I. R. M., Vijaya, T., Rao, S. D., Ismail, S. M., & Girisha, B. P. Effect of saponin-rich extract of *Achyranthes aspera* on high-fat diet fed male Wistar rats. *Journal of Pharmacy Research*, 4(9), 3190–3193. 2011.
 23. Aysun, H., Takci, M., Turkmen, F. U., & Sari, M. Effect of cedar (*Cedrus libani* A. Rich) tar on bacterial growth. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9(4), 805–808. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.9.4.805-808>. 2019.
 24. Lotfi, M., Ghanei Alvar, M., & Haidarizadeh, M. Evaluation of chemical compounds, antibacterial and allelopathic properties of cedar leaf extract (*Cupressus arizonica*). *Iranian Journal of Biology*. 2018.
 25. Eller, F. J., & Taylor, S. L. Pressurized fluids for extraction of cedarwood oil from *Juniperus virginiana*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/jf030783i>. 2004.
 26. Loto, R. T., Olukeye, T., & Okorie, E. Synergistic combination effect of clove essential oil extract with basil and atlas cedar oil on the corrosion inhibition of low carbon steel. *South African Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.08.001>. 2019.