



Investigation and Optimization of Effective Parameters in the Process of Desalination of Crude Oil by Electrostatic Method

H. Mehdizadeh¹, GH. R. Moradi^{2*}

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Razi University

2- Professor of Chemical Engineering, Razi University

Email: gmoradi@razi.ac.ir

Abstract

The purpose of desalination in production units is to separate salt and water from the flow of crude oil in order to prevent corrosion and damage to facilities. In this study, the effect of effective parameters including temperature, demulsifier injection rate, dilution water injection rate and desalting device voltage on the efficiency of the desalination process of crude oil by electrostatic method to reach optimal conditions (Reaching the amount of salt and water in oil to less than 10 pounds per thousand barrels and 0.1 percent by volume, respectively) has been investigated. An increase in oil temperature causes a decrease in viscosity and accelerates the desalination process, and in this study, the optimum value was obtained at 48 degrees Celsius. Injection of demulsifier at the rate of 40 ppm and diluting water at the rate of 3% by volume of oil is necessary to achieve the highest separation efficiency. By applying 20 Kv of direct current in the desalination plant, the lowest amount of salt and energy consumption can be achieved.

Received: 2 July 2023

Accepted: 16 April 2024

Page Number: 22-34

Keywords:

Crude Oil,
Desalination,
Electrostatic,
Demulsifier

Please Cite this Article Using:

Mehdizadeh, H., & Moradi, GH. R. (2025). Investigation and Optimization of Effective Parameters in the Process of Desalination of Crude Oil by Electrostatic Method. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(133), 22-34, [In Persian].



بررسی و بهینه‌سازی مشخصه‌های مؤثر در فرایند نمک‌زدایی از نفت خام به روش الکترواستاتیک

حمید مهدی‌زاده^۱، غلامرضا مرادی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه رازی

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه رازی

پیام‌نگار: gmoradi@razi.ac.ir

چکیده

هدف از نمک‌زدایی در واحدهای بهره‌برداری جداسازی نمک و آب از جریان نفت خام، جلوگیری از خوردگی و آسیب به تأسیسات است. در این مطالعه تأثیر مشخصه‌های مؤثر شامل دما، نرخ تزریق مادهٔ امولسیون‌زدا، میزان تزریق آب رقیق‌کننده و ولتاژ دستگاه نمک‌زدا در بازه فرایند نمک‌زدایی از نفت خام به روش الکترواستاتیک برای رسیدن به شرایط بهینه (رسیدن مقدار نمک و آب همراه در نفت به ترتیب به کمتر از ۱۰ پوند در هزار بشکه و ۰/۱ درصد حجمی) بررسی شده است. افزایش دمای نفت موجب کاهش گران‌روی می‌شود و فرایند نمک‌زدایی را سرعت می‌بخشد که در این بررسی دمای ۴۸ درجهٔ سلسیوس مقدار بهینه به دست آمد. تزریق مادهٔ امولسیون‌زدا به میزان ۴۰ ppm و آب رقیق‌کننده به مقدار ۳٪ حجمی از نفت برای رسیدن به بالاترین راندمان جداسازی ضروری است. با اعمال ۲۰ کیلوولت جریان مستقیم در نمک‌زدا می‌توان به کمترین میزان نمک و مقدار صرف انرژی دست یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸

شماره صفحات: ۲۲ تا ۳۴

کلیدواژه‌ها:

نفت خام،

نمک‌زدایی،

الکترواستاتیک،

امولسیون‌زدا

* کرمانشاه، دانشگاه رازی، دانشکدهٔ پتروشیمی و نفت، گروه مهندسی شیمی
استناد به مقاله:

مهدی‌زاده، حمید، و مرادی، غلامرضا. (۱۴۰۳). بررسی و بهینه‌سازی مشخصه‌های مؤثر در فرایند نمک‌زدایی از نفت خام به روش الکترواستاتیک، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳ (۱۳۶)، ۲۲-۳۴.

۱. مقدمه

اغلب، نفت استحصال‌شده از میدان‌های نفتی با ناخالصی‌های گوناگونی مانند ذرات جامد، آب، گل، املاح، نمک، مقدار اندکی از فلزات نیکل، سرب، مس، وانادیوم، کادمیوم و آرسنیک همراه است که باید پیش از ورود نفت به پالایشگاه، مقدار این ناخالصی‌ها به کمترین میزان ممکن برسد [۱]. ساختار نمک‌های محلول در نفت، اغلب به‌شکل کلرید سدیم و نمک‌های کلسیم و منیزیم است و با حرارت‌دادن به نفت مخلوطی از ترکیبات سولفات‌ها، کلریدها و کربنات‌های جامد باقی می‌ماند که این نمک‌های محلول در نفت هیدروژن کلرید آزاد می‌کنند و حتی وجود مقدار پایین کلریدریک موجب می‌شود که خاصیت خوردندگی ترکیبات سولفوری بالا برود [۲ و ۳]. بنابراین، نمک‌زدایی از نفت در واحدهای بهره‌برداری تا رسیدن به مقدار کمتر از ده پوند در هر هزار بشکه^۱ لازم و ضروری است و حتی در بسیاری از پالایشگاه‌های نفت در حالاتی که مقدار نمک موجود در نفت خام از این میزان هم پایین‌تر باشد - به دلیل خوردگی و رسوب نمک در تأسیسات و آسیب دیدن کاتالیست‌های مورد استفاده در عملیات‌های گوناگون پالایش - اقدام به نمک‌گیری از نفت ورودی می‌کنند [۴].

قطره‌های بزرگ آب پراکنده‌شده در نفت، طی مدت‌زمان کوتاهی ته‌نشین می‌شوند؛ ولی قسمتی از آب که به شکل قطره‌های ریزتر و امولسیون در نفت است، به‌آسانی ته‌نشین یا جدا نمی‌شوند، در واقع هر اندازه که قطره‌های آب ریزتر باشند، ته‌نشین شدن یا جدا کردن آن‌ها از نفت خام سخت‌تر خواهد بود. آب موجود در نفت براساس قطر قطره‌های آب پراکنده‌شده، به سه دسته تقسیم می‌شود: آب آزاد، آب امولسیون‌شده و آب حل‌شده. آب حل‌شده در نفت ته‌نشین نمی‌شود و در واقع حلالیت آب در نفت به میزان بالایی به دما و نوع هیدروکربن‌های موجود در نفت خام وابسته است.

در تعریف امولسیون، مایعی که به شکل قطره‌های ریز و کوچک پراکنده و ناپیوسته باشد فاز پراکنده است و به مایعی که آن قطره‌ها را احاطه کرده است، فاز پیوسته می‌گویند. در واقع کاربرد امولسیون‌ها در صنعت بسیار زیاد است و در صنایع مهمی از جمله صنایع غذایی، تولید خمیر کاغذ و مقوا، آرایشی، دارویی، سیالات زیستی، صنعت کشاورزی و مهندسی نفت یافت می‌شوند [۵].

امولسیون تشکیل‌شده به‌شکل آب در نفت خام ممکن است در هر کدام از مراحل تولید نفت و مشتقات آن و یا صنایع فرایندی ایجاد شود و از راه عوامل مختلف پایدار شود که پایداری این امولسیون‌ها به عوامل مختلفی وابسته است که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است [۶]:

- اندازه قطره‌ها

- اختلاف چگالی فاز پیوسته و فاز پراکنده

- گرانروی

- غلظت مواد تعلیق‌کننده و امولسیون‌زدا

- نسبت حجم فازها

- دما

- خاصیت الکترولیتی آب‌نمک موجود در نفت

روش‌های مختلفی برای جداسازی آب و نمک‌ها از نفت خام شامل موارد زیر وجود دارد [۷-۹]:

- ۱- روش ته‌نشینی با نیروی ثقل ۲- روش حرارتی ۳- استفاده از مواد امولسیون‌زدا ۴- شست‌وشو با آب رقیق‌کننده ۵- روش مکانیکی
- ۶- روش الکتریکی ۷- استفاده از غشا ۸- استفاده از امواج فراصوت
- ۹- روش زیستی

اساس جداسازی نمک از نفت به‌روش الکترواستاتیک، در واقع ترکیب چند روش از موارد ذکر شده است و شامل افزایش درجه حرارت و بالابردن دمای نفت برای کاهش گرانروی آن و تزریق ماده شیمیایی امولسیون‌زدا به منظور به هم پیوستن قطره‌های آب در نفت و هم‌چنین تزریق آب رقیق‌کننده به نفت ورودی به نمک‌زدا برای رقیق‌سازی و حل کردن نمک‌ها و املاح موجود در نفت و بعد از آن جداسازی آب در پکیج نمک‌زدا با اعمال جریان و تشکیل میدان الکتریکی است. برتری این روش این است که چند روش جداسازی باهم ترکیب شده و نسبت به روش‌های دیگری مانند استفاده از غشا یا امواج فراصوت دارای بازده بالاتر و راندمان اقتصادی بیشتر است. عوامل گوناگونی بر بازده فرایند نمک‌زدایی از نفت تأثیر دارد که از جمله می‌توان به چگالی و گرانروی نفت خام، ولتاژ اعمالی و میدان الکتریکی، نسبت حجمی آب رقیق‌کننده به نفت خام، ولتاژ اعمالی، اختلاف فشار در شیر اختلاط و میزان ماده امولسیون‌زدای تزریقی اشاره کرد [۱۰]. هدف از مطالعه پیش‌رو، بررسی تأثیر عواملی از جمله دمای نفت، افت فشار در شیر اختلاط آب رقیق‌کننده و نفت،

1. Pounds of Salt Per Thousand Barrels

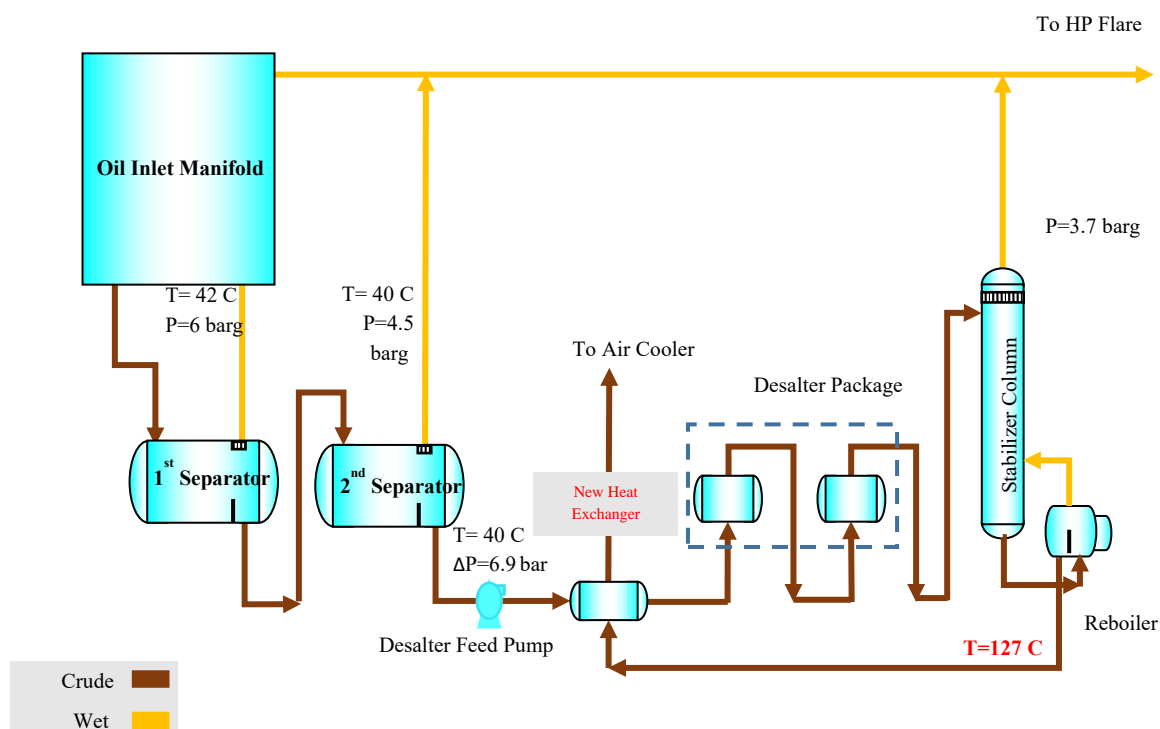
امولسیون‌زدا پیش‌از این مرحله موجب می‌شود که راندمان جداسازی در این تفکیک‌گرها بیشتر شود و مقدار آب همراه نفت به کمتر از ۲٪ برسد و برای جداسازی بیشتر آن تا مقدار مجاز نفت از این مرحله به‌وسیلهٔ پمپ به نمک‌زدای الکترواستاتیک ارسال شود. در این مرحله پیش‌از ورود به نمک‌زدا آب رقیق‌کننده به نفت تزریق شده، غلظت نمک در آب محلول در نفت خام کمتر می‌شود و بعد از آن با ورود نفت به نمک‌زدا و اعمال میدان الکتریکی، قطره‌های ریز آب تحت تأثیر این میدان ته‌نشین و جدا می‌شوند. به‌طور کلی فرایند نمک‌زدایی الکترواستاتیکی شامل سه مرحله است:

۱- تزریق آب رقیق‌کننده: طی این فرایند در ابتدا آب رقیق‌کننده به نفت افزوده می‌شود که این امر برای انتقال نمک به فاز آبی است و باعث کمتر شدن غلظت نمک در نفت می‌شود. به‌وسیلهٔ شیر اختلاط و در اثر افت فشار ایجاد شده در دو طرف شیر، نفت و آب باهم مخلوط و یک امولسیون تشکیل می‌شود.

نرخ تزریق مادهٔ امولسیون‌زدا، مقدار ولتاژ اعمالی در میدان الکتریکی نمک‌زدا و نرخ تزریق آب رقیق‌کننده به نفت بر روی بازده جداسازی نمک و آب از نفت خام است که بهینه‌بودن هر کدام از این عوامل، جدا از این که تأثیر مثبت بر راندمان فرایند دارد باعث صرفه‌جویی اقتصادی و انرژی می‌شود.

۲. شرح فرایند نمک‌زدایی الکترواستاتیک

فرایند کلی واحد بهره‌برداری و نمک‌زدایی از نفت خام در شکل (۱) آورده شده‌است. در ابتدا نفت وارد تفکیک‌گرها شده، طی دو یا سه مرحله گاز همراه آن جدا می‌شود و در واقع تعداد تفکیک‌گرها بسته به میزان گاز همراه نفت و فشار ورودی آن مشخص می‌شود. با توجه به این که این تفکیک‌گرها سه‌فازی هستند، زمان ماند کافی باعث می‌شود که در این مرحله آب آزاد از نفت جدا شود. ساختار داخلی این تفکیک‌گرها به‌صورتی است که به نفت اجازه می‌دهد تا در داخل آن بچرخد و مدت‌زمان کافی برای جداسازی آب همراه نفت فراهم شود. افزایش درجهٔ حرارت نفت و تزریق مادهٔ شیمیایی



شکل ۱. نمای کلی واحد نمک‌زدایی [۱۱].

Figure 1. Overview of the desalination unit [11].

۲- به هم پیوستگی با میدان الکتریکی: اگر جریان و میدان الکتریکی وجود نداشته باشد، به هم پیوستگی و جهت‌گیری قطره‌ها و مولکول‌های آب به صورت تصادفی است و نیروی وارد بر مولکول‌های آب تقریباً صفر است و در این حالت قطره‌های آب کروی هستند و با اعمال میدان الکتریکی این قطره‌ها قطبیده و بیضی شکل می‌شوند و سطحی از قطره‌هایی که پتانسیل مثبت دارند به سطوح منفی دیگر قطره‌ها نزدیک می‌شوند. در نتیجه با تشکیل نیروهای جاذبه بین سطوح قطره‌ها، میزان برخورد و به هم پیوستگی بیشتر می‌شود و مقدار آب بیشتری ته‌نشین خواهد شد. نیروی جاذبه بین دو قطره بر دو نوع است: نیروی الکترواستاتیک و دوقطبی که این نیروها تابع شدت جریان و میدان الکتریکی ایجاد شده هستند؛ اما باید توجه کرد که میدان بسیار قوی موجب شکستن قطره‌های آب به قطره‌های ریزتر می‌شود که مطلوب نیست.

۳- ته‌نشینی و جداسازی: با این فرض که قطره‌ها کروی هستند، سرعت سقوط قطره‌های آب در نفت طبق قانون استوکس حساب می‌شود.

$$V = \frac{2(\rho_d - \rho_c)gr^2}{9\mu}$$

در رابطه بالا V سرعت سقوط قطره، g شتاب ثقل، r شعاع قطره، ρ_d چگالی آب، ρ_c چگالی نفت و μ گرانروی فاز نفت است که به منظور جداسازی آب از نفت، باید سرعت سقوط قطره‌های آب در نفت بالاتر از سرعت بالآمدن نفت از نمک‌زدا و در میان الکترودها باشد.

۳. آزمایش‌ها و روش‌ها

انجام آزمایش و تحقیقات برای دستیابی به حداکثر میزان شیرین‌سازی و بالا بردن کیفیت نفت خام امری واجب و ضروری است. مشخصه‌های گوناگونی برای تعیین میزان کیفیت و مرغوب بودن نفت وجود دارد؛ چگالی نفت خام از جمله این مشخصه‌ها است که تابع مقدار آسفالتین، پارافین و دیگر هیدروکربن‌های تشکیل‌دهنده نفت است و با API بیان می‌شود که بیشتر بودن اندازه آن بیانگر سبک‌تر بودن نفت و کمتر بودن اندازه آن بیانگر سنگین‌تر بودن نفت خام است. مشخصه دیگر، مقدار آب و

رسوبات همراه نفت خام است که به اختصار با BS&W^۱ بیان می‌شود. مطابق اطلاعات موجود غلظت ترکیبات یونی همراه نفت در میدان‌های نفتی ایران حدود ۲۲۰۰۰۰-۱۵۰۰۰۰ ppm است. آب استحصال شده به همراه نمک در اثر عبور از محیط متخلخل مخزن، شیرهای فشار شکن و سایر تنش‌های موجود در مسیر تولید و انتقال به صورت قطره‌های ریز در فاز نفتی پراکنده می‌شوند و ترکیبات فعال سطحی طبیعی موجود در فاز نفت از قبیل آسفالتین، رزین و واکس با تشکیل یک لایه حائل پایدار، حول قطره‌های آب و جلوگیری از انعقاد و پیوند قطره‌ها با یکدیگر موجب پایداری امولسیون آب در نفت می‌شوند. امولسیون تشکیل شده اگرچه از نقطه نظر ترمودینامیکی ناپایدار است، اما از نظر سینتیکی می‌تواند در بازه طولانی از زمان پایدار باشد.

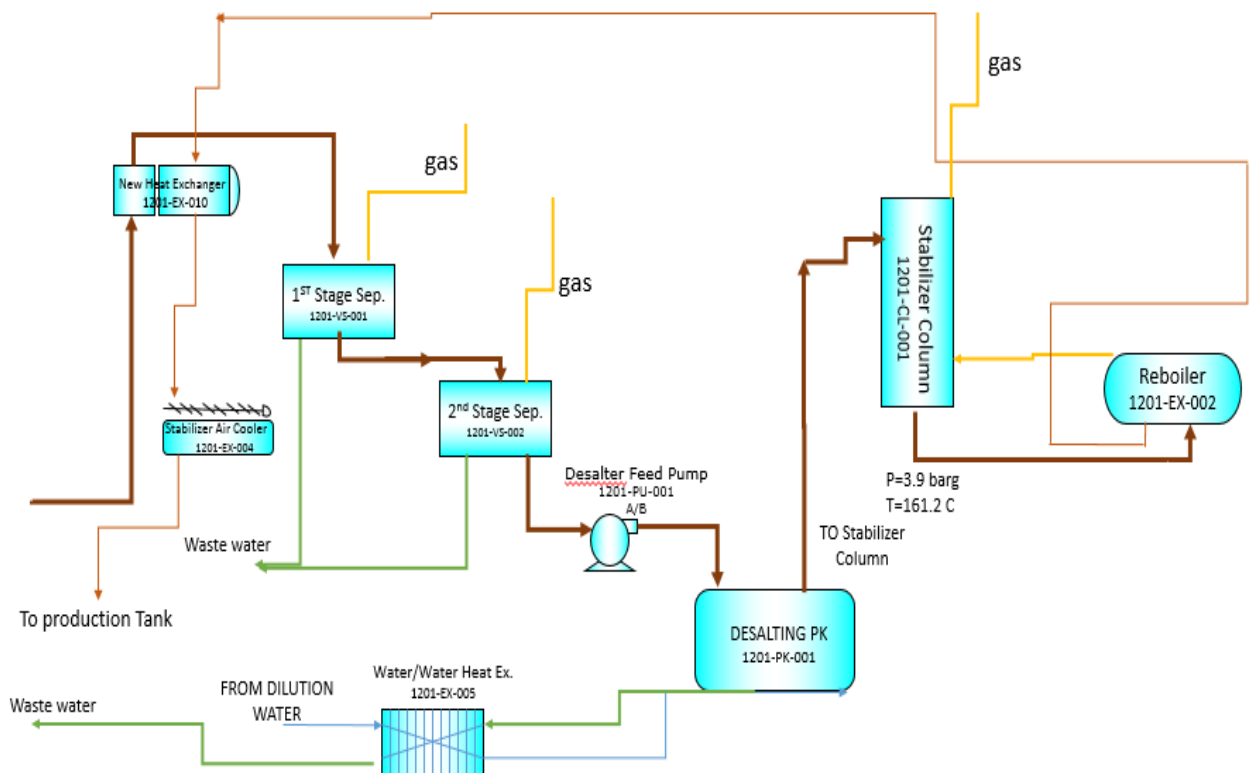
در این پژوهش با پایش روزانه شرایط عملیاتی واحد نمک‌زدایی تأثیر مشخصه‌های مختلف عملیاتی بر کیفیت محصول صادراتی ارزیابی می‌شود.

شکل (۲) نشان‌دهنده واحد بهره‌برداری مورد مطالعه است که نرخ جریان نفت ورودی به آن برابر ۱۵۰۰۰ بشکه در روز است. مقدار آب نمک و رسوبات همراه نفت با توجه به رفتار چاه‌های نفتی، متغیر و بین ۷-۳٪ حجمی از نفت است و لازم به ذکر است که مقدار API نفت واحد بهره‌برداری مورد مطالعه برابر ۳۲/۵ و گرانروی آن نیز در دمای ۲۴ درجه سلسیوس برابر ۸/۴ سانتی‌استوک است. ماده امولسیون‌زدای مورد استفاده در شرکت شیمیایی انرژی سمنان (با نام تجاری DDH9689I) تولید شده است.

همان‌طور که در شکل پیدا است، این واحد شامل دو مرحله تفکیک‌گر است که در آن تفکیک سه فاز رخ می‌دهد، سپس نفت خروجی از تفکیک‌گر مرحله دوم وارد یک نمک‌زدای الکترواستاتیک می‌شود. نفت قبل از ورود به این تجهیز با آب شست‌وشو ترکیب شده، پس از اختلاط کامل در شیر اختلاط تحت میدان الکتریکی قرار می‌گیرد و سپس به برج پایدارکننده وارد می‌شود. در این برج تحت دمایی که در گرم‌کننده^۲ تأمین می‌شود، میزان کیفیت نفت صادراتی در حالت پایدار تعیین می‌شود.

در آزمایشگاه نمک‌زدایی آزمایش‌های مربوط به نمونه نفت خام به شرح صفحه بعد انجام گرفت:

1. Basic Sediment & Water
 2. Reboiler



شکل ۲. نمای کلی واحد بهره‌برداری مورد مطالعه.

Figure 2. Overview of the study operation unit.

۳-۲ اندازه‌گیری میزان آب و رسوبات همراه (BS&W) در نفت خام

۵۰ CC نمونه نفت خام را در تیوپ مخصوص دستگاه سانتیفریوژ (مدل HETTICH-ROTO FIX 46H و رنج ۴۰۰۰ دور در دقیقه) ریخته و ۵۰ CC تولوئن به آن افزوده می‌شود تا به حجم ۱۰۰ CC برسد، سپس یک یا دو قطره امولسیون‌زدا نیز بدان اضافه و خوب تکان داده می‌شود و بعد به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب گرم ۵۰ درجه سلسیوس گذاشته و سپس تیوب داخل سانتیفریوژ قرار داده می‌شود و برای مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۶۸۰ دور در دقیقه چرخش داده می‌شود، بعد از آن درصد آب و رسوبات به دست می‌آید.

۳-۳ اندازه‌گیری چگالی با استفاده از چگالی‌سنج

ابتدا درجه حرارت نمونه نفت و وسایل را به ۶۰ درجه فارنهایت رسانده می‌شود، سپس نمونه در سیلندر شیشه‌ای ریخته و در محلی که تغییرات حرارتی کم باشد، قرار می‌گیرد. بعد از این عمل

۳-۱ اندازه‌گیری نمک موجود در نفت خام (خروجی و ورودی) به روش تیتراسیون

به منظور این کار ۱۰۰ CC از نفت (خروجی یا ورودی واحد) برداشته و داخل دستگاه سنجش نمک نفت خام (IP77-SAA250) ریخته و ۷۰ CC تولوئن و ۴۰ CC الکل استن بدان اضافه و سه دقیقه جوشانده می‌شود، سپس ۱۲۵ CC آب مقطر افزوده و ۱۲ دقیقه دیگر جوشانده می‌شود. بعد از سرد شدن و جداسازی محلول به دو فاز مقدار ۱۰۰ CC از آب (فاز پایین) برداشته و ۸ CC فریک آلوم و ۵/۰ CC تیوسیانات پتاسیم به آن افزوده می‌شود تا به رنگ آجری درآید. در مرحله بعد، نیترات نقره به محلول اضافه می‌شود تا بی‌رنگ شود، سپس از نو تیوسانات پتاسیم به محلول اضافه می‌شود تا تغییر رنگ دهد (بی‌رنگ شود) و در پایان اختلاف حجم نیترات نقره و تیوسانات پتاسیم مصرف شده در عدد ۴۷ ضرب می‌شود و میزان نمک موجود در نفت خام با واحد (گرم در هر متر مکعب) به دست می‌آید.

افزایش درجه حرارت در پکیج نمک‌زدا سبب:

- بیشتر شدن فشار بخار نفت خام
- کم شدن استحکام قشر بیرونی قطره‌های آب موجود در نمک
- بیشتر شدن جابه‌جایی و زیادتر شدن به هم پیوستن قطره‌های آب
- تفاوت چگالی بین نفت خام و آب
- کمتر شدن گرانروی نفت

و در آخر بهبود عملکرد جداسازی آب نمک از نفت خام می‌شود. اگرچه مقدار افزایش دما نباید از حد مشخصی بیشتر شود؛ زیرا دمای زیاد موجب جدا شدن و تغییر در ساختار هیدروکربن‌های سبک نفت می‌شود و به دنبال آن چگالی نسبی، بیشتر و نفت سنگین‌تری تشکیل می‌شود که از نظر اقتصادی ارزش کمتری دارد. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده‌است با افزایش دما میزان نمک موجود در نفت کاهش می‌یابد و در نهایت به نقطه‌ای می‌رسد که با افزایش دما میزان نمک دیگر کاهش نمی‌یابد. بدین ترتیب باید میزان دما در پکیج نمک‌زدا بهینه شود.

چگالی سنج (هیدرومتر) را به آرامی وارد نمونه کرده، صبر می‌کنند تا به حالت سکون برسد. در این حالت، خط تماس ساقه مدرج چگالی سنج با سطوح مایه، مقدار چگالی نفت خام را نشان می‌دهد. هنگامی که نمی‌توان دمای نمونه را به ۶۰ درجه فارنهایت رساند، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

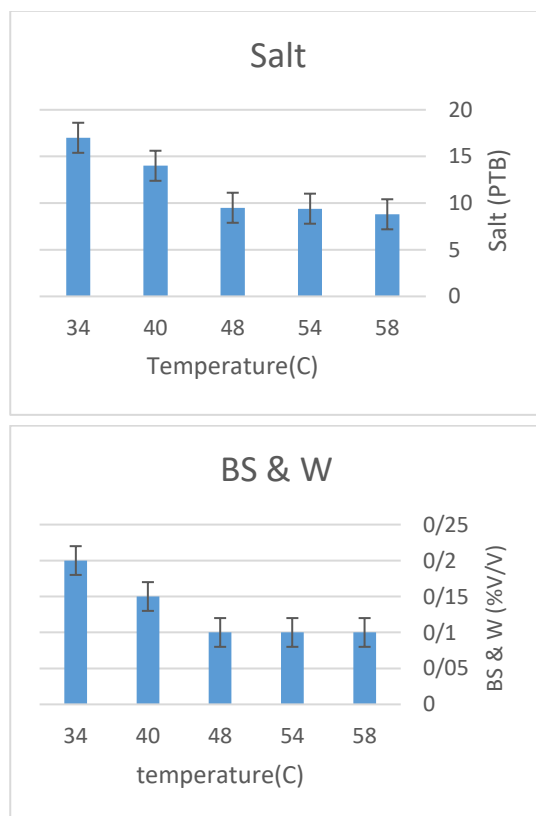
$$\text{نسبی دما در } 60 \text{ درجه فارنهایت} = \text{چگالی نسبی نفت} + 0.00035 \times (60 - \text{درجه حرارت نفت})$$

۴. نتایج و بحث

ابتدا نتایج حاصل از کنترل شرایط عملیاتی، بررسی و در ادامه نتایج حاصل از تأثیر مشخصه‌های مختلف ارائه شده‌است. در آخر نیز نتایج حاصل از شرایط بهینه فرایند نمک‌زدای الکترواستاتیک آورده شده‌است.

۴-۱ دما

خاصیت حل‌شوندگی آب در نفت به‌میزان بالایی به نوع هیدروکربن‌های نفت و دما وابسته است.



شکل ۳. تأثیر دمای نفت در نمک‌زدای الکترواستاتیکی بر روی میزان نمک و آب و رسوبات همراه خروجی.

Figure 3. The effect of oil temperature in the electrostatic salt trap on the amount of salt and water and sediments with the output.

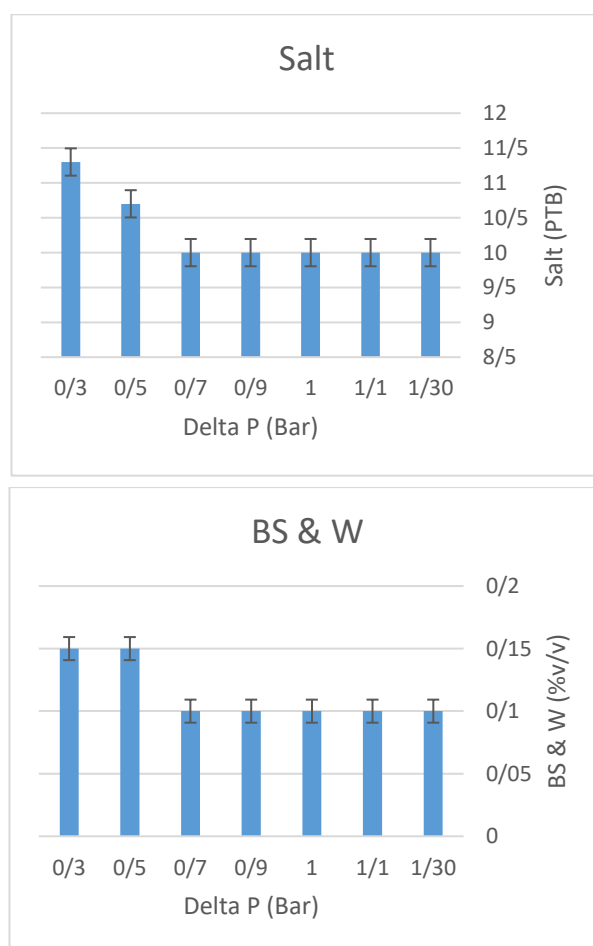
۲-۴ افت فشار در شیر اختلاط

تعداد قطره‌های کوچک موجود در محیط افزایش می‌یابد و فرایند جداسازی را با مشکل مواجه می‌کند. در تأسیسات فرورش مرکزی مقدار بهینه ۰/۹ Bar برای افت فشار طی شیر اختلاط در نظر گرفته شده‌است؛ زیرا در این مقدار میزان اختلاط بهتری انجام می‌گیرد و در نتیجه نیازی به تغییر میزان آن دیده نمی‌شود.

با عبور سیال از یک شکاف باریک (اریفیس) یک منطقه با آشفتگی بالا تشکیل می‌شود و تنش ایجاد شده موجب تغییر شکل و شکستن قطره‌های امولسیون می‌شود [۱۲]. بیشتر شدن اختلاف فشار در دو سمت ورودی و خروجی شیر اختلاط باعث می‌شود که قطره‌های کوچکتری به وجود آیند؛ زیرا بیشتر شدن اختلاف فشار باعث شکست بیشتر قطره‌ها می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۴) نمایان است میزان اختلاف فشار در شیر اختلاط نیز باید بهینه شود. در فرایند صنعتی بیشتر شدن اختلاف فشار در دو طرف شیر اختلاط باعث بیشتر شدن اختلاط آب رقیق‌کننده تزریقی و آب همراه نفت شده، در نتیجه موجب کمتر شدن غلظت آب‌نمک محلول در نفت خام می‌شود. باید توجه داشت که افزایش بیش از اندازه اختلاف فشار در دو طرف شیر باعث کاهش بازده جداسازی دستگاه الکترواستاتیک می‌شود؛ زیرا

۳-۴ ماده شیمیایی امولسیون‌زدا

ماده شیمیایی امولسیون‌زدا برای کمک به شکستن پیوند آب و نفت اضافه می‌شود و نحوه عملکرد این مواد چنین است که موجب می‌شوند لایه نازک اطراف قطره‌های امولسیونی آب شکسته شود و به بیان دیگر، امولسیون‌زداها عوامل امولسیونی آب را خنثی می‌کنند و فعال‌کننده سطح هستند [۱۳].



شکل ۴. تأثیر اختلاف فشار شیر اختلاط بر روی کیفیت نفت خروجی.

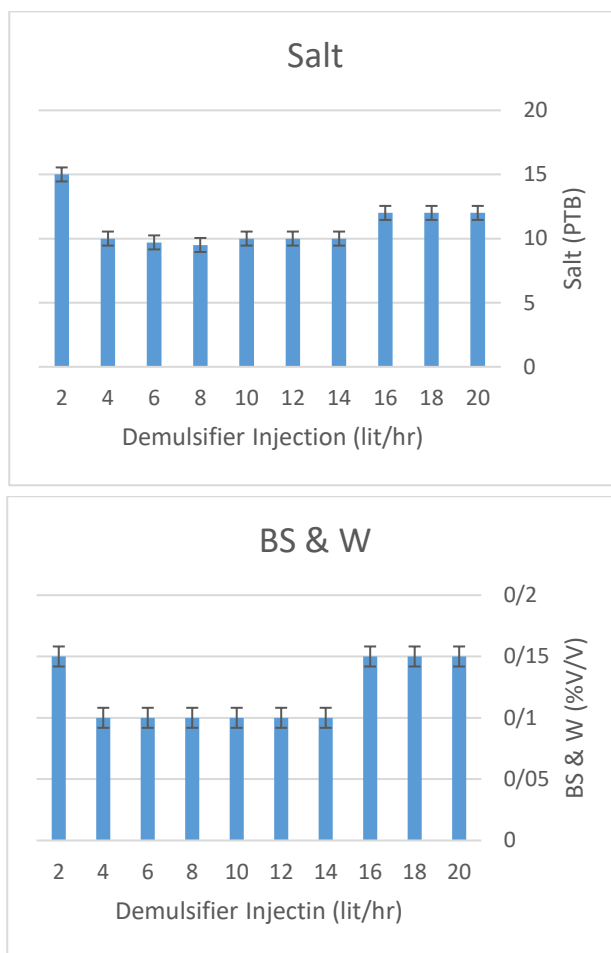
Figure 4. The effect of mixing valve pressure difference on output oil quality.

در شکل (۵) میزان تأثیر امولسیون‌زدای تزریقی بر روی جداسازی نمک و آب همراه در نمک‌زدایی با نرخ نفت ورودی یعنی ۱۵۰۰۰ بشکه در روز بررسی شده‌است.

باتوجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان تغییر ماده امولسیون‌زدا تأثیر بسیاری در کنترل کیفیت نفت صادراتی دارد؛ اما باید اثر متقابل آن که با افزایش میزان تزریق اثر معکوس آن است در نظر گرفته شود.

در صورت تزریق نشدن ماده شیمیایی امولسیون‌زدا باتوجه به توضیحات فوق‌الذکر، عملیات جداسازی آب و نمک همراه نفت با مشکل مواجه می‌شود و در نتیجه جریان یافتن آب و نمک همراه نفت به برج‌های تثبیت کننده در درجه اول نمک بر روی سطح سینی‌ها رسوب می‌کند و عملیات انتقال جرم بین گاز و نفت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

استفاده زیاد از حد از مواد امولسیون‌زدا موجب ایجاد مواد امولسیونی جدید می‌شود که در فرایند پالایش و تصفیه پساب مشکلاتی به وجود می‌آورد، در نتیجه در محاسبه مقدار تزریق این مواد باید دقت لازم انجام شود. اغلب نفت‌های سنگین به نسبت نفت‌های سبک به مواد امولسیون‌زدا بیشتری نیاز دارند. باید دقت کرد که هر نوع تغییری در عملیات نمک‌زدایی مانند تغییر شرایط دمایی و فشاری، تغییر جریان، تغییر فصل مشترک و غیره بر مقدار تزریق مواد امولسیون‌زدا تأثیر می‌گذارد، در نتیجه میزان تزریق متناسب با تغییر مشخصه‌ها متغیر خواهد بود [۱۴، ۱۵]. تزریق امولسیون‌زدا قبل از پمپ‌ها باعث اختلاط بهتر آن‌ها با نفت می‌شود و ایجاد امولسیون در پمپ را به حداقل می‌رساند. امروزه نمک‌زدایی از نفت بدون وجود این مواد صرف نظر از تمامی فناوری‌های موجود امری غیرممکن است.



شکل ۵. تأثیر نرخ تزریق ماده امولسیون‌زدا بر روی جداسازی نمک و آب همراه نفت در پکیج نمک‌زدایی.

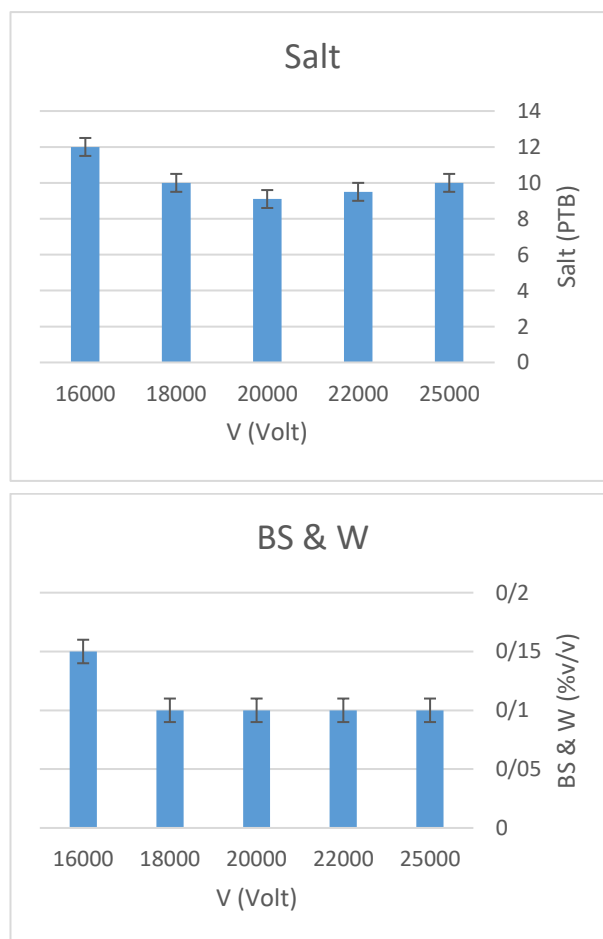
Figure 5. The effect of the injection rate of suspending agent on the separation of salt and water with oil in the desalination package.

۴-۴ ولتاژ اعمال شده

ولتاژ بحرانی می‌تواند سبب شود که نیروهای الکترواستاتیک از نیروهای بین سطحی، بیشتر و موجب شکست قطره‌های آب نمک شود. شرط لازم برای این که میدان الکتریکی در جداسازی آب‌نمک از نفت بتواند مؤثر باشد آن است که باید قطره‌ها خیلی بزرگ نباشند و فاصله بین قطره‌ها کم باشد.

نتایج نشان می‌دهد که با اعمال ولتاژ بالاتر می‌توان به جداسازی بیشتر دست یافت؛ اما در نتیجه اعمال ولتاژ بالاتر از حالت بحرانی ممکن است راندمان حذف نمک افت کند و میزان مصرف برق نیز افزایش یابد که این امر ضرورت تعیین حالت بهینه را نشان می‌دهد. باتوجه به این که در واحد بهره‌برداری دو نمک‌زدا به صورت سری در نظر گرفته شده‌است، می‌توان با عنایت به نتایج آزمایشگاهی ولتاژ بهینه را تخمین زد و اعمال کرد.

در پکیج نمک‌زدایی و در داخل نمک‌زدا اعمال جریان الکتریکی کار اصلی را انجام می‌دهد که دارای ولتاژ بالایی است و این کار موجب می‌شود که قطره‌های کوچک آب باهم ادغام شود و قطره‌های بزرگ‌تری حاصل شود و هراندازه که قطره‌های حاصل شده بزرگ‌تر باشند، تحت تأثیر نیروی گرانش زودتر در داخل نفت ته‌نشین و خارج می‌شوند. از جریان متناوب (AC) یا جریان مستقیم (DC) به منظور حذف قطره‌های آب‌نمک از نفت بهره‌گیری می‌شود. به دلیل قطبی بودن مولکول‌های آب جداکننده‌های الکتریکی با ولتاژ بالا سبب القای دو قطبی القایی در مولکول‌های آب می‌شوند و مولکول‌ها بیشتر و سریع‌تر به هم پیوسته می‌شوند که این امر موجب تسریع در سرعت جداسازی آب از نفت می‌شود [۱۶]. نباید فراموش شود که



شکل ۶. تأثیر ولتاژ اعمالی در نمک‌زدای الکترواستاتیکی بر روی کیفیت نفت خروجی.

Figure 6. The effect of the applied voltage in the electrostatic salt trap on the quality of the output oil.

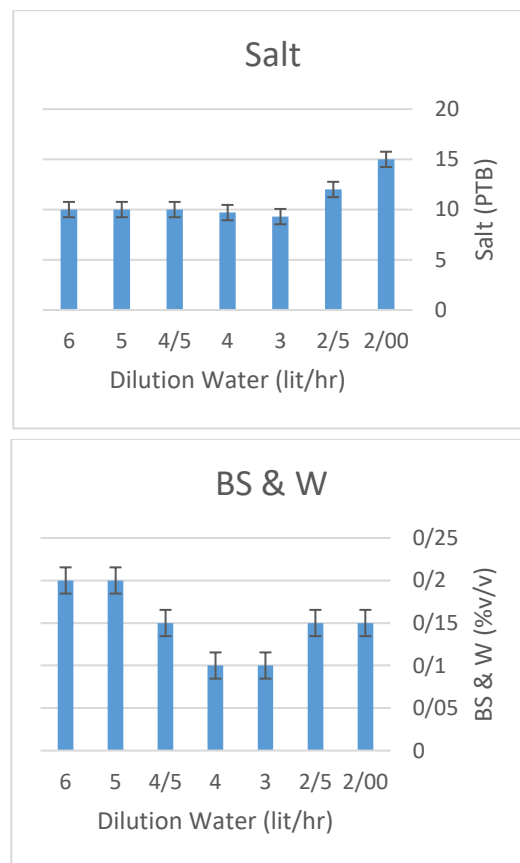
۴-۵ آب رقیق‌کننده^۱

اختلاط آب رقیق‌کننده و نفت برای رقیق کردن قطره‌های آب‌نمک موجود در نفت است. بالابودن کیفیت آب رقیق‌کننده تزریقی در راندمان جداسازی تأثیرگذار است و اگر کیفیت مطلوب را دارا نباشد، می‌تواند روی مشخصه‌هایی مانند PH محیط اثر بگذارد و مقدار آن را افزایش دهد که باعث پایداری امولسیون آب و نفت شود. واضح است که به‌منظور جداسازی نمک از نفت لازم است که آب رقیق‌کننده تزریقی مقادیر اندکی نمک داشته و ترجیحاً PH آب تزریق شده باید پایین‌تر از ۹ باشد. درعین حال PH کمتر از ۵/۶، نگرانی‌ها را در مورد خوردگی دستگاه نمک‌زدا بالا می‌برد. در نتیجه بیشتر کردن مقدار آب رقیق‌کننده و تزریق آن به نفت تعداد قطره‌های آب موجود در سامانه بیشتر می‌شود و احتمال قرارگیری قطره‌های آب در مسیر یکدیگر زیادتر می‌شود و امکان برخورد مؤثر بین آن‌ها افزایش می‌یابد.

نتایج آزمایشگاهی در شکل (۷) بیانگر این است که با افزایش دبی آب رقیق‌کننده تزریقی به پکیج نمک‌زدایی، میزان نمک در نفت خروجی کاهش یافته است؛ اما با تزریق بیشتر آب رقیق‌کننده مقدار آب همراه نفت بیشتر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

اساساً نمک موجود در نفت خام یا به‌صورت محلول در فاز آب- که به‌شکل امولسیون با نفت مخلوط شده- است یا به‌صورت ذرات پراکنده محلول در نفت. نمک محلول در آب تا حد زیادی در فرایند آب‌زدایی با استفاده از جداکننده‌های فازی موجود در واحدهای بهره‌برداری و مخازن که براساس اختلاف در وزن مخصوص سیالات عمل می‌کنند، جدا می‌شود، ولی برای جداسازی ذرات پراکنده نمک محلول در نفت نیاز به عملیات نمک‌زدایی از نفت است.



شکل ۷. تأثیر آب رقیق‌کننده تزریقی به نفت ورودی در نمک‌زدای الکترواستاتیکی بر روی کیفیت نفت خروجی.

Figure 7. The effect of diluting water injected into the incoming oil in the electrostatic salt trap on the quality of the outgoing oil.

- [2] Varadaraj, R., & Brons, C. (2007). Molecular origins of crude oil interfacial activity part 3: characterization of the complex fluid rag layer formed at crude oil-water interfaces. *Energy & fuels*, 21(3), 1617-1621.
- [3] Li, R., Huang, H., Wang, X., & Wang, Y. (2022). Effect of ammonium salt on corrosion of pipelines and components in a crude oil distillation column: Electrochemical and AIMD studies. *Corrosion Science*, 203, 110362.
- [4] Manning, F., & Thompson, R. (1995). *Oilfield processing of petroleum: Crude oil*. PennWell Books, LLC.
- [5] Salam, K. K., Alade, A. O., Arinkoola, A. O., & Opawale, A. (2013). Improving the demulsification process of heavy crude oil emulsion through blending with diluent. *Journal of Petroleum Engineering*, 2013.
- [6] Manning, F. S., & Thompson, R. E. (1995). Dehydration of crude oil. *Oilfield Processing Volume 2: Crude Oil*, 113-143.
- [7] Ranaee, E., Ghorbani, H., Keshavarzian, S., Abarghoei, P. G., Riva, M., Inzoli, F., & Guadagnini, A. (2021). Analysis of the performance of a crude-oil desalting system based on historical data. *Fuel*, 291, 120046.
- [8] Lei, M., Huang, H., Liu, J., & Peng, F. (2023). A gemini ionic liquid and its low-temperature demulsification performance in water-in-crude oil emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 671, 131696.
- [9] Hamekhani, M., & Sadeghi, MT. (2014). "Application of microwaves in crude oil demulsification process". *Iranian Chemical Engineering Journal*, 14(83), 6-15, In Persian.
- [10] Arnold, K., & Stewart, M. (1999). *Surface production operations, Volume 2: Design of gas-handling systems and facilities* (Vol. 2). Elsevier.
- [11] Midanshahi V. (2019). *Modeling of electrical interconnection in electrostatic desalination device*, Master's thesis, Shiraz University, Iran.
- [12] Anand, V., Srivastava, S., Juvekar, V. A., Naik, V. M., Bhartiya, S., & Thaokar, R. M. (2022). Plantwide Control of Two Stage Desalting Process For Feed Rate and Grade Disturbances. *IFAC-PapersOnLine*, 55(1), 387-392.
- [13] Ye, F., Zhang, X., Jiang, X., Liu, H., Tang, Y., Qu, Q., ... & Yan, X. (2023). Demulsification of crude oil emulsions using a three-branched betaine type ionic liquid and its demulsification mechanism. *Geoenergy Science and Engineering*, 230, 212265.

با افزایش دمای نفت ورودی به نمک‌زدا مقدار جداسازی نمک و آب همراه افزایش یافت و مقدار دمای بهینه برای رسیدن به راندمان مطلوب 48°C به دست آمد (باتوجه به بالابودن API نفت میدان نفتی مورد مطالعه $(32/5)$ نیاز به افزایش دمای بیشتر نیست).

در ورودی پکیج نمک‌زدایی مطلوب‌ترین مقدار اختلاف فشار شیر اختلاط مقدار $0.1-7/3$ Bar به دست آمد، به طوری که در این بازه هم اختلاط آب رقیق‌کننده و نفت به صورت کامل انجام می‌گیرد و هم اینکه افت فشار در داخل نمک‌زدا زیاد نیست.

به دست آوردن مقدار بهینه نرخ تزریق ماده امواسیون‌زدا باید به گونه‌ای باشد که بتوان به بیشترین مقدار جداسازی آب و نمک دست یافت و هم اینکه به دلیل بالا بودن قیمت ماده امولسیون‌زدا، مقدار تزریق آن بیشتر از حالت بهینه نباشد.

بیشترین میزان جداسازی نمک و آب همراه از نفت با مقدار تزریق امولسیون‌زدا بین $140/40$ ppm به دست آمد که می‌توان مقدار بهینه امواسیون‌زدا را به سامانه تزریق کرد.

میزان بازه ولتاژ اعمالی در نمک‌زدهای مورد استفاده را می‌توان از 15 Kv تا 25 Kv تغییر داد. نتایج حاصل شده نشان داد که با اعمال ولتاژ مستقیم به مقدار 20 Kv می‌توان به جداسازی مطلوب دست یافت و از صرف انرژی بیشتر جلوگیری کرد.

با در نظر گرفتن نرخ نفت ورودی به پکیج نمک‌زدا به میزان 15000 بشکه در روز، بهینه‌ترین مقدار آب شست‌وشو دهنده تزریقی به سامانه برابر 3 مترمکعب در ساعت به دست آمد (به عبارتی با تزریق آب رقیق‌کننده به میزان 3% حجمی نفت می‌توان به حالت ایده‌آل مصرف آب رقیق‌کننده و بالاترین میزان جداسازی نمک دست یافت).

تزریق زیاد آب رقیق‌کننده اگرچه نتیجه مطلوبی برای جداسازی نمک از نفت دارد، ولی اثر نامطلوبی بر کیفیت نفت خروجی از واحد دارد؛ زیرا باعث می‌شود مقدار آب همراه نفت از میزان مجاز آن یعنی 0.1% حجمی فراتر برود.

مراجع

- [1] Noorollahi, Y., Taghipoor, S., & Sajadi, B. (2017). Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. *Geothermics*, 67, 66-75.

- [14] Li, Z., Chakraborty, A., Fuentes, J., Zamora, E., Vázquez, F., Xu, Z., ... & McCaffrey, W. C. (2021). Study on demulsifier crude oil interactions at oil-water interface for crude oil dehydration. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 630, 127526.
- [15] Ahmadi, S., Khormali, A., & Khoutoriansky, F. M. (2022). Optimization of the demulsification of water-in-heavy crude oil emulsions using response surface methodology. *Fuel*, 323, 124270.
- [16] Kakhki, N. A., Farsi, M., & Rahimpour, M. R. (2016). Effect of current frequency on crude oil dehydration in an industrial electrostatic coalescer. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 67, 1-10.