

بررسی نحوه عملکرد انواع نمک‌زدای الکتروستاتیک نفت خام

مهدی محمدی*، رحمت ا. گلپاشا، سعید سلطانعلی
تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده توسعه فناوریهای پالایش و فرآوری نفت خام
دریافت: ۹۱/۶/۲۱ پذیرش: ۹۱/۹/۱۰

چکیده

فرآیند نمک‌زدایی یکی از مهمترین مراحل واحدهای بهره‌برداری در بخش تأسیسات سرچاهی فرآوری نفت خام و اولین مرحله در واحدهای پالایشگاهی می‌باشد. با توجه به ساز و کار پیچیده این فرآیند، جنبه‌های مختلفی از آن همچنان ناشناخته باقی مانده است. در این مقاله سعی شده تا با معرفی فرآیند و پدیده‌های متعددی که درون یک نمک‌زدای نفت خام روی می‌دهد، شناخت دقیق‌تری از نحوه عملکرد آن بدست آید. اصول بنیادی نمک‌زدایی الکتروستاتیک نفت خام را می‌توان در ادغام قطرات کوچک آب تحت میدان الکتریکی اعمال شده و تشکیل قطرات بزرگتر آب با سرعت ته‌نشینی بالاتر خلاصه نمود. همچنین تأثیر عوامل مختلف عملیاتی نظیر خصوصیات نفت خام، دما، شدت میدان الکتریکی، غلظت امولسیون‌زدا و میزان آب شستشو به کمک معادلات حاکم بر این پدیده مورد بررسی قرار گرفت.

واژگان کلیدی: نمک‌زدایی، نفت خام، جداسازی، الکتروستاتیک، پارامترهای عملیاتی

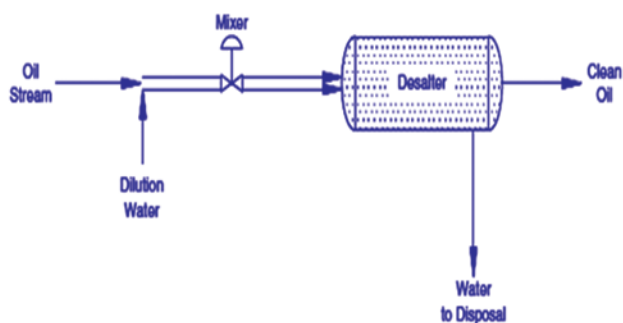
مقدمه

ایجاد مشکلات فراوانی در فرآیندهای پالایشی می‌شود [۱]. نمک کلرید سدیم بخش اصلی نمک موجود در نفت خام را تشکیل می‌دهد. کلریدهای کلسیم و منیزیم در مرتبه بعد قرار می‌گیرند. این نمک‌ها تقریباً در تمام آب‌های همراه نفت خام یافت می‌شوند. نمک‌ها بندرت در نفت خام (فاز آلی) حضور داشته و در صورت وجود به شکل گونه‌های معلق و حل‌ناشونده یافت می‌شوند. تقریباً در تمامی موارد، نمک موجود در نفت خام

نفت خام استخراج شده از میدان نفتی همواره مقادیری آب شور به صورت امولسیون به همراه دارد. میزان آب همراه نفت خام به نحوه استقرار فازهای درون مخزن، موقعیت جغرافیایی حوزه نفتی (خشکی^۱ یا دریا^۲)، طول عمر مخزن، نحوه استخراج و به ویژه استفاده از روش تزریق آب به منظور ازدیاد برداشت بستگی دارد. آب همراه نفت خام حاوی املاح و نمک‌هایی است که باعث

* mohammadym@ripi.ir
1. Onshore

2. Offshore



شکل ۱: نمای کلی فرآیند نمکزدایی نفت خام [۴]

نمکزدایی تاثیر داشته که از آن جمله می‌توان به ولتاژ، pH، چگالی و گرانیوی نفت خام و نیز نسبت حجمی آب شستشو به نفت خام اشاره نمود [۴].

موادی که بر روی فصل مشترک آب و نفت اثرگذارند مانند آسفالتن، رزین‌ها، واکس‌ها، اجزای جامد، خاک رس یا اسیدهای آلی که در نفت خام وجود دارند، می‌توانند به عنوان پایدارکننده‌های امولسیون^۲ عمل نمایند. بنابراین نمک‌زدا می‌بایست توانایی شکستن پیچیده‌ترین امولسیون‌ها را داشته باشد. میزان نمکزدایی به نحوه طراحی نمک‌زدا و شرایط عملیاتی وابسته است.

ابتدا آب شستشو در یک شیر اختلاط ویژه که قادر است آب را به شکل قطرات بسیار ریز در آورد داخل نفت خام پراکنده می‌شود که باعث کاهش غلظت نمک در آب خواهد شد. اگر آب شستشو اضافه نشود، قطرات آب موجود در نفت خام احتمال برخورد و تجمع با یکدیگر را نخواهند داشت. مخلوط آب و نفت سپس به داخل مخزن نمک‌زدا هدایت شده که در آن میدان الکتریکی باعث جداسازی آب و نفت می‌گردد [۵].

