

آخرین فناوری های نمک زدای الکتروستاتیک نفت خام و مسیر توسعه فناوری در پژوهشگاه صنعت نفت

مهدی محمدی* (دکترای مهندسی شیمی)، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

میزان آب و نمک دو عامل اساسی تعیین کننده کیفیت نفت خام تولیدی محسوب می شوند. کیفیت موردنظر از طریق فرآورش نفت خام در واحد نمک زدایی قابل دستیابی است. فرآورش نفت خام های سنگین و فوق سنگین چالش هایی را به همراه دارد که نیازمند استفاده از فناوری های جدیدتر است. استفاده از فناوری قدیمی، بهره برداران را ناچار به اتخاذ راه حل های سنتی نظیر استفاده از تجهیزات بزرگتر در طراحی نمک زدا و یا بالا بردن دما و افزایش مصرف مواد شیمیایی در عملیات می نماید. این روش ها نهایتاً موجب افزایش هزینه، بروز شرایط غیرعادی در فرآیند و عدم تطابق کیفیت نفت خام تولیدی با مشخصات تعیین شده می گردد. چالش هایی نظیر خاصیت رسانایی بالا، ویسکوزیته بالا و افزایش میزان آب همراه نفت در این فرآیند مطرح است. در این مقاله چالش های پیش روی فرآیند نمک زدایی و فناوری های جدید این حوزه معرفی می شوند. همچنین اقدامات پژوهشگاه صنعت نفت در مسیر توسعه فناوری از طریق مقیاس آزمایشگاهی، مقیاس نیمه صنعتی و تدوین نرم افزار تشریح خواهند شد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۳/۰۴

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۵/۱۰

واژگان کلیدی:

نفت خام، آب همراه، رسانایی، میدان الکتریکی، فرانکس، دامنه.

مقدمه

نفت خام معمولاً دارای مقادیری آب و املاح به صورت همراه می باشد که لازم است قبل از انتقال نفت در تأسیسات فرآورشی جدا شود. بخشی از آب شور در جداکننده های چندفازی به روش ثقلی جدا می شود ولی شکستن امولسیون قطرات کوچک آب باقیمانده در نفت، تنها با استفاده از روش الکتروستاتیک قابل انجام است. در نمک زدا با اعمال میدان الکتریکی و ادغام قطرات کوچک به قطرات بزرگتر، راندمان جداسازی آب شور از نفت به طور چشمگیری بهبود می یابد. با انجام مناسب این فرآیند از بروز معضلاتی نظیر خوردگی خطوط انتقال نفت، تجهیزات پایین دستی و همچنین مسمومیت کاتالیست های پالایشگاهی جلوگیری می شود. با تضمین کیفیت نفت خام صادراتی، از افت قیمت فروش نفت خام نیز پیشگیری خواهد شد.

معمولاً برای جداسازی امولسیون آب در نفت خام در تجهیزاتی به نام نمک زدا از اثر هم زمان حرارت، زمان اقامت و میدان الکتریکی استفاده می شود. در فرآیند نمک زدایی از نفت خام، معمولاً حجم مشخصی از آب تازه (۲-۵ % vol) را در یک شیر اختلاط و با اعمال افت فشار (۵-۲۰ psi) با جریان نفت خام مخلوط می کنند. این کار موجب حل شدن و رقیق شدن نمک در فاز آب خواهد شد. سپس امولسیون آب در نفت خام برای جداسازی وارد دستگاه نمک زدا می شود. در صورتی که اختلاط ذکر شده کامل انجام شود، راندمان آب زدایی^۱ را می توان با راندمان نمک زدایی^۲ قابل مقایسه دانست. استفاده از دمولسیفایر نیز برای بهبود عملیات جداسازی رایج است و معمولاً به ازای هر بشکه نفت خام، میزان ۰/۰۱-۰/۰۵ پوند از این

مواد استفاده می شود [۱].

سایزبندی نمک زدا به شدت تحت تأثیر ویسکوزیته نفت قرار دارد که خود این پارامتر نیز به دمای عملیاتی بستگی دارد. به عنوان مثال برای نفت خام های بسیار ویسکوز حد اقل دمای خوراک برای طراحی باید 70°C در نظر گرفته شود. هر چند انتخاب دماهای بالاتر، کاهش اندازه مخزن را ممکن می سازد ولی در عوض این کاهش در هزینه ساخت مخزن، هزینه های عملیاتی برای گرمایش خوراک افزایش خواهد یافت [۲].

فرآورش نفت خام های سنگین به دلیل مشکلاتی نظیر اختلاف دانسیته پایین فازهای نفت و آب، ویسکوزیته بالای نفت خام و اندازه کوچکتر قطرات آب، استفاده از دمای عملیاتی بالاتر و در نتیجه رسوب گذاری^۳ و یا شرایط غیرعادی در فرآیند را موجب می گردد. همچنین، استفاده از تجهیزات بزرگتر و یا افزایش میزان مصرف مواد شیمیایی (دمولسیفایر) نیز باعث افزایش هزینه ها خواهد شد. چالش های دیگری نظیر خاصیت رسانایی^۴ بالای نفت خام و افزایش ویسکوزیته امولسیون آب در نفت خام به دلیل افزایش میزان آب همراه^۵ نیز در این فرآیند وجود دارند [۳].

فناوری AC به دلیل افت ولتاژ اعمال شده، برای نفت خام های با رسانایی بالا مناسب نیست و موجب بزرگ شدن مخزن و منبع الکتریکی مورد نیاز می گردد. استفاده از فناوری ترکیبی AC/DC موجب بهبود عملکرد، هم در جداسازی توده آب و هم در جداسازی قطرات کوچک آب می شود. در نسخه های پیشرفته تر این فناوری، میدان الکتریکی مدوله شده، چیدمان الکترودها و

* نویسنده ی عهده دار مکاتبات (mohammady@ripi.ir)

عبارتند از: سیستم توزیع خوراک ورودی، شبکه الکترودها، منبع الکتریکی ولتاژ بالا، بدنه مخزن تحت فشار، بوشینگ ورودی ولتاژ بالا، سیستم جمع آوری کننده محصول، سیستم کنترل سطح آب، سیستم شست و شوی جامدات کف مخزن [۱۳].

۳- کنترل فصل مشترک آب-نفت

مهمترین پارامتر فرآیندی که باید در نمک زدای نفت خام به دقت کنترل شود، ارتفاع فصل مشترک آب-نفت است. به دلیل مشکلاتی که بالا آمدن سطح آب درون نمک زدا در پی خواهد داشت، تمام مخازن نمک زدا دارای تجهیزات کنترل سطح آب شامل سطح و شیر کنترل برای تنظیم دبی آب خروجی است. بالا رفتن بیش از حد سطح آب، در ابتدا مصرف توان الکتریکی را افزایش می دهد و در صورتی که ادامه یابد می تواند منجر به اتصال کوتاه بین الکترودها شود. از طرف دیگر، پایین آمدن بیش از حد سطح آب، موجب افزایش میزان نفت همراه جریان پساب خروجی شده و در نتیجه علاوه بر هدر رفتن نفت خام، موجب بروز مشکلات در بخش تصفیه پساب واحد نمک زدایی خواهد شد. بنابراین، علاوه بر کنترل سطح آب، سیستم های مجزای دیگری به عنوان سوئیچ سطح بالای آب^{۱۱} و سوئیچ سطح پایین آب^{۱۲} با استفاده از حسگرهای الکترونیکی مشابهی مورد استفاده قرار می گیرد. حسگرهای مورد استفاده در تشخیص سطح فصل مشترک آب-نفت غالباً از نوع شناوری^{۱۳}، خازنی^{۱۴} و گاهی از نوع راداری^{۱۵} می باشند. معمولاً به دلیل تشکیل لایه امولسیون بین دو فاز آب و نفت، دقت این حسگرها در هنگام عملیات موضوع چالش برانگیزی است. در یک روش جدیدتر که به کمک اشعه گامای کم انرژی دانسیته فازهای داخل مخزن را اندازه گیری می کند، از دقت بالاتری برخوردار است و می تواند در هنگام تشکیل لایه امولسیون به اپراتور هشدار دهد (شکل ۳-). این دستگاه در مقایسه با سایر حسگرهای سطح، قیمت بالاتری دارد ولی در عوض اطلاعات ارزشمندی را از داخل مخزن نمک زدا برای کنترل بهتر سیستم ارائه می نماید [۱۴].

۴- مواد جامد همراه

به دلیل ویسکوزیته بالاتر نفت خام های سنگین (API پایین) این دسته از نفت خام ها مقادیر بیشتری از مواد جامد را با خود حمل می کنند. این جامدات می توانند در اندازه کوچک و یا فوق ریز^{۱۶} باشند. جامدات کوچک می توانند در کف مخازن جدا کننده و نمک زدا ته نشین شوند و یا حتی بر روی ساختار الکترودهای داخل نمک زدا رسوب نمایند. همچنین مواد جامد فوق ریز در لایه میانی فاز آب-نفت تجمع یافته و موجب تشکیل لایه ضخیم امولسیون می شوند. این مشکل را می توان از طریق سیستم تخلیه فصل مشترک^{۱۷} برطرف نمود. در صورتی که از منبع الکتریکی مدوله شده استفاده شود، تجربه نشان داده که با اعمال ولتاژ گذرا با دامنه بالا، می توان

هندسه توزیع کننده ورودی به مخزن بهبود یافته اند. فناوری فرکانس دو گانه^{۱۸} شدت میدان الکتریکی بالاتر را با فرکانس بالا ترکیب نموده و در نتیجه با افزایش راندمان فرآیند، امکان کوچک تر شدن بیشتر مخازن را فراهم می نماید. فناوری الکترو دینامیک^{۱۹} نیز امکان استفاده از یک مرحله نمک زدا به جای دو مرحله را فراهم می نماید. پیشرفت ها در نسل های جدید فناوری موجب کوچک تر شدن حجم مخزن، پایین آمدن دمای عملیاتی و کاهش مصرف دمولسیفایر شده است [۴].

این مقاله چالش های فرآورش نفت خام و فناوری های جدید نمک زدایی را تشریح می نماید. طراحی مفهومی نمک زدا و دانش فنی ساخت اجزای کلیدی دستگاه در کشور یک فناوری وارداتی می باشد و تا کنون بومی نگردیده بود. این موضوع هم در بخش دانش فنی راهبری واحدهای موجود و هم در احداث واحدهای نمک زدایی جدید مشاهده می شود. پژوهشگاه صنعت نفت بر اساس ضرورت های اشاره شده، اقدامات هدفمندی را به منظور بومی سازی این فناوری به انجام رسانیده است که در این مقاله معرفی خواهند شد.

۱- اصول جداسازی الکتروستاتیک آب از نفت

سرعت جداسازی فاز آب از نفت مطابق رابطه استوکس با توان دوم اندازه قطرات ارتباط مستقیم دارد. بنابراین اگر بتوانیم به روشی اندازه قطرات فاز آب موجود در نفت را رشد دهیم، سرعت و راندمان جداسازی افزایش خواهد یافت. از اینرو در نمک زدای نفت خام با اعمال میدان الکتریکی، قطرات کوچک با یکدیگر ادغام^{۲۰} شده و قطرات بزرگتر تشکیل می شود [۵].

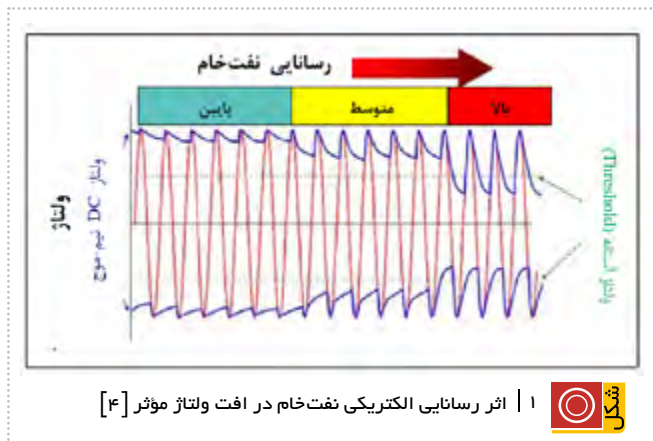
قطرات پراکنده در نفت خام، در صورتی که با انرژی کافی با یکدیگر برخورد کنند قادر خواهند بود بر موانع موجود غلبه کرده و با یکدیگر ادغام شوند. موانع موجود در مقابل تجمع قطرات عبارتند از: لایه فیلم جذب شده در اطراف قطرات آب، ذرات ریز احاطه کننده قطرات، نیروی دافعه لایه دوتایی الکتریکی^{۲۱} و کشش سطحی. البته نیروی کشش سطحی از طرف دیگر می تواند در لحظه تجمع به عنوان نیروی محرکه مطرح باشد ولی قبل از شروع تجمع نقش انرژی ممانعت کننده دارد که لازم است شکسته شود تا عمل تجمع^{۲۲} بتواند انجام شود [۸-۶]. به طور کلی می توان گفت استفاده از میدان الکتروستاتیک شرایطی را فراهم می سازد که انجام تجمع بین قطرات بهبود یابد. به طور عمده سه دسته اصلی نیروهای الکتروستاتیک شامل نیروی جاذبه دوقطبی، نیروی الکتروفور تیک و نیروی دی الکتروفور تیک در انجام این پدیده نقش دارند [۱۲-۹].

۲- اجزای نمک زدای الکتروستاتیک

دستگاه نمک زدای الکتروستاتیک یک مخزن افقی با رژیم جریان عمودی رو به بالا می باشد که اجزای اصلی تشکیل دهنده آن

ترکیبات آلی قطبی، جامدات سنگین و آسفالتین)، شدت میدان الکتریکی می تواند به طور چشمگیری کاهش یابد. در این شرایط منبع الکتریکی فرکانس بالا برای جبران مجدد و سریع ولتاژ اعمالی و ممانعت از افت ولتاژ ناشی از رسانایی نفت خام قابل استفاده است. همچنین مدولاسیون دامنه ولتاژ، راندمان عملکرد آبزدایی را افزایش خواهد داد [۴].

خاصیت رسانایی الکتریکی بر حسب نانوزیمنس بر متر (nS/m) اندازه گیری می شود و انواع نفت خام از نظر رسانایی را می توان مطابق جدول ۱- به چهار دسته تفکیک نمود.



جدول ۱ | رسانایی الکتریکی انواع نفت خام [۱۳]

نوع نفت خام	رسانایی (nS/m)
رسانایی پایین	< ۵۰۰
رسانایی متوسط	۱۰۰۰-۵۰۰
رسانایی بالا	۲۵۰۰-۱۰۰۰
رسانایی خیلی بالا	> ۲۵۰۰

اثر رسانایی بالای نفت خام در نمک زدای AC به صورت میدان الکتریکی ضعیف تر و در نتیجه راندمان پایین تر عملیات جداسازی بروز می کند؛ چرا که قطرات بسیار کوچک آب در این شدت میدان قابل جداسازی نیستند. راه حل سنتی برای رفع این مشکل استفاده از منبع الکتریکی بزرگتر است. نمک زدای AC/DC برای فرآورش نفت خام های با رسانایی بالا از راندمان بالاتری برخوردار است، به ویژه اگر از منبع الکتریکی با ولتاژ و فرکانس مدوله شