

Evaluation of the effect of water and sodium chloride solution on the adsorption of asphaltene dispersed in toluene on dolomite in presence of bacterial products

Hamed Hosseini¹, Reza Zabihi², Mahin Schaffie³, Mohammad Ranjbar⁴

1. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: hhosseini399@yahoo.com
2. Corresponding author, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: zabihi@uk.ac.ir
3. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: m.schaffie@uk.ac.ir
4. Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: m.ranjbar@uk.ac.ir

Article Info

Article type: research paper

Article history:

Received 23 July 2025

Received in revised form 16 August 2025

Accepted 14 September 2024

Published online 21 December 2025

Keywords:

Asphaltene adsorption
Bacterial products
Dolomite
Sodium chloride
Water presence

ABSTRACT

Objective: The main objective of this study is to investigate the effect of water and sodium chloride as the most common salt on the asphaltene adsorption on dolomite in the presence of products of *Bacillus subtilis*.

Materials and methods: Asphaltene was first extracted, and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and elemental analyses of asphaltene were performed. Micro-dolomite was prepared, and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) analysis was performed. *Bacillus subtilis* bacterium had grown in the dolomite presence, and FTIR analysis of dolomite was evaluated before, and after bacterial products. Then, a toluene solution containing asphaltene and water solutions containing sodium chloride were prepared at concentrations of 1000 to 40000 mg/L, and the asphaltene adsorption was investigated in presence of 20 and 50%v NaCl solution and in presence of bacterial products.

Results: In two phase system (dolomite and toluene containing asphaltene), the presence of bacterial products resulted in decreasing asphaltene adsorption from 28 to 19.4%w. The presence of deionized water in a system, including toluene containing asphaltene and dolomite without bacterial products, reduced the asphaltene adsorption, and the asphaltene adsorption decreased from 28%w to 10.7%w in the presence of 20%v, and to 7.1%w in the presence of 50%v deionized water. In three phase system, including dolomite with bacterial products, deionized water increased asphaltene adsorption. With increasing NaCl concentration from 1000 to 3000 mg/L, the asphaltene adsorption decreased, however, with further increasing NaCl concentration from 3000 to 40000 mg/L, the asphaltene adsorption increased. The simultaneous presence of NaCl solution and bacterial products had a significant effect on reducing the performance of bacterial products in the adsorption of asphaltene on dolomite rock.

Conclusions: Bacterial products in deionized water increases the adsorption of asphaltene, however, the presence of sodium chloride greatly reduces the effect of bacterial products on the adsorption of asphaltene.

Citation: Hosseini, Zabihi, Schaffie, Ranjbar (2025). Evaluation of the effect of water and sodium chloride solution on the adsorption of asphaltene dispersed in toluene on dolomite in presence of bacterial products, Journal of Separation Science and Engineering, 16 (1), 17-33. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5050>



ارزیابی تاثیر آب و محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین محلول در تولوئن روی دولومیت در حضور محصولات باکتری

حامد حسینی^۱، رضا ذبیحی^۲، مهین شفیعی^۳، محمد رنجبر^۴

۱. گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: hhosseini399@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: zabihi@uk.ac.ir
۳. گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: m.schaffie@uk.ac.ir
۴. گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: m.ranjbar@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: علمی پژوهشی

چکیده

هدف: هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر آب و سدیم کلراید بعنوان متداولترین نمک بر جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری باسیلوس سابتیلیس است.

مواد و روش: ابتدا آسفالتین استخراج گردید و آنالیزهای طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) و آنالیز عنصری آسفالتین انجام شد. میکرو دولومیت تهیه شد و آنالیز طیف سنجی فلورانس اشعه ایکس (XRF) آن انجام گردید. باکتری باسیلوس سابتیلیس در حضور دولومیت رشد داده شد و آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ دولومیت قبل و بعد از تولید محصولات باکتری بررسی شد. سپس محلول تولوئن حاوی آسفالتین و محلول آب حاوی نمک سدیم کلراید در غلظت‌های ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ mg/L آماده شد و میزان جذب آسفالتین در حضور ۲۰ و ۵۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید در حضور محصولات باکتری مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: در سیستم دو فازی (دولومیت و تولوئن حاوی آسفالتین)، حضور محصولات باکتری سبب کاهش جذب آسفالتین از ۲۸ درصد به ۱۹/۴ درصد جرمی گردید. حضور آب بدون یون (آب دیونیزه) در سیستم شامل تولوئن حاوی آسفالتین و دولومیت بدون باکتری موجب کاهش جذب آسفالتین گردید و میزان جذب آسفالتین از مقدار ۲۸ درصد به مقدار ۱۰/۷ درصد جرمی در حضور ۲۰ درصد حجمی آب و به ۷/۱ درصد جرمی در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه کاهش یافت. در سیستم سه فازی شامل دولومیت حاوی محصولات باکتری، حضور آب دیونیزه موجب افزایش جذب آسفالتین شد. با افزایش غلظت نمک سدیم کلراید از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ mg/L میزان جذب آسفالتین کاهش یافت اما با افزایش بیشتر غلظت نمک از ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ mg/L میزان جذب آسفالتین افزایش پیدا کرد. حضور همزمان محلول سدیم کلراید و محصولات باکتری تاثیر بسیار زیادی بر کاهش عملکرد محصولات باکتری در جذب آسفالتین روی سنگ دولومیت داشت.

نتیجه‌گیری: محصولات باکتری در آب بدون یون موجب افزایش جذب آسفالتین می‌شود اما حضور سدیم کلراید تاثیر محصولات باکتری در جذب آسفالتین را به شدت کاهش می‌دهد.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

دریافت فایل اصلاح شده نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

کلمات کلیدی:

جذب سطحی آسفالتین
محصولات باکتری
دولومیت
سدیم کلراید
حضور آب

استناد: حسینی، ذبیحی، شفیعی، رنجبر (۱۴۰۴). ارزیابی تاثیر آب و محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین محلول در تولوئن روی دولومیت در

حضور محصولات باکتری. نشریه علوم و مهندسی جداسازی، (۲) ۱۷، ۳۳-۱۷. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5050>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان

۱-مقدمه

با افزایش بهره‌برداری از مخازن نفتی سبک این مخازن به پایان عمر خود نزدیک می‌شوند و نیاز به اکتشاف و تولید از مخازن نفت سنگین و فوق سنگین ضروری است. تولید از این مخازن مشکلات زیادی را در پی دارد، از جمله این مشکلات رسوب آسفالتین است. آسفالتین‌ها دارای ساختار پیچیده‌ای هستند که تمایل به تجمع در محلول و رسوب بر روی سطوح دارند [1]. سطوح سنگ در مخازن هیدروکربنی به‌عنوان محیط‌های مهم تعامل نفت و آب شناخته می‌شوند. تحولاتی که در ویژگی‌های سطحی این سنگ‌ها رخ می‌دهد، می‌تواند تأثیر بسزایی بر تراوایی سیالات در این مخازن داشته باشد. یکی از عوامل مهم در تغییر ویژگی‌های سطحی سنگ‌ها، تأثیر آسفالتین موجود در نفت است. آسفالتین‌ها به‌عنوان گروهی از ترکیبات کلوئیدی می‌باشند که ساختاری پیچیده دارند. این ترکیبات به دلیل حضور اجزای پلی‌آروماتیک و عدم حلالیت در محیط‌های آبی، نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های سطحی سنگ مخزن دارند [2]. آسفالتین‌ها ترکیباتی با وزن مولکولی نسبتاً بالا هستند که در حلال‌های آروماتیک مانند بنزن و تولوئن بصورت پراکنده هستند و در حلال‌های پارافینی رسوب می‌کنند. تغییرات ترشوندگی، کاهش نفوذپذیری سنگ‌های مخزن و کاهش تولید نفت ممکن است در نتیجه جذب آسفالتین و رسوب بر روی سطوح سنگ‌های مخزن نفت رخ دهد [3]. تزریق آب با یون‌ها و غلظت‌های مختلف می‌تواند سبب تغییر کشش سطحی، ترشوندگی سنگ مخزن، و بهبود بازیافت نفت شود [4]. برهمکنش بین ترکیبات فعال در آب تزریق شده و ترکیبات موجود در نفت خام می‌تواند بر ترشوندگی مخزن اثر بگذارد و در نتیجه بازیافت نفت را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین نوع مکانیزم درگیر در تعامل بین سنگ، آب‌نمک و نفت، مانند مکانیزم تبادل یونی، در تزریق هوشمند آب مورد توجه قرار می‌گیرد [5].