در مخزن نمک‌زدا، امولسیون آب-نفت در معرض یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. این میدان لایه نفت اطراف قطرات آب منفرد را شکسته تا امکان ترکیب چند قطره با یکدیگر و تشکیل قطرات بزرگتر آب فراهم شود. سپس این قطرات بزرگتر در اثر نیروی جاذبه ثقلی به پایین سقوط کرده از محدوده میدان الکتریکی خارج می‌شوند. بنابراین به تدریج تعداد قطرات کاهش می‌یابد و یا به عبارت دیگر، فاصله بین

به صورت حل شده در قطرات کوچک آب ظاهر شده و کلریدها و سولفات‌ها نیز به حالت محلول در قطره‌های آب حضور دارد [۲]. به دلیل مشکلات فراوان ناشی از حضور نمک‌ها، نمک‌زدایی ابتدا در واحدهای بهره‌برداری سرچاهی تا میزان ۲۰-۱۰ (پوند در هر ۱۰۰۰ بشکه^۱) و سپس در پالایشگاه‌ها قبل از ارسال به واحد تقطیر تا میزان ۵ PTB، انجام می‌شود. اصولاً چنانچه میزان املاح موجود در نفت خام از ۱۰ PTB بیشتر باشد، می‌بایست حتماً آن را نمک‌زدایی نمود. با این وجود بسیاری از پالایشگاه‌ها حتی در مواردی که میزان نمک از این مقدار نیز کمتر باشد اقدام به نمک‌زدایی نفت خام ورودی می‌کنند. چرا که رسوب نمک باعث جرم‌گرفتگی و خوردگی در تاسیسات و آلودگی کاتالیست‌های مورد استفاده در فرآیندهای مختلف پالایش می‌شود [۳].

میزان نمک از جنبه ایجاد خوردگی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. زمانی که نفت خام تقطیر می‌شود نمک‌های کلرید تجزیه شده و اسید کلریدریک تولید می‌کنند که اثرات خوردگی شدیدی به همراه خواهد داشت. اثرات زیان‌بار دیگری که می‌تواند ایجاد شود رسوب‌گذاری و مسدود کردن مبدل‌ها، لوله‌های کوره و سینی‌های پایین برج تقطیر است. کربنات‌های کلسیم و منیزیم و سولفات‌های کلسیم و استرانسیم بر روی سطوح تبادل حرارتی رسوب می‌کنند. این رسوبات باعث کاهش ظرفیت حرارتی و بازده فرآیند می‌شوند. علاوه بر حذف آب شور، وظیفه دیگر واحد نمک‌زدا حذف ناخالصی‌هایی مانند شن، گل، اکسید آهن، سولفات آهن و آرسنیک از نفت خام می‌باشد. چرا که بعضی از فلزات در ترکیبات غیر آلی حل شده در آب امولسیون شده و در نفت خام حضور دارند و می‌توانند باعث آلودگی و غیر فعال شدن کاتالیست‌های مورد استفاده در فرآیندهای مختلف پالایشگاه گردند [۱].

اساس روش نمک‌زدایی تزریق آب شستشو به نفت خام شور به منظور انحلال و رقیق‌سازی املاح موجود در نفت خام و سپس جداسازی آب از نفت درون مخزن نمک‌زدا به کمک یک میدان الکتریکی قوی می‌باشد (شکل ۱). عوامل مختلفی بر بازده فرآیند

1. PTB

2. Emulsifier

برای جفت قطراتی که نزدیک یکدیگر هستند، نیروی جاذبه قوی است و موجب تغییر شکل وجوه متقابل آنها شده و اغلب به ادغام آنها می‌انجامد. نیروهایی که در حرکت قطرات موثر هستند عمدتاً شامل نیروهای وزن، شناوری، پسا^۱، نیروی تخلیه لایه‌ای و نیروی دو قطبی است [۸].

در بخش‌های آینده این مقاله سعی می‌شود تا ضمن معرفی فرآیند و تبیین اصول بنیادی نمک‌زدایی الکتروستاتیک نفت‌خام، مکانیزم عملکرد این تجهیز به صورت دقیقی مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین انواع میدان‌های الکتریکی مورد استفاده در این فرآیند و مزایا و معایب آنها بررسی شده و معادلات حاکم بر پدیده‌های موجود در نمک‌زدا تشریح خواهند شد. در پایان تأثیر پارامترهای مختلف بر نحوه عملکرد نمک‌زدا و بازده جداسازی آب از نفت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

قطرات افزایش می‌یابد. این بدین معنا است که هر قدر هم عملیات نمک‌زدایی بهتر انجام شود در هر حال به شرایطی می‌رسد که نمی‌توان آب بیشتری را جدا نمود [۶].

همانطور که در شکل (۲) آمده است، موقعیت فرآیند تجمع الکتریکی قطرات آب در نفت در بین فرآیندهایی مثل روش شیمیایی کاربرد موملسیفاور و یاروش سانتریفوژی هیدروسیکلون قرار دارد. مکانیزم‌های متعددی نیز برای توجیه این فرآیند تاکنون مطرح شده که مهمترین آنها مکانیزم سه مرحله‌ای می‌باشد [۷]. تأثیر میدان الکتریکی روی امولسیون آب در نفت در ابتدا موجب پلاریزه شدن قطرات رسانای آب شده و نیروی جاذبه بین آنها را تقویت می‌کند. برای قطراتی که خیلی نزدیک نیستند، نیروی متقابل دو قطبی^۱ بسیار کوچک بوده و اثر آن در حالتی که امولسیون در حرکت است قابل صرف‌نظر کردن است.



شکل ۲: جایگاه، مکانیزم‌ها و عوامل موثر در فرآیند نمک‌زدایی الکتروستاتیک نفت‌خام [۷]

1. Dipole-dipole

2. Drag

شرح فرآیند نمک‌زدایی

عملیات نمک‌زدایی، بسته به ویژگی‌های نفت خام و میزان مجاز نمک در نفت خروجی، به وسیله مخلوط کردن نفت خام با ۳ تا ۱۰ درصد حجمی آب در دمای ۶۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. نسبت آب به نفت و دمای عملیات تابع دانسیته نفت خام می‌باشد. این مخلوط تشکیل یک امولسیون آب در نفت می‌دهد که توسط روش الکتروستاتیکی قابل جداسازی است. حرارت دادن به دلیل کاهش گرانی و کشش سطحی، به منظور اختلاط آسان‌تر نفت خام و آب شستشو انجام می‌پذیرد. استفاده از حرارت باعث کاهش گرانی نفت خام و ایجاد نیروی بیشتر در حین برخورد قطرات آب می‌گردد. همچنین، گرانی پایین‌تر باعث سرعت بخشیدن به ته‌نشینی قطرات آب در ظرف نمک‌زدا می‌شود. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، درصد آب شستشو و دمای عملیات به چگالی نفت خام بستگی دارد [۹].

