



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Performance of Electric Fields for Enhanced Oil Recovery

Negin Ghaderi Hayati¹, Javad Saien^{2*}, Farnaz Jafari³

Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry and Petroleum Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 20/Jul/2024

Revised: 08/Oct/2024

Accepted: 31/May/2025

Keywords:

Enhanced oil recovery,
Electric field,
Interfacial tension,
Natural surfactants.

ABSTRACT

With the increase of crude oil consumption and the decrease in extractable resources, the development of new methods to enhanced oil recovery has become of particular concern. One advanced and exploited method in recent years is employing external fields, especially electric fields, to reduce the attraction forces between crude oil and water, which improves the production of oil trapped in reservoirs. In this study, the effects of different electric fields with voltage range of (3-9) V and frequency within (100-900) Hz on the interfacial tension of the crude oil–water system were investigated. The results showed that this property has a significant dependency on the electric field parameters, and that the highest voltage and the frequency adjusted at the optimum value, decreased it from the initial value of 32.0 to 8.8 mN/m, equivalent to a 72.5% reduction and also enhanced oil recovery. This phenomenon is mainly due to the increased adsorption of natural crude oil surfactants at the interface and the creation of electrohydrodynamic flows. In addition, investigations on the performance of electric fields demonstrated that electric field with optimum frequency exhibits higher efficiency attributed to the continuous displacement of the poles.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.37183.2359>

© 2025 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Professor of Chem. Eng. E-mail address: saien@basu.ac.ir

How to cite this article: Ghaderi Hayati, N., Saien, J., & Jafari, F. (2025). Performance of Electric Fields for Enhanced Oil Recovery. *Applied Chemistry Today*, 20(75), 1-16. (in persian)

بررسی عملکرد میدان‌های الکتریکی برای بهبود بازیابی نفت خام

نگین قادری حیاتی، جواد صاین*، فرناز جعفری

گروه شیمی کاربردی، دانشکده شیمی و علوم نفت، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰	با افزایش مصرف نفت خام و کاهش منابع قابل استخراج، توسعه روش‌های نوین برای بهبود بازیابی نفت خام اهمیت ویژه‌ای یافته است. یکی از راهکارهای پیشرفته و مورد استفاده در سال‌های اخیر، به کارگیری میدان‌های خارجی، به‌ویژه میدان الکتریکی برای کاهش نیروهای جاذبه بین نفت خام و آب است که منجر به افزایش تحرک نفت محبوس در مخازن می‌شود. در این پژوهش، تأثیر میدان‌های الکتریکی با ولتاژ در محدوده (۳-۹ V) و فرکانس در بازه (۱۰۰-۹۰۰ Hz) بر کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این ویژگی وابستگی قابل توجهی به پارامترهای میدان الکتریکی دارد، که بیشترین ولتاژ و فرکانس تنظیم‌شده در مقدار بهینه، کشش بین سطحی را از مقدار اولیه ۳۲٪ به ۸۸ mN/m کاهش داد که معادل ۷۲/۵٪ کاهش و نیز بهبود بازیابی نفت خام است. این پدیده عمدتاً ناشی از افزایش جذب سطحی سورفکتانت‌های طبیعی نفت در فصل مشترک و ایجاد جریان‌های الکتروهیدرودینامیک می‌باشد. علاوه بر این، بررسی عملکرد میدان‌های الکتریکی نشان داد که میدان الکتریکی در فرکانس بهینه به دلیل جابه‌جایی مداوم قطب‌ها کارایی بیشتری دارد.
کلمات کلیدی: بهبود بازیابی نفت خام، میدان الکتریکی، کشش بین سطحی، سورفکتانت‌های طبیعی.	
DOI: https://doi.org/10.22075/CHEM.2025.37183.2359	
This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)	

۱- مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا برای انرژی و محدودیت منابع نفتی، یافتن روش‌های نوین برای ازدیاد برداشت نفت از اهمیت بالایی برخوردار شده است. در حال حاضر، تنها ۲۰ تا ۴۰٪ از نفت موجود در مخازن نفتی با استفاده از روش‌های مرسوم برداشت اولیه^۱ و ثانویه^۲ قابل استخراج است [۱]. بدین لحاظ مرحله سوم برداشت^۳ که به روش بهبود بازیابی نفت خام^۴ معروف است، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه کشش بین سطحی^۵ نفت خام و آب است که باعث می‌شود بیش از دو سوم نفت درجا غیرقابل برداشت باقی بماند. بنابراین، کاهش کشش بین سطحی بین فازها می‌تواند به بهبود بازیابی نفت کمک کند [۲]. از جمله راهکارهای مرسوم در کاهش کشش بین سطحی، تزریق مواد شیمیایی فعال سطحی^۶ مانند فوم، پلیمر

¹ Primary recovery

² Secondary recovery

³ Tertiary recovery

⁴ Enhanced oil recovery (EOR)

⁵ Interfacial tension (IFT)

⁶ Surface active agents

و مایعات یونی می‌باشند [۲]. در سال‌های اخیر یکی از روش‌های نوین و موثر در این زمینه، استفاده از انواع میدان‌های خارجی^۱ از جمله میدان الکتریکی^۲، الکترومغناطیسی^۳ و فراصوت^۴ بوده است [۳-۵]. طبق بررسی‌های انجام شده، اعمال میدان‌های الکتریکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. این روش می‌تواند موجب افزایش تحرک نفت، انتقال جرم و جداسازی آسان‌تر نفت از آب و سنگ مخزن شود. به‌علاوه، این فرآیند بر توزیع سیالات و نحوه حرکت آن‌ها در محیط متخلخل تاثیر گذاشته و نقش مهمی در تولید طبیعی و فرآیندهای ازدیاد برداشت ایفا می‌کند [۶]. در این رابطه اعمال میدان‌های الکتریکی می‌توانند کشش بین سطحی را به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهند، که از نظر زیست محیطی، ایمنی و اقتصادی در صنعت نفت حائز اهمیت هستند.

میدان الکتریکی به‌طور موثر نرخ انتقال جرم مواد فعال سطحی را در سطح مشترک مایع-مایع تحریک کرده و قادر به افزایش انتقال، جای‌دهی و انباشتگی این مواد در ناحیه فصل مشترک می‌باشند. در نتیجه، با تاثیر بر نیروهای بین مولکولی سطح مشترک و تضعیف آن‌ها، کشش بین سطحی دینامیکی^۵ و تعادلی^۶ کاهش می‌یابد [۷]. در شرایطی که سطح مشترک سیالات در معرض میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، کاهش کشش بین سطحی ناشی از افزایش چگالی بار سطحی سورفکتانت‌ها می‌باشد [۸]. با تشدید میدان الکتریکی، انتقال جرم سورفکتانت‌ها به‌طور یکنواخت افزایش و به تبع آن کشش بین سطحی کاهش می‌یابد. این وضعیت تا زمانی که قدرت میدان الکتریکی به حد بهینه برسد ادامه می‌یابد [۹].

از نکات مهم دیگر این است که تاثیر میدان الکتریکی در کاهش کشش بین سطحی، نیازی به تزریق مواد شیمیایی فعال سطحی مصنوعی در مخازن ندارد، بلکه این بهبود می‌تواند با بهره‌گیری از مواد فعال سطحی طبیعی نفت خام^۷ مانند نفتنیک اسیدها، سولفونیک اسیدها، آسفالتین‌ها و رزین‌ها حاصل شود. این مواد که نامحلول در آب و عمدتاً دارای بار سطحی هستند، به‌طور موثر تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند و با خاصیت دوگانه‌دوستی بالا می‌توانند نقش مهمی در کاهش کشش بین سطحی ایفا کنند [۱۰-۱۲]. در شکل ۱ نمایش نحوه‌ی قرارگیری مولکول‌های سورفکتانت‌های طبیعی نفت (عمدتاً دارای بار سطحی مثبت [۱۳]) در سطح مشترک سیستم نفت خام-آب در غیاب و در حضور میدان الکتریکی ارائه شده است.

¹ External fields

² Electric field (EF)

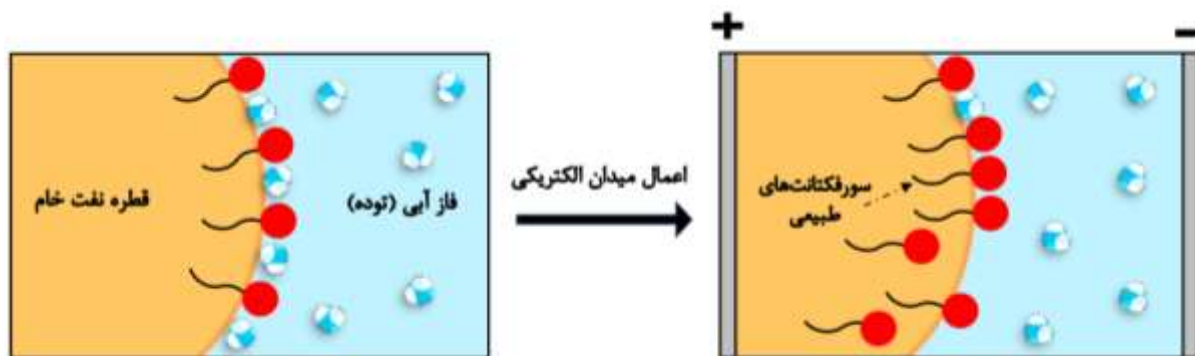
³ Electromagnetic

⁴ Ultrasonic

⁵ Dynamic

⁶ Equilibrium

⁷ Natural surface-active agents of crude oil



شکل ۱. نحوه‌ی قرارگیری سورفکتانت‌های طبیعی نفت خام در سطح مشترک در غیاب و در حضور میدان الکتریکی.

افزایش انتقال جرم سورفکتانت‌ها در سطح مشترک نفت خام-آب به جریان‌های متقارن محوری الکتروهیدرودینامیک تولید شده در هر دو طرف سطح مشترک نسبت داده می‌شود. این جریان‌ها تحت تاثیر هدایت و گذردهی الکتریکی هر دو فاز قرار دارند [۱۴]. گذشته از این، غلبه تنش‌های الکتریکی بر نیروی کشش بین سطحی می‌تواند منجر به تشدید ناپایداری سطحی شود [۱۵]. مکانیسم ناپایداری سطحی، از دیدگاه هیدرودینامیک، از برهم‌کنش تنش‌های الکتریکی و سورفکتانت‌ها در سطح مشترک فازها ناشی می‌شود [۱۶]. در غیاب میدان الکتریکی، مولکول‌های فعال سطحی در سطح مشترک توزیع یکنواختی دارند، در حالی که با اعمال میدان الکتریکی به سیستم نفت خام-آب (سیالات رسانای جزئی)، این مواد به صورت نامتقارن توزیع می‌شوند. در نهایت، اعمال میدان الکتریکی در سیالاتی که رسانا یا عایق جریان الکتریکی هستند، موجب ایجاد تنش‌های الکتریکی القایی عمود بر سطح مشترک می‌شود که در افزایش ناپایداری سطحی نقش مهمی ندارد. این درحالی است که این تنش‌ها در سیالات رسانای جزئی باعث افزایش ناپایداری سطحی، کاهش کشش بین سطحی و بهبود بازیابی نفت خام می‌شوند. هرچه تفاوت هدایت الکتریکی و گذردهی جریان الکتریکی میان دو فاز بیشتر باشد، تنش‌های بین سطحی تشدید شده و ناپایداری‌های سطحی مطلوبی را برای کاهش کشش بین سطحی ایجاد می‌کند [۱۷ و ۱۸].

بر این اساس، در پژوهش حاضر تاثیر پارامترهای عملیاتی شامل ولتاژ و فرکانس میدان‌های الکتریکی بر کاهش کشش بین سطحی و بهبود بازیابی نفت خام در بردارنده‌ی سورفکتانت‌های طبیعی نفت بررسی شده است. علاوه بر این، تاثیر میدان الکتریکی نوسانی بر سیستم نفت خام-آب نیز مطالعه شده تا امکان مقایسه و ارزیابی اثرات انواع میدان‌های الکتریکی بر کاهش کشش بین سطحی فراهم شود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و تجهیزات

برای انجام این پژوهش نفت خام از منطقه جنوب غربی ایران تهیه شد. این نمونه فاقد گازهای همراه بود و بدون هرگونه تصفیه یا رقیق‌سازی، در حالت طبیعی مورد استفاده قرار گرفت تا تاثیر ترکیبات فعال سطحی طبیعی آن بر کشش بین سطحی سیستم

بررسی شود. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و ترکیبات سازنده نفت خام را ارائه می‌دهد. مواد فعال سطحی موثر در این پژوهش، نفتنیک اسیدها، سولفونیک اسیدها، آسفالتین‌ها و رزین‌ها می‌باشند که به‌صورت طبیعی در نفت خام وجود دارند. افزون بر این، میزان درصد بالای آسفالتین و آروماتیک در جدول ۱ حاکی از آن است که ترکیبات فعال سطحی موجود در نفت خام مورد استفاده در این پژوهش، عمدتاً از نوع آسفالتین‌ها می‌باشند. لازم به توضیح است که آسفالتین‌ها اغلب به‌طور طبیعی دارای بار سطحی مثبت می‌باشند [۱۳]. برای فاز توده در تماس با نفت خام، از آب مقطر با میزان کل جامدات محلول به مقدار 5 mg/L و با چگالی $999/62 \text{ kg/m}^3$ اندازه‌گیری شده توسط دستگاه چگالی سنج (Anton Paar ۴۵۰۰ DMA) استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات و ترکیبات نفت خام مورد استفاده