در زمینه تضمین جریان و بازیافت نفت، مطالعاتی که به بررسی جذب آسفالتین بر روی سطوح سنگ و تغییرات ترشوندگی آن می‌پردازند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. خرم‌علی و همکاران (۲۰۱۸) میزان جذب آسفالتین بر روی نمونه‌های سنگ کربنات و ماسه سنگ در غلظت‌های اولیه مختلف آسفالتین در نفت را بررسی کردند. آنها به‌طور تجربی نشان دادند که افزایش غلظت اولیه آسفالتین باعث افزایش جذب روی سنگ‌های ماسه سنگ و کربنات شده و حضور بازدارنده‌های آسفالتین میزان جذب آسفالتین را کاهش می‌دهد [6]. همکاران (۲۰۱۸) آزمایش‌هایی طراحی شده برای مجموعه خاصی از شوری آب، غلظت آسفالتین، محتوای رس و ترکیب سیالات تزریق شده انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که شوری آب به‌عنوان یک نیروی مقاومتی می‌تواند در برابر رسوب عمل کند [7]. منجری و همکاران (۲۰۱۹) جذب آسفالتین بر روی یک محیط متخلخل حاوی کلاسیت را در حضور فیلم آب شور بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که وجود یک فیلم آب شور، نوعی مانع مکانیکی بین سطح جاذب و آسفالتین‌ها ایجاد می‌کند و منجر به کاهش قابل‌توجه جذب آسفالتین می‌شود [8]. محمدی و همکاران (۲۰۲۱) اثر جذب آسفالتین‌های جدا شده از دو نمونه نفت خام را در میدان‌های نفتی ایران بر روی کانی‌های دولومیت، کوارتز و مگنتیت در سیستم‌های دو فاز و سه فاز در دو حالت جریان استاتیکی و دینامیکی بررسی و نتیجه گرفتند برای جریان استاتیک، جذب در یک سیستم دو فازی می‌تواند تا ۹۰ درصد بیشتر از سیستم سه فازی باشد [9]. برادری و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه اثر غلظت یون‌های تأثیرگذار آب دریا بر ترشوندگی سنگ دولومیت به این نتیجه رسیدند که، افزایش غلظت سولفات در آب‌نمک هوشمند باعث تغییر در ترشوندگی سنگ دولومیت می‌شود. علاوه بر این، آب‌نمک هوشمند بدون یون کلسیم نیز عملکرد بهتری

نسبت به آب نمک هوشمند با یون کلسیم روی ترشوندگی سنگ دولومیت نشان می‌دهد [10]. انصاری و همکاران (۲۰۲۲) با انجام یکسری آزمایش‌ها در دو حالت استاتیک و دینامیک، به بررسی اثر آسفالتین بر دولومیت و نقش ترکیبات عنصری در جذب آسفالتین پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که مهمترین پارامترهایی که بر جذب آسفالتین روی دولومیت به‌عنوان جاذب تأثیر می‌گذارد، حضور نیتروژن و گوگرد و همچنین آروماتیک بودن آسفالتین است [11]. طاهری شکیب و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی تأثیر ۴ نوع آسفالتین مختلف روی سنگ کربناته کلاسیت دریافتند که، ویژگی‌های سطحی کلاسیت تحت تأثیر مستقیم ساختار آسفالتین قرار می‌گیرد و تغییرات الکترواستاتیکی و پیوند هیدروژنی ناشی از ویژگی‌های زیستی آسفالتین‌ها، خواص سطحی جاذب کلاسیت را تغییر می‌دهند که می‌تواند باعث تغییر ویژگی‌های سطحی، تراوایی نسبی و زاویه تماس شود. همچنین آنها دریافتند که این تأثیرات تا حد زیادی به نوع و توالی زنجیره‌های هیدروکربنی و تعاملات الکترونی در ساختار آسفالتین‌ها بستگی دارد [2]. لی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر نوع و غلظت نمک بر بازیافت نفت در مخازن کربناته با استفاده از تزریق هوشمند آب پرداختند. آنها برای بررسی تعامل بین نفت، آب نمک و سنگ اندازه‌گیری‌های تجربی انجام دادند، نتایج نشان داد که وجود نمک‌های آلی در آب تزریق شده، خواص سیال و سطح سنگ را تغییر می‌دهد و نیروهای موینگی و راندمان جاروب زنی را افزایش می‌دهد [12].

مطالعات مختلفی به منظور بررسی اثر حضور نمک‌های محلول در آب بر جذب آسفالتین روی سنگ مخزن انجام شده است اما اطلاعات در خصوص تأثیر محصولات باکتری بر جذب آسفالتین در حضور محلول سدیم کلراید محدود است. با توجه به اینکه اغلب مخازن نفتی ایران از جنس دولومیت می‌باشد، ارزیابی فرایند جذب آسفالتین در حضور آب با نمک سدیم کلراید به منظور ازدیاد برداشت نفت با استفاده از محصولات باکتری در مخازن دولومیتی می‌تواند مفید شود. لذا در این پژوهش تأثیر محصولات باکتری باسیلوس سابتیلیس بر میزان جذب آسفالتین در حالت بدون حضور آب، و آب حاوی نمک سدیم کلراید ارزیابی شد. لذا فرضیه اصلی این پژوهش این است که محصولات باکتری، آب دیونیزه و نمک سدیم کلراید بر جذب آسفالتین روی سطح دولومیت موثر هستند و متغیرهایی مانند حضور محصولات باکتری، درصد حجمی آب، غلظت سدیم کلراید بعنوان متغیرهای مستقل و جذب آسفالتین بعنوان متغیر وابسته می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نمک سدیم کلراید (شرکت کیان کاوه آزما) با خلوص آزمایشگاهی استفاده شد. از سنگ دولومیت به‌عنوان جاذب استفاده شده است. ابتدا نمونه دولومیت آسیاب شده و با آب دیونیزه شستشو گردید. سپس نمونه شسته شده به‌صورت ذرات مش‌های مختلف دانه‌بندی شد. پس از مش‌بندی، مقادیر یکسانی از مش‌های ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ با هم مخلوط شدند که به‌صورت جاذب میکرو دولومیت شناخته می‌شود. از آنالیز طیف‌سنجی فلورانس اشعه ایکس (XRF) برای تعیین درصد ترکیبات و مشخص نمودن نوع ترکیب دولومیت استفاده شد و نتایج آن در جدول ۱ گزارش شده است. با توجه به جدول ۱ نمونه دارای ۲۹/۵۵ درصد کلسیم اکسید و ۲۱/۴۴ درصد منیزیم اکسید است که بیانگر دولومیتی بودن نمونه است. لازم به ذکر است که میزان ۴۶/۸ درصد نمونه در احتراق از بین رفته^۱ (LOI) است.

¹ Loss in ignition

جدول ۱: آنالیز XRF سنگ دولومیت

Table 1: XRF analysis of dolomite rock

MnO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	BaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب Component
0.01	21.44	0.05	0.4	29.55	0.01	0.32	1.34	درصد Percent
Zn	Pb	Cu	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	ترکیب Component
<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	<0.05	0.02	<0.01	درصد Percent

آسفالتین مورد استفاده در این پژوهش از نفت آزادگان استخراج شد. جهت جداسازی آسفالتین از نمونه نفت، از روش استاندارد ASTM D'2007-80 استفاده گردید [13]. در این روش از نرمال پنتان تهیه شده از شرکت کیان کاوه آزما با خلوص ۹۹ درصد به عنوان راسب استفاده شد. ابتدا نفت خام به نسبت ۱ به ۴۰ در نرمال پنتان به مدت ۲۴ ساعت مخلوط شده و سپس آسفالتین با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ از مالتن جداسازی شد. برای مشخص کردن پیوندهای آسفالتین مورد استفاده نیز از آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه فرورسرخ^۲ (FTIR) استفاده گردید. بعلاوه جهت عناصر تشکیل دهنده آسفالتین، آنالیز عنصری آسفالتین انجام شد. پس از جداسازی آسفالتین برای ساخت محلول تولوئن حاوی آسفالتین با غلظت دلخواه از حلال تولوئن ساخت شرکت کیان کاوه آزما با خلوص بالا استفاده شد. در ابتدا غلظت ۱۰۰۰ mg/L محلول آسفالتین حاوی تولوئن ساخته شد و سپس با رقیق سازی، غلظت‌های مورد نیاز به دست آمد.

به منظور اندازه گیری میزان جذب آسفالتین، ابتدا غلظت‌های مختلف آسفالتین در تولوئن تهیه شده و میزان جذب آنها در طول موج ۴۱۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis اندازه گیری و معادله نمودار (خط) استخراج شد. از این نمودار جهت تعیین غلظت آسفالتین بعد از فرایند جذب استفاده شد.

