



DOI: 10.22034/ijche.2023.340508.1258

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Experimental Study of the Effect of Different Salts on the Improvement of Cationic Surfactant Performance from the Dynamic Interfacial Tension of Water and Oil

M. A. Mokhtarian<sup>1\*</sup>, N. Mokhtarian<sup>2</sup>

1- M. Sc. in Chemical Engineering, Chemical Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahreza Branch, Shahreza, Iran

2- Professor of Chemical Engineering, Chemical Department, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahreza Branch, Shahreza, Iran

Email: mokhtarian@iaush.ac.ir

### Abstract

*The purpose of this study was to investigate the effect of different salts on improving the performance of cationic surfactants in terms of the dynamic interfacial strength between the surface of water and oil. Increasing production from oil reservoirs has been a major concern for oil companies. Capillary forces inside the holes cause oil to be trapped between them and it is considered as an unproductive phase. Surfactant flooding is a technique to increase oil recovery in which the phase behavior inside the reservoir can be manipulated by injecting surfactants. The results showed the effect of divalent salts on the improvement of surfactant performance. Also, based on the experiments and previous studies, it can be concluded that the presence of salt in water reduces the interfacial tension force. In addition, divalent salts have a greater effect in reducing interfacial tension compared to monovalent salts.*

Received: 1 December 2022

Accepted: 5 April 2023

Page Number: 100-116

### Keywords:

Cationic Surfactants,  
Divalent Salts,  
Enhanced Oil Recovery,  
Interfacial Tension  
Between Water and Oil,  
Monovalent Salts

### Please Cite this Article Using:

Mokhtarian, M. A., & Mokhtarian, N. (2024). Experimental Study of the Effect of Different Salts on the Improvement of Cationic Surfactant Performance from the Dynamic Interfacial Tension of Water and Oil. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(132), 100-116, [In Persian].



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر نمک‌های متفاوت بر بهبود عملکرد سورفکتانت کاتیونی از منظر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به صورت دینامیکی

محمدعلی مختاریان<sup>۱</sup>، نادر مختاریان<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، شهرضا، ایران

۲- استاد گروه مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، شهرضا، ایران

پیام نگار: [mokhtarian@iaush.ac.ir](mailto:mokhtarian@iaush.ac.ir)

### چکیده

هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی تأثیر نمک‌های متفاوت بر بهبود عملکرد سورفکتانت کاتیونی از منظر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به صورت دینامیکی است. افزایش تولید از مخازن نفتی از دغدغه‌های بزرگ شرکت‌های نفتی است. نیروهای موئینه درون حفره‌ها، باعث به دام انداختن نفت در میان آن‌ها می‌شود و به عنوان یک فاز تولیدناپذیر تلقی می‌شود. سیلاب‌زنی سورفکتانت یک فن ازدیاد برداشت نفت است که در آن می‌توان رفتار فاز را در داخل مخزن با تزریق سورفکتانت‌ها دست‌کاری کرد. نتایج، نشان‌دهنده تأثیر نمک‌های دوظرفیتی بر بهبود عملکرد سورفکتانت بوده است. همچنین براساس آزمایش‌ها، حضور نمک در آب سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی می‌شود. علاوه بر آن نمک‌های دوظرفیتی در مقایسه با نمک‌های تک‌ظرفیتی تأثیر بیشتری در کاهش نیروی کشش بین سطحی داشته است.

### کلیدواژه‌ها:

ازدیاد برداشت نفت،  
سورفکتانت‌های کاتیونی،  
نیروی کشش بین سطحی آب و  
نفت،  
نمک‌های دوظرفیتی،  
نمک‌های تک‌ظرفیتی

\* شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

مختاریان، محمدعلی، و مختاریان، نادر. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی تأثیر نمک‌های متفاوت بر بهبود عملکرد سورفکتانت کاتیونی از منظر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به صورت دینامیکی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۲)، ۱۰۰-۱۱۶.

## ۱. مقدمه

روش‌های بهبود بازده تولید نفت شامل روش‌های ازدیاد برداشت از مخازن نفتی است [۱]. سیلاب‌زنی سورفکتانت یک فن ازدیاد برداشت نفت است که در آن می‌توان رفتار فاز را در داخل مخزن با تزریق سورفکتانت‌ها دست‌کاری کرد و شرایط مطلوبی به‌منظور تحرک نفت به‌دام‌افتاده ایجاد کرد [۲]. سامانه‌های سورفکتانت درست و صحیح طراحی شده به‌همراه نفت خام، می‌توانند در رابط بین نفت خام و آب، میکرو امولسیون ایجاد کنند، بنابراین تنش بین سطحی را به فوق‌العاده پایین (۰/۰۰۱ میلی نیوتن در متر) کاهش می‌دهند، که در نتیجه نفت باقی‌مانده را دچار حرکت می‌کند و منجر به بهبود می‌شود. با این وجود، این فناوری ازدیاد برداشت نفت به‌وسیله تعدادی از عوامل، مانند جذب سورفکتانت به سنگ مخزن هنگام تزریق و جداسازی کروماتوگرافی سورفکتانت در مخزن به چالش کشیده می‌شود [۳].

سیتپالی و همکارانش در سال ۲۰۰۴، بر روی تغییر ترشوندگی در طول فرایند سیلاب‌زنی سورفکتانت در مخازن کربناته تحقیقاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بازیابی از مخازن کربناته شکاف‌دار نفت‌دوست با فرایند سیلاب‌زنی آب دشوار خواهد بود؛ بنابراین آن‌ها از سورفکتانت‌های رقیق‌شده به‌منظور بهبود فرایند تولید در مخازن کربناته شکاف‌دار استفاده کردند. آنان در این تحقیق واکنش‌های بین محلول‌های رقیق‌شده سورفکتانت‌های یونی آلکالینی و نفت را روی سطح سنگ‌های کربناته بررسی کردند و آزمایش‌هایی را از قبیل ترشوندگی، رفتار فازی، کشش بین سطحی و جذب انجام دادند.

رستمی در سال ۲۰۱۱ بر روی ازدیاد برداشت برپایه آب در سنگ‌های آهکی با استفاده از آب‌های هوشمند<sup>۱</sup> مطالعاتی انجام داد. او ابتدا با تزریق ۹ حجم حفره از آب دریا در مغزه‌ای، ازدیاد برداشت و بازده تولیدی نفت را با حالت بدون هیچ‌گونه تزریقی مقایسه کرد. نتایج نشان داد که در مغزه مورد نظر در حالت تزریق آب دریا، بازده تولیدی حدود ۵۰ درصد افزایش یافته‌است. نیز با انجام آزمایش سیلاب‌زنی آب، توانست یون‌های خروجی از مغزه را برحسب مول بر لیتر به‌دست آورد. همان‌گونه که ذکر شده، با تزریق ۴/۵ حجم از حفره آب دریا در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس، نتیجه چنین شد که با افزایش تزریق، مقدار یون‌های منیزیم و سولفات تقریباً دارای روند

1. Smart Water

ثابتی بوده، در حالی که یون کلسیم دارای میزان افزایش ناچیزی است. نیز با انجام آزمایش‌های پتانسیل زتا، تأثیر غلظت یون‌های دوظرفیتی را بر روی پتانسیل زتا بررسی کرد و به این نتیجه رسید که با افزایش غلظت یون‌های منیزیم و کلسیم، مقدار پتانسیل زتا افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش غلظت یون سولفات، از میزان پتانسیل زتا کاسته می‌شود [۴].

تنه و همکارانش در سال ۲۰۱۸، بر روی تغییر ترشوندگی و افزایش ازدیاد برداشت با استفاده از سیلاب‌زنی آب کم‌شور در سنگ‌های کربناته تحقیقاتی انجام دادند. آنان در این تحقیق، نقش یون‌های دوظرفیتی را بر روی سازوکارهای تحت تأثیر سیلاب‌زنی آب کم‌شور بررسی کردند که این کار با انجام آزمایش‌های زاویه تماس، اندازه‌گیری کشش بین سطحی و پتانسیل زتا همراه بود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد کارهای مختلفی بر روی آب کم‌شور و سورفکتانت انجام گرفته بود؛ اما به‌وضوح به تأثیر هر نمک بر عملکرد سورفکتانت پرداخته نشده بود که در این پژوهش با انتخاب چهار نوع نمک که دو نمونه آن از نوع دوظرفیتی و دو نمونه دیگر از نوع تک‌ظرفیتی است و با انجام آزمایش‌های گوناگون در غلظت‌های متفاوت نمک‌ها و در مدت‌زمان‌های مختلف، به‌وسیله دستگاه آنالیز قطره توانستیم به نتایج بیان‌شده دست یابیم.

گفتنی است هم‌چنین که قبلاً کارهای مختلفی بر روی آب کم‌شور و سورفکتانت انجام گرفته بود؛ اما به‌وضوح به تأثیر هر نمک بر عملکرد سورفکتانت پرداخته نشده بود که در این پژوهش به‌روشنی می‌توان تأثیر نمک‌های تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی را بر عملکرد سورفکتانت کاتیونی مشاهده کرد. با توجه به کارهایی که در گذشته انجام شده بود و از آنجایی که آب کم‌شور از جمله روش‌های ازدیاد برداشت در صنعت نفت است و تزریق مواد شیمیایی سبب بهبود تولید نفت شده، تصمیم به بررسی این دو روش گرفته شد؛ اما برای درک بهتر از عملکرد آن‌ها و به‌دلیل تأثیر بالای مشخصه نیروی کشش بین سطحی آب و نفت، تصمیم به بررسی تأثیر نمک و ماده شیمیایی بر روی این مشخصه گرفته شد.