مقدار	مشخصات و ترکیبات
۲۰/۷	°API
۰/۸۷۸۲	چگالی در 20°C (g/cm^3)
۵۵	گرانروی در 70°F (cP)
۴۴	گرانروی دینامیک در 100°F (cP)
۶۰	گرانروی سینماتیک ^۱ در 70°F (cSt)
۱۰	نقطه ریزش ^۲ ($^{\circ}\text{F}$)
۷۰	نقطه اشتعال ^۳ ($^{\circ}\text{F}$)
۰/۰۹	عدد اسیدی ^۴ (mg KOH/g oil)
۱۲/۱	فشار بخار رید ^۵ (psi)
۵۴/۰	درصد مواد اشباع ^۶ (wt%)
۲۲/۳	درصد آروماتیک ^۷ (wt%)
۷/۷	درصد آسفالتین ^۸ (wt%)
۶/۷	درصد رزین ^۹ (wt%)
۱/۶۳	محتوای سولفور ^{۱۰} (wt%)
اندک	محتوای آب ^{۱۱} (wt%)
۴	محتوای نمک ^{۱۲} (Lbs per 1000 bbls)
۹/۳	درصد افت مقدار در 200°C (wt%)

¹ Kinematic viscosity

² Pour point

³ Flash point

⁴ Acidity number

⁵ Reid vapor pressure (RVP)

⁶ Saturated

⁷ Aromatic

⁸ Asphaltene

⁹ Resin

¹⁰ Sulphur content

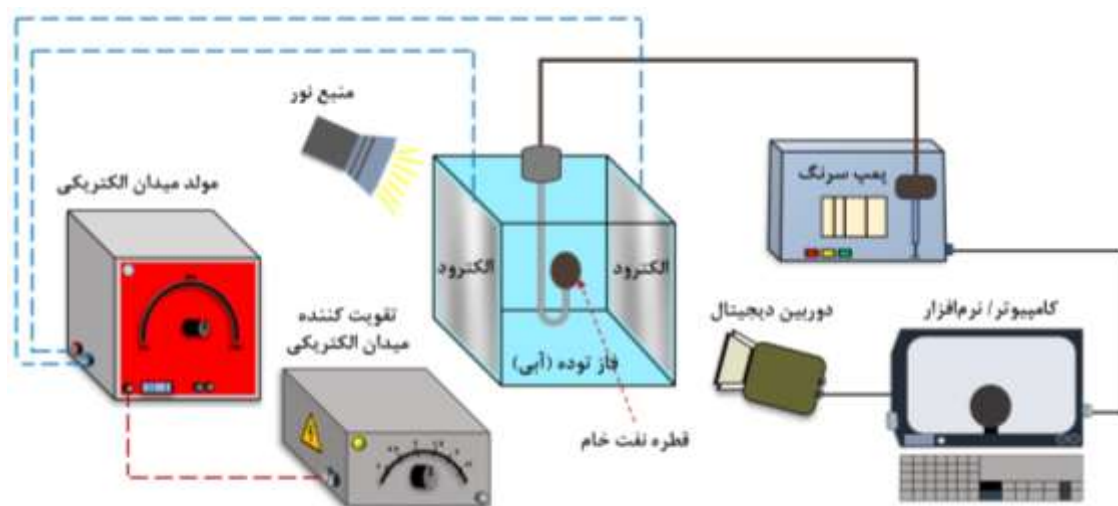
¹¹ Water content

¹² Salt content

۲-۲- دستگاه و روش اندازه‌گیری کشش بین سطحی

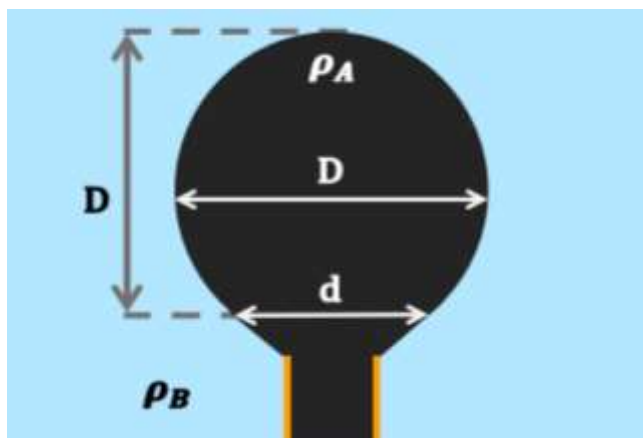
به منظور اندازه‌گیری کشش بین سطحی دینامیکی و تعادلی، تمامی آزمایش‌ها در دما و فشار اتاق با استفاده از روش قطره آویزان انجام شد. این روش به دلیل دقت بالا و هزینه‌ی نسبتاً کم، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود. برای بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب، دستگاه اندازه‌گیری به یک مولد و یک تقویت‌کننده‌ی میدان الکتریکی مجهز شد. در این مجموعه‌ی آزمایشگاهی که در شکل ۲ ارائه شده است، دو الکتروستیل ضد زنگ به صورت متقارن درون سل شیشه‌ای نصب شدند تا امواج الکتریکی تولید شده را به فضای داخل سل منتقل کنند.

در این آزمایش، نفت خام ابتدا در یک سرنگ شیشه‌ای مدرج و کاملاً تمیز به حجم 10 cm^3 منتقل شد. سپس، با استفاده از پمپ سرنگ مدل (JMS S P-510)، با شدت جریان تنظیم‌شده از طریق یک لوله باریک هدایت شد. در این مرحله، یک قطره آویزان بر نوک نازل درون فاز پیوسته‌ی آبی تشکیل می‌شد و قطره در معرض امواج میدان الکتریکی قرار می‌گرفت.



شکل ۲. نمای کلی مجموعه‌ی آزمایشگاهی اندازه‌گیری کشش بین سطحی به روش قطره آویزان در حضور میدان الکتریکی.

از آنجایی که چگالی نفت خام کمتر از فاز آبی است، برای تشکیل قطره معلق از یک نازل برگشتی استفاده شد تا بدین ترتیب قطره نفت درون آب تشکیل شود. شکل قطره‌ی معلق ایجاد شده بر نوک نازل ناشی از تعادل بین نیروهای موئینگی و گرانش است [۱۹] که در شکل ۳ نمایش داده شده است. دوربین دیجیتال با دقت ۴ مگاپیکسل، که به لنزی با قابلیت بزرگنمایی مجهز بود، به کمک منبع نور تصاویر قطره را ثبت کرد. پردازش این تصاویر امکان محاسبه‌ی کشش بین سطحی دو مایع غیرقابل امتزاج را فراهم ساخت.



شکل ۳. شکل قطره نفتی معلق تشکیل شده در نوک نازل درون فاز آبی.

