

## نمک‌زدایی از نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل

محمد رضا کاردان فرد، نادیا اسفندیاری\*

گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی مرودشت، ایران

چکیده: در این پژوهش جداسازی نمک از نفت خام با استفاده از نانو جاذب اکسید نیکل مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهایی همانند pH (۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹)، زمان (۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ min)، میزان جاذب (۰/۲۵، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ g) و دما (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ °C) بر روی میزان جداسازی نمک از نفت خام مورد مطالعه قرار گرفت. هنگامی که pH کاهش یافت، مقدار جذب نمک کاهش یافت. در بازه قلیایی نیز با توجه به حضور یون های OH<sup>-</sup> در محلول، احتمال تشکیل کمپلکس بهتری بین جاذب و کاتیون‌ها وجود دارد. بنابراین بهترین جذب در pH نزدیک به خنثی مشاهده شد. افزایش دما سبب افزایش درصد نمک‌زدایی شد. بهترین شرایط جذب نمک ۷pH، دمای ۸۰ °C، میزان جاذب ۰/۷۵ g و زمان جذب ۴۵ دقیقه به دست آمد.

**واژگان کلیدی:** نفت خام، نانو جاذب، اکسید نیکل، نمک‌زدایی

**KEYWORDS:** Crude oil, Nano absorbance, Nickel Oxide, Temperature, Desalination

### مقدمه

دیگر درصد رسوب‌های نمکی و آب همراه با نفت است که با پارامتر BS&W<sup>۱</sup> مشخص می‌شود. لازم است به منظور افزایش کیفیت نفت خام، آب نمک از آن جدا شود. عملیات نمک‌زدایی بر روی کیفیت فراورده نهایی و خوردگی لوله‌ها و قیمت حمل و نقل تأثیر مستقیم دارد [۱]. با افزایش ۱ میلی‌گرم بر لیتر از آب شور قیمت نفت خام در هر بشکه ۰/۸۵ تا ۱ دلار کاهش می‌یابد [۲]. برای جداسازی نمک از نفت خام ۷ روش کلی استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از: روش ثقلی، روش اضافه کردن آب شیرین، روش گرمایی، استفاده از مواد شیمیایی تعلیق شکن، روش مکانیکی، روش الکتریکی و روش ترکیبی. واضح است که روش‌های ثقلی و گرمایی، نسبت به روش‌های دیگر هزینه کمتری دارند. با توجه به ویژگی‌هایی که نفت خام در هر منطقه دارد، برای جداسازی نمک از نفت خام مجموعه‌ای از روش‌های بالا را به کار می‌گیرند. با توجه به

نفت خام به‌طور معمول هنگام خروج از چاه با مقداری آب همراه است. در آبی که بدین ترتیب همراه نفت خارج می‌شود مقداری از نمک‌ها به صورت محلول وجود دارد. وجود آب و نمک زیاد در نفت موجب بروز خوردگی شدید و سوراخ شدن و از بین رفتن دستگاه‌ها و وسایل گران‌بهای بهره‌برداری مانند لوله‌ها، شیرها و کشتی‌های نفتکش و پایین آوردن کیفیت فراورده‌ها می‌شود که سرانجام منجر به کاهش قیمت نفت خام صادراتی می‌شود. نفت خام استحصال شده از میدان‌های نفتی متفاوت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. تعبیر زیادی از طبقه‌بندی نفت موجود است، با این حال از دیدگاه اقتصادی دو پارامتر دارای اهمیت است. یکی وزن مخصوص نفت خام است که وابسته به مولکول‌های هیدروکربن تشکیل دهنده نفت می‌باشد، که اغلب به صورت درجه API<sup>۱</sup> بیان می‌شود. پارامتر

\*Email: esfandiari\_n@miau.ac.ir

\* عهده‌دار مکاتبات

(۱) American Petroleum Institute

(۲) Bottom sediments and water

جدول ۱ - ویژگی‌های آب همراه با نفت

۱۹۲۰۰۰	نمک (میلی‌گرم/کلرید سدیم)
۱۱۰۰	دانسیته در فشار ۳۷۰۰ پوند بر اینچ مربع، دمای ۸۴ درجه سلسیوس (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۱۲۸	دانسیته مخزن ذخیره سازی (کیلوگرم بر متر مکعب)
$۲/۲ \times ۱۰^{-۶}$	تراکم پذیری (۱ بر پوند بر اینچ مربع)
۰/۵۵	گرانروی در فشار ۳۷۰۰ پوند بر اینچ مربع، دمای ۸۴ درجه سلسیوس (سانتی‌پوز)