با توجه به این که آب کم‌شور به آبی با شوری کمتر از ۱۰۰۰۰ ppm اطلاق می‌شود، از همین رو، قرار بر بررسی تأثیر نمک در شوری بین ۱۰۰۰ ppm تا ۱۵۰۰۰ ppm و هم‌چنین تأثیر سورفکتانت کاتیونی بر نیروی کشش بین سطحی گرفته شد؛ اما به‌دلیل کارهای متعددی

جدول ۲. مشخصات نفت مورد استفاده در آزمایش.

Table 2. Specifications of the oil used in the test.

Specification	amount of
Saturation (Weight percent)	55.8
Aromatic (Weight percent)	34.7
resin (Weight percent)	6.7
asphaltene (Weight percent)	2.8
Density (g /m <sup>3</sup> )	0.907
Total acid number) mg of potassium oxide per gram of sample)	0.216
Viscosity at ambient temperature (centipoise)	56

استفاده می‌شود که دارای اندازه‌های متنوع است. یک موتور مغناطیسی درون دستگاه قرار دارد که در هنگامی که آهنربای درون موتور شروع به چرخش کند، مگنت درون ظرف محلول نیز حرکت آهنربا را تکرار می‌کند و این گونه، سرعت چرخش مگنت تنظیم می‌شود.

### ۲-۳ دستگاه آنالیز قطره

در این سامانه، با روش قطره آویزان، کشش بین سطحی آب و نفت اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه شامل یک دوربین است که تصویر قطره را ثبت می‌کند. شکل قطره خارج شده از سرسوزن، رابطه بین کشش بین سطحی و نیروی گرانش را نشان می‌دهد. این دستگاه محصول شرکت ازدیاد برداشت فارس (مدل VIT 6000) و قادر به اندازه‌گیری نیروی کشش بین سطحی در دماهای مختلف است. (شکل (۱) و (۲))

چنان که از شکل پیداست زمانی که محلول در محفظه قرار می‌گیرد، با تزریق نفت در آن به کمک دوربین می‌توان با نرم‌افزار موجود در کامپیوتر متصل به آن، میزان نیروی کشش بین سطحی را تعیین کرد.

روش قطره آویزان روشی است که برای محاسبه کشش بین سطحی از شعاع انحنای یک قطره استفاده می‌شود. رابطه بین کشش سطحی و هر مشخصه را می‌توان با معادله (۱) بیان کرد:

$$\gamma = \Delta\rho g d_e^2 \cdot \frac{1}{H} \quad (1)$$

که در این زمینه انجام شده‌بود، نیاز به مشخص شدن تأثیر نمک تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی بر عملکرد سورفکتانت کاتیونی بود که به صورت دینامیکی این تأثیر کاملاً روشن شود؛ بنابراین هدف اصلی و کلی در این پژوهش، تعیین تأثیر نمک‌های تک‌ظرفیتی و دوظرفیتی به صورت مجزا بر نیروی کشش بین سطحی باگذشت زمان است.

## ۲. مواد و روش آزمایش

مواد مورد استفاده را در این پژوهش می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد.

جدول ۱. مواد مورد استفاده برای انجام پژوهش.

Table 1. Materials used for research.

Name of the material	Purity percentage of the substance	Latin name of the material	Manufacturer company name
Distilled water	100%	H <sub>2</sub> O	Zolal .co
sodium chloride	98%	NaCl	Mojallali .co
Potassium chloride	98%	KCl	Mojallali .co
calcium chloride	95%	CaCl <sub>2</sub>	Mojallali .co
Magnesium chloride	95%	MgCl <sub>2</sub>	Mojallali .co
Hexadecyl trimethyl ammonium bromide	98%	HTAB	Merck .co
Benzyl trimethyl ammonium bromide	98%	BTAB	Merck .co

ماده دیگری که در آزمایش به کار رفت، نفت است که مشخصات آن را در جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد.

## ۳. تجهیزات مورد استفاده و روش آزمایش

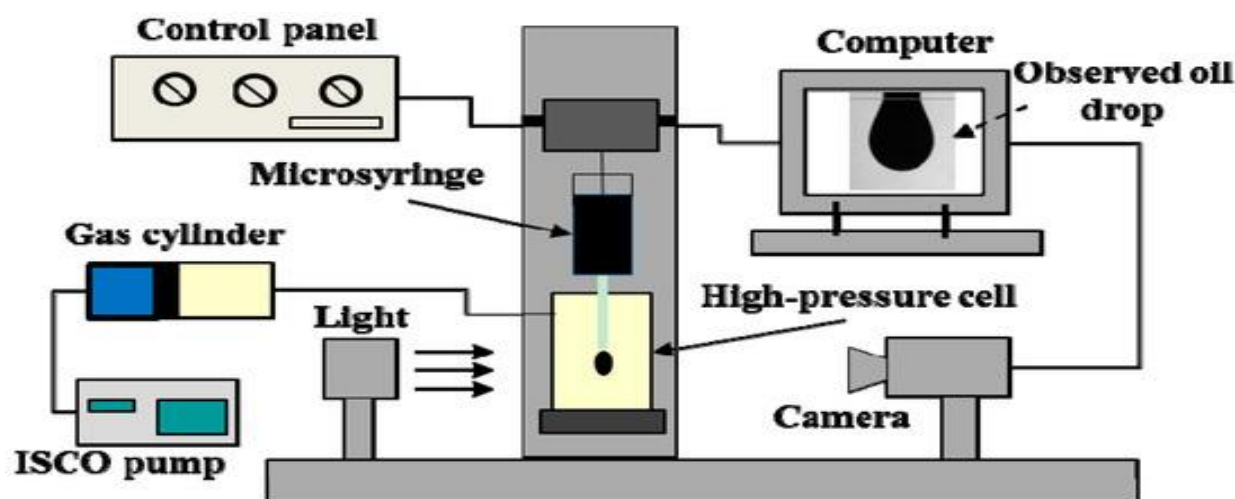
### ۳-۱ همزن مغناطیسی

همزن مغناطیسی، برای هم‌زدن، مخلوط کردن و حتی گرم کردن مایعات و محلول‌ها به کار می‌رود. همزن مغناطیسی، شامل یک مگنت است که روکشی خنثی در برابر تمامی مواد شیمیایی دارد. بسته‌به نوع مایع و حجم محلول، نوع خاصی از مگنت‌ها



شکل ۱. دستگاه آنالیز قطره.

Figure 1. Drop analysis device.



شکل ۲. طرحواره کارکرد دستگاه آنالیز قطره.

Figure 2: Schematic of the operation of the drop analysis device

و واحد آن میلی نیوتن بر متر است. باتوجه به هدف تعیین شده که بررسی تأثیر نمک و غلظت آن بر عملکرد دو نمونه سورفکتانت کاتیونی در نیروی کشش بین سطحی است، باید ابتدا نمک‌ها را به تنهایی در چند غلظت مختلف در آب مقطر، حل و میزان نیروی کشش بین سطحی آن‌ها را مشخص کرد. همچنین باید میزان نیروی کشش بین سطحی دو نمونه سورفکتانت را نیز به دست آورد و سپس به کمک بررسی ترکیب نمک و سورفکتانت در آب به مؤثر و یا غیرمؤثر بودن این ترکیب پی برد. برای تهیه محلول برای بررسی باید ابتدا به میزان مورد نظر آب مقطر در ظرفی جداگانه ریخت، از آنجایی که برای بررسی نیروی کشش بین سطحی به کمک دستگاه آنالیز قطره به حداقل ۸۰ سی سی

در رابطه بالا،  $\gamma$  کشش بین سطحی،  $\Delta\rho$  اختلاف گران روی مایعات،  $g$  شتاب جاذبه،  $d_e$  حداکثر قطر قطره و  $1/H$  ضریب تصحیح ناشی از  $d_e/d_e$  است. نیروی کشش بین سطحی در واقع بین دوفاز امتزاج‌ناپذیر رخ می‌دهد؛ زمانی که دوفاز غیر امتزاجی در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند این مشخصه مطرح می‌شود. نیروی کشش بین سطحی بر روی عدد موئینه و فشار موئینگی تأثیر بالایی دارد، چراکه این دو مشخصه در ازدیاد برداشت نفت از مخازن تأثیر مستقیم دارند؛ بنابراین تعیین نیروی کشش بین سطحی در مطالعات ازدیاد برداشت نفت لازم و ضروری است. دما و فشار و ترکیب دو فاز، تأثیر زیادی در تغییر نیروی کشش بین سطحی دارد

در ابتدا نیروی کشش بین سطحی آب مقطر و نفت، اندازه‌گیری شد که بتوان عملکرد حضور نمک در آب مقطر را به‌خوبی ملاحظه کرد. نیروی کشش بین سطحی آب مقطر و نفت با دستگاه آنالیز قطره و انجام آزمایش - که مراحل آن در روش آزمایش توضیح داده‌شد - اندازه‌گیری شد و مقدار آن ۳۵ میلی‌نیوتن بر متر به‌دست آمد، سپس به تأثیر نمک و غلظت آن بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت پرداخته شد. نتایج عبارت است از:

#### ۴-۲ تأثیر غلظت نمک بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت

با افزایش غلظت نمک‌های پتاسیم کلراید و سدیم کلراید تا غلظت ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ ppm مقدار نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در مقایسه با نیروی کشش بین سطحی آب مقطر و نفت افزایش یافته‌است. با افزایش غلظت تا میزان ۱۵۰۰۰ ppm روند نیروی کشش بین سطحی کاهش یافته‌است، اما افزایش غلظت نمک‌های کلسیم کلراید و منیزیم کلراید به‌طور پیوسته، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت را کاهش داده‌است. هم‌چنین با توجه به شکل (۳)، عملکرد منیزیم از کلسیم و سدیم و پتاسیم در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت بهتر است. هم‌چنین غلظت بهینه در نمک‌های سدیم کلراید و پتاسیم کلراید ۱۰۰۰۰ ppm بوده و در نمک‌های منیزیم کلراید و کلسیم کلراید ۵۰۰۰ ppm بوده‌است. شکل (۳) تأثیر نمک‌های منیزیم، کلراید، کلسیم کلراید، سدیم کلراید و پتاسیم کلراید را در غلظت‌های مختلف بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نشان می‌دهد.

#### ۴-۳ تأثیر زمان و غلظت نمک بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت

برای بررسی تأثیر نمک‌ها بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به‌صورت دینامیک به بررسی آن در طول زمان نیز پرداخته شد. اندازه‌گیری‌ها در بازه‌های زمانی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ دقیقه انجام شد. نتایج به‌صورت شکل (۴) است. در ابتدا به بررسی تأثیر نمک سدیم کلراید در ۵ غلظت مختلف و در ۶ بازه زمانی پرداخته شده‌است.

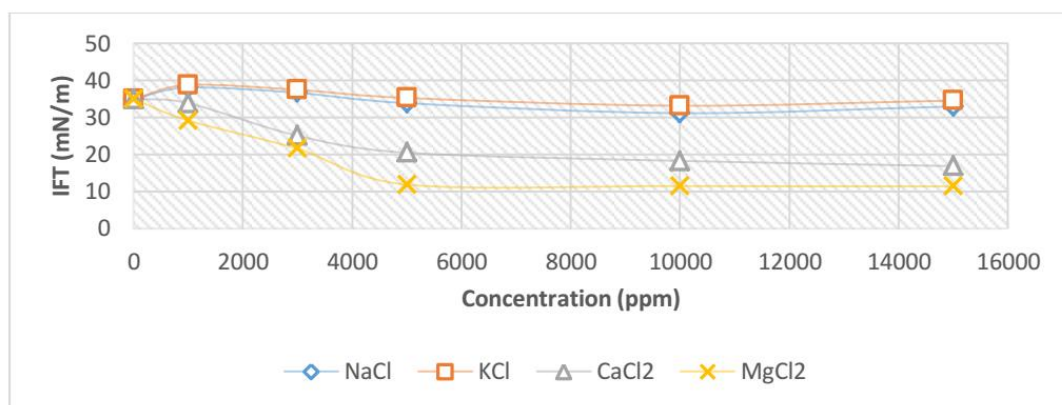
محلول نیاز است، پس ۱۰۰ سی‌سی محلول تهیه شد. سپس برای تهیه محلول شامل نمک و سورفکتانت، (باتوجه به تعریف ppm که میلی‌گرم ماده در یک لیتر است) برای محلول‌های ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ppm به‌کمک ترازو ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۱/۵ گرم از هر نمک، اندازه‌گیری و به آب مقطر اضافه می‌شود. بعد از آن ظرف بر روی همزن مغناطیسی قرار می‌گیرد و حداقل به‌مدت ۱۰ دقیقه بر روی آن می‌نشیند تا نمک به‌خوبی حل شود. به همین روش برای سورفکتانت نیز عمل می‌شود.

تعیین نیروی کشش بین سطحی به‌کمک دستگاه آنالیز قطره انجام گرفته‌است و همان‌طور که بیان شد این دستگاه متصل به یک رایانه بوده که به‌طور هم‌زمان در طول آزمایش، مقدار نیروی کشش بین سطحی را اندازه می‌گیرد و به نمایش می‌گذارد. برای این کار باید محلول تهیه‌شده از نمک و سورفکتانت نیز در محفظه مشخص قرار داد، سپس نفت را نیز درون سرنگ متصل به دستگاه ریخت تا به‌کمک شیرهای متصل به دستگاه، نفت به‌درون محلول تزریق شود و به‌کمک رایانه در هر لحظه، مقدار نیروی کشش بین سطحی اندازه‌گیری شود. از آنجایی که این آزمایش‌ها به‌صورت دینامیک بررسی شده‌اند، به همین روی در زمان‌های اولیه و ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش و تزریق نفت، داده‌ها، یادداشت شده و برای دقت در کار از روش تکرارپذیری نیز بهره گرفته و هر آزمایش حداقل سه بار بررسی شده‌است. باتوجه به دقت بالای آزمایش‌ها و درصد بسیار پایین خطا، مقادیر بیان شده میانگینی از تمام آزمایش‌های انجام‌گرفته برای هر نمونه است.

#### ۴. نتایج و بحث

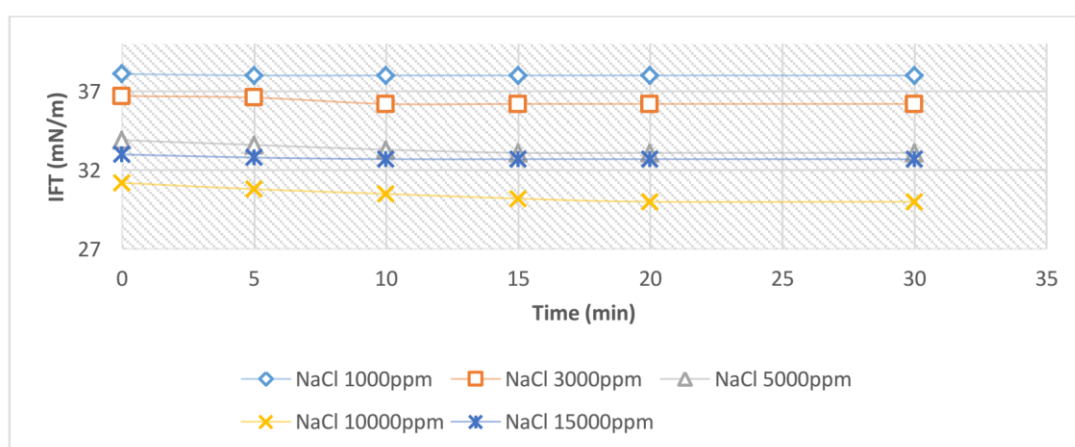
##### ۴-۱ تأثیر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در ازدیاد برداشت

باتوجه به مطالب ذکرشده، مشخص شد که به‌دلیل باقی‌ماندن حجم زیادی از نفت در مخزن بعد از تولید اولیه و ثانویه، نیاز به روش‌های ازدیاد برداشت برای تولید نفت باقی‌مانده در مخزن است. از جمله مشخصه‌های مهم و مؤثر در بررسی‌های ازدیاد برداشت نفت و هم‌چنین رفتار نفت در مواجهه با آب تزریقی در مخزن، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت است.



شکل ۳. تأثیر غلظت نمک بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت.

Figure 3. The effect of salt concentration on the interfacial tension between water and oil.



شکل ۴. تغییر دینامیکی نیروی کشش بین سطحی آب و نمک سدیم کلراید/نفت.

Figure 4. Dynamic change of the tension force between the surface of water and sodium chloride salt/oil.

شکل (۵) تأثیر دینامیکی نمک پتاسیم کلراید را بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در غلظت‌های مختلف پتاسیم کلراید نشان می‌دهد.

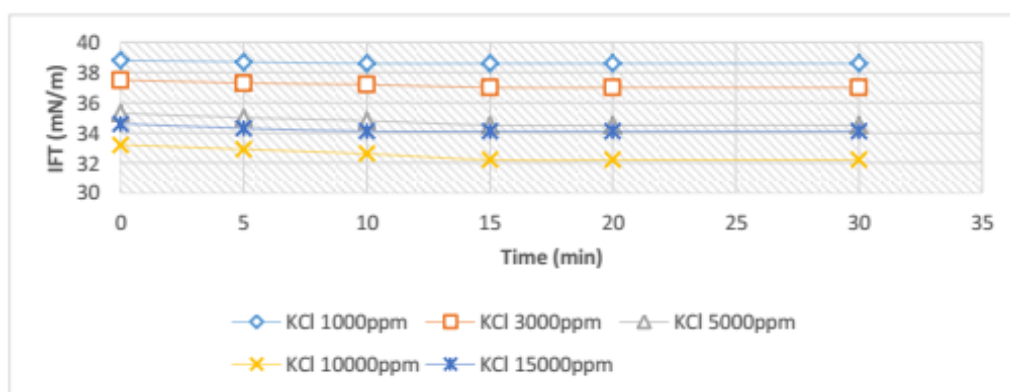
باتوجه به شکل (۵) همانند نمک سدیم کلراید، نمک پتاسیم کلراید نیز در غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ppm تغییر ناچیزی در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت با گذشت زمان رخ داده است؛ اما در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm با گذشت زمان نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کم شده است. این روند کاهش تا زمان ۲۰ دقیقه بوده است؛ بنابراین می‌توان گفت که زمان پایداری نمک سدیم کلراید در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت ۲۰ دقیقه است و تأثیر نمک‌های تک‌ظرفیتی بر تغییر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت اندک بوده، به همین به‌منظور به بررسی تأثیر نمک‌های

نمک سدیم کلراید در غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ تغییر ناچیزی در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت با گذشت زمان رخ داده است؛ اما در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm با گذشت زمان نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کاهش یافته است. این روند کاهش تا زمان ۲۰ دقیقه بوده و بعد از آن تغییری ملاحظه نشده است؛ بنابراین می‌توان گفت که زمان پایداری نمک سدیم کلراید در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت ۲۰ دقیقه است. شکل (۵) تغییر دینامیکی نیروی کشش بین سطحی آب و نمک سدیم کلراید را با نفت در غلظت‌های مختلف نمک NaCl نشان می‌دهد. هم‌چنین تأثیر نمک پتاسیم کلراید بر تغییر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در ۵ غلظت مختلف محلول آب و نمک پتاسیم کلراید در ۶ بازه زمانی بررسی شد.

بین سطحی آب و نفت داشته، به طوری که در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm کاهش ۵۰ درصدی نیروی کشش بین سطحی را در پی داشته‌است؛ اما گذر زمان و در واقع بررسی دینامیکی نشان‌دهنده نداشتن تغییر قابل توجه به مرور زمان بوده‌است. بعد از بررسی تأثیر نمک کلسیم کلراید، به بررسی نمک دوظرفیتی دیگر یعنی منیزیم کلراید پرداخته شد. شکل (۷) تأثیر دینامیکی نمک منیزیم کلراید را در غلظت‌های مختلف بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نشان می‌دهد.