نرم‌افزار دستگاه با تجزیه و تحلیل شکل هندسی قطره، کشش بین سطحی را با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌نماید [۲۰]:

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

در این رابطه $\Delta \rho$ اختلاف چگالی دو فاز، g شتاب گرانش، D قطر استوایی قطره و H کمیت وابسته به شکل قطره هستند. کمیت H به فاکتور شکلی $S = d / D$ بستگی دارد که در آن d طول استوایی^۱ قطره در نقطه‌ای به فاصله بیشترین قطر از لبه بالایی قطره است. مقادیر $1/H$ برحسب S در مراجع ذکر شده است [۲۱ و ۲۰]. به‌منظور اطمینان از دقت اندازه‌گیری‌ها، هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شد.

شایان ذکر است که ویژگی‌های میدان الکتریکی به‌گونه‌ای تنظیم شده که ضمن اثرگذاری بر کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب، به دلیل بازه محدود ولتاژ، مزایا و عملکرد مناسب‌تری از لحاظ مصرف انرژی الکتریکی و نیز ایجاد شرایط ایمن برای اپراتور به همراه داشته باشد. این درحالی است که در پژوهش‌های مشابه از میدان‌های الکتریکی با ولتاژ بالا تا ۱ kV/cm (صدها برابر بزرگتر) استفاده شده است [۲۳ و ۲۲].

۳- بحث و نتیجه‌گیری

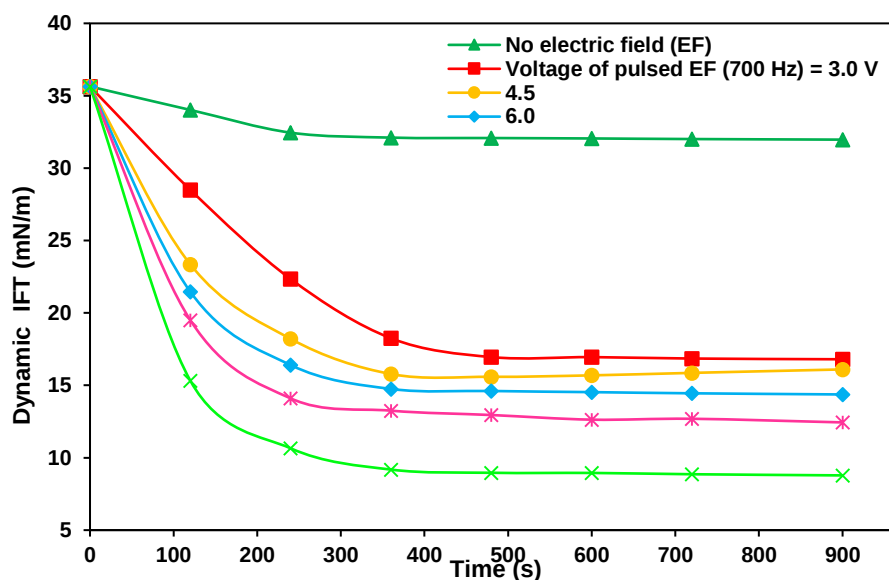
۳-۱- کشش بین سطحی دینامیکی

نظر به آن‌که کشش بین سطحی دینامیک از آغاز تا رسیدن به نقطه تعادل با استفاده از روش قطره آویزان قابل اندازه‌گیری است، نیاز هست که پیش از انجام آزمایش‌ها، از به تعادل رسیدن سیستم اطمینان حاصل شود. کشش بین سطحی برای هر ولتاژ و فرکانس میدان الکتریکی مستقیم و نوسانی در آغاز با زمان کاهش می‌یابد (کشش بین سطحی دینامیکی) و پس از مدتی

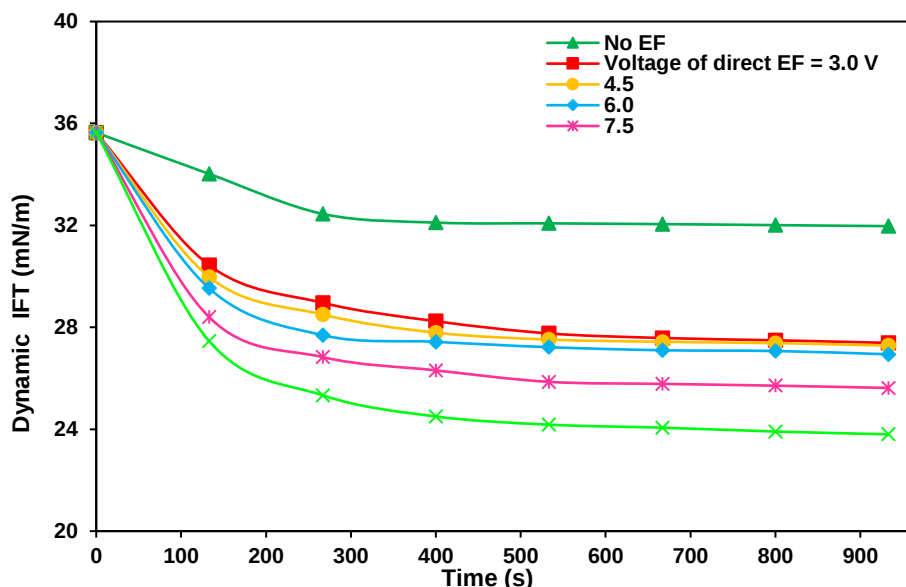
^۱ Equatorial

تغییرات نسبت به زمان صفر شده و مقدار کشش بین سطحی ثابت می‌شود، این مقدار ثابت به‌عنوان کشش بین سطحی تعادلی در نظر گرفته می‌شود.

در نتیجه برای دستیابی به شرایط تعادلی لازم است که به سیستم زمان کافی داده شود تا بعد از تشکیل قطره، مولکول‌های سورفکتانت‌های طبیعی در سطح مشترک نمایان شوند. اگر زمان کافی به سیستم داده نشود امکان دارد که تجمع سورفکتانت‌ها در سطح مشترک به شکل ناقص صورت گرفته و خطا ایجاد کند. به جهت استنباط بهتر، در شکل ۴ تغییرات کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب برحسب زمان در حضور میدان الکتریکی نوسانی با ولتاژهای مختلف تحت فرکانس بهینه ۷۰۰ Hz، در مقایسه با حالت عدم حضور میدان الکتریکی نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ولتاژ، کشش بین سطحی سریع‌تر و در زمان کوتاه‌تری کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه روند تغییرات کشش بین سطحی سیستم در حضور میدان الکتریکی مستقیم با ولتاژهای مختلف در شکل ۵ آورده شده است.



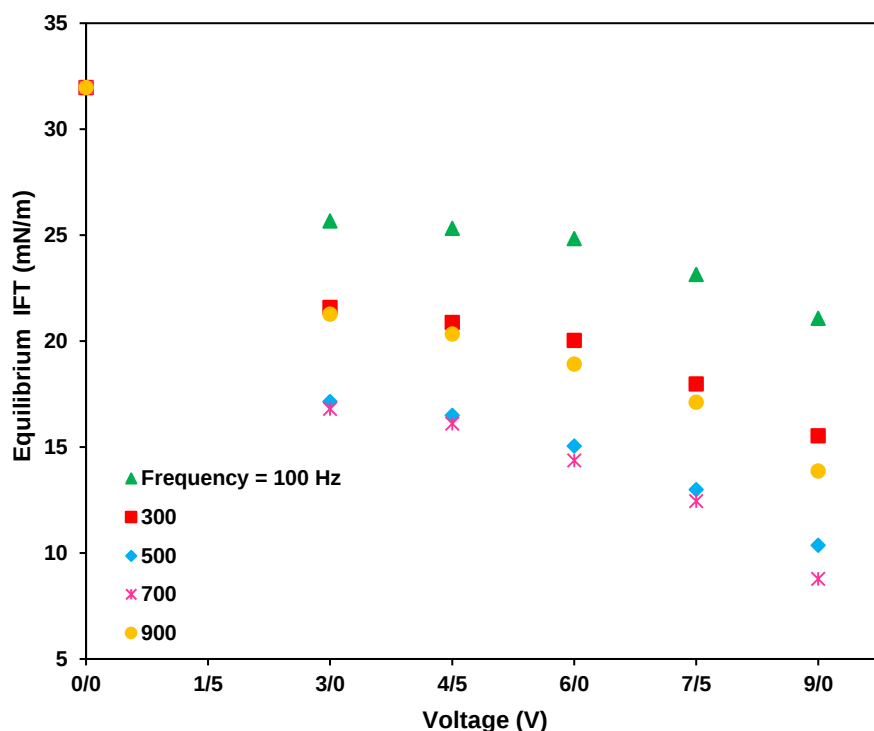
شکل ۴. تغییرات کشش بین سطحی دینامیکی سیستم نفت خام-آب برحسب زمان در ولتاژهای مختلف میدان الکتریکی نوسانی تحت فرکانس بهینه ۷۰۰ Hz.



شکل ۵. تغییرات کشش بین سطحی دینامیکی سیستم نفت خام-آب برحسب زمان در ولتاژهای مختلف میدان الکتریکی مستقیم. با توجه به نتایج حاصل، کشش بین سطحی سیستم در زمان‌های کم، کاهش یافته و بعد از گذشت حداکثر زمانی در حدود ۲۵۰ تا ۵۰۰ ثانیه، مستقل از زمان گردیده و تقریباً ثابت می‌ماند. علت این شرایط تداوم مهاجرت مولکول‌های سورفکتانت‌های طبیعی نفت به سطح مشترک قطره و فاز پیوسته تا دستیابی به میزان تعادلی می‌باشد. برای سایر فرکانس‌ها نیز روند تغییرات و محاسبه کشش بین سطحی تعادلی همین‌گونه می‌باشد. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته زمان رسیدن به تعادل برای سیستم تحت میدان‌های الکتریکی مستقیم و نوسانی در بازه (۲۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه) بود. لیکن برای اطمینان از به تعادل رسیدن سیستم نفت خام-آب، کشش بین سطحی بعد از سپری شدن حداقل ۹۰۰ ثانیه انتخاب شد.

۲-۳- کشش بین سطحی تعادلی

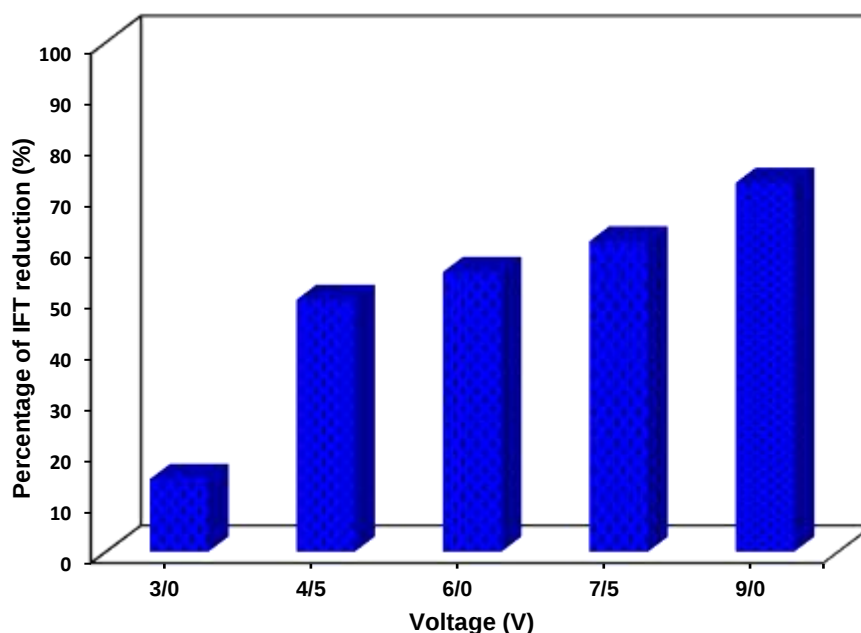
دو پارامتر عملیاتی مهم ولتاژ و فرکانس میدان الکتریکی بر بهبود کاهش کشش بین سطحی موثر هستند. تغییرات کلی کشش بین سطحی تعادلی برای سیستم نفت خام-آب برحسب ولتاژ میدان الکتریکی در فرکانس‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کشش بین سطحی سیستم با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. مقدار اولیه کشش بین سطحی سیستم در غیاب میدان الکتریکی $32/0 \text{ mN/m}$ بوده و در حضور میدان الکتریکی به $8/8 \text{ mN/m}$ کاهش یافته است. بنا بر این بیشینه درصد کاهش کشش بین سطحی و به دنبال آن بهبود بازیابی نفت خام که به دلیل غلبه تنش‌های الکتریکی بر نیروهای کشش بین سطحی فراهم شده است برابر با $72/5\%$ می‌باشد.



شکل ۶ تغییرات کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب در فرکانس‌های مختلف برحسب ولتاژ میدان الکتریکی.

مشاهده می‌شود که با اعمال میدان الکتریکی، در ولتاژ نسبتاً کم کاهش کشش بین سطحی شیب بیشتری دارد. این به دلیل تاثیر امواج میدان الکتریکی بر افزایش جذب سطحی سورفکتانت‌های طبیعی در سطح مشترک می‌باشد [۲۲]. همچنین در شروع، تعداد کمتری از مولکول‌های فعال سطحی طبیعی در سطح مشترک جذب شده و فضای بیشتری برای جذب سطحی باقی می‌ماند، از این رو جذب سطحی آن‌ها در سطح مشترک آسان‌تر شده که منجر به کاهش کشش بین سطحی با روند سریع‌تر می‌شود. با وجود کند شدن روند کاهش کشش بین سطحی، افزایش ولتاژ موثر سبب مهاجرت بیشتر مولکول‌ها به سطح مشترک شده و در نتیجه کشش بین سطحی به میزان بیشتری کاهش می‌یابد [۲۴].

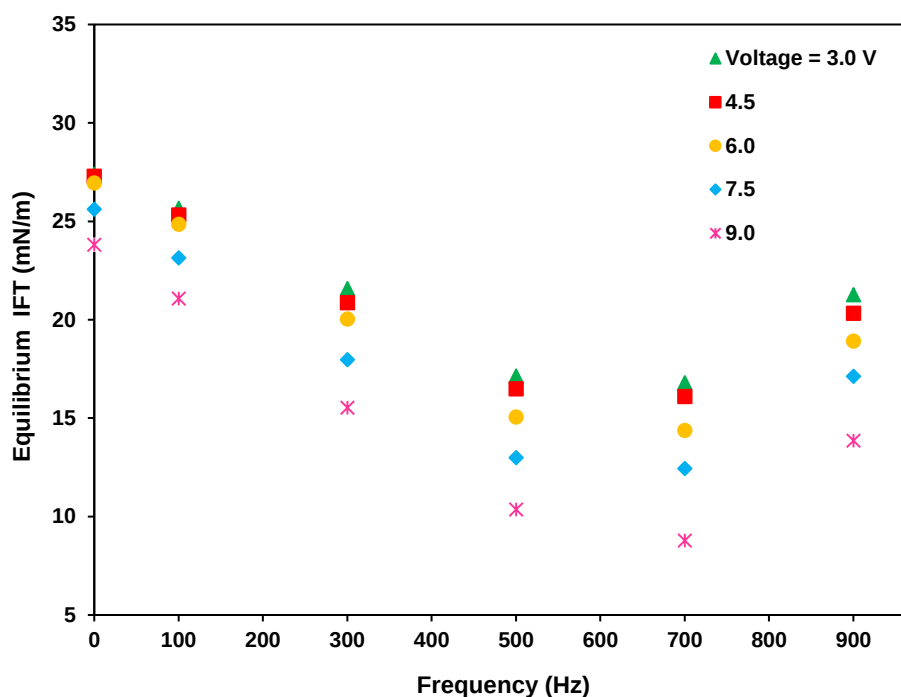
همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، علت این امر این است که میدان الکتریکی با ایجاد جریان‌های الکتروهایدرو دینامیک در اطراف سطح مشترک و نیز جابه‌جایی مدام قطب‌ها، انرژی جنبشی مولکول‌ها را افزایش داده، فرآیند انتقال، تجمع و جذب سورفکتانت‌های طبیعی نفت در سطح مشترک را تشدید کرده و منجر به کاهش بیشتر کشش بین سطحی می‌شود. همچنین توزیع غیریکنواخت مولکول‌های سورفکتانت طبیعی در سطح مشترک و ایجاد ناپایداری بین سطحی از یک سو و عدم تطابق در گذردهی و هدایت الکتریکی دو فاز نفت خام و آب از سوی دیگر نیز به کاهش کشش بین سطحی و بهبود بازیابی نفت خام می‌انجامد. افزون بر این، ارتعاش مولکول‌های فعال سطحی طبیعی موجود در سطح مشترک تحت تاثیر امواج میدان الکتریکی نوسانی به کاهش بیشتر این پدیده کمک می‌نماید. نمودار شکل ۷ تغییرات درصد کاهش کشش بین سطحی سیستم حاوی سورفکتانت‌های طبیعی برحسب ولتاژ موثر میدان الکتریکی نوسانی در فرکانس بهینه ۷۰۰ Hz را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نحوه تغییر درصد کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب با ولتاژ میدان الکتریکی نوسانی تحت فرکانس ثابت ۷۰۰ Hz. از پارامترهای عملیاتی دیگری که تاثیر مهمی بر کشش بین سطحی دارد، فرکانس میدان الکتریکی می‌باشد. شکل ۸ اثر فرکانس میدان الکتریکی بر کاهش کشش بین سطحی تعادلی در حضور سورفکتانت‌های طبیعی نفت خام را تحت ولتاژهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب، ابتدا با افزایش فرکانس کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این وضعیت نشان می‌دهد که پارامتر فرکانس میدان الکتریکی دارای نقطه بهینه می‌باشد. در فرکانس‌های پایین میزان جابه‌جایی قطب‌ها نسبت به زمان کم و در نتیجه جابه‌جایی سورفکتانت‌ها نیز محدود می‌شود. این محدودیت در جابه‌جایی منجر به افزایش ناکافی جذب مولکول‌های سورفکتانت طبیعی نفت خام در سطح مشترک نفت خام-آب و کاهش ناچیز کشش بین سطحی می‌شود. از طرفی در فرکانس‌های بیش از مقدار بهینه، جابه‌جایی سریع قطب‌ها و به دنبال آن جابه‌جایی سورفکتانت-ها در بازه زمانی بسیار کوتاه (بیش از ۶۰۰ بار در ثانیه) عملاً مانع از انتقال و جذب موثر مولکول‌های سورفکتانت طبیعی در سطح مشترک فازها می‌شود که علت این امر وقوع پدیده میرایی^۱ می‌باشد.

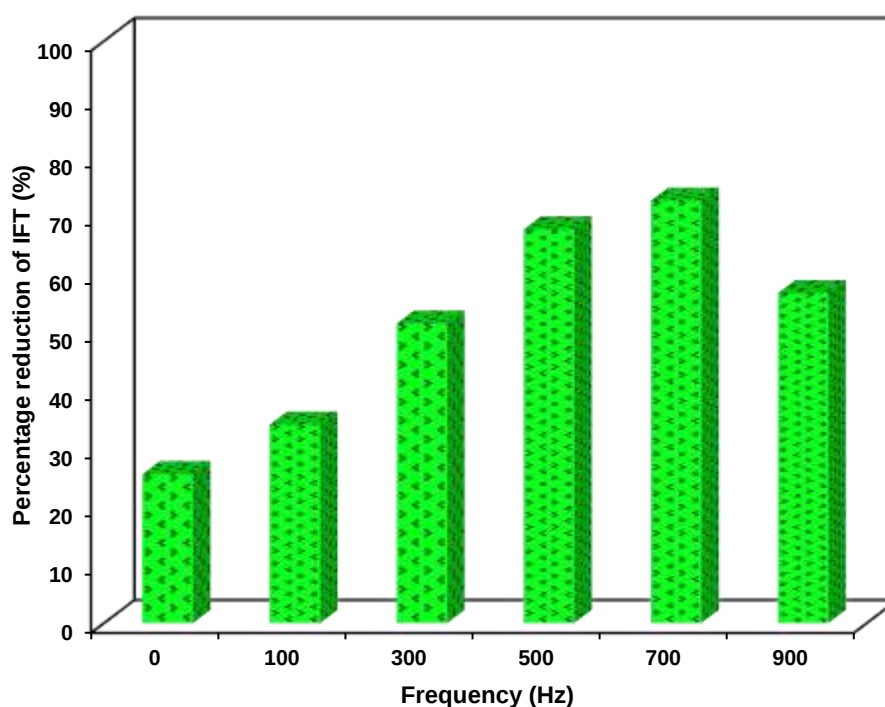
بنابراین تبادل سریع قطب‌ها در فرکانس‌های بالا، دامنه جابه‌جایی ناشی از حرکات القایی الکتریکی مولکول‌های سورفکتانت را به‌شدت کاهش داده و مانع از جذب و ایجاد اثر مفید در تضعیف نیروهای جاذبه بین مولکولی در ناحیه فصل و کاهش کشش بین سطحی می‌شود [۲۵].

¹ Damping



شکل ۸. تغییرات کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب با ولتاژهای مختلف برحسب فرکانس میدان الکتریکی نوسانی.

از این رو برای دستیابی به بالاترین میزان کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب لازم است فرکانس در حدود مقدار بهینه ۷۰۰ Hz تنظیم شود. یافتن نقاط بهینه برای پارامتر فرکانس میدان الکتریکی نوسانی در پژوهش‌های دیگری که به بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر کاهش کشش بین سطحی همچنین ارتقاء ضریب انتقال جرم در فرآیند استخراج مایع-مایع پرداخته‌اند، مورد توجه قرار گرفته است [۱۸ و ۲۶]. شایان ذکر است که مقدار فرکانس بهینه در سیستم‌های شیمیایی مختلف، متفاوت بوده و به ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نظیر نوع نفت خام، نوع و بار سورفکتانت‌ها، دانسیته و ویسکوزیته فازها همچنین خواص الکتریکی شامل گذردهی و هدایت الکتریکی دو فاز وابسته می‌باشد [۲۷]. در نمودار شکل ۹ اثر فرکانس میدان الکتریکی بر درصد کاهش کشش بین سطحی در حضور سورفکتانت‌های طبیعی تحت ولتاژ بیشینه نمایش داده شده است.

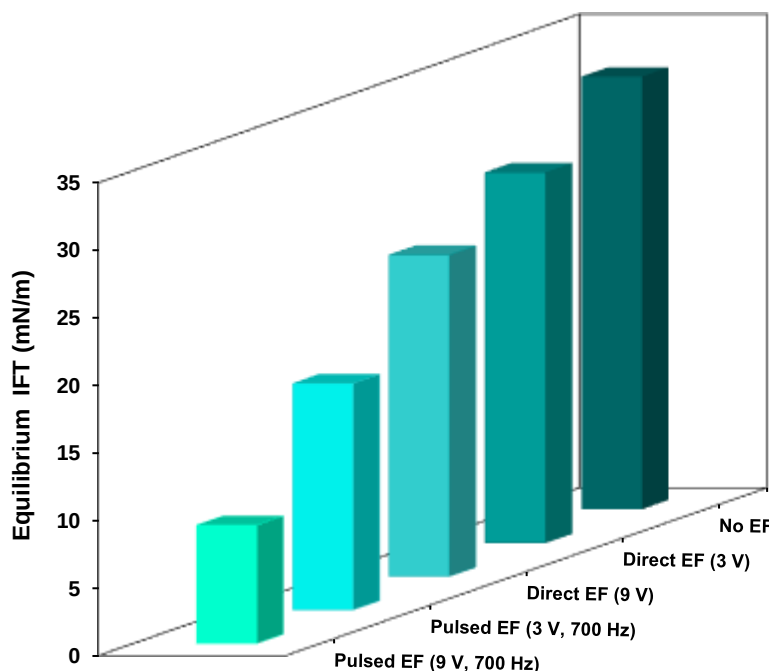


شکل ۹. تغییرات درصد کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب با فرکانس میدان الکتریکی نوسانی تحت ولتاژ بیشینه ۷ V.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر اثر فرکانس در میدان الکتریکی، نقش میدان الکتریکی مستقیم نیز در میزان ولتاژ برابر در مقایسه با میدان الکتریکی در فرکانس بهینه (۷۰۰ Hz) بر کشش بین سطحی سیستم مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۱۰ آورده شده است. مشخص شد که کشش بین سطحی تحت تاثیر امواج میدان الکتریکی بدون فرکانس نیز کاهش می‌یابد، هرچند که این تاثیر نسبت به میدان الکتریکی دارای فرکانس کمتر می‌باشد. به گونه‌ای که کشش بین سطحی از مقدار اولیه ۳۲/۰ mN/m در غیاب میدان الکتریکی به ۲۳/۸ mN/m در حضور ولتاژ موثر بیشینه میدان الکتریکی مستقیم کاهش یافته است و میزان درصد این کاهش ۲۵/۶٪ بوده که نسبت به میزان درصد کاهش کشش بین سطحی تحت میدان الکتریکی نوسانی (۷۲/۵٪) کمتر می‌باشد. در این حالت جابه‌جایی مداوم قطب‌ها وجود نداشته و تاثیر میدان الکتریکی بر کاهش کشش بین سطحی تنها مربوط به جریان‌های الکتروهایدرودینامیک اطراف سطح مشترک فازها و پدیده مارانگونی^۱ می‌باشد که این پدیده از دو عامل ناشی می‌شود: اول، تفاوت در هدایت الکتریکی فازها و دوم، توزیع نامتقارن سورفکتانت‌های طبیعی در سمت قطب‌های ناهم‌نام. با توجه به اینکه بار سورفکتانت‌های طبیعی عمدتاً مثبت است، این تجمع بیشتر به سمت قطب منفی الکتروود رخ می‌دهد. در نهایت، این عوامل به ناپایداری سطحی و تضعیف نیروهای جاذبه بین مولکولی در سطح مشترک منجر شده که کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب و بهبود بازیابی نفت خام را به همراه دارد [۲۹ و ۲۸].

^۱ Marangoni

در پایان، نمودار شکل ۱۰ به خوبی تفاوت عملکرد میدان‌های الکتریکی نوسانی و مستقیم را در کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب ارائه می‌دهد. کمترین کشش بین سطحی در حضور میدان الکتریکی نوسانی با ولتاژ بیشینه (۹ V) و فرکانس بهینه (۷۰۰ Hz) حاصل شد.