نمک‌زدایی کردند. بهترین جداسازی نمک از نفت خام با استفاده از ۰/۳ درصد وزنی از نانوذره‌ها صورت گرفت. کشاورز و اسفندیاری [۱۷] از SWCNT<sup>۱</sup>، MWCNT<sup>۲</sup>، نانولوله کربنی با عامل کربوکسیل و گرافن ۱-۳ لایه برای جداسازی نمک همراه نفت استفاده کردند. نتیجه بررسی نشان داد که MWCNT بهترین جاذب است و قابلیت جذب بیش از ۵۰ درصد نمک موجود در نفت خام را دارد. نانوذره‌های اکسید گرافن توسط لایو و همکاران [۱۸] برای جداسازی آب نمک موجود در نفت خام استفاده شد. بازیابی نانوذره‌ها در کار آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. حسن و همکاران [۱۹] نانوذره‌های سیلیکا با قطر ۲۵ نانومتر با غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر را به نفت خام افزودند و افزایش ۵۳ درصدی جداسازی آب از نفت را دیدند. در این پژوهش نمک همراه با نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل جداسازی شد. تأثیر پارامترهای pH، زمان، میزان جاذب، دما و مقدار جاذب مصرفی بر روی جداسازی نمک بررسی شد.

### بخش تجربی

#### مواد

زایلین با خلوص ۹۸ درصد، تولوئن با خلوص ۹۹ درصد، آب اکسیژنه ۳۰ درصد، کرومات پتاسیم ۹۸ درصد، ۲-پروپانول و نانوذره‌های اکسید نیکل از شرکت مرک خریداری شد. نفت خام از میدان نفتی گچساران تهیه شد. ویژگی‌های آب موجود در نفت در جدول ۱ آمده است.

#### روش اندازه‌گیری نمک

در بین روش‌های موجود برای ارزیابی مقدار نمک در نفت خام، برای سنجیدن اثر نانوجاذب مورد استفاده در این پژوهش از روش IP-۷۷ استفاده شد. این روش ساده و ارزان می‌باشد. سرعت اندازه‌گیری آن نیز قابل توجه است. بیش‌تر آزمایشگاه‌های موجود در

توسعه روزافزون فناوری نانو به نظر می‌رسد که نانو جاذب‌ها در فرایند جداسازی نمک از نفت خام مثر ثمر باشند [۳، ۴].

مطالعه‌هایی در زمینه جداسازی نمک از نفت خام صورت گرفته است. وفاجو و همکاران [۵] تأثیر دما، تزریق مواد شیمیایی و pH را بر روی جداسازی نمک همراه نفت با روش نمک‌زدایی الکترواستاتیک مورد بررسی قرار دادند. مهدی و همکاران [۶] تأثیر پنج پارامتر (غلظت عامل تعلیق شکن، دما، نسبت آب رقیق کننده، زمان ته نشینی و زمان مخلوط شدن با آب شستشو) را بر روی فرایند نمک‌زدایی از نفت خام مورد مطالعه قرار دادند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند دهیدراته و نمک‌زدایی از نفت خام با نرم‌افزار اسپن‌هایسیس توسط سوتلو و همکاران انجام شد [۷].

سد و همکاران [۸] نمک‌زدایی از نفت خام سنگین و عامل‌های مؤثر بر آن همچون دانسیته، گرانروی، میزان نمک و میزان گوگرد را مورد مطالعه قرار دادند. ابراهیم و سامی [۹] تأثیر زمان ته‌نشینی، دما، میزان آب شستشو و افزودن تعلیق شکن را بر روی نمک‌زدایی نفت بررسی کردند. فرایند الکترودیالیز برای نمک‌زدایی آب همراه نفت توسط گنجی زاده و اشرفی زاده مطالعه شد. درصد جداسازی با افزایش ولتاژ و مدت فرایند افزایش یافت [۱۰].