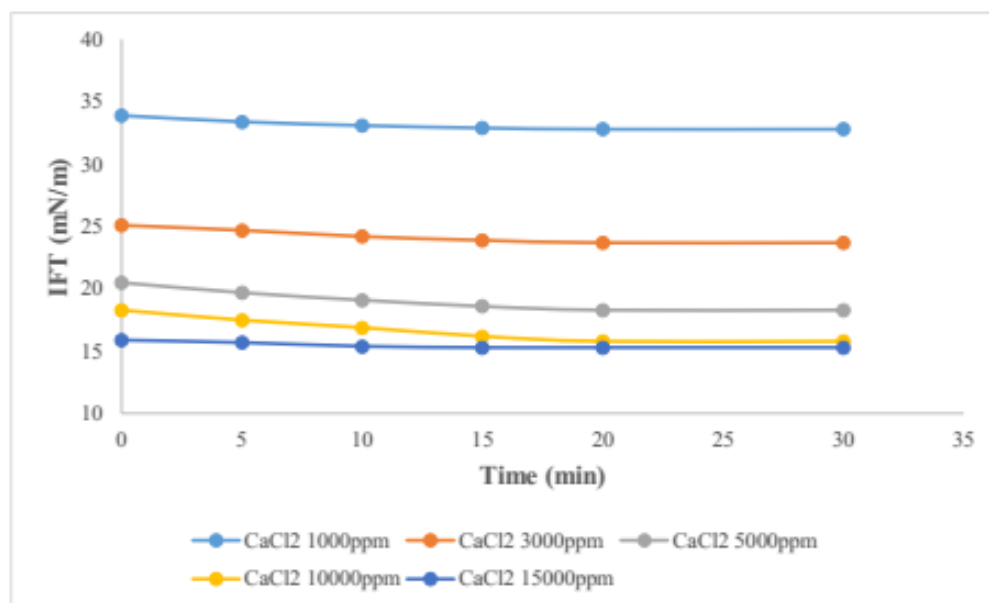
دوظرفیتی بر نیروی کشش بین سطحی پرداخته شد. در ابتدا به بررسی تأثیر نمک کلسیم کلراید در ۵ غلظت مختلف و ۶ بازه زمانی به صورت جداگانه بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت پرداخته شد.

شکل (۶) تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید را در غلظت‌های متفاوت بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۶) حضور نمک دوظرفیتی کلسیم کلراید سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده‌است. افزایش غلظت نمک کلسیم کلراید تأثیر مثبت در کاهش نیروی کشش



شکل ۵. تأثیر دینامیکی نمک پتاسیم کلراید بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت.

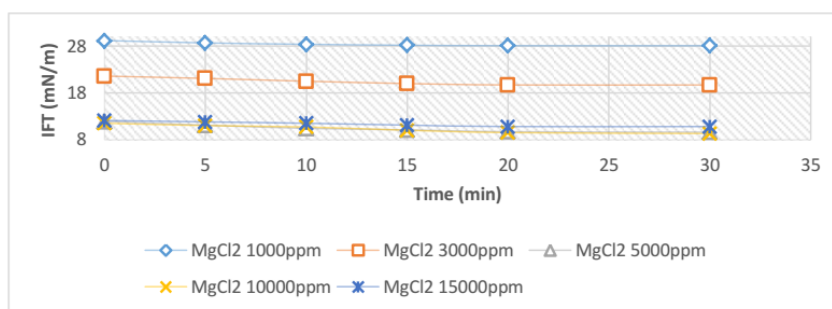
Figure 5. The dynamic effect of potassium chloride salt on the interfacial tension between water and oil.



شکل ۶. تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت.

Figure 6. The dynamic effect of calcium chloride salt on the interfacial tension between water and oil.





شکل ۷. تأثیر دینامیکی نمک منیزیم کلراید بر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت.

Figure 7. The dynamic effect of magnesium chloride salt on the interfacial tension between water and oil.

تأثیر بسیار بالایی در تغییر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت دارند. با افزایش غلظت نمک‌های کلسیم کلراید و منیزیم کلراید، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کم شده است. غلظت بهینه در این دو نمک ۵۰۰۰ ppm بوده و در غلظت‌های بیشتر کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت اندک بوده است. شکل (۸) مقایسه تأثیر انواع نمک را در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm و زمان ۲۰ دقیقه بر تغییر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۸) در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm که بهینه غلظت نمک‌ها در بررسی تأثیر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت بوده و حداقل این مقدار را شامل شده، بیشترین تغییر مربوط به نمک منیزیم کلراید بوده است و بعد از آن نمک کلسیم کلراید و با اختلاف زیاد به ترتیب نمک سدیم کلراید و پتاسیم کلراید قرار دارند.

#### ۴-۵ تعیین غلظت بحرانی ناشی از سورفکتانت

در این پژوهش از دو نمونه سورفکتانت کاتیونی به نام‌های هگزا تری‌متیل آمونیوم بروماید (HTAB)<sup>۴</sup> و بنزیل تری‌متیل آمونیوم بروماید (BTAB)<sup>۵</sup> استفاده شده است. برای کار با سورفکتانت، قبل از هر کار باید غلظت بهینه آن مشخص شود؛ از همین رو در ابتدا به تعیین غلظت بحرانی<sup>۶</sup> سورفکتانت‌ها در آب مقطر پرداخته شد. غلظت بحرانی یعنی غلظتی که در آن حداکثر تعداد مونومر<sup>۷</sup> در بخش میان سطحی قرار گرفته و سبب حداقل مقدار نیروی کشش بین سطحی می‌شود؛ چرا که بعد از آن تغییر این مشخصه بسیار ناچیز بوده است. شکل (۹) تعیین غلظت بحرانی مایسل شدن سورفکتانت‌ها را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۷) حضور نمک دو ظرفیتی منیزیم کلراید در آب، سبب کاهش شدید نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده است. با افزایش غلظت نمک منیزیم کلراید به‌طور پیوسته و با گذشت زمان، نیروی کشش بین سطحی کم شده است؛ به‌طوری‌که بهینه غلظت آن در ۵۰۰۰ ppm بوده و در حدود ۷۰ درصد سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده و عملکرد قابل توجهی در این زمینه داشته است.

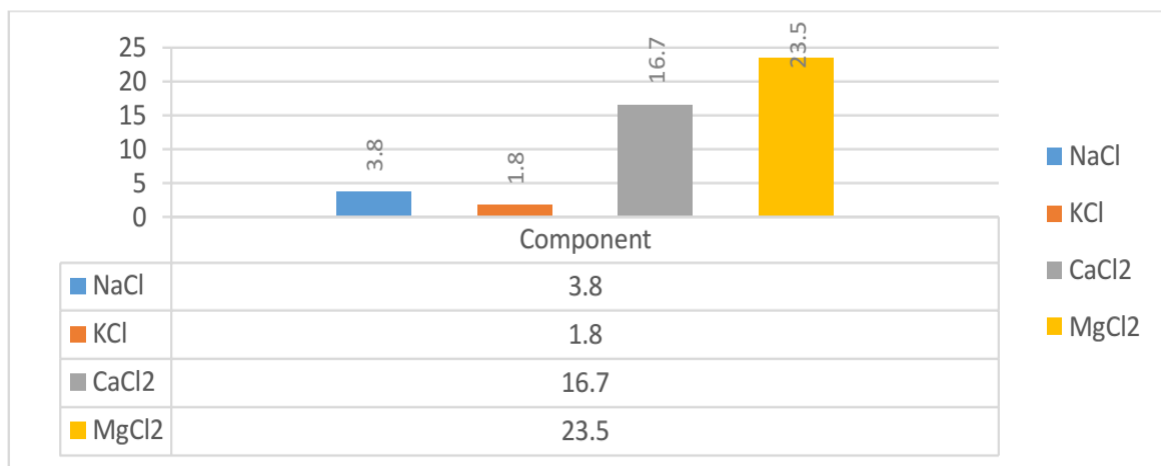
#### ۴-۴ سازوکار مؤثر بر کاهش نیروی کشش بین سطحی

##### آب-نمک و نفت

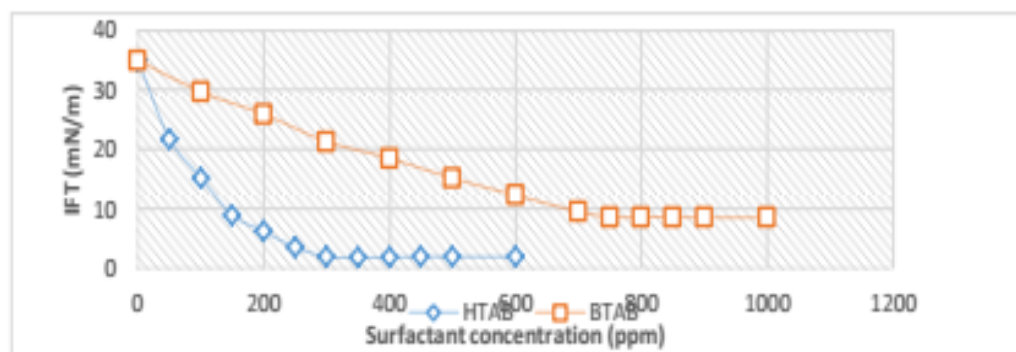
به‌طور کلی نمک‌های مورد استفاده را می‌توان به دو گروه نمک‌های تک‌ظرفیتی (سدیم و پتاسیم) و نمک‌های دوظرفیتی (کلسیم و منیزیم) تقسیم‌بندی کرد. افزایش غلظت نمک‌های تک‌ظرفیتی سدیم کلراید و پتاسیم کلراید سبب افزایش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده و این روند تا غلظت ۳۰۰۰ ppm ادامه داشته است. با افزایش غلظت نمک، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کاهش اندکی داشته است. در این بخش می‌توان به قدرت یونی<sup>۱</sup> اندک یون‌های تک‌ظرفیتی اشاره کرد. زمانی که این دسته از یون‌ها در ناحیه بین سطحی آب و نفت<sup>۲</sup> قرار می‌گیرند، باتوجه به قدرت یونی پایینی که دارند توانایی کشاندن سورفکتانت‌های طبیعی<sup>۳</sup> موجود در نفت را- یا همان بخش قطبی نفت که شامل آسفالتین و رزین می‌شود- از بخش داخلی نفت به بخش میان سطحی ندارند و همین امر سبب تغییر اندک در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده است. هم‌چنین می‌توان دید که وجود یون‌های دوظرفیتی