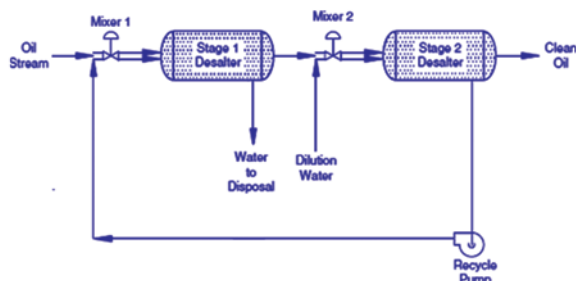
نمک‌ها در آب شستشو حل شده، سپس در مخزن جداکننده، آب و نفت از هم جدا می‌شوند. این جدا شدن در اثر ایجاد یک میدان الکتریکی با پتانسیل بالا به منظور تسریع در به هم چسبیدن قطره‌های آب حاوی نمک صورت می‌پذیرد. اختلاف پتانسیل الکتریکی لازم معمولاً ۲۴-۱۸ کیلو ولت است. میدان الکتریکی متناوب در نزدیکی سطح مشترک نفت و آب اعمال می‌شود. این فرآیند باعث جداسازی موثرتر آب در دماهای پایین‌تر شده و در نتیجه، بازدهی انرژی بالاتری بدست می‌آید. نفت خام نمک‌زدایی شده بطور پیوسته از بخش بالایی مخزن نمک‌زدا و آب شور جدا شده از پایین آن خارج می‌شوند.

در صورتی که واحد نمک‌زدایی تک مرحله‌ای نیاز به آب شستشو یا آب رقیق‌کننده^۱ زیادی داشته باشد، از سیستم نمک‌زدایی دو مرحله‌ای همانند شکل (۳) استفاده می‌شود. در واحدهای نمک‌زدایی تک مرحله‌ای، بازده عملیات می‌تواند حداکثر تا ۹۵% باشد ولی در واحدهای دو مرحله‌ای تا ۹۹% نیز قابل افزایش است [۳].

در واحدهای نمک‌زدایی دو مرحله‌ای آب و نفت خام به صورت متقابل وارد نمک‌زداها می‌شوند، بطوریکه آب تازه ابتدا وارد

جدول ۱: شرایط عملیات نمک‌زدایی بر حسب درجه API نفت خام [۹]

درجه API	درصد حجمی آب شستشو	دما (°C)
API > 40	۳ - ۴	۶۰ - ۱۲۵
30 < API < 40	۴ - ۷	۱۲۵ - ۱۴۰
API < 30	۷ - ۱۰	۱۴۰ - ۱۵۰

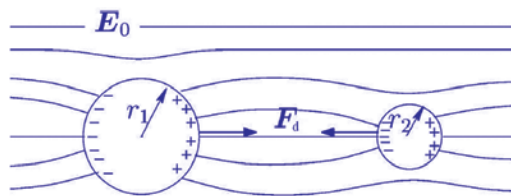


شکل ۳: واحد نمک‌زدایی دو مرحله‌ای [۴]

مرحله دوم شده و آب خروجی از آن وارد مرحله اول می‌گردد. در حالیکه نفت خام ابتدا وارد نمک‌زدای مرحله اول و سپس مرحله دوم می‌شود. قبل از ورود به مخزن نمک‌زدا، نفت خام با آب شستشوی خروجی از مرحله دوم که غلظت مواد محلول در آن افزایش یافته است در شیر اختلاط اول مخلوط شده و وارد نمک‌زدای مرحله اول می‌شود. نفت خروجی از این مرحله که تا حدی نمک آن کاهش یافته است به همراه آب رقیق‌کننده که میزان املاح آن کم است در شیر اختلاط دوم مخلوط شده و وارد نمک‌زدای مرحله دوم می‌شود تا باقیمانده نمک‌های موجود در آن جدا شود. نفت نمک‌زدایی شده خروجی از مرحله دوم به عنوان نفت محصول از قسمت بالایی نمک‌زدا خارج شده و آب شور جدا شده در مرحله دوم بعنوان آب شستشو وارد مرحله اول می‌شود. پس‌اب حاصل از مرحله دوم بعنوان پس‌اب نهایی به سمت تاسیسات تصفیه هدایت می‌گردد.

نفت خام‌های سنگین نفتنی با درجه API پایین‌تر در مقایسه با سایر نفت‌ها، امولسیون‌های پایدارتری با آب ایجاد می‌کنند که موجب کاهش کارایی دستگاه‌های نمک‌زدایی می‌شوند. نفت‌های خام با گرانی بالاتر نیز بطور معمول امولسیون پایدارتری نسبت به نفت خام با گرانی پایین‌تر ایجاد می‌نمایند. امولسیون‌های

شده مجاور نسبت به یکدیگر دارای جاذبه الکتریکی می‌باشند. در انتهای منفی یک قطره بخش مثبت قطره‌ی دیگر در نزدیک‌ترین فاصله قرار دارد، بنابراین یک نیروی جاذبه بین دو بخش انتهایی وجود دارد که تمایل دارد قطرات را به سمت یکدیگر جذب کند. اگر این نیرو به اندازه کافی قوی باشد، قطرات حرکت کرده و لایه‌های خارجی قطرات (لایه نفت) شکسته شده و اجازه می‌دهد تا قطرات به هم بچسبند و قطره بزرگتری تشکیل شود.