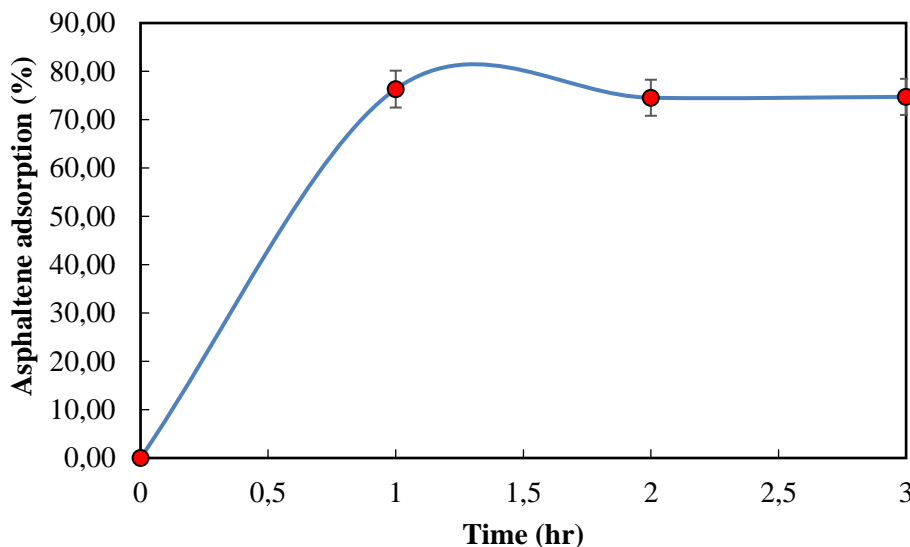
برای بررسی اثر محصولات باکتری در جذب آسفالتین از باکتری باسیلوس سابتیلیس استفاده شد. باکتری باسیلوس سابتیلیس که یک باکتری تولیدکننده بیوسورفکتانت سورفکتین است از مرکز کلسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران^۳ (PTCC) وابسته به سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران خریداری شد و محیط کشت براساس شیوه ارائه شده در مرجع [14] تهیه گردید. سپس دولومیت با نسبت ۱ به ۱۰ به محیط کشت باکتری اضافه شد و باکتری تلقیح گردید. ظرف حاوی دولومیت، محیط کشت و باکتری به مدت ۱۴۴ ساعت در شیکرانکوباتور با دور ۱۵۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. نهایتاً دولومیت حاوی محصولات باکتری با کاغذ واتمن ۴۲ از محیط کشت جداسازی شد و در دمای اتاق خشک گردید. از این نمونه جهت تاثیر محصولات باکتری بر جذب آسفالتین استفاده گردید. لازم به ذکر است به منظور تعیین گروه‌های عاملی محصولات باکتری آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه فرورسرخ برای دولومیت در غیاب و حضور محصولات باکتری انجام شد.

² Fourier Transform Infrared Spectrometer³ Persian Type Culture Collection

در مرحله اول میزان جذب آسفالتین از محلول تولوئن روی دولومیت بدون حضور آب در غیاب و در حضور محصولات باکتری بررسی شد. بدین منظور، ۱ گرم دولومیت به ۱۰ میلی لیتر تولوئن با غلظت اولیه آسفالتین ۱۰۰ mg/L اضافه شد و به مدت ۳ ساعت با ۳۰۰ دور بر دقیقه درون شیکر در دمای اتاق قرار گرفت. لازم به ذکر است جهت اطمینان از پایان جذب آسفالتین توسط دولومیت و تعادل جذب، میزان جذب بر حسب زمان بررسی شد و نتایج در شکل ۱ نشان می‌دهد که بعد از ۲ ساعت جذب به تعادل می‌رسد که با نتایج پژوهش قبلی [15] مطابقت دارد، اما جهت اطمینان بیشتر در تمام آزمایش‌ها زمان جذب ۳ ساعت در نظر گرفته شد. پس از جداسازی محلول باقیمانده، غلظت آسفالتین بعد از فرایند جذب اندازه‌گیری گردید و در نهایت درصد جرمی آسفالتین جذب شده با رابطه (۱) به دست آمد [16].

$$\text{Asphaltene adsorption (\%)} = \frac{V(C_o - C_e)}{VC_o} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه C_o غلظت اولیه آسفالتین و C_e غلظت تعادلی آسفالتین بعد از جذب بر حسب میلی گرم بر لیتر، V حجم محلول تولوئن حاوی آسفالتین بر حسب لیتر می‌باشد. در مرحله دوم میزان جذب آسفالتین روی دولومیت در حضور درصد‌های مختلف حجمی آب دیونیزه در غیاب و در حضور محصولات باکتری با pH خنثی بررسی شد. جرم اولیه آسفالتین در همه حالت‌ها یکسان و برابر ۱ mg در نظر گرفته شد.



شکل ۱: تاثیر زمان بر جذب آسفالتین روی دولومیت

Figure 1: Effect of time on asphaltene adsorption on dolomite

در مرحله سوم اثر نمک سدیم کلراید بر میزان جذب آسفالتین بررسی گردید. بدین منظور، محلول سدیم کلراید با غلظت‌های مختلف ۴۰۰۰۰ - ۱۰۰۰ mg/L با آب دیونیزه در pH خنثی تهیه شد و در حالت‌های ۲۰ و ۵۰ درصد حجمی آب حاوی نمک سدیم کلراید (به ترتیب در حضور ۸۰ و ۵۰ درصد حجمی تولوئن حاوی آسفالتین) مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت میزان مقدار آسفالتین جذب شده توسط جاذب محاسبه گردید. در مرحله نهایی غلظت بهینه سدیم کلراید در حالت‌های قبل تعیین شد و تاثیر حضور محصولات باکتری بر جذب آسفالتین از محلول تولوئن

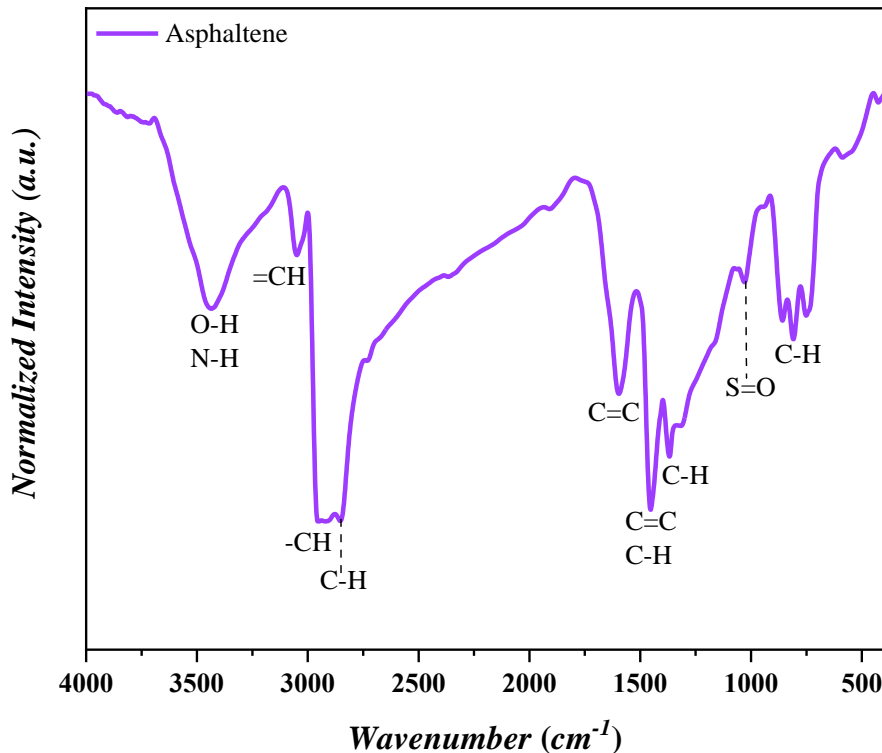
مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که تمام آزمایش‌ها حداقل سه بار تکرار شده است تا از تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود و میزان خطا روی نمودارها ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) آسفالتین

شکل ۲ آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز آسفالتین را نشان می‌دهد. پیک 3433 cm^{-1} مربوط به نوار قوی به دلیل کشش O-H و N-H است. پیک 3049 cm^{-1} یک نوار کوچک به دلیل کشش C-H در ترکیبات آروماتیک (کشش C-H یا C=C) است. پیک 2950 cm^{-1} مربوط به کشش پیوند C-H در آلکان‌ها است. پیک 2853 cm^{-1} ممکن است به دلیل کشش متقارن پیوند C-H در (CH_3) و کشش نامتقارن پیوند C-H در (CH_2) ایجاد شود. پیک 1595 cm^{-1} مربوط به کشش پیوند C=C در حلقه‌های آروماتیک است. پیک 1452 cm^{-1} ممکن است به دلیل خمش متقارن پیوند C-H در CH_2 ، خمش نامتقارن C-H در CH_3 و کشش نامتقارن پیوند C=C در حلقه‌های آروماتیک ایجاد شود. پیک 1368 cm^{-1} مربوط به خمش متقارن پیوند C-H در CH_3 است. پیک 1029 cm^{-1} مربوط به کشش پیوند S=O در سولفوکسیدها است. پیک‌های 858 cm^{-1} ، 809 cm^{-1} ، 750 cm^{-1} مربوط به خمش خارج از صفحه پیوند C-H در ترکیبات آروماتیک است [17]. انصاری و همکاران [11] (۲۰۲۲) و [18] (۲۰۲۳) آسفالتین آزادگان را به ترتیب تحت عنوان آسفالتین (A) و آسفالتین ۱ در مطالعه خود بررسی نمودند و نتایج آنها نشان داد که پیک 3430 cm^{-1} و 3548 cm^{-1} مربوط به پیوند گسترده N-H آمین و O-H هیدروکسیل آسفالتین می‌باشد. آنها پیوند C-H در CH_2 و خمش نامتقارن C-H در CH_3 را در پیک 1460 cm^{-1} و خمش متقارن پیوند C-H در CH_3 را در پیک 1376 cm^{-1} مشاهده نمودند. آنها بیان کردند که کشش غیرمتقارن پیوند C-H در CH_2 را در پیک 2923 cm^{-1} دیده شد. بعلاوه آنها دریافتند که خمش خارج صفحه پیوند C-H در ترکیبات آروماتیک و خمش C-H در CH_2 در آلکان‌های زنجیره مستقیم با تعداد اتم کربن ۴ یا بیشتر مربوط به پیک 724 cm^{-1} می‌باشد [11,18].

آنالیز عنصری آسفالتین نشان داد که آسفالتین حاوی $81/73$ درصد جرمی عنصر کربن، $7/9$ درصد جرمی عنصر هیدروژن، $5/47$ درصد جرمی عنصر گوگرد، $3/91$ درصد جرمی عنصر اکسیژن و $0/99$ درصد جرمی عنصر نیتروژن است. براساس این آنالیز نسبت مولی هیدروژن به کربن برابر مقدار $1/16$ می‌باشد. آنالیز عنصری نشان می‌دهد که آسفالتین حاوی مقادیر زیادی هترواتم‌های گوگرد و اکسیژن است که می‌توانند در فرایند جذب آسفالتین موثر باشند.



شکل ۲: نتیجه آنالیز FTIR مربوط به آسفالتین

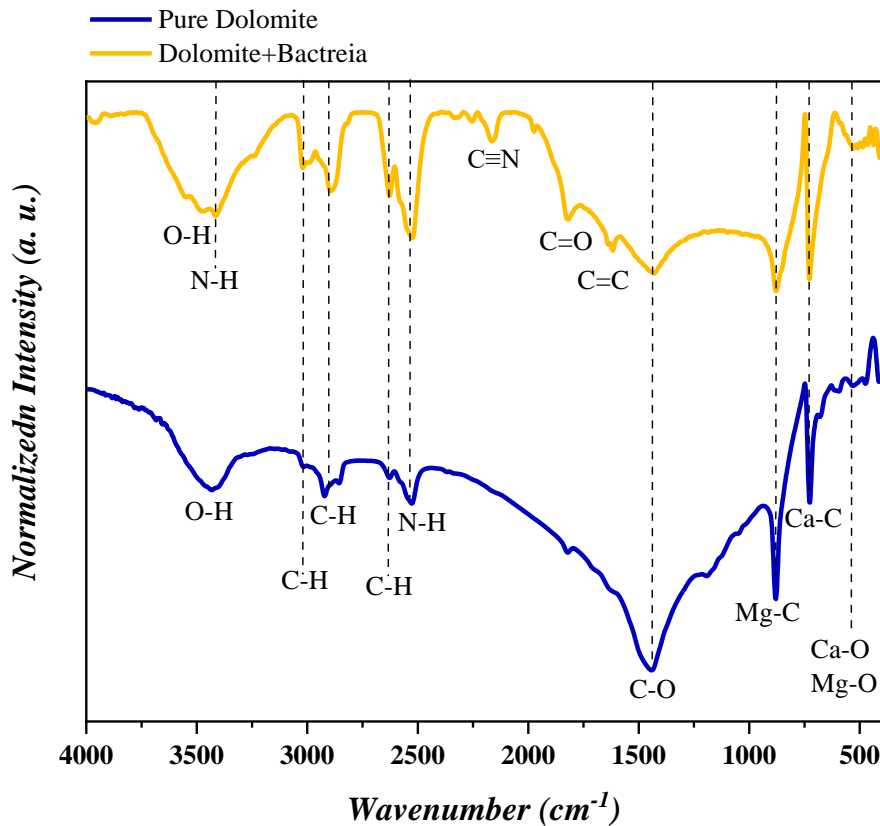
Figure 2: Result of FTIR analysis related to asphaltene

۲-۳- آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) دولومیت در غیاب و حضور محصولات باکتری

شکل ۳ مقایسه بین دولومیت بدون محصولات باکتری و دولومیت با محصولات باکتری را نشان می‌دهد. پیک گسترده 3414 cm^{-1} و 3500 cm^{-1} که در محدوده 3000 cm^{-1} تا 3700 cm^{-1} قرار دارد و نسبت به دولومیت گسترش یافته است می‌تواند به حرکات کشش O-H و N-H ارتباط داده می‌شود که ممکن است نشانگر وجود آب، پروتئین (شامل گروه‌های پپتید، آمین‌ها و آمیدها) و پلی ساکاریدها در نمونه حاوی محصولات باکتری باشد [15,19,20]. همچنین پیک 3020 cm^{-1} ممکن است به حرکات کشش =C-H از دسته‌های آروماتیک ارتباط داشته باشد. پیک 2893 cm^{-1} معمولاً به حرکات کشش C-H در آمینواسیدها ارتباط داده می‌شود. پیک 2627 cm^{-1} نشانگر N-H از نمک NH_4^+ است که این پیوند نسبت به پیوند N-H در پیک 3414 cm^{-1} مربوط به محصولات باکتری بسیار ضعیف تر می‌باشد. پیک تیز 2253 cm^{-1} ممکن است به حرکات کشش چندین پیوند، مانند $\text{C}\equiv\text{N}$ (گروه‌های سایان) ارتباط داشته باشد که بیانگر وجود ترکیبات حاوی نیتروژن ناشی از بیو محصولات باکتری^۴ بر روی سطح دولومیت است. پیک 2165 cm^{-1} ممکن است به حرکات کشش C-O یا سایانید ($\text{C}\equiv\text{N}$) ارتباط داشته باشد. لازم به ذکر است که وجود پیک در محدوده 2000 cm^{-1} تا 2300 cm^{-1} منطقه ارتعاش پیوند سه گانه نامیده می‌شود و می‌تواند شامل ترکیبات $\text{C}\equiv\text{C}$ یا $\text{C}\equiv\text{N}$ باشد [15,21]. پیک 1820 cm^{-1} معمولاً به حرکات کشش C=O در گروه‌های کربونیل، مانند آلدهید، استر یا کتون‌ها ارتباط داده می‌شود. پیک 1631 cm^{-1} مربوط به ساختارهای صفحه‌ای چین‌دار β پیوند امید I پروتئین و پیوند پپتید است که در اثر جذب بیو محصولات باکتری در طیف ظاهر شده

⁴ Bacterial bioproducts

است [19,20]. با توجه به نتایج حاصل از تست FTIR، مشخص می‌شود که این ترکیب‌ها مربوط به بیوسورفکتانت و بیومس تولیدی توسط باکتری می‌باشد.

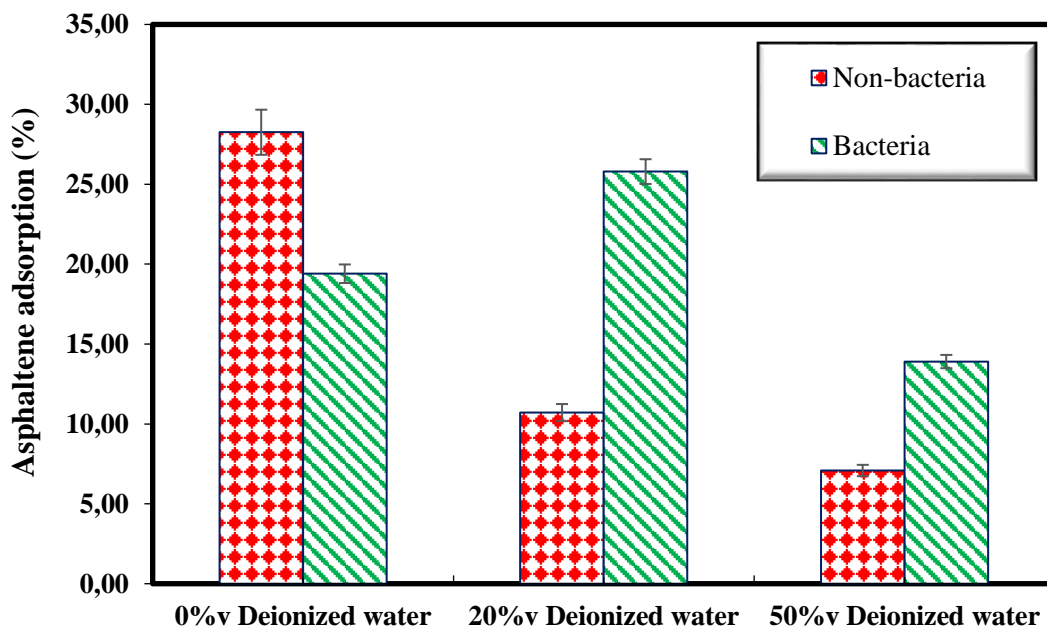


شکل ۳: مقایسه نتایج FTIR سنگ دولومیت در غیاب و در حضور محصولات باکتری
Figure 3: Comparison of FTIR results in absence and in presence of bacterial products

۳-۳- تأثیر آب دیونیزه بر جذب آسفالتین در غیاب محصولات باکتری

در این بررسی، جذب سطحی تولوئن حاوی آسفالتین در عدم حضور آب دیونیزه، حضور ۲۰ درصد حجمی و ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه انجام شد. نتایج حاصل در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در حالت عدم حضور آب و در غیاب محصولات باکتری (حالتی که فقط تولوئن و سنگ در تماس یکدیگر بودند)، میزان جذب آسفالتین ۲۸ درصد به ازای یک گرم دولومیت می‌باشد. یافته‌های قبلی نتایج مشابهی را ارائه داده‌اند و میزان بالای هترواتم‌ها در آسفالتین مانند نیتروژن و گوگرد را موجب جذب بیشتر آسفالتین به سطح دولومیت ذکر کردند [14,21-23]. در حالتی که آب دیونیزه در سیستم حضور پیدا می‌کند، آب یک فیلم روی سطح ذرات سنگ ایجاد می‌کند و مانع از جذب آسفالتین به سطح سنگ می‌شود. لذا میزان جذب آسفالتین در حالت ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه کمتر از مقدار جذب آن در حالت عدم حضور آب دیونیزه است. لذا در حالت ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه و بدون محصولات باکتری میزان جذب آسفالتین به مقدار ۱۰/۷ درصد جرمی کاهش می‌یابد. به علاوه با افزایش درصد آب دیونیزه به ۵۰ درصد حجمی، میزان جذب آسفالتین کاهش می‌یابد. لذا میزان جذب آسفالتین در غیاب محصولات باکتری از حدود ۲۸ درصد جرمی در صفر درصد حجمی آب دیونیزه به ۷/۱ درصد جرمی در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه کاهش یافته است. به عبارت دیگر در غیاب محصولات باکتری، با افزایش درصد

حجمی آب دیونیزه از ۰ به ۲۰ درصد، میزان جذب آسفالتین ۱۷/۳ درصد جرمی کاهش یافت در حالی که با افزایش درصد حجمی آب دیونیزه از ۲۰ به ۵۰ درصد، میزان جذب آسفالتین ۳/۶ درصد جرمی کاهش پیدا کرد. همچنین با توجه به اینکه حجم آب دیونیزه در حالت ۵۰ درصد حجمی بیشتر از حالت ۲۰ درصد حجمی است، فیلم آب با ضخامت بیشتری بر روی سطح سنگ قرار می‌گیرد و در نتیجه مقدار جذب آسفالتین کمتر است. واکنش بین پیوندهای هیدروژنی برای قرارگیری و جذب آسفالتین بسیار مهم است و زمانی که آب بر سطح سنگ قرار می‌گیرد، پیوند هیدروژنی بین مولکول آب و کاتیون‌های دولومیت به شدت پیوند هیدروژنی بین آسفالتین و سنگ را کاهش می‌دهد و میزان جذب آسفالتین بر سطح سنگ کم می‌شود. لازم به ذکر است که آب نمی‌تواند بطور کامل مانع جذب سطحی آسفالتین شود [18]. نتیجه مشابهی توسط محمدی و همکاران (۲۰۲۱) جهت بررسی تاثیر آب خلیج فارس بر جذب آسفالتین بر سطح سنگ حاصل گردید. نتایج آنها نشان داد با جذب آب بر سطح سنگ، میزان جذب آسفالتین کاهش می‌یابد [17].



شکل ۴: تاثیر آب دیونیزه بر جذب آسفالتین در حضور و عدم حضور محصولات باکتری

Figure 4: Effect of deionized water on asphaltene adsorption in absence and in presence of bacterial products

۳-۴- تاثیر آب دیونیزه بر جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری

شکل ۴ نشان می‌دهد که حضور محصولات باکتری موجب کاهش جذب آسفالتین از ۲۸ درصد جرمی به ۱۹/۴ درصد جرمی به ازای ۱ گرم دولومیت در عدم حضور آب دیونیزه شده است؛ اما زمانی که محصولات باکتری بر سطح دولومیت حضور دارد موجب افزایش میزان جذب آسفالتین در حالت‌های ۲۰ و ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه شده است. با توجه به اینکه در حضور محصولات باکتری و عدم حضور آب دیونیزه، محصولات باکتری می‌توانند بر سطح دولومیت باقی بمانند و مکان‌های فعال دولومیت را اشغال کنند؛ لذا مکان‌های فعال کمتری جهت جذب آسفالتین وجود دارد و میزان جذب آسفالتین کاهش پیدا می‌کند [24,25]. بعلاوه وجود گروه هیدروکسیل و کربوکسیل در ساختار اسید چرب و وجود گروه کربوکسیل و آمین در پپتید بیو سورفکتانت موجب می‌شود سورفکتین بار منفی داشته باشد و موجب جذب آنیون‌های موجود در محصولات باکتری به کلسیم موجود در دولومیت شود. در نتیجه

وجود محصولات باکتری با بار منفی مانع از جذب گروه‌های عاملی آسفالتین به سطح دولومیت می‌شود و میزان جذب آسفالتین کاهش می‌یابد [26,27]. در حضور همزمان آب دیونیزه (حالت‌های ۲۰ در صد حجمی و ۵۰ در صد حجمی آب دیونیزه) و محصولات باکتری، از یک طرف به دلیل وجود آب در محیط و انحلال بیوسورفکتانت در آب، بیوسورفکتانت در سطح مشترک آب - تولوئن حاوی آسفالتین قرار می‌گیرد و میزان کشش بین سطحی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر روی سطح دولومیت بیومس باکتری قرار دارد، لذا مقدار جذب آسفالتین در سنگ حاوی محصولات باکتری بیشتر از سنگ بدون محصولات باکتری است. همچنین در حالت ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه، حجم آب بیشتر از حالت ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه است، فیلم آب با ضخامت بیشتری بر روی سطح سنگ قرار می‌گیرد و همچنین غلظت محصولات باکتری در آب دیونیزه کاهش می‌یابد؛ در نتیجه میزان جذب آسفالتین در حالت ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه کمتر از حالت ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه است. به همین دلیل میزان جذب آسفالتین با وجود محصولات باکتری و در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه ۱۳/۹ درصد جرمی و در حضور ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه ۲۵/۸ درصد جرمی بود؛ لذا جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری با افزایش درصد حجمی آب دیونیزه از ۲۰ به ۵۰ درصد حجمی، به مقدار ۱۱/۹ درصد کاهش یافت. در این حالت هم با توجه به وجود بیومحصولات در محیط مشاهده می‌شود که مقدار جذب در حالت با باکتری بیشتر از حالت بدون باکتری است.

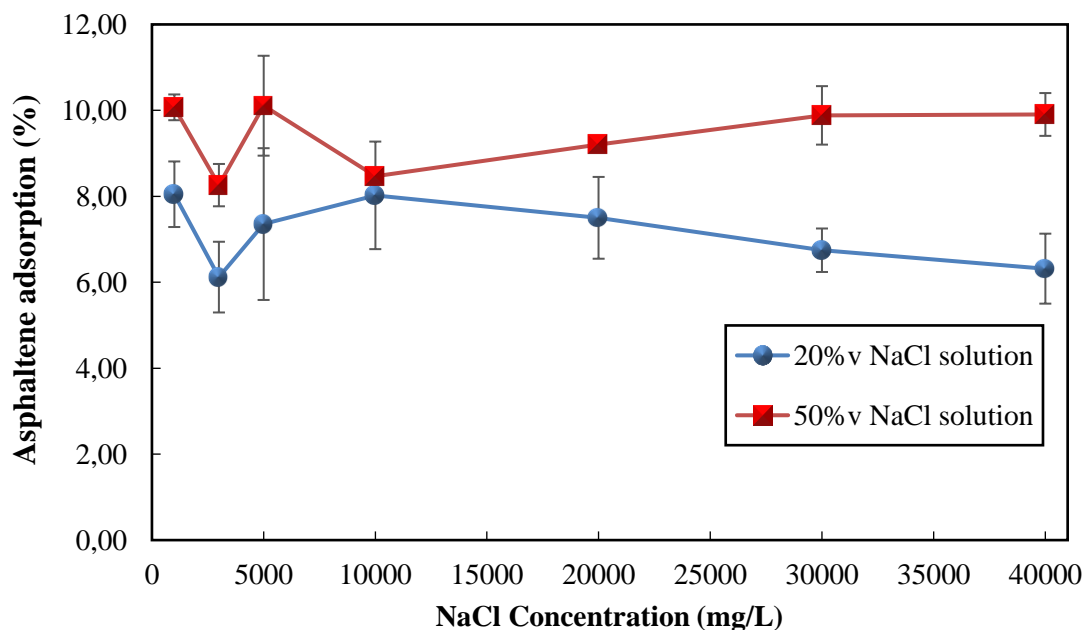
۳-۵- تأثیر غلظت محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین بدون حضور محصولات باکتری

تأثیر نمک سدیم کلراید با غلظت‌های مختلف بر جذب آسفالتین در عدم حضور محصولات باکتری مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده است. غلظت‌های ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ mg/L بیانگر آب با شوری کم و غلظت‌های ۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ mg/L بیانگر آب با شوری متوسط است. شکل ۵ نشان می‌دهد که در غلظت ۱۰۰۰ mg/L جذب زیاد بوده و سپس مقدار جذب در ۳۰۰۰ mg/L کاهش یافته است. با توجه به اینکه یون سدیم در آب دارای بار مثبت و ذرات آسفالتین دارای بار منفی هستند لذا یون سدیم در سطح مشترک آب - تولوئن حاوی آسفالتین قرار می‌گیرد، آسفالتین یونیزه شده و به سمت سطح مشترک مهاجرت می‌کند. در نهایت آسفالتین موجود در سطح مشترک، موجب کاهش کشش بین سطحی می‌شود [28,29]. در نتیجه ماده آلی (آسفالتین) در حضور یون سدیم در آب محلول‌تر می‌شود. به این مکانیزم، اثر ورود نمک^۵ گفته می‌شود. به همین دلیل با افزایش میزان سدیم کلراید از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ mg/L، میزان جذب آسفالتین توسط سنگ کاهش یافته است. با افزایش میزان سدیم کلراید، میزان قدرت یونی محیط آبی نسبت به سطح مشترک افزایش می‌یابد و تعادل ترمودینامیکی به دلیل افزایش تقاضا برای یونیزه شدن یون سدیم از بین می‌رود. در این حالت پیوند ایجاد شده بین آسفالتین و یون سدیم در سطح مشترک می‌شکند و آسفالتین به فاز تولوئن بر می‌گردد و در نتیجه جذب بیشتر آسفالتین در سطح سنگ رخ می‌دهد به این مکانیزم، اثر خروج نمک^۶ گفته می‌شود [28,30]. به همین دلیل در حالت ۵۰ درصد حجمی آب نمک با افزایش بیشتر غلظت سدیم کلراید از ۳۰۰۰ به ۴۰۰۰۰ mg/L میزان جذب آسفالتین افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در شوری کم، ضخامت لایه الکتریکی گسترش بیشتری می‌یابد و غلظت اضافی سطح در فاز آب مثبت می‌شود اما در شوری زیاد، ضخامت لایه الکتریکی بسیار نازک می‌شود که باعث غلظت

⁵ Salting-in effect

⁶ Salting-out effect

اضافی سطح آسفالتین منفی شده و در نتیجه آسفالتین از سطح مشترک خارج می‌گردد و رسوب می‌کند [4,31]. برخی پژوهشگران اثر مکانیزم ورود نمک به سطح مشترک را با استفاده از آزمایش کشش سطحی بررسی نمودند. آنها دریافتند که با افزایش غلظت سدیم کلراید از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ mg/L میزان کشش سطحی بین آب حاوی سدیم کلرید و نفت کاهش یافت و افزایش بیشتر غلظت از ۱۰۰۰۰ به ۴۰۰۰۰ mg/L موجب افزایش کشش بین سطحی شد [4]. بعلاوه بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که در حضور سدیم کلراید با ۵۰ درصد حجمی محلول، میزان جذب آسفالتین بیشتری نسبت به حضور ۲۰ درصد حجمی آب نمک رخ می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش میزان درصد حجمی آب نمک، مقدار نمک موجود در آب افزایش می‌یابد، افزایش نمک باعث می‌شود که آسفالتین از سطح تماس به توده محلول تولوئن برگردد. در همین زمان نمک نیز از سطح تماس آب و محلول تولوئن به توده آب نمک بر می‌گردد. در این حالت آسفالتین از حالت تعادلی خارج شده و در نتیجه رسوب بیشتر آسفالتین رخ می‌دهد.



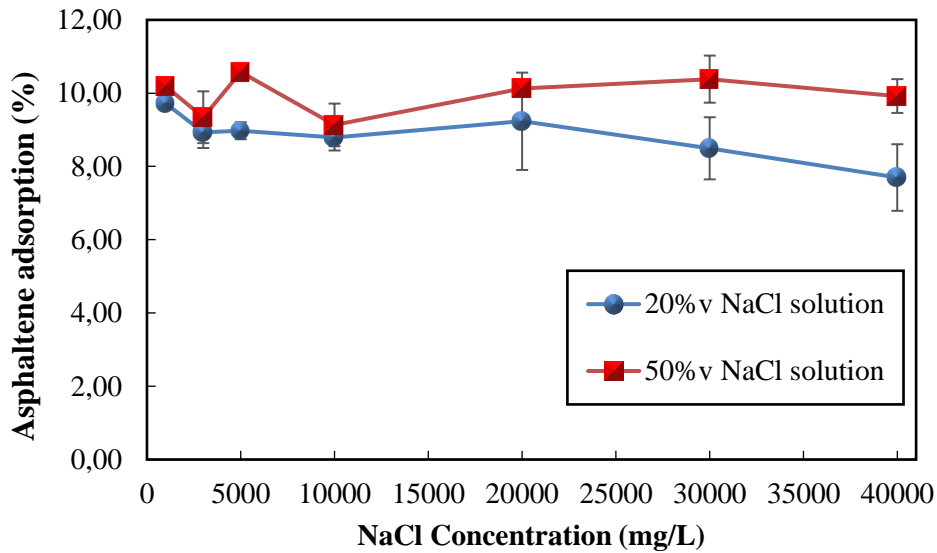
شکل ۵: تاثیر غلظت محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین در سیستم حاوی ۲۰ و ۵۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید در عدم حضور محصولات باکتری

Figure 5: Effect of various NaCl concentrations on asphaltene adsorption in system including 20 and 50 % v NaCl solutions in absence of bacterial products

۳-۶- تاثیر غلظت محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری

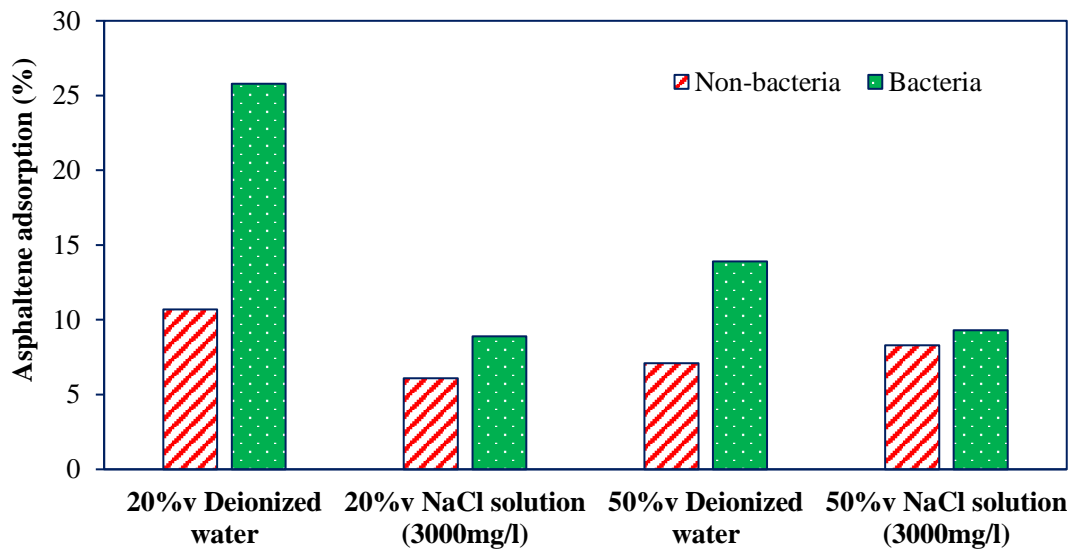
در شکل ۶ تاثیر نمک سدیم کلرید با غلظت‌های مختلف بر جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت سدیم کلراید ابتدا میزان جذب آسفالتین کاهش و با افزایش بیشتر غلظت سدیم کلراید میزان جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری افزایش می‌یابد. مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در حضور محصولات باکتری اختلاف جذب آسفالتین در حضور ۲۰ درصد حجمی و ۵۰ درصد حجمی محلول حاوی نمک بسیار نزدیکتر به یکدیگر هستند. بعلاوه در غلظت ۳۰۰۰ mg/L سدیم کلراید، کمترین میزان جذب آسفالتین در عدم حضور و حضور محصولات باکتری رخ داده است. به همین منظور غلظت ۳۰۰۰ mg/L سدیم کلراید به عنوان غلظت بهینه سدیم کلراید در نظر گرفته شد و جهت

درک بهتر تاثیر حضور محصولات باکتری شکل ۷ ارائه گردید. با توجه به شکل ۷، حضور محصولات باکتری در سیستم حاوی ۲۰ در صد حجمی و ۵۰ در صد حجمی آب حاوی 3000 mg/L سدیم کلراید موجب افزایش جذب آسفالتین نسبت به حالت عدم حضور باکتری شده است اما میزان افزایش جذب آسفالتین در حضور ۲۰ در صد حجمی محلول سدیم کلراید در حضور محصولات باکتری بیشتر از میزان افزایش جذب آسفالتین در حضور ۵۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید است. بعلاوه حضور همزمان سدیم کلرید و محصولات باکتری موجب کاهش اثر محصولات باکتری بر افزایش جذب آسفالتین شده است لذا در حضور ۲۰ در صد حجمی آب دیونیزه میزان جذب آسفالتین از $25/8$ در صدجرمی به $8/9$ در صدجرمی در حضور ۲۰ در صد حجمی آب حاوی 3000 mg/L سدیم کلراید کاهش یافت. همچنین حضور سدیم کلراید در حضور محصولات باکتری موجب شد که جذب آسفالتین در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه از مقدار $13/9$ درصدجرمی به $9/3$ درصدجرمی در محلول حاوی 3000 mg/L سدیم کلراید کاهش یابد. حضور سدیم کلراید موجب فشرده سازی دولایه الکتریکی شده و در نتیجه میزان جذب بیوسورفکتانت به سطح دولومیت افزایش می یابد [27] و بیوسورفکتانت از طریق گروه های عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل به کلسیم و منیزیم سطح دولومیت متصل می شود و رقابت بین بار منفی بیوسورفکتانت و آسفالتین موجب کاهش جذب آسفالتین در حضور سدیم کلراید می شود. بعلاوه در حضور یون سدیم، مقدار بیشتری آسفالتین با بار منفی در سطح مشترک آب و تولوئن قرار می گیرد و باعث می شود آسفالتین تمایل کمتری به جذب بر سطح دولومیت داشته باشد. برخی پژوهشگران تفسیر تاثیر همزمان بیوسورفکتانت و نمک بر کاهش کشش سطحی را پیچیده توصیف نمودند. در یک مطالعه اثر بیوسورفکتانت باکتری ژئوباسیلوس استروترموفیلوس در حضور آب با شوری کم حاوی نمک های سدیم کلراید، منیزیم کلراید و کلسیم کلراید بر کشش سطحی نفت سنتزی بررسی شد. در این مطالعه، پژوهشگران اثر کاهش کشش سطحی در حضور نمک را به یون کلر نسبت دادند و بیان کردند رفتار کشش سطحی به نوع بیوسورفکتانت، اسیدی یا بازی بودن آسفالتین، انرژی هیدراسیون کاتیون و غلظت آنیون وابسته است. آنها دریافتند در آسفالتین بازی، بار مثبت بیوسورفکتانت بر بار منفی بیوسورفکتانت غلبه می کند و نتیجه گرفتند با افزایش تعداد یون کلر، واکنش بین آسفالتین بازی و باکتری افزایش می یابد [32]. لازم به ذکر است که آنها هیچگونه ارزیابی از FTIR برای بیوسورفکتانت ارائه نمودند.



شکل ۶: تاثیر غلظت محلول سدیم کلراید بر جذب آسفالتین در سیستم حاوی ۲۰ و ۵۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید در حضور محصولات باکتری

Figure 6: Effect of various NaCl concentrations on asphaltene adsorption in system including 20 and 50 % v NaCl solutions in presence of bacterial products



شکل ۷: اثر درصد حجمی محلول سدیم کلراید و محصولات باکتری بر جذب آسفالتین (غلظت ۳۰۰۰ mg/L سدیم کلراید)

Figure 7: Effect of volumetric percentage of NaCl solution and bacterial products on asphaltene adsorption (at 3000 mg/L NaCl concentration)

۴- نتیجه گیری

- در این پژوهش اثر آب، محلول سدیم کلراید و محصولات باکتری بر جذب آسفالتین محلول در تولوئن بر سطح دولومیت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، نتایج زیر حاصل شد:
- ۱- در سیستم دو فازی شامل دولومیت و تولوئن حاوی آسفالتین، حضور محصولات باکتری موجب کاهش جذب آسفالتین روی سطح دولومیت به میزان ۳۱/۳ درصد شد.
 - ۲- حضور آب دیونیزه در سیستم حاوی دولومیت بدون محصولات باکتری و تولوئن حاوی آسفالتین، باعث کاهش جذب آسفالتین شد و با افزایش درصد حجمی آب دیونیزه، جذب آسفالتین کاهش بیشتری پیدا کرد؛ بطوریکه میزان در صدجرمی جذب آسفالتین از مقدار ۲۸/۲۵ در صفر درصد حجمی آب دیونیزه، به ۱۰/۷ در ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه و به ۷/۱ در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه کاهش یافت.
 - ۳- در سیستم سه فازی شامل دولومیت حاوی محصولات باکتری، تولوئن حاوی آسفالتین و آب دیونیزه، حضور آب دیونیزه موجب افزایش جذب آسفالتین گردید و با افزایش درصد حجمی آب دیونیزه میزان افزایش جذب آسفالتین کاهش یافت. نتایج نشان داد وجود محصولات باکتری میزان جذب را در حضور ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه از مقدار ۱۰/۷ به ۲۵/۸ در صدجرمی و در حضور ۵۰ درصد حجمی آب دیونیزه از مقدار ۷/۱ به ۱۳/۹ درصد جرمی افزایش داد.
 - ۴- با افزایش غلظت سدیم کلراید از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ mg/L در سیستم سه فازی با ۵۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید، میزان جذب آسفالتین از ۱۰/۱ به ۸/۳ در صدجرمی کاهش یافت اما با افزایش غلظت سدیم کلراید از ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ mg/L مقدار جذب آسفالتین از ۸/۳ به ۹/۹ در صدجرمی افزایش یافت.
 - ۵- حضور همزمان محلول سدیم کلراید با غلظت ۳۰۰۰ mg/L و محصولات باکتری موجب شد تا تاثیر محصولات باکتری در جذب آسفالتین بر سنگ دولومیت به شدت کاهش یابد بطوریکه میزان جذب آسفالتین با وجود محصولات باکتری از ۲۵/۸ در صدجرمی در حضور ۲۰ درصد حجمی آب دیونیزه به ۸/۹ در صدجرمی در حضور ۲۰ درصد حجمی محلول سدیم کلراید ۳۰۰۰ mg/L کاهش یافت.
- به منظور ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود که اثر باکتری بر روی دولومیت بصورت ایستا (بدون حرکت) بررسی گردد. همچنین اثر یون‌های دیگر مانند کلسیم و منیزیم، دما و pH بر جذب آسفالتین در حضور محصولات باکتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

- [1] V. Gonzalez, S.E. Taylor, Asphaltene adsorption on quartz sand in the presence of pre-adsorbed water, *J. Colloid Interface Sci.* 480 (2016) 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.07.014>
- [2] J. Taheri-Shakib, M. Rajabi-Kochi, A. Shabani, A. Esfandiarian, M.A. Karaei, H. Sangbor, Wettability alteration by surface adsorption of asphaltene molecular in carbonate porous media, *J. Mol. Liq.* 345 (2022) 118128. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118128>
- [3] M.-R. Mohammadi, S. Ansari, H. Bahmaninia, M. Ostadhassan, S. Norouzi-Apourvari, A. Hemmati-Sarapardeh, M. Schaffie, M. Ranjbar, Experimental Measurement and Equilibrium Modeling of Adsorption of Asphaltenes from Various Origins onto the Magnetite Surface under Static and Dynamic Conditions, *ACS Omega.* 6 (2021) 24256–24268. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04224>
- [4] A. Ameri, F. Esmailzadeh, D. Mowla, Effect of low-salinity water on asphaltene precipitation, *J. Dispers. Sci. Technol.* 39 (2018) 1031–1039. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1381616>
- [5] S. Bovard, M.T. Sadeghi, E. Kazemzadeh, R. Miri, Experimental study of effective compounds in a smart water injection process, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 13 (2023) 471–485. <https://doi.org/10.1007/s13202-022-01561-7>
- [6] A. Khormali, A.R. Sharifov, D.I. Torba, Experimental and modeling study of asphaltene adsorption onto the reservoir rocks, *Pet. Sci. Technol.* 36 (2018) 1482–1489. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1496116>
- [7] V. Hematfar, B. Maini, Z.J. Chen, Experimental investigation of asphaltene adsorption in porous media due to solvent injection and effects on relative permeability, *Int. J. Multiph. Flow.* 99 (2018) 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.10.005>
- [8] R. Monjezi, C. Ghotbi, T. Jafari Behbahani, P. Bakhshi, Experimental investigation of dynamic asphaltene adsorption on calcite packs: The impact of single and mixed-salt brine films, *Can. J. Chem. Eng.* 97 (2019) 2028–2038. <https://doi.org/10.1002/cjce.23441>
- [9] M.-R. Mohammadi, F. Hadavimoghaddam, M. Pourmahdi, S. Atashrouz, M.T. Munir, A. Hemmati-Sarapardeh, A.H. Mosavi, A. Mohaddespour, Modeling hydrogen solubility in hydrocarbons using extreme gradient boosting and equations of state, *Sci. Rep.* 11 (2021) 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97131-8>
- [10] A. Baradari, E. Hosseini, B. Soltani, N. Jadidi, Experimental investigation of ionic content effect on wettability alteration in smart water for enhanced oil recovery, *Pet. Sci. Technol.* 39 (2021) 288–302. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1550509>
- [11] S. Ansari, H. Bahmaninia, M.-R. Mohammadi, M. Ostadhassan, S. Norouzi-Apourvari, M. Schaffie, M. Ranjbar, A. Hemmati-Sarapardeh, On the evaluation of asphaltene adsorption onto dolomite surface: The roles of flow condition, composition of asphaltene, and dolomite size, *Alexandria Eng. J.* 61 (2022) 9411–9425. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.066>
- [12] H. Li, F. Razavirad, A. Shahrabadi, A. Binley, Effect of the Type and Concentration of Salt on Production Efficiency in Smart Water Injection into Carbonate Oil Reservoir Rocks, *ACS Omega.* 8 (2023) 30736–30746. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04888>
- [13] P.N. Wang J, Buckley J, Standard Procedure for Separating Asphaltenes from Crude Oils., 2002.
- [14] N. Aghamohammadi, M. Schaffie, M. Ranjbar, R. Zabihi, Investigating the impact of *Bacillus subtilis* bioproducts on static adsorption of asphaltene on dolomite and calcite, *Fuel.* 397 (2025) 135240. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135240>
- [15] Y. Soleimani, M.-R. Mohammadi, M. Schaffie, R. Zabihi, M. Ranjbar, An experimental study of the effects of bacteria on asphaltene adsorption and wettability alteration of dolomite and quartz, *Sci. Rep.* 13 (2023) 21497. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48680-7>
- [16] N.N. Nassar, M.E. Al-Jabari, M.M. Husein, Removal of asphaltenes from heavy oil by nickel nano and micro particle adsorbents, in: *Proc. IASTED Int. Conf. Crete, Greece, 2008.*

- [17] M.-R. Mohammadi, H. Bahmaninia, S. Ansari, A. Hemmati-Sarapardeh, S. Norouzi-Apourvari, M. Schaffie, M. Ranjbar, Evaluation of asphaltene adsorption on minerals of dolomite and sandstone formations in two and three-phase systems, *Adv. Geo-Energy Res.* 5 (2021) 39–52. <https://doi.org/10.46690/ager.2021.01.05>
- [18] S. Ansari, M.-R. Mohammadi, H. Bahmaninia, A. Hemmati-Sarapardeh, M. Schaffie, S. Norouzi-Apourvari, M. Ranjbar, Experimental measurement and modeling of asphaltene adsorption onto iron oxide and lime nanoparticles in the presence and absence of water, *Sci. Rep.* 13 (2023) 122. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27335-z>
- [19] S. Garip, F. Bozoglu, F. Severcan, Differentiation of Mesophilic and Thermophilic Bacteria with Fourier Transform Infrared Spectroscopy, *Appl. Spectrosc.* 61 (2007) 186–192. <https://doi.org/10.1366/000370207779947486>
- [20] Z. Movasaghi, S. Rehman, D.I. ur Rehman, Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Biological Tissues, *Appl. Spectrosc. Rev.* 43 (2008) 134–179. <https://doi.org/10.1080/05704920701829043>
- [21] J. Taheri-Shakib, S.A. Hosseini, E. Kazemzadeh, V. Keshavarz, M. Rajabi-Kochi, H. Naderi, Experimental and mathematical model evaluation of asphaltene fractionation based on adsorption in porous media: Dolomite reservoir rock, *Fuel.* 245 (2019) 570–585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.057>
- [22] V. Nalwaya, V. Tantayakom, P. Piumsomboon, S. Fogler, Studies on asphaltenes through analysis of polar fractions, *Ind. Eng. Chem. Res.* 38 (1999) 964–972. <https://doi.org/10.1021/ie9804428>
- [23] D. Dudášová, S. Simon, P. V Hemmingsen, J. Sjöblom, Study of asphaltenes adsorption onto different minerals and clays: Part 1. Experimental adsorption with UV depletion detection, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 317 (2008) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.09.023>
- [24] D.A. Ams, J.B. Fein, H. Dong, P.A. Maurice, Experimental measurements of the adsorption of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas mendocina* onto Fe-oxyhydroxide-coated and uncoated quartz grains, *Geomicrobiol. J.* 21 (2004) 511–519. <https://doi.org/10.1080/01490450490888172>
- [25] X. Rong, Q. Huang, X. He, H. Chen, P. Cai, W. Liang, Interaction of *Pseudomonas putida* with kaolinite and montmorillonite: a combination study by equilibrium adsorption, ITC, SEM and FTIR, *Colloids Surfaces B Biointerfaces.* 64 (2008) 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.01.008>
- [26] J. Hou, J. Du, H. Sui, L. Sun, Surfactants enhanced heavy oil–solid separation from carbonate asphalt rocks-experiment and molecular dynamic simulation, *Nanomaterials.* 11 (2021) 1835. <https://doi.org/10.3390/nano11071835>
- [27] J. Hou, S. Lin, J. Du, H. Sui, Study of the adsorption behavior of surfactants on carbonate surface by experiment and molecular dynamics simulation, *Front. Chem.* 10 (2022) 847986. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.847986>
- [28] M. Lashkarbolooki, S. Ayatollahi, M. Riazi, Effect of salinity, resin, and asphaltene on the surface properties of acidic crude oil/smart water/rock system, *Energy & Fuels.* 28 (2014) 6820–6829. <https://doi.org/10.1021/ef5015692>
- [29] F. Shojaati, S.H. Mousavi, M. Riazi, F. Torabi, M. Osat, Investigating the Effect of Salinity on the Behavior of Asphaltene Precipitation in the Presence of Emulsified Water, *Ind. Eng. Chem. Res.* 56 (2017) 14362–14368. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03331>
- [30] A. Ameri, F. Esmaeilzadeh, D. Mowla, Effect of low-salinity water on asphaltene precipitation, *J. Dispers. Sci. Technol.* (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1381616>
- [31] J. Amanabadi, S. Jamshidi, Investigation of Water Salinity Effect on Asphaltene Precipitation Using PC-SAFT EOS, *J. Gas Technol.* 7 (2022) 51–60. <https://doi.org/20.1001.1/jgt.2022.552432.1000>
- [32] A. Abdi, B. Ranjbar, Y. Kazemzadeh, F. Aram, M. Riazi, Investigating the mechanism of interfacial tension reduction through the combination of low-salinity water and bacteria, *Sci. Rep.* 14 (2024) 11408. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62255-0>