بهینه‌سازی پارامترهای فرایند نمک‌زدایی نفت در یک کارخانه نمک‌زدایی در الجزیره مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. زهدی و همکاران عیب یابی فازی یک کارخانه نمک‌زدایی نفت خام را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. مدل‌سازی مقایسه‌ای فرایند نمک‌زدایی از نفت خام به روش الکترواستاتیک انجام شد [۱۳]. شبیه‌سازی دینامیکی فرایند نمک‌زدایی با نرم‌افزار اسپن‌هایسیس بررسی شد [۱۴]. فرایند نمک‌زدایی الکترواستاتیکی به صورت عددی مدل‌سازی شد [۱۵].

جذب سطحی یک فرایند جداسازی است که در آن برخی از اجزاء فاز سیال به سطح یک جاذب جامد منتقل می‌شوند. به‌طور معمول ذره‌های ریز جاذب در بستر ثابتی نگه داشته می‌شوند و سیال به صورت پیوسته از میان بستر عبور داده می‌شود تا جامد به تقریب اشباع شود. جذب سطحی را می‌توان تمایل مولکول‌های فاز سیال برای چسبیدن به سطح جامد تعریف کرد. در گذشته استفاده از جاذب‌ها بر مبنای سعی و خطا استوار بوده که با انجام آزمایش کیفیت آن‌ها اندازه‌گیری می‌شد. اما امروزه از نانوذره‌ها که سطح ویژه بالایی دارند، به عنوان جاذب استفاده می‌شود. برای جداسازی نمک از نفت خام از نانو جاذب‌هایی استفاده شده است. نیکخواه و همکاران [۱۶] با استفاده از نانوذره‌های اکسید تیتانیوم نفت خام را

(۱) single-walled carbon nanotubes

(۲) multi-walled carbon nanotubes



شکل ۱ - تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذره‌های اکسید نیکل

۰/۲۵ g از اکسید نیکل به نفت افزوده شد و به روی هیتر گذاشته و در هر یک از دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ °C به مدت ۲۰ دقیقه عمل جذب انجام شد. در پایان پس از جداسازی جاذب توسط سانتریفیوژ، مقدار نمک جذب شده اندازه‌گیری شد. دمای بهینه به دست آمده از این مرحله، برای مرحله سوم در نظر گرفته شد. در مرحله سوم نخست pH و دمای بهینه تنظیم شد. سپس با میزان جاذب ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ g عمل جذب در مدت زمان ۲۰ دقیقه انجام شد. در مرحله چهارم با مقدارها pH، دما و مقدار جاذب بهینه از مرحله‌ها پیش عملیات جذب در مدت زمان ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه صورت گرفت و زمان بهینه به دست آمد.

### نتیجه‌ها و بحث

#### تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری

تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذره‌های اکسید نیکل در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، نانوذره‌های اکسید نیکل به شکل کروی هستند.

#### طیف سنجی پرتو ایکس

شکل ۲ نتیجه طیف‌سنجی XRD نانوذره‌های اکسید نیکل را نشان می‌دهد. ساختار نانوذره‌های اکسید نیکل با استفاده از تفرق پرتوی ایکس مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اوج پیک‌ها و موقعیت پیک‌ها با استاندارد (JCPDS, 78-0643) تطابق دارد [۲۰]. در صورت نیاز می‌توان با استفاده از معادله دبای شرر<sup>۱</sup> اندازه ذره‌ها را به دست آورد [۲۱].

#### تأثیر pH

از آن جایی که pH آب نمک موجود در نفت خام در نزدیکی ۸ می‌باشد، عمل نمک‌زدایی در بازه pH ۴ تا ۹ صورت گرفت. نتیجه‌های

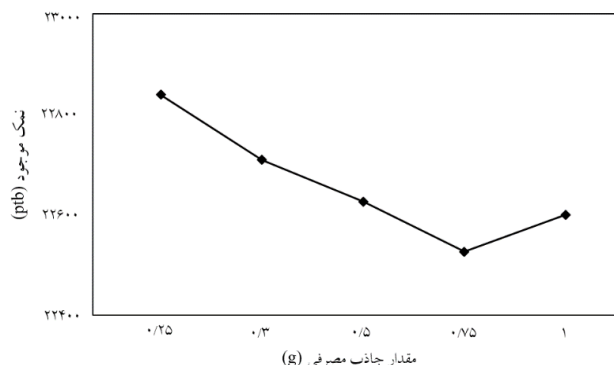
صنعت نفت نیز از همین روش برای اندازه‌گیری نمک همراه با نفت خام استفاده می‌کنند.

نخست ۵۰ میلی‌لیتر نفت خام درون یک بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد، ۵۰ میلی‌لیتر زایلین، ۵۰ میلی‌لیتر الکل (۲- پروپانول) و ۱۰۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده به بشر افزوده شد. سپس بر روی هیتر در دمای ۸۰ °C، به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. پس از پایان این مرحله زمانی به مخلوط داده می‌شود تا به صورت دو فازی تبدیل شود. در فاز پایینی آب مقطر و الکل بوده که این دو ماده به دلیل قطبی بودن در یکدیگر حل می‌شوند. فاز بالا شامل نفت و زایلین است. نمک موجود در نفت خام به دلیل قطبی بودن در فاز پایینی حل می‌شود. سپس دو فاز جداسازی شد. به فاز پایینی جداسازی شده، چند قطره آب اکسیژنه اضافه شد و محلول به جوش آمد. آب اکسیژنه باعث اکسید شدن گوگرد موجود در نمونه و متصاعد شدن گاز دی اکسید گوگرد می‌شود. سپس اجازه داده می‌شود تا محلول به دمای اتاق برسد. نمک موجود در نفت خام به صورت محلول می‌باشد که به شیوه تیتراسیون اندازه‌گیری می‌شود. ارزیابی مقدار کلرید در فاز آبی به روش تیتراسیون موهر صورت گرفت. در روش تیتراسیون موهر از یون‌های کرومات به عنوان معرف برای تیتراسیون کردن یون‌های کلرید توسط محلول استاندارد نیترات نقره استفاده می‌شود. اندکی معرف زرد رنگ دی کرومات پتاسیم به محلول افزوده شد تا به رنگ زرد در آمد. نیترات نقره ۰/۱ نرمال درون بورت قرار داده شد. نیترات نقره به محلول اضافه شد تا رنگ محلول قرمز آجری شود. البته رنگ قرمز آجری باید پایدار باشد. مقدار نیترات نقره استفاده شده تعیین شد و با این داده‌ها میزان نمک محاسبه شد [۱۷].

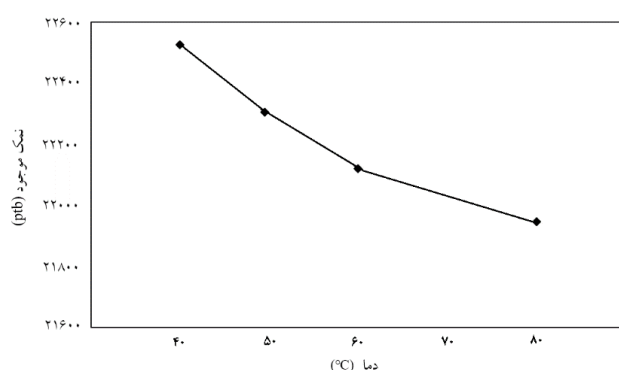
#### شرح آزمایش

برای بررسی نمک‌زدایی توسط نانوذره‌ها در مرحله اول، نخست pH نفت در مقدارهای ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ توسط سود و اسید سولفوریک تنظیم شد. سپس مقدار ۰/۲۵ از نانوذره اکسید نیکل به نفت افزوده شد و به مدت ۲۰ دقیقه بر روی شیکر قرار گرفت تا عمل جذب توسط نانو جاذب صورت پذیرد. نانوذره‌ها توسط دستگاه سانتریفیوژ جدا شد. مقدار نمک توسط روش IP-۷۷ و روش تیتراسیون موهر تعیین شد. pH بهینه که بهترین جذب نمک را داشت برای مرحله‌ها پس استفاده شد. در مرحله دوم نخست pH در شرایط بهینه تنظیم شد. سپس

(۱) Debye-Scherrer



شکل ۴ - تأثیر میزان جاذب بر میزان نمک‌زدایی از نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل



شکل ۵ - بررسی تأثیر دما بر میزان نمک‌زدایی از نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل

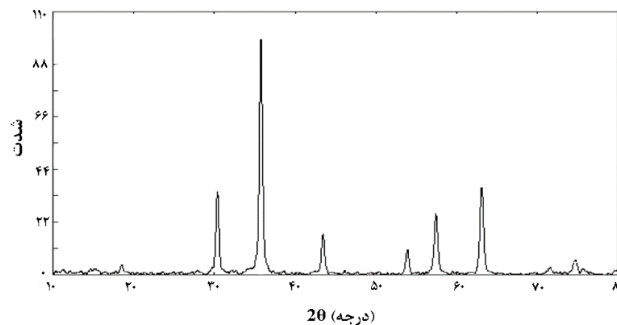
کشاورز و اسفندیاری [۱۷] از نانوذره‌های کربن به عنوان جاذب نمک از نفت خام استفاده کردند. با افزایش نانوذره‌های کربن به یک میزان معین نمک‌زدایی افزایش و پس از آن کاهش می‌یافت.

#### تأثیر دما

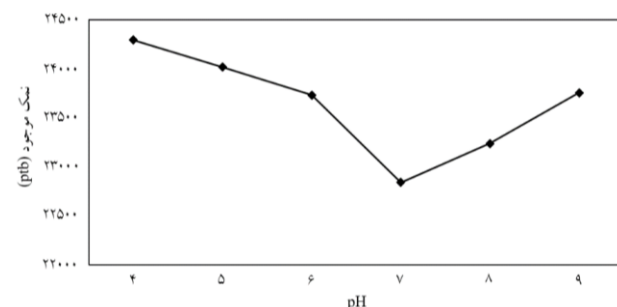
برای بررسی اثر دما بر نمک‌زدایی از نفت خام توسط نانو جاذب، نمک‌زدایی بین دمای ۴۰ تا ۸۰ °C صورت گرفت. افزایش دما سبب افزایش درصد نمک‌زدایی می‌شود (شکل ۵). در pH ۷، زمان ۲۰ دقیقه، میزان جاذب ۰/۷۵ g و دمای ۸۰ °C کم‌ترین میزان نمک وجود دارد. به عبارتی بهترین درصد نمک‌زدایی در این دما به میزان ۴۳/۳ درصد صورت گرفته است.

#### تأثیر زمان

نتیجه‌های به دست آمده از نمک‌زدایی نفت خام بر حسب زمان توسط نانوذره‌های اکسید نیکل در شکل ۶ نشان داده شده است. در زمان‌های اولیه، سایت‌های فعال زیادی دارد و همچنین سطح



شکل ۲ - طیف سنجی پرتو ایکس نانوذره‌های اکسید نیکل



شکل ۳ - تأثیر pH بر میزان نمک‌زدایی از نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل

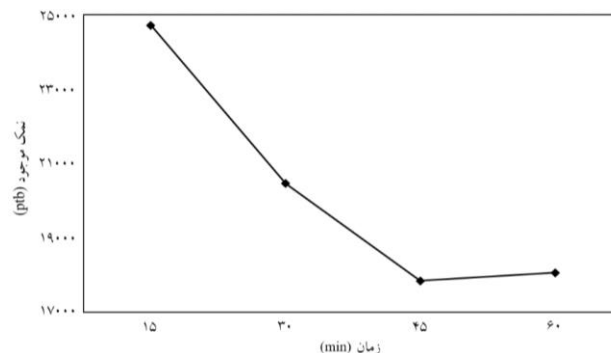
به دست آمده از آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان می‌دهد که بهترین نمک‌زدایی در pH ۷ صورت گرفته است. در pH های اسیدی با توجه به رقابت کاتیون‌ها تمایل بیش‌تر به جذب  $H^+$  است. کاهش pH منجر به کاهش جذب می‌شود. در بازه قلیایی نیز با توجه به حضور یون‌های  $OH^-$  در محلول، احتمال تشکیل لایه میانی بین جاذب و کاتیون‌ها وجود دارد. بنابراین انتظار می‌رود که بهترین جذب در pH های نزدیک به خنثی صورت پذیرد، که همین امر نیز اتفاق افتاده است. میزان جذب نمک در pH ۷ برابر ۴۰/۹ درصد به دست آمد.

#### تأثیر میزان جاذب مصرفی

شکل ۴ نشان می‌دهد که در یک غلظت ثابت محلول، هرچه مقدار جاذب بیش‌تر باشد مقدار جذب افزایش می‌یابد، تا جایی که همه یون‌های موجود در محلول توسط جاذب جذب شوند یا این که جاذب اشباع شود. بیش‌ترین میزان جذب در مقدار جاذب ۰/۷۵ g به دست آمد. درصد حذف نمک از نفت خام در pH ۷، میزان جاذب ۰/۷۵ g، دمای ۲۵ °C و زمان ۲۰ دقیقه برابر ۴۱/۸ درصد محاسبه شد. نیکخواه و همکاران [۱۶] نیز با افزایش میزان نانوذره‌های اکسید تیتانیوم به عنوان جاذب رفتار همانندی را دیدند. با افزایش میزان جاذب پس از حد معینی نمک موجود در نفت خام ثابت شد.

### نتیجه‌گیری

نانوذره‌های اکسید نیکل قابلیت جداسازی نمک از نفت خام را داشت و بالاترین جداسازی نمک به میزان ۵۳/۹ درصد به دست آمد. این میزان جداسازی نمک در شرایط بهینه، دما °C ۸۰، pH برابر ۷، مقدار جاذب مصرفی g ۰/۷۵ و زمان ۴۵ دقیقه به دست آمد. همه شرکت‌های فعال در حوزه انتقال نفت خام در درون و خارج از کشور می‌توانند از این روش برای جداسازی نمک همراه نفت خام استفاده کنند. انرژی مصرف شده در این روش بسیار کم‌تر از روش‌های گرمایی برای نمک‌زدایی از نفت خام می‌باشد. با توجه به قیمت بالای نانوذره‌های اکسید نیکل می‌توان روش‌های سنتز این ماده را بررسی کرد و روش کم هزینه را برای تولید آن مد نظر قرار داد. پیشنهاد دیگر برای کاهش هزینه‌ها استفاده از چند نانوذره در کنار یکدیگر برای جذب نمک می‌باشد، این روش توسط پژوهشگران همین پژوهش در حال بررسی است. برای کم کردن هزینه‌ها می‌توان تلفیقی از چندین روش نمک‌زدایی را مد نظر گرفت.



شکل ۶ - بررسی تأثیر زمان بر میزان نمک‌زدایی از نفت خام با استفاده از نانوذره‌های اکسید نیکل

جاذب از جذب شونده خالی می‌باشد. پس از مدتی بخش عمده‌ای از سطح جاذب توسط جذب شونده پر می‌شود و سایت‌های در دسترس کم‌تر می‌شود، بنابراین شیب منحنی کاهش می‌یابد. این اتفاق با گذشت زمان ۴۵ دقیقه رخ می‌دهد، بنابراین این زمان به عنوان زمان بهینه انتخاب می‌شود. سرانجام سطح جاذب به‌طور کامل از جذب شونده پر می‌شود و به اصطلاح گفته می‌شود که فرایند جذب به تعادل رسیده است. بنابراین پس از آن با گذشت زمان جذبی اتفاق نمی‌افتد. بیش‌ترین نمک‌زدایی از نفت خام توسط نانوذره‌های اکسید نیکل در شرایط بهینه شده که pH برابر ۷، دمای °C ۸۰، مقدار جاذب مصرفی g ۰/۷۵ در مدت زمان ۴۵ min صورت گرفت. درصد جذب در این شرایط ۵۳/۹ به دست آمد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

### مراجع

- [1] Suleiman R.K., Saleh T.A., Al Hamouz O.C.S., Ibrahim M.B., Sorour A.A., El Ali B., *Corrosion and Fouling Protection Performance of Biocide-Embedded Hybrid Organosiloxane Coating on Mild Steel in a Saline Medium*, *Surf. Coat. Technol.*, **324**: 526-535 (2017).
- [2] Kiani S., Moradi S., Soltani Soulgani B., Mousavian S., *Study of a Crude Oil Desalting Plat of the National Iranian South Oil Company in Gachsaran by using Artificial Neural Networks*, *Int. J. Environ. Eco. Eng.*, **7**: 1015-1018 (2013).
- [3] Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.O., Williams T., *Electrostatic Enhancement of Coalescence of Water Droplets in Oil: A Review of the Current Understanding*, *Chem. Eng. J.*, **8**: 173-192 (2001).
- [4] Abdalla K., Gasmseed G., Elnour M., Ahmed A., *Optimum Electrostatic Desalting Efficiency of Alfulla Crude Oil*, *J. Eng. Comput. Sci.*, **16**: 56-62 (2015).
- [5] Vafajoo L., Ganjian K., Fattahi M., *Influence of key Parameters on Crude Oil Desalting: An Experimental and Theoretical Study*, *J. Pet. Sci. Eng.*, **90-91**: 107-111 (2012).

- [6] Mahdi K., Gheshlaghi R., Zahedi G., Lohi A., [Characterization and Modeling of a Crude Oil Desalting Plant by a Statistically Designed Approach](#), *J. Pet. Sci. Eng.*, **61**: 116-123 (2008).
- [7] Sotelo C., Favela-Contreras A., Sotelo D., Beltran-Carbajal F., Cruz E., [Control Structure Design for Crude Oil Quality Improvement in a Dehydration and Desalting Process](#), *Arab. J. Sci. Eng.*, **43**: 6579-6594 (2018).
- [8] Sad C.M.S., Santana I.V., Morigaki M.K., Medeiros E.F., Castro E.V.R., Santos M.F.P., Filgueiras P.R., [New Methodology for Heavy Oil Desalination](#), *Fuel*, **150**: 705-710 (2015).
- [9] Ibrahim D.S., Sami N.A., [Experimental Study of Desalting and Dehydration of Two Samples of Iraqi Crude Oils](#), *Pet. Sci. Technol.*, **33**: 1533-1539 (2015).
- [۱۰] گنجی زاده ا، اشرفی زاده س.ن.ا، تعیین شرایط بهینه نمک‌زدایی از آب همراه با فرایند الکترودیالیز، پژوهش نفت، **۸۹**: ۳۵ تا ۴۴ (۱۳۹۵).
- [11] Sellami M.H., Naam R., Temmar M., [Optimization of Operating Parameters of Oil Desalting in Southern Treatment Unit \(HMD/Algeria\)](#), *J. Pet. Environ. Biotechnol.*, **7(2)**: 1-6 (2016).
- [12] Zahedi G., Saba S., al-Otaibi M., Mohd-Yusof K., [Troubleshooting of Crude Oil Desalination Plant using Fuzzy Expert System](#), *Desalination*, **266**: 162-170 (2011).
- [13] Mohammadi F., Mohammadi M., Nonahal B., [A Comprehensive Electrical Model for the Electrostatic Desalting Process of Crude Oil](#), *Pet. Coal*, **61(4)**: 738-748 (2019).
- [14] Sotelo C., Favela-Contreras A., Ramirez-Mendoza R.A., Beltran-Carbajal F., Cruz E., Sotelo D., [Rigorous Dynamic Simulation of a Dehydration and Desalting Crude Oil Unit using Aspen Hysys](#), *Int. J. Simul. Model.*, **20(2)**: 231-242 (2021).
- [15] Ramirez-Argaez M.A., Abreú-López D., Gracia-Fadrique J., Dutta A., [Numerical Study of Electrostatic Desalting Process Based on Droplet Collision Time](#), *Processes*, **9**: 1226 (2021).
- [16] Nikkhah M., Tohidian T., Rahimpour M.R., Jahanmiri A., [Efficient Demulsification of Water-in-Oil Emulsion by a Novel Nano-Titania Modified Chemical Demulsifier](#), *Chem. Eng. Res. Des.*, **94**: 164-172 (2015).
- [17] Keshavarz H., Esfandiari N., [Crude Oil Desalting by using Nanocarbon](#), *J. Chem. Pet. Eng.*, **51**: 47-53 (2017).
- [18] Liu J., Wang H., Liu X., Jia W., Zhao Y., Pen S., [Recyclable Magnetic Graphene Oxide for Rapid and Efficient Demulsification of Crude Oil –in- Water Emulsion](#), *Fuel*, **189**: 79-87 (2017).
- [19] Hassan S.A., Abdalla B.K., Mustafa M.A., [Addition of Silica Nano-Particle for the Enhancement of Crude Oil Demulsification Process](#), *Pet. Sci. Technol.*, **37**: 1603-1611 (2019).
- [20] Fazlali F., Mahjoub A.R., Abazari R., [A New Route for Synthesis of Spherical NiO Nanoparticles via Emulsion Nano-Reactors with Enhanced Photocatalytic Activity](#), *Solid State Sci.*, **48**: 263-269 (2015).
- [۲۱] حسینی زوار محله س.ر، قاسمی میر ش، پور صادق لیمویی ش، بررسی مقایسه‌ای اکسایش الکتروکاتالیستی برخی از الکل‌های مهم در سطح الکتروکاتالیست کربن اصلاح شده با نانوالیاف نیکل اکسید الکتروکاتالیستی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی، **۳۷(۴)**: ۱۰۹ تا ۱۲۰ (۱۳۹۷).