شکل ۴: نیروی الکتریکی F_d بین دو قطره با شعاع r_1 و r_2 در میدان الکتریکی با شدت E_0 [۱۱]

یک قطره معلق در میان یک جفت الکتروود تحت تاثیر پنج نیروی مختلف قرار دارد (شکل ۵). در این بین دو نیرو از جنس هیدرولیکی هستند. نیروی وزن و شناوری که تمایل دارد موجب حرکت رو به پایین قطرات گردد و نیروی پسا که به وسیله جریان نفت عبوری از روی قطره اعمال می‌شود و تمایل دارد موجب بالا رفتن قطره به سمت خروجی نفت گردد. اگر اندازه قطره آب از قطر قطره‌ای که با رابطه استوک (رابطه ۱) بیان می‌شود بزرگتر باشد، تاثیر وزن از نیروی پسا بیشتر بوده و قطره آب به سمت پایین سقوط کرده و از نفت جدا خواهد شد.

$$d_{stoke} = \left(\frac{18\mu_0 v \nu}{g(\rho_w - \rho_o)} \right)^{0.5} \quad (1)$$

به منظور بالا بردن بازدهی فرآیند نمک‌زدایی، نیروهای الکتروستاتیک باید قادر باشند قطرات کوچک را با یکدیگر منعقد نموده و اندازه آن‌ها را به قطرهایی بزرگتر از قطر استوک برساند. سه نیروی الکتروستاتیک که بر قطرات آب اعمال می‌شوند عبارتند از: نیروهای دو قطبی^۱، الکتروفورتیک^۲ و دی الکتروفورتیک^۳ [۱۲].

نفت خام با گرانی بالا معمولا بسیار پایدار بوده و جداسازی آن‌ها مشکل است؛ زیرا گرانی بالا مانع حرکت قطرات آب پراکنده شده و در نتیجه به هم پیوستن قطرات را دچار تاخیر و کندی می‌نماید. در اغلب موارد این نوع نفت‌های خام حاوی امولسیفایرهای بیشتری نسبت به نفت‌های سبک‌تر می‌باشند.

همانطور که گفته شد در فرآیند نمک‌زدایی آب رقیق‌کننده (شستشو) و نفت خام توسط یک شیر اختلاط با هم مخلوط می‌شوند تا تماس بین آنها به صورت مطلوب انجام شود. یکی از مهمترین بخش‌های فرآیند نمک‌زدایی اختلاط آب شستشو با نفت خام می‌باشد. هرچه اندازه قطرات آب شستشوی پراکنده شده در نفت خام کمتر باشد، امکان تماس آن‌ها با قطرات آب شور همراه نفت خام بیشتر می‌شود [۱]. افت فشار بهینه مورد نیاز برای ایجاد امولسیون آب در نفت خام باید به صورت تجربی تعیین شود. بطور معمول این افت فشار حدود ۳۰-۵۰ psi می‌باشد [۱۰].

معمولا هر مجموعه الکتروود که در مخزن نمک‌زدا نصب می‌شود شامل سه عدد الکتروود موازی تقریبا هم‌اندازه می‌باشد. هر الکتروود به یک بخش از ثانویه ترانسفورماتور سه فاز متصل می‌گردد. با تنظیم فواصل بین الکتروودها می‌توان گرادیان ولتاژ مناسب را ایجاد نمود. الکتروودها به وسیله میله‌های عایق از سقف مخزن معلق نگهداشته می‌شوند. الکتروودها باید به صورت صحیح نصب شوند تا ولتاژ یکنواختی درون مخزن ایجاد نمایند [۱۰].

اصول نمک‌زدایی الکتروستاتیک

قطره‌ای از یک مایع که در مایع دیگری معلق است، چنانچه هیچ نیروی خارجی به آن وارد نشود، به شکل کره‌ای کامل در نظر گرفته می‌شود. در صورتیکه میدان الکتریکی با ولتاژ بالا اعمال شود، قطره از حالت کروی تغییر شکل می‌دهد. بارهای مثبت و منفی در قطره در نیمکره‌ای که مقابل الکتروود با بار مخالف قرار گرفته است، متمرکز می‌شوند. به این عمل اصطلاحا پلاریزه شدن قطره می‌گویند [۱۱]. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، دو قطره‌ی پلاریزه

1. Dipole-dipole
2. Electrophoretic

3. Dielectrophoretic

قطرات آب اندازه یکنواختی داشته و بطور همگن توزیع شده باشند. واضح است که فاصله میان قطرات بطور عکس با حجم آب پراکنده شده (X) متناسب است (رابطه ۵). بنابراین، با به هم چسبیدن و انعقاد قطرات آب پراکنده و جدا شدن از نفت، فاصله میان قطرات افزایش یافته و نیروهای دو قطبی کاهش می‌یابند. همچنین رابطه (۵) نشان می‌دهد که وقتی شعاع قطره افزایش می‌یابد، فاصله میان قطرات نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین در طول زمان و با انعقاد و به هم چسبیدن قطرات و جدا شدن آن‌ها از نفت، نیروی دو قطبی کاهش می‌یابد [۱۲].

$$s = r \left(\frac{1.333\pi}{X} \right)^{0.333} \quad (5)$$

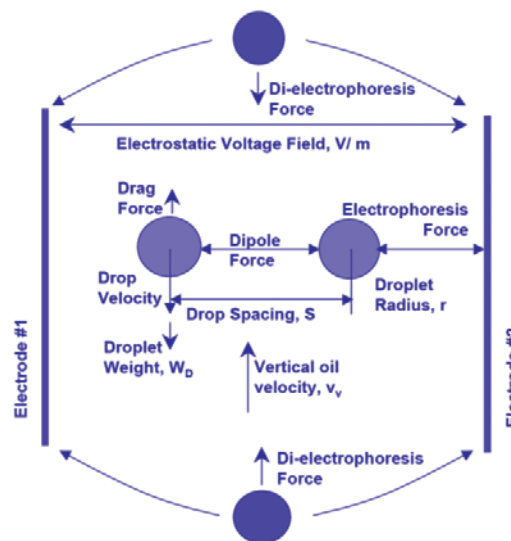
با توجه به رابطه (۳)، نیروی الکتروفور تیک مستقل از فاصله میان قطرات بوده، اما به ضریب گذردهی و گرانیوی نفت خام وابسته است. همچنین این رابطه نشان می‌دهد، نیروی الکتروفور تیک در نفت خامی که دارای ضریب گذردهی بالایی است به سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه (۴)، نیروی دی الکتروفور تیک مستقل از فاصله قطرات و وابسته به گرادیان شدت میدان بوده و قطرات درشت‌تر را به سمت میدان الکتریکی قویتر می‌کشاند.

انواع میدان‌های الکتروستاتیکی

بطور کلی سه نوع میدان الکتروستاتیکی به منظور افزایش میزان انعقاد قطرات آب پراکنده قابل استفاده است که عبارتند از: میدان جریان متناوب (AC)، میدان جریان مستقیم (DC)، و میدان ترکیبی (AC/DC).

۱- میدان جریان متناوب (AC)

همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، میدان AC توسط یک ترانسفورماتور متصل به الکترودهای افقی معلق در مخزن نمک-زدا اعمال می‌شود. در میدان AC به علت تغییر جهت و معکوس شدن سریع جریان پیش از آنکه محصولات حاصل از خوردگی بتوانند از محل واکنش دور شوند، درگیر واکنش شیمیایی واکنش شیمیایی فرآیند خوردگی معکوس شود. بنابراین، هیچ گونه خوردگی خالصی ایجاد نخواهد شد. به دلیل



شکل ۵: نیروهای موثر در انعقاد قطرات [۱۲]

نیروی دو قطبی بواسطه جهت‌گیری مولکول‌های قطبی آب درون قطره ایجاد شده و با شدت میدان الکتریکی، اندازه قطره و فاصله قطرات متناسب است [۱۲].

$$F_d = \frac{6 K E^2 r^6}{s^4} \quad (2)$$

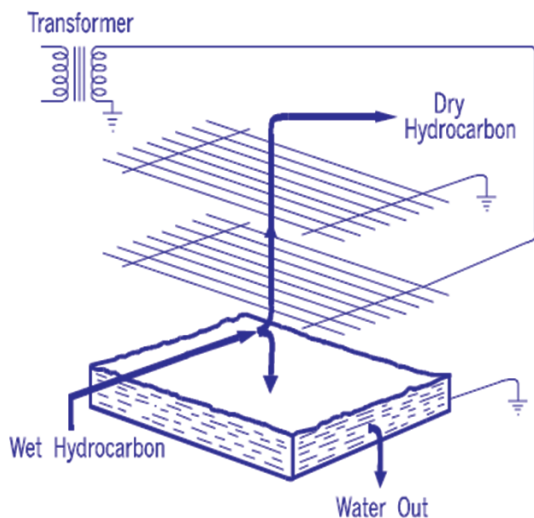
نیروی الکتروفور تیک هم از نوع جاذبه و هم از نوع دافعه بوده که در یک میدان ولتاژ یکنواخت میان قطرات باردار و الکترودها ایجاد می‌شوند. این نیروها با شدت میدان، اندازه قطره و ضریب گذردهی نفت متناسب است [۱۲].

$$F_e = C \pi^3 \mu_o \epsilon_o r^2 E^2 e^{(-\sigma_o t / \epsilon_o)} \quad (3)$$

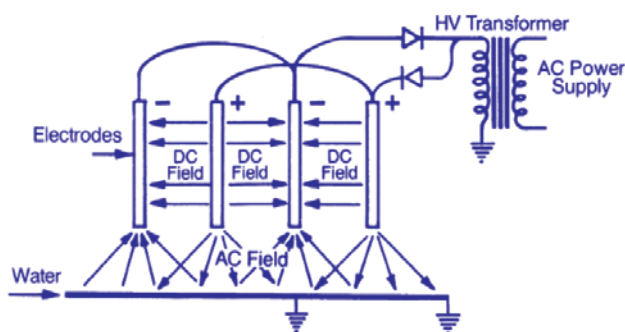
نیروی دی الکتروفور تیک از نوع نیروهای جاذبه بوده که در یک میدان غیر یکنواخت بین قطرات و الکترودها ایجاد می‌شود. این نیرو قطرات را به سمت میدان الکتریکی قویتر هدایت کرده و با اندازه قطره و ضریب گذردهی نفت متناسب است [۱۲].

$$F_{diel} = 2\pi r^3 \epsilon_o \left(\frac{\epsilon_w - \epsilon_o}{\epsilon_w + 2\epsilon_o} \right) \nabla E^2 \quad (4)$$

همانطور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود، نیروی دو قطبی وابسته به اندازه قطره آب و فاصله میان آنها است با فرض اینکه



شکل ۶: ساختار کلی یک نمک زدای AC [۱۳]



شکل ۷: ساختار کلی یک نمک زدای AC/DC [۱۳]

الکترودها و یک میدان DC در بین الکترودهای عمودی مجاور هم برقرار می‌نماید (شکل ۷). بنابراین میدان جریان مستقیم محدود به ناحیه الکترودهای عمودی بوده در حالیکه ساختار استفاده شده یک میدان AC را نیز درون مخزن ایجاد می‌نماید که وظیفه آن ممانعت از بروز خوردگی است. این ساختار امکان مهاجرت و برخورد قطرات بسیار ریز باقیمانده را در میدان DC فراهم نموده تا حداکثر میزان حذف آب حاصل شود.