4. Hexadecyl Trimethyl Ammonium Bromide (HTAB)  
5. Benzyl trimethyl Ammonium Bromide (BTAB)  
6. Critical Micelle Concentration (CMC)  
7. Monomer

1. Ionic Strength  
2. Interfacial Area  
3. Natural Surfactant



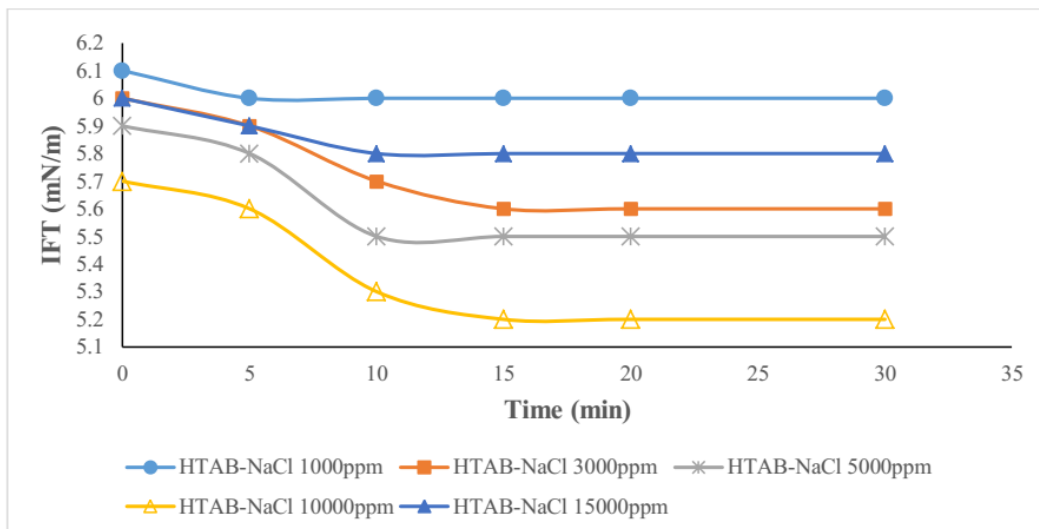
شکل ۸. مقایسه تأثیر انواع نمک در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm و زمان ۲۰ دقیقه بر تغییر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت.  
Figure 8. Comparison of the effect of different types of salt at a concentration of 10000 ppm and a time of 20 minutes on the change in the tension force between the surface of water and oil.



شکل ۹. تعیین غلظت بحرانی مایسل شدن سورفکتانت‌ها.  
Figure 9. Determination of the critical concentration of micellization of surfactants.

باتوجه به شکل (۹) با افزایش غلظت سورفکتانت، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کم شده است و غلظت بحرانی آن‌ها جایی است که بعد از آن تغییری در نیروی کشش بین سطحی رخ ندهد. از جمله عوامل مؤثر در کاهش نیروی کشش بین سطحی به وسیله سورفکتانت، طول زنجیره هیدروکربنی آن است؛ در واقع هرچه زنجیره هیدروکربنی بلندتر باشد کاهش نیروی کشش بین سطحی ناشی از آن نیز بیشتر می‌شود. در اینجا با افزایش غلظت سورفکتانت نیز نیروی کشش بین سطحی آب و نفت کاهش یافته؛ اما غلظت بحرانی HTAB به دلیل ساختار آن کمتر بوده، هم‌چنین کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نیز بیشتر از BTAB بوده است. بر این اساس در نقطه بحرانی، نیروی کشش بین سطحی ناشی از

HTAB از ۳۵ تا ۲ میلی‌نیوتن بر متر و BTAB از ۳۵ تا حدود ۸ میلی‌نیوتن بر متر کاهش یافته است.  
۴-۶ تأثیر نمک بر عملکرد سورفکتانت در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب-نفت  
در ابتدا به بررسی تأثیر نمک سدیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت‌های HTAB و BTAB در غلظت ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ ppm در بازه زمانی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ دقیقه پرداخته شده است. شکل (۱۰) تأثیر نمک سدیم کلراید را بر عملکرد سورفکتانت HTAB نشان می‌دهد.

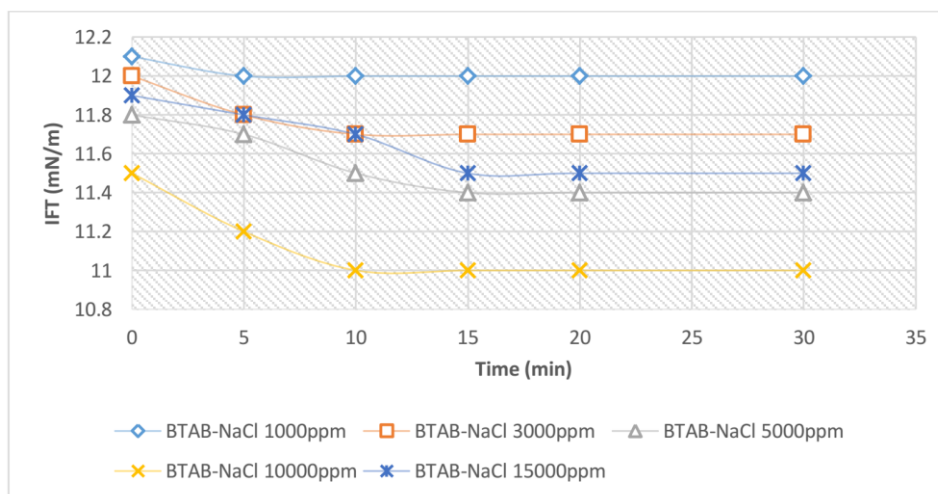


شکل ۱۰. تأثیر نمک سدیم کلراید بر عملکرد سورفکتانت HTAB.

Figure 10. The effect of sodium chloride salt on the performance of HTAB surfactant.

باتوجه به شکل (۱۰) تأثیر ۱۰۰۰ ppm نمک سدیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت HTAB ناچیز بوده است. با افزایش غلظت نمک سدیم کلراید عملکرد سورفکتانت HTAB بهبود یافته است. با افزایش غلظت نمک سدیم کلراید، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت از ۶/۲ میلی نیوتن بر متر که مقدار آن در حالت بدون نمک بوده، کاهش یافته و در غلظت بهینه نمک؛ یعنی مقدار ۱۰۰۰۰ ppm به کمترین مقدار یعنی ۵/۷ میلی نیوتن بر متر رسیده است. همچنین به مرور زمان عملکرد سورفکتانت در حضور نمک، بهتر و سبب کاهش بیشتر آن شده است. عملکرد سورفکتانت HTAB در حضور

۱۰۰۰۰ ppm نمک سدیم کلراید با گذشت زمان به کمترین مقدار در مقایسه با دیگر غلظت‌ها رسیده است. زمان پایداری ناشی از سورفکتانت HTAB در حضور نمک سدیم کلراید تقریباً ۱۵ دقیقه بوده؛ چراکه پس از این زمان تغییر چشم‌گیری در مقدار نیروی کشش بین سطحی رخ نداده است. همچنین برای بررسی تأثیر نمک سدیم کلراید بر روی سورفکتانت BTAB به بررسی آن در ۵ غلظت مختلف از این نمک به همراه ۶۰۰ ppm سورفکتانت BTAB در ۶ بازه زمانی بررسی شده است. شکل (۱۱) تأثیر نمک سدیم کلراید را بر عملکرد سورفکتانت BTAB نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. تأثیر نمک سدیم کلراید بر عملکرد سورفکتانت BTAB.

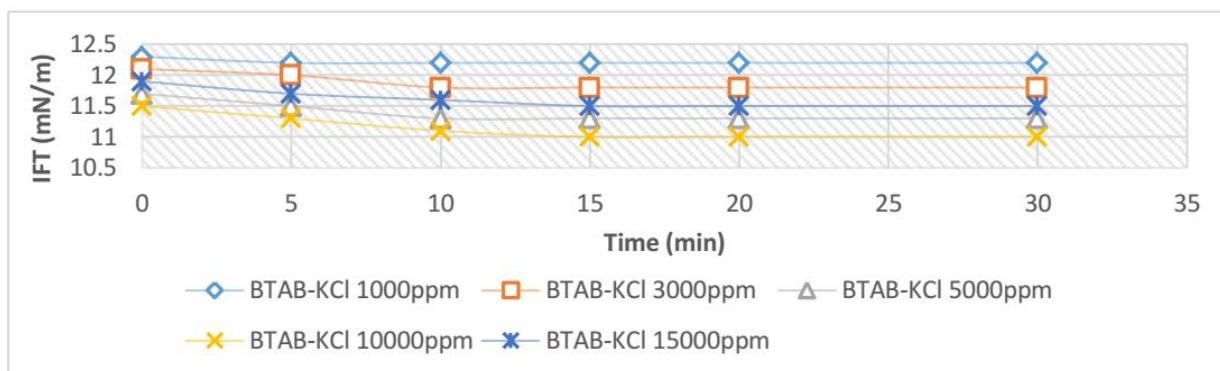
Figure 11. The effect of sodium chloride salt on BTAB surfactant performance.

تأثیر دینامیکی نمک پتاسیم کلراید را بر سورفکتانت BTAB نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۱۲) سورفکتانت BTAB در حضور نمک پتاسیم کلراید، سبب کاهش بیشتر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده و با افزایش غلظت نمک پتاسیم کلراید مقدار این کمیت به طور پیوسته کاهش یافته و بهینه غلظت آن که باگذشت زمان به حداقل مقدار درمقایسه با سایر غلظت‌ها رسیده، غلظت ۱۰۰۰۰ ppm است. شکل (۱۳) مقایسه تأثیر نمک پتاسیم کلراید بر دو سورفکتانت را نشان می‌دهد.

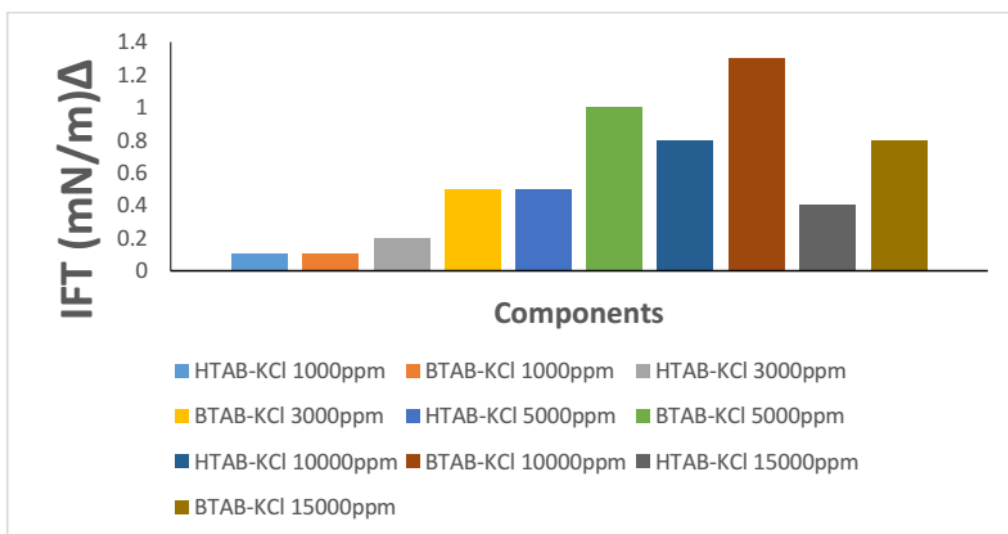
باتوجه به شکل (۱۳) حضور نمک تک‌ظرفیتی پتاسیم کلراید در محلول حاوی سورفکتانت BTAB عملکرد بهتری در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت درمقایسه با محلول حاوی سورفکتانت HTAB داشته است. به طور کلی با افزایش غلظت نمک پتاسیم کلراید میزان نیروی کشش بین سطحی کم شده و بیشترین کاهش ناشی از هر دو سورفکتانت در غلظت ۱۰۰۰۰ ppm از نمک پتاسیم کلراید بوده است. برای درک بهتر از تأثیر نمک‌های دو ظرفیتی بر روی عملکرد سورفکتانت‌های کاتیونی، به بررسی تأثیر کلسیم کلراید و منیزیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت‌های HTAB و BTAB پرداخته شده است. در ابتدا به بررسی تأثیر نمک کلسیم کلراید بر روی سورفکتانت HTAB در ۵ غلظت مختلف از نمک و در ۶ بازه زمانی بر روی نیروی کشش بین سطحی آب و نفت و در غلظت ثابت از HTAB پرداخته شده است. شکل (۱۴) تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید را بر عملکرد سورفکتانت HTAB نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۱۱) تأثیر ۱۰۰۰ ppm نمک سدیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت BTAB ناچیز بوده است. با افزایش غلظت نمک سدیم کلراید، عملکرد سورفکتانت BTAB بهبود یافته است. با افزایش غلظت نمک سدیم کلراید، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت از ۱۲/۳ میلی‌نیوتن بر متر که مقدار آن در حالت بدون نمک بوده، کاهش یافته و در غلظت بهینه نمک؛ یعنی مقدار ۱۰۰۰۰ ppm به کمترین مقدار یعنی ۱۱/۵ میلی‌نیوتن بر متر رسیده است. هم‌چنین به مرور زمان عملکرد سورفکتانت در حضور نمک بهتر و سبب کاهش بیشتر آن شده است. عملکرد سورفکتانت BTAB در حضور ۱۰۰۰۰ ppm نمک سدیم کلراید باگذشت زمان به کمترین مقدار درمقایسه با دیگر غلظت‌ها رسیده است. زمان پایداری ناشی از سورفکتانت BTAB در حضور نمک سدیم کلراید تقریباً ۱۵ دقیقه بوده؛ چرا که بعد از این زمان تغییر چشم‌گیری در مقدار نیروی کشش بین سطحی رخ نداده است. در غلظت‌های کم نمک سدیم کلراید، قدرت آن در کاهش نیروی کشش بین سطحی کم بوده؛ اما با افزایش مقدار غلظت نمک کشش بین سطحی کاهش می‌یابد. وجود نمک پتاسیم کلراید نیز سبب بهبود عملکرد سورفکتانت کاتیونی HTAB شده، به طوری که با افزایش غلظت این نمک، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به طور پیوسته کاهش یافته و بهینه غلظت آن ۱۰۰۰۰ ppm بوده؛ چرا که در این غلظت به مرور زمان کمترین نیروی کشش بین سطحی رخ داده است. هم‌چنین برای بررسی تأثیر نمک پتاسیم کلراید بر روی سورفکتانت BTAB به بررسی آن در ۵ غلظت مختلف از این نمک به همراه ۶۰۰ ppm سورفکتانت BTAB در ۶ بازه زمانی بررسی شده است. شکل (۱۲)



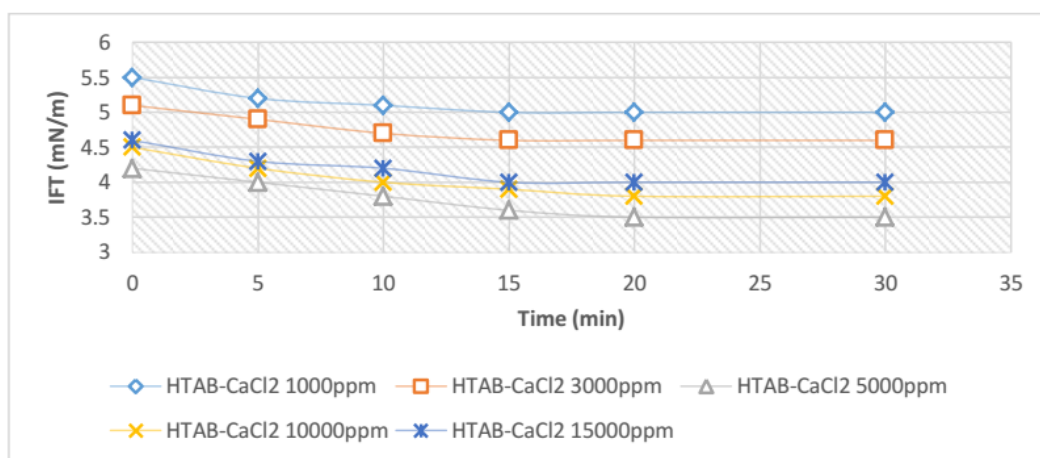
شکل ۱۲. تأثیر دینامیکی نمک پتاسیم کلراید بر سورفکتانت BTAB.

Figure 12. Dynamic effect of potassium chloride salt on BTAB surfactant.



شکل ۱۳. مقایسه تأثیر نمک پتاسیم کلراید بر دو سورفکتانت.

Figure 13. Comparison of the effect of potassium chloride salt on two surfactants.



شکل ۱۴. تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید بر عملکرد سورفکتانت HTAB.

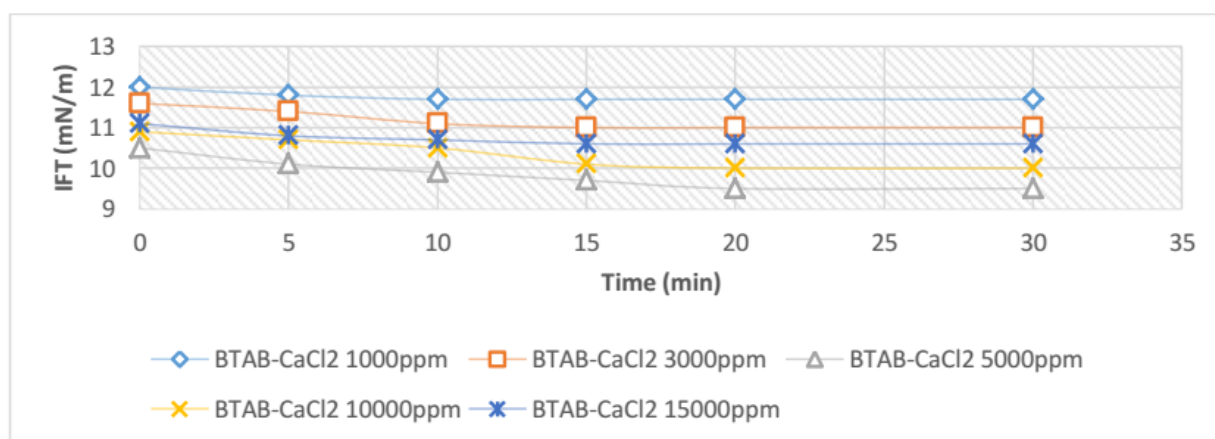
Figure 14. The dynamic effect of calcium chloride salt on the performance of HTAB surfactant.

شده است. شکل (۱۵) تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید را بر عملکرد سورفکتانت BTAB نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۵) تأثیر ۱۰۰۰ ppm نمک کلسیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت BTAB ناچیز بوده است. با افزایش غلظت نمک کلسیم کلراید عملکرد سورفکتانت BTAB بهبود یافته است. با افزایش غلظت نمک کلسیم کلراید، نیروی کشش بین سطحی آب و نفت از ۱۲/۳ میلی نیوتن بر متر که مقدار آن در حالت بدون نمک بوده، کاهش یافته و در غلظت بهینه نمک؛ یعنی مقدار ۵۰۰۰ ppm

چنان که از شکل (۱۴) پیداست، افزایش غلظت نمک کلسیم کلراید سبب بهبود عملکرد این نوع نمک بر روی نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده است، به گونه‌ای که در غلظت ۵۰۰۰ ppm از کمترین مقدار نیروی کشش بین سطحی آب و نفت حاصل شده، هم‌چنین با گذشت زمان نیز این مقدار به طور پیوسته تا زمان ۲۰ دقیقه کم شده است. هم‌چنین برای بررسی تأثیر نمک کلسیم کلراید بر روی سورفکتانت BTAB به بررسی آن در ۵ غلظت مختلف از این نمک به همراه ۶۰۰ ppm سورفکتانت BTAB در ۶ بازه زمانی بررسی

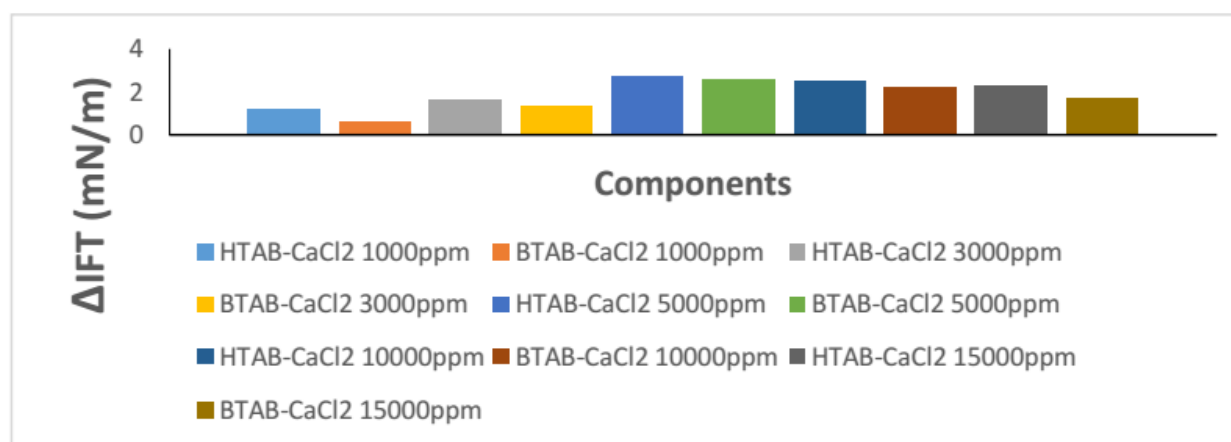
که با افزایش غلظت نمک کلسیم کلراید این تغییر در نیروی کشش بین سطحی آب و نفت نیز بیشتر شده است. به‌طور کلی تأثیر نمک کلسیم کلراید بر روی عملکرد سورفکتانت کاتیونی HTAB در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در مقایسه با سورفکتانت BTAB بهتر بوده است. در ادامه برای بررسی تأثیر نمک‌های دو ظرفیتی به بررسی تأثیر نمک منیزیم کلراید بر روی سورفکتانت پرداخته شده است. به همین منظور، ابتدا تأثیر نمک منیزیم کلراید بر روی سورفکتانت HTAB در ۵ غلظت مختلف نمک و در ۶ بازه زمانی بررسی شد. شکل (۱۷) تأثیر نمک منیزیم کلراید را بر کارکرد سورفکتانت HTAB نشان می‌دهد.

به کمترین مقدار یعنی ۱۰/۵ میلی‌نیوتن بر متر رسیده است. همچنین به مرور زمان عملکرد سورفکتانت در حضور نمک بهتر شده و سبب کاهش بیشتر آن شده است. عملکرد سورفکتانت BTAB در حضور ۵۰۰۰ ppm نمک سدیم کلراید با گذشت زمان به کمترین مقدار در مقایسه با دیگر غلظت‌ها رسیده است. زمان پایداری ناشی از سورفکتانت BTAB در حضور نمک سدیم کلراید تقریباً ۱۵ دقیقه بوده است. شکل (۱۶) مقایسه تأثیر نمک کلسیم کلراید را بر دو سورفکتانت نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۱۶) پیداست، کلسیم کلراید سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی محلول حاوی سورفکتانت شده؛ به‌طوری



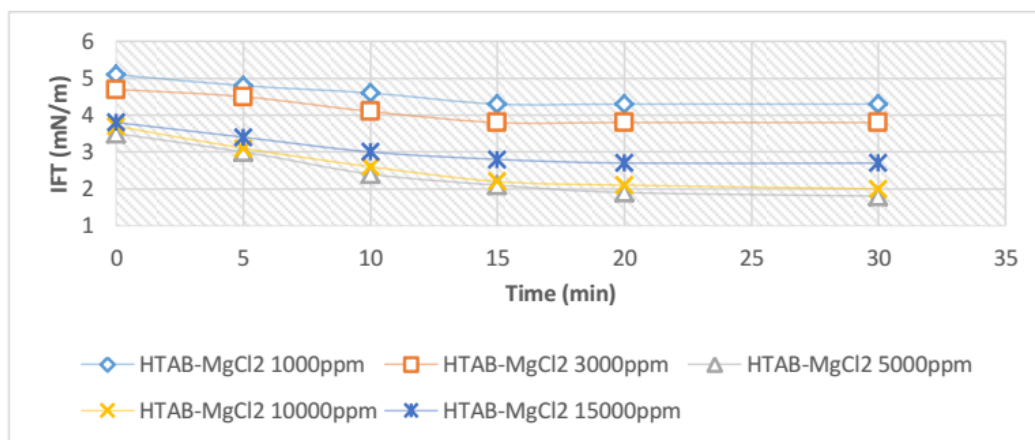
شکل ۱۵. تأثیر دینامیکی نمک کلسیم کلراید بر عملکرد سورفکتانت BTAB.

Figure 15. The dynamic effect of calcium chloride salt on BTAB surfactant performance.



شکل ۱۶. مقایسه تأثیر نمک کلسیم کلراید بر دو سورفکتانت.

Figure 16. Comparison of the effect of calcium chloride salt on two surfactants.

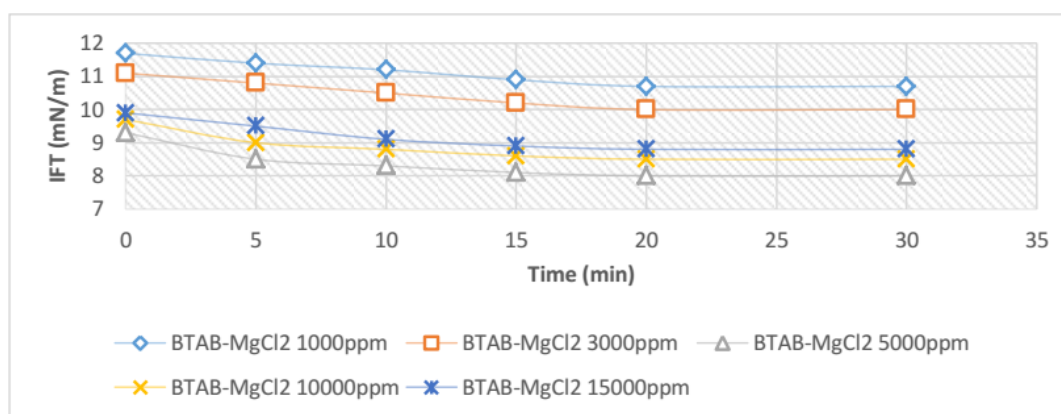


شکل ۱۷. تأثیر نمک منیزیم کلراید بر کارکرد سورفکتانت HTAB.

Figure 17. Effect of magnesium chloride salt on the performance of HTAB surfactant.

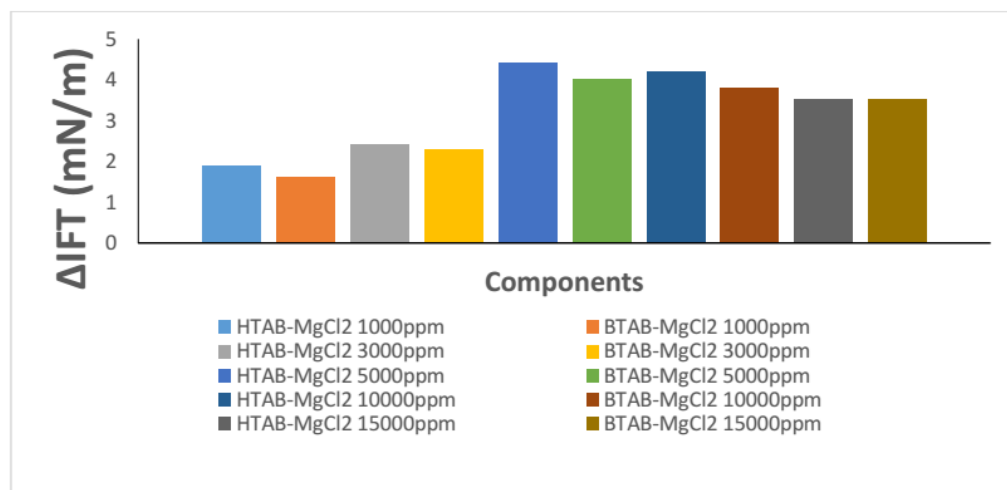
دینامیک، بررسی شد. شکل (۱۸) تأثیر نمک منیزیم کلراید را بر کارکرد سورفکتانت BTAB نشان می‌دهد. در این بخش نیز حضور نمک منیزیم کلراید سبب کاهش بیشتر نیروی کشش بین سطحی ناشی از محلول آب و سورفکتانت BTAB در مقایسه با حالت بدون نمک شده‌است. همان‌طور که از شکل (۱۸) مشخص است، افزایش غلظت نمک منیزیم کلراید به‌طور پیوسته سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت شده؛ به‌طوری که در غلظت بهینه آن یعنی غلظت ۵۰۰۰ ppm مقدار این نیرو از ۱۲/۳ به ۹/۳ کاهش یافته‌است و گذر زمان نیز سبب عملکرد بهتر آن شده‌است. شکل (۱۹) تأثیر نمک منیزیم کلراید را بر دو سورفکتانت نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۱۷) وجود نمک منیزیم کلراید، عملکرد سورفکتانت HTAB را بر روی کاهش نیروی کشش بین سطحی بسیار بهتر کرده‌است. با افزایش غلظت نمک منیزیم کلراید، نیروی کشش بین سطحی به‌طور پیوسته کم شده‌است، به‌گونه‌ای که در غلظت ۵۰۰۰ ppm مقدار نیروی کشش بین سطحی از میزان ۶/۳ به ۳/۵ میلی‌نیوتن بر متر تقلیل یافته و هم‌چنین گذر زمان نیز عملکرد آن را بسیار بهبود بخشیده‌است؛ به‌طوری که باگذشت زمان این مقدار به ۱/۸ میلی‌نیوتن بر متر کاهش یافته‌است؛ یعنی در حدود ۷۰ درصد کاهش در مقدار نیروی کشش بین سطحی آب و نفت حاصل شده‌است. به همین ترتیب، تأثیر نمک منیزیم کلراید بر عملکرد سورفکتانت BTAB در تعیین نیروی کشش بین سطحی آب و نفت در ۵ غلظت مختلف از نمک و در ۶ بازه زمانی به‌صورت



شکل ۱۸. تأثیر نمک منیزیم کلراید بر کارکرد سورفکتانت BTAB.

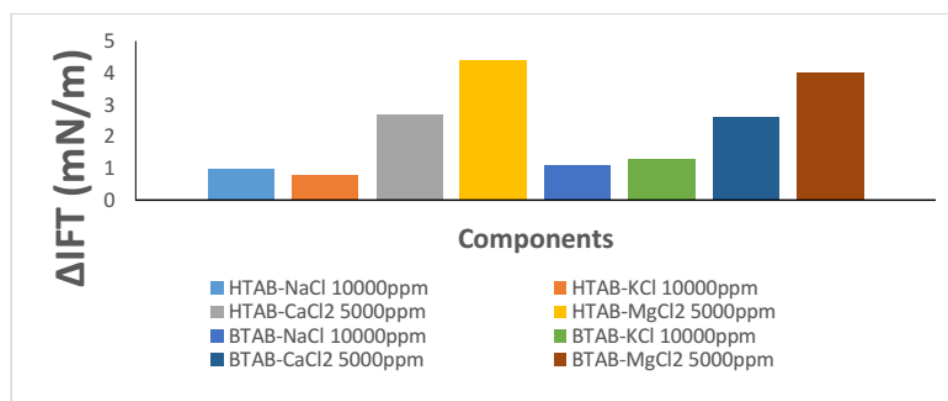
Figure 18. Effect of magnesium chloride salt on BTAB surfactant performance.



شکل ۱۹. تأثیر نمک منیزیم کلراید بر دو سورفکتانت.  
Figure 19. Effect of magnesium chloride salt on two surfactants.

سورفکتانت در تغییر نیروی کشش بین سطحی بر می‌آید، پیداست که نمک‌های دوظرفیتی یعنی منیزیم کلراید و کلسیم کلراید تأثیر بیشتری در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت درمقایسه با نمک‌های تک‌ظرفیتی سدیم کلراید و پتاسیم کلراید داشته‌است. هم‌چنین تأثیر نمک منیزیم کلراید درمقایسه با نمک کلسیم کلراید بسیار بهتر بوده‌است. علاوه بر این، عملکرد سورفکتانت HTAB در حضور نمک منیزیم کلراید در کاهش نیروی کشش بین سطحی درمقایسه با سورفکتانت BTAB نیز بهتر بوده و سبب بیشترین کاهش در میزان نیروی کشش بین سطحی شده‌است.

باتوجه به شکل (۲۰) مشخص است همان‌طور که نمک منیزیم کلراید به‌تنهایی تأثیر بسیار زیادی در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت داشت، در این قسمت نیز سبب بهبود عملکرد سورفکتانت شده‌است. با افزایش غلظت نمک منیزیم کلراید، کاهش نیروی کشش بین سطحی محلول حاوی سورفکتانت بیشتر شده‌است. سورفکتانت HTAB در حضور نمک منیزیم کلراید عملکرد بهتری در کاهش نیروی کشش بین سطحی آب و نفت درمقایسه با سورفکتانت BTAB داشته‌است. اما از شکل (۲۰) که یک شمای کلی از تأثیر انواع نمک بر روی



شکل ۲۰. تأثیر انواع نمک بر دو نمونه سورفکتانت.  
Figure 20. The effect of salt types on two surfactant samples.



- [3] Tetteh, J., Janjang, N. M., & Barati, R. (2018, April). Wettability alteration and enhanced oil recovery using low salinity waterflooding in limestone rocks: A mechanistic study. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*, SPE-192425, SPE.
- [4] Alagic, E., Spildo, K., Skauge, A., & Solbakken, J. (2011). Effect of crude oil ageing on low salinity and low salinity surfactant flooding. *Journal of Petroleum science and Engineering*, 78(2), 220-227.
- [5] Ramlal, V. (2004, April). Enhanced oil recovery by steamflooding in a recent steamflood project, cruse 'E' field, Trinidad. In *SPE Improved Oil Recovery Conference?*, SPE-89411, SPE.
- [6] Manrique, E., Thomas, C., Ravikiran, R., Izadi, M., Lantz, M., Romero, J., & Alvarado, V. (2010, April). EOR: current status and opportunities. In *SPE Improved Oil Recovery Conference?*, SPE-130113, SPE.
- [7] Seethepalli, A., Adibhatla, B., & Mohanty, K. K. (2004, April). Wettability alteration during surfactant flooding of carbonate reservoirs. In *SPE Improved Oil Recovery Conference?*, SPE-89423, SPE.
- [8] Pitts, M. J., Dowling, P., Wyatt, K., Surkalo, H., & Adams, C. (2006, April). Alkaline-surfactant-polymer flood of the Tanner Field. In *SPE Improved Oil Recovery Conference?*, SPE-100004, SPE.
- [9] Mahendra, P., Gauma, M. S. (2004). Field Implementation of Alkaline-Surfactant-Polymer (ASP) Flooding: A Maiden Effort in India. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition.*, 1-5.
- [10] Rostami R., R. (2011). 'Water-Based EOR in Limestone by Smart Water', PhD Thesis, Faculty of Science and Technology Department of Petroleum Engineering University of Stavanger.
- [11] Hematpur, H., Mahmood, S. M., Nasr, N. H., & Elraies, K. A. (2018). Foam flow in porous media: Concepts, models and challenges. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 53, 163-180.
- [12] Alvarado, V., & Manrique, E. (2010). Enhanced oil recovery: an update review. *Energies*, 3(9), 1529-1575.

## ۵. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، بررسی آزمایشگاهی تأثیر نمک‌های متفاوت بر بهبود عملکرد سورفکتانت کاتیونی از منظر نیروی کشش بین سطحی آب و نفت به صورت دینامیکی است. از همین روی، در بررسی تأثیر غلظت و نوع نمک‌ها بر روی سورفکتانت از غلظت‌های کمتر از غلظت بحرانی آن‌ها استفاده شده است. براساس آزمایش‌ها و همچنین مطالعات گذشته می‌توان نتیجه گرفت که حضور نمک در آب، سبب کاهش نیروی کشش بین سطحی می‌شود. نمک‌های دو ظرفیتی منیزیم و کلسیم به علت چگالی بار الکتریکی بیشتر نسبت به کاتیون‌های تک ظرفیتی سدیم و پتاسیم تأثیر بیشتری بر کاهش کشش بین سطحی دارند. نمک منیزیم کلرید به علت دارا بودن یون‌های فعال منیزیم با چگالی بار الکتریکی بالا نسبت به سه نمک دیگر، بیشترین تأثیر را بر کاهش کشش بین سطحی نفت و آب دارد. سورفکتانت HTAB نیز در مقایسه با BTAB به دلیل بلندتر بودن زنجیره هیدروکربنی سبب کاهش بیشتر نیروی کشش بین سطحی شده است. حضور یون منیزیم در مقایسه با سایر یون‌ها، تأثیر بیشتری بر عملکرد سورفکتانت‌ها در کاهش نیروی کشش بین سطحی داشته است. نیز گذشت زمان تأثیر مثبتی در روند کاهش نیروی کشش بین سطحی ناشی از نمک‌ها، سورفکتانت‌ها و ترکیب آن‌ها داشته است.

## مراجع

- [1] Manrique, E., Gurfinkel, M., & Muci, V. (2004, September). Enhanced oil recovery field experiences in carbonate reservoirs in the United States. In *Proceedings of the 25th Annual Workshop & Symposium Collaborative Project on Enhanced Oil Recovery*, International Energy Agency, Vol. 111, 667-686.
- [2] Hosseini, N. (2018). Laboratory investigation of alternating non-mixed injection of hot water and hot carbon dioxide gas to increase oil recovery in a slotted model, *Journal of Iranian Chemical Engineering*, the period 8, Number 43.