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد میدان‌های الکتریکی مستقیم و نوسانی در کاهش کشش بین سطحی سیستم نفت خام-آب.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش کاربرد میدان الکتریکی به عنوان یک روش نوین برای کاهش کشش بین سطحی در سیستم نفت خام-آب و بهبود بازیابی نفت خام مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارتقای اثر مواد فعال سطحی طبیعی موجود در نفت خام از طریق اعمال میدان‌های الکتریکی بود. برای این منظور، میدان‌های الکتریکی با محدوده فرکانس‌ها و ولتاژهای مختلف به سیستم اعمال شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال میدان الکتریکی کم ولتاژ و ایمن در صنعت نفت می‌تواند نتایج مطلوبی را در افزایش برداشت از مخازن نفتی موجب شود، به نحوی که، کشش بین سطحی در فرکانس بهینه و حداکثر ولتاژ اعمالی به میزان ۷۲/۵٪ کاهش یافت.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه بوعلی سینا به لحاظ حمایت از این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

۶- فهرست منابع و مآخذ

[1] Donaldson, E. C., Chilingarian, G. V., & Yen, T. F. (1989). *Enhanced Oil Recovery, II: Processes and Operations*. Elsevier.

- [2] Tunio, S. Q., Tunio, A. H., Ghirano, N. A., & El Adawy, Z. M. (2011). Comparison of different enhanced oil recovery techniques for better oil productivity. *Int. J. Appl. Sci.*, 1(5), 143-152.
- [3] Nandwani, S. K., Malek, N. I., Chakraborty, M., & Gupta, S. (2020). Insight into the application of surface-active ionic liquids in surfactant based enhanced oil recovery processes—a guide leading to research advances. *Energy & Fuels*, 34(6), 6544-6557.
- [4] Ali, H., Soleimani, H., Yahya, N., Khodapanah, L., Sabet, M., Demiral, B. M., Hussain, T., & Adebayo, L. L. (2020). Enhanced oil recovery by using electromagnetic-assisted nanofluids: A review. *J. Mol. Liq.*, 309, 113095.
- [5] Luo, X., Gong, H., He, Z., Zhang, P., & He, L. (2021). Recent advances in applications of power ultrasound for petroleum industry. *Ultrason. Sonochem.*, 70, 105337.
- [6] Thomas, S. (2008). Enhanced oil recovery—An overview. *Oil. Gas. Sci. Technol.*, 63, 9-19.
- [7] Feng, J. Q., & Scott, T. C. (1996). A computational analysis of electrohydrodynamics of a leaky dielectric drop in an electric field. *J. Fluid Mech.*, 311, 289-326.
- [8] Cloupeau, M., & Prunet-Foch, B. (1994). Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review. *J. Aerosol Sci.*, 25(6), 1021-1036.
- [9] He, Y., Yazhgur, P., Salonen, A., & Langevin, D. (2015). Adsorption–desorption kinetics of surfactants at liquid surfaces. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 222, 377-384.
- [10] Lemahieu, G., Ontiveros, J. F., Souza, N. T. T., Molinier, V., & Aubry, J. M. (2021). Fast and accurate selection of surfactants for enhanced oil recovery by dynamic Salinity-Phase-Inversion (SPI). *Fuel*, 289, 119928.
- [11] Jones, D. M., Watson, J. S., Meredith, W., Chen, M., & Bennett, B. (2001). Determination of naphthenic acids in crude oils using nonaqueous ion exchange solid-phase extraction. *Anal. Chem.*, 73(3), 703-707.
- [12] Sjöblom, J., Aske, N., Auflem, I. H., Brandal, Ø., Havre, T. E., Sæther, Ø., Westvik, A., Johnsen, E. E. & Kallevik, H. (2003). Our current understanding of water-in-crude oil emulsions.: Recent characterization techniques and high pressure performance. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 100, 399-473.
- [13] Xia, S., & Kostarelos, K. (2020). The charge alteration of asphaltenes during electro-deposition. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 598, 124808.
- [14] Taylor, G. I. (1966). Studies in electrohydrodynamics. I. The circulation produced in a drop by an electric field. *Proceed. Royal Soc. A. Math. Phys. Sci.*, 291(1425), 159-166.
- [15] Roques-Carmes, T., Palmier, S., Hayes, R. A., & Schlangen, L. J. (2005). The effect of the oil/water interfacial tension on electrowetting driven fluid motion. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 267(1-3), 56-63.
- [16] Khorshidi, B., Jalaal, M., & Esmaeilzadeh, E. (2011). Electrohydrodynamic instability at the interface between two leaky dielectric fluid layers. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 380(1-3), 207-212.

- [17] Saville, D. (1997). Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher leaky dielectric model. *Annu. Review fluid Mech.*, 29(1), 27-64.
- [18] Vizika, O., & Saville, D. A. (1992). The electrohydrodynamic deformation of drops suspended in liquids in steady and oscillatory electric fields. *J. fluid Mech.*, 239, 1-21.
- [19] Dantas, T. C., Moura, E. F., Júnior, H. S., Neto, A. D., & Gurgel, A. (2002). Micellization and adsorption thermodynamics of novel ionic surfactants at fluid interfaces. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 207(1-3), 243-252.
- [20] Erbil, H. Y. (2006). *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*. Wiley-Blackwell Publishing.
- [21] Misak, M. D. (1968). Equation for determining $1/H$ versus S values in computer calculations of interfacial tension by the pendant drop method. *J. Collid Interface Sci.*, 27, 141-142.
- [22] Sengupta, R., Khair, A. S., & Walker, L. M. (2020). Dynamic interfacial tension measurement under electric fields allows detection of charge carriers in nonpolar liquids. *J. Colloid Interface Sci.*, 567, 18-27.
- [23] Mhatre, S., Simon, S., & Sjoblom, J. (2020). Experimental Evidence of Enhanced Adsorption Dynamics at Liquid-Liquid Interfaces under an Electric Field. *Anal. Chem.*, 92(19), 12860-12870.
- [24] Giustiniani, A., Drenckhan, W., & Poulard, C. (2017). Interfacial tension of reactive, liquid interfaces and its consequences. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 247, 185-197.
- [25] Lermé, J. (2011). Size evolution of the surface plasmon resonance damping in silver nanoparticles: Confinement and dielectric effects. *J. Phys. Chem.*, 115(29), 14098-14110.
- [26] Zhang, L., Chen, J., Cai, X., Huang, S., & Ji, Y. (2017). Research on electrostatic coalescence of water-in-crude-oil emulsions under high frequency/high voltage AC electric field based on electro-rheological method. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 520, 246-256.
- [27] Jafari, F., & Saien, J. (2022). Experimental and model study for liquid-liquid extraction of conductive nanofluid drops under low voltage pulsed electric fields. *Chem. Eng. Sci.*, 258, 117762.
- [28] Palizdan, S., Abbasi, J., Riazi, M., & Malayeri, M. R. (2020). Impact of solutal Marangoni convection on oil recovery during chemical flooding. *Pet. Sci.*, 17, 1298-1317.
- [29] Mitra, S., Singh, S. K., Shevchenko, E., Sachan, M., Ghosh, A., Basak, M., & Gooh Pattader, P. S. (2020). Efficient microextraction process exploiting spontaneous interfacial convection driven by Marangoni and electric field induced instability: A computational fluid dynamics study. *Phys. Fluids*, 32(1), 014102.