تاثیر شرایط عملیاتی بر بازدهی فرآیند نمک زدایی

فرآیند نمک‌زدایی نفت خام بطور کلی به عوامل فراوانی وابسته است. در این میان عواملی که ممکن است بازدهی سیستم را از

ملاحظات خوردگی امروزه کاربرد میدان‌های DC تنها محدود به مواردی شده است که فاز پیوسته شامل محصولات پالایش شده با هدایت الکتریکی کمتری نسبت به نفت‌های خام می‌باشند. معمولاً یک میدان AC ضعیف بین الکترودها و فصل مشترک دو فاز و یک میدان AC قوی بین الکترودها شارژ شده و الکترودها زمین برقرار می‌شود. مخلوط آب و نفت از بالای فصل مشترک دو فاز وارد مخزن می‌شود و در ابتدا در اثر میدان AC ضعیف، منعقد شده و بعد از آن به کمک میدان AC قوی بیشتر منعقد شده و آب‌زدایی می‌شود [۱۳].

۲- میدان جریان مستقیم (DC)

در میدان‌های جریان مستقیم، قطرات بعد از برخورد به الکترودها باردار شده و هنگام حرکت به سمت الکترودها مقابل با هم برخورد کرده و منعقد می‌شوند. ماهیت ثابت و تک جهتی این میدان موجب مهاجرت قطرات شده و این امکان را فراهم می‌آورد تا احتمال انعقاد قطرات ریزی که با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند افزایش یابد. از آنجا که قطرات در یک میدان DC طی برخورد با الکترودها باردار می‌شوند، این امر باعث افزایش نیروهای الکتروستاتیک اعمال شده بر روی قطرات شده و موجب افزایش انعقاد قطرات می‌شود. متأسفانه، با وجود مزایای اشاره شده، به دلیل ملاحظات خوردگی و امکان اتصال کوتاه در میدان‌های DC در عمل کاربرد آن مشکلات فراوانی را ایجاد خواهد کرد [۱۲].

۳- میدان ترکیبی AC/DC

میدان ترکیبی AC/DC قابلیت تحمل درصد بالای آب (مزیت میدان AC) و بازدهی بالا (مزیت میدان DC) را بطور همزمان فراهم می‌آورد. در دهه ۱۹۷۰ میلادی، فرآیندی با عنوان تجاری Dual polarity برای بکارگیری ترکیبی از میدان‌های AC و DC به منظور دستیابی و استفاده از مزایای هر دو نوع میدان و پرهیز از مشکلات خوردگی میدان‌های DC، مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافت [۱۴]. روش خاص اتصال الکتریکی که در این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد یک میدان AC در ناحیه زیر

نمودن امولسیفایرهای طبیعی نظیر واکس و آسفالتن و همچنین حرکت براونی قطرات آب را در امولسیون نفت خام، افزایش می‌دهد. این امر موجب می‌شود تا برخورد میان قطرات و به هم چسبیدگی آن‌ها بیشتر شده و در نتیجه بازده جداسازی آب از نفت خام افزایش یابد. با این وجود، در صورتی که دما خیلی بالا باشد، اختلاف دانسیته نفت خام و آب کاهش می‌یابد. در نتیجه ته نشینی قطرات بر اساس قانون استوک کند شده و بازده جداسازی کاهش خواهد یافت [۱۷]. تأثیر دما همچنین در تحقیقات انجام شده به روش CFD از طریق بررسی سرعت تجمع قطرات در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹].

۳- شدت میدان الکتریکی

معمولاً در اغلب نمک‌زدهای نفت خام از یک سطح ولتاژ مشخص در الکترودها به منظور دستیابی به میزان جداسازی مناسب استفاده می‌شود. با این وجود، همانطوری که معادلات نیروهای الکتریکی نشان می‌دهند، قطرات کوچکتر به ولتاژ بالاتری برای ایجاد نیروی کافی به منظور غلبه بر نیروهای هیدرودینامیکی و افزایش انعقاد نیاز دارند [۱۶].

اصولاً در فرآیند آب‌زدایی دو حد شناخته شده برای ولتاژ وجود دارد. حد پایین ولتاژ بعنوان ولتاژ آستانه^۱ نامیده می‌شود. همانطوری که نتایج تجربی نیز به وضوح نشان می‌دهند انجام عملیات در ولتاژی کمتر از ولتاژ آستانه موجب می‌شود تا انرژی الکتروستاتیکی لازم برای آغاز انعقاد و به هم چسبیدن قطرات فراهم نشود. با این حال، انجام عملیات در ولتاژهایی تا این اندازه کم، امکان جداسازی قطرات بسیار ریز آب را غیرممکن می‌سازد. همچنین اگر ولتاژ بیش از اندازه زیاد باشد، ممکن است نیروهای الکتروستاتیکی از نیروهای بین سطحی قوی‌تر شده و موجب شکستن قطرات شود. این حد بالای ولتاژ، ولتاژ بحرانی^۲ نامیده می‌شود [۱۳].

برای انعقاد کوچکترین قطرات آب ولتاژ می‌بایست به اندازه‌ای زیاد شود تا قادر باشد نیروهای الکتروستاتیک موثر را افزایش دهد. با

نظر حذف آب نمک همراه نفت خام تحت تاثیر قرار دهند عبارتند از: نرخ جریان و خصوصیات نفت خام، دما، میدان الکتریکی، نوع و میزان ترکیب امولسیون‌زدا، و میزان آب شستشو [۱۵]. در تحقیقات انجام شده قبلی به کمک روش CFD، تأثیر این عوامل بر سرعت تجمع قطرات آب و عملکرد نمک‌زدا مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶-۱۹].

۱- نرخ جریان و خصوصیات نفت خام

مهمترین خصوصیات فیزیکی نفت خام که دارای اهمیت بیشتری هستند عبارتند از: گرانروی و دانسیته نفت. از این خصوصیات برای محاسبه قطر استوک قطرات آب استفاده می‌شود [۱۷]. تمامی قطرات آب که قطر آن‌ها از قطر استوک بزرگتر باشد در اثر غلبه نیروی وزن بر نیروی پسا سقوط کرده و به سمت فصل مشترک ته نشین می‌شوند. در حالیکه قطرات کوچکتر، همچنان در اثر جریان نفت به سمت بالا و خروجی نمک‌زدا بالا برده می‌شوند [۲۰].

پارامترهای طراحی معینی می‌توانند برای رسیدن به میزان مطلوب آب و نمک در خروجی نمک‌زدا تنظیم شوند. نرخ جریان خوراک نفت خام مستقیماً با ابعاد نمک‌زدا متناسب است [۲۱]. کاهش گرانروی نفت، امکان ته نشینی قطرات کوچکتر آب را فراهم می‌آورد. در حالیکه کاهش اختلاف دانسیته آب و نفت، جداسازی را کاهش خواهد داد. برقراری تعادل مناسب بین گرانروی نفت، اختلاف دانسیته دو فاز و شدت جریان نفت به منظور حصول اطمینان از بازدهی مناسب نمک‌زدا، ضروری است [۱۷].

۲- دما

در اغلب موارد با افزایش دما، بازدهی نمک‌زدایی افزایش می‌یابد [۱۹]. در دماهای پایین، با افزایش دما، گرانروی نفت خام کاهش یافته و در نتیجه مولکول‌های امولسیون‌زدا راحت‌تر به سمت فصل مشترک نفت-آب نفوذ کرده و جذب می‌شوند [۲۲]. از سوی دیگر گرما قابلیت نفت خام را برای حل

1. Threshold voltage

2. Critical voltage

نتیجه منجر به کاهش بازدهی نمک-زدایی می‌شود [۲۳].

۵- میزان آب شستشو

با افزایش میزان آب شستشو ضمن رقیق شدن قطرات آب شور، انتقال نمک به فاز آب بیشتر شده و بازده نمک‌زدایی افزایش می‌یابد. البته اثر مثبت افزایش آب شستشو یک مقدار بهینه دارد [۲۴]. بعد از این مقدار بهینه با افزایش میزان آب، بازدهی سیستم کاهش می‌یابد. افزودن آب شستشو در ابتدا موجب افزایش تعداد قطرات در امولسیون نفت خام و کاهش فاصله میان قطرات شده، در نتیجه برخورد و انعقاد قطرات بیشتر می‌شود. ولی از آنجا که بازده جداسازی آب در نمک‌زدای نفت خام تا یک مقدار مشخص قابل دستیابی است، افزودن بیشتر آب شستشو به نفت خام ورودی، در نهایت موجب می‌شود تا میزان آب باقیمانده در نفت خام خروجی از نمک-زدا از مقدار مجاز بالاتر باشد. این موضوع همچنین در تحقیقات انجام شده به روش CFD از طریق تأثیر فاصله و اندازه قطرات بر سرعت تجمع قطرات مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است [۱۶].

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند نمک‌زدایی به عنوان یکی از مهمترین مراحل فرآورش نفت خام مورد مطالعه قرار گرفت. شناخت عوامل مؤثر در عملکرد نمک‌زدا مستلزم درک مکانیزم و بررسی اصول بنیادی این پدیده است. به همین منظور، نحوه جداسازی آب شور همراه نفت خام، توسط پدیده انعقاد قطرات کوچکتر آب تحت اثر میدان الکتریکی و تشکیل قطرات درشت‌تر با سرعت ته‌نشینی بالاتر مورد بررسی قرار گرفت. نیروهای الکتریکی مختلف وارد بر قطرات آب پراکنده در فاز نفت خام در قالب نیروهای دوقطبی، الکتروفورتیک و دی الکتروفورتیک معرفی گردید. در این میان نیروی دوقطبی، به انعقاد قطرات مجاور و نیروهای الکتروفورتیک و دی الکتروفورتیک به حرکت قطرات به سمت الکترودها منجر می‌شوند.

انواع میدان‌های الکتریکی قابل استفاده در نمک‌زدای نفت خام شامل میدان AC، میدان DC، و میدان AC/DC تشریح شد.

این وجود، افزایش ولتاژ موجب افزایش نیروهای الکتروستاتیکی بر روی قطرات بزرگتر شده که ممکن است سبب شکسته شدن و از هم گسستن آن‌ها شود. بنابراین، ولتاژ بکار گرفته شده نباید از میزانی که ممکن است موجب شکسته شدن قطراتی با قطر استوک شود، بیشتر باشد. در صورتیکه نمک‌زدایی در ولتاژی بیشتر از ولتاژ بحرانی انجام شود، قطر قطرات آب کاهش یافته و بازدهی آب-زدایی به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۸].

۴- نوع و میزان امولسیون زدا

با افزایش غلظت امولسیون زدا، بازدهی نمک‌زدایی تا یک مقدار بیشینه قابل افزایش است. بنابراین همواره یک غلظت بهینه برای امولسیون زدا وجود دارد که بعد از آن بازدهی کاهش می‌یابد. امولسیون زدا در مقایسه با امولسیفایرهای طبیعی موجود در نفت خام (نظیر رزین و آسفالتین) از فعالیت سطحی بیشتری برخوردار است. این موضوع همچنین در تحقیقات انجام شده به روش CFD از طریق تأثیر کشش سطحی بر سرعت تجمع قطرات مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷]. بنابراین حتی در غلظت نسبتاً کم، امولسیون زدا می‌تواند بطور موثر جایگزین امولسیفایرهای طبیعی موجود در نفت خام شود [۲۳].

در مولکول‌های امولسیون زدا، زنجیر اتیلن اکساید گروه آبدوست و زنجیر پروپیلن اکساید گروه چربی دوست است. زنجیر پروپیلن اکساید در مولکول امولسیون زدا در ابتدا در فصل مشترک آب-نفت و زنجیر اتیلن اکساید در فاز آب قرار دارد. قدرت و استحکام لایه تشکیل شده به وسیله مخلوط امولسیون زدا و امولسیفایرهای طبیعی در نفت خام ضعیف‌تر از لایه‌ای است که تنها به وسیله امولسیفایرهای طبیعی تشکیل می‌شود. بنابراین حضور این لایه موجب افزایش احتمال به هم پیوستن و انعقاد قطرات آب در حین برخورد خواهد شد. با افزایش میزان امولسیون زدا، اثر جابجایی افزایش یافته و موجب کاهش قدرت و استحکام لایه مخلوط می‌گردد. با این وجود، زمانیکه غلظت امولسیون زدا از یک حد مشخص بیشتر شود، مولکول‌های امولسیون زدا در فصل مشترک آب-نفت جذب شده و در ساختاری نزدیک به هم آرایش می‌یابند. این امر موجب افزایش استحکام لایه‌ای و در

گرفت. مشخص شد با کاهش گرانش نفت خام در اثر افزایش دما، بازده نمک‌زدا افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ولتاژ، غلظت امولسیون‌زدا و میزان آب شستشو تا یک مقدار بهینه بازدهی فرآیند را بهبود می‌بخشد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به شناخت عملکرد نمک‌زدای نفت خام کمک نموده و به منظور افزایش بازدهی فرآورش نفت خام مورد استفاده قرار گیرد.

مشخص گردید که میدان DC برخلاف مزایایی که می‌تواند منجر به بازده بالاتر گردد، دارای مشکلات فرآیندی است که کاربرد آنرا دشوار می‌نماید. میدان AC که مشکلات خوردگی را ندارد، متداول‌ترین نوع می‌باشد. میدان ترکیبی AC/DC که از مزایای هر دو میدان به‌صورت همزمان برخوردار است و در نسل جدید نمک‌زدهای نفت خام مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت اثر شرایط عملیاتی مختلف مورد بررسی قرار

منابع

- Bradley H.B., "Petroleum Engineering Handbook, by the Society of Petroleum Engineers", U.S.A., Third printing, 1992.
- Eaton P., US Patent No. 6086750, 2000.
- Manning F.S. and Thompson R.E., "Oilfield processing", Volume two: Crude oil, Penn Well Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1995.
- Arnold K. and Stewart M., "Surface production operations, Design of Oil-Handling Systems and Facilities", Vol 1, Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 1999.
- Varadaraj R. and Brons C., "Molecular origins of crude oil interfacial activity part 3: characterization of the complex fluid rag layer formed at crude oil-water interfaces", Energy & Fuels, Vol 21, 2007, pp. 1617-1621.
- Dennis N. and Perugini J.J., US Patent No. 4992210, 1991.
- Eow J.S., Ghadiri M., Sharif A.O. and Williams T., "Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of the current understanding", Chemical Engineering Journal, Vol 84, No.3, 2001, pp. 173-192.
- Varadaraj R. and Brons C.H., Energy Fuels, Vol 21, 2007, pp. 199-204.
- Pruneda E.F., Escobedo E.R.B. and Vazquez F.J., "Optimum temperature in the electrostatic desalting of Maya crude oil", J. Mex. Chem. Soc., Vol 49, No.1, 2005, pp. 14-19.
- Gary J.H. and Handwerk G.E., "Petroleum Refining, Technology and Economics", Marcel Dekker, INC., New York, USA, Third Edition, 1994.
- Melheim J.A., Chiesa M., Ingebrigtsen S. and Berg G., "Forces between two water droplets in oil under the influence of an electric field", Presented at 5th International conference on multiphase flow, Yokohama, Japan, 2004.
- Sams G.W. and Warren K.W., "New methods of application of electrostatic fields", NATCO Group, Presented at AIChE spring meeting, New Orleans, 2004.
- Warren K.W., Sams G.W. and Nakayama T., "Electrostatic fields: essential tools for desalting", NATCO Group, Presented at AIChE spring meeting, New Orleans, (1998).
- Prestridge F.L., US Patent No. 3772180, 1973.
- Xu X., Yang J., Jiang Y., and Gao J., "Effects of process conditions on desalting and demetalization of crude oil", Petroleum Science and Technology, Vol 24, 2006, pp. 1307-1321.
- Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., "The effect of electric field on water droplets coalescence", Presented at 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish,

- Iran, 2011.
17. Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., "Direct numerical simulation of water droplet coalescence in the oil", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol 36, 2012, pp. 58-71.
 18. Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., "Numerical prediction of the electrical waveform effect on electrocoalescence kinetic", *Chemical Engineering Research and Design*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2012.09.002>, 2012.
 ۱۹. مهدی محمدی، شاهرخ شاه حسینی و محمود بیات، "بررسی اثر ولتاژ و دما بر عملکرد نمک زدای نفت خام با استفاده از شبیه سازی "CFD، چهارمین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی و نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران (۱۳۹۱).
 20. Abdul-Wahab S., Elkamel A., Madhuranthakam C.R. and Al-Otaibi M.B., "Building inferential estimators for modeling product quality in a crude oil desalting and dehydration process", *Chemical Engineering and Processing*, Vol 45, 2006, pp. 568-577.
 21. Don B., "How to design an efficient crude desalting system", *World Oil*, Vol 186, No.7, 1978, pp. 150-156.
 22. Zeidani K. and Bahadori A., "New equations predicting the best performance of electrostatic desalter", *Petroleum Science and Technology*, Vol 26, 2008, pp. 40-49.
 23. Xu X., Yang J., Jiang Y., and Gao J., "Effects of demulsifier structure on desalting efficiency of crude oils", *Petroleum Science and Technology*, Vol 24, 2006, pp. 673-688.
 24. Al-Otaibi M., Elkamel A., Al-Sahhaf T. and Ahmed A.S., "Experimental investigation of crude oil desalting and dehydration", *Chemical Engineering Communication*, Vol 190, 2003, pp. 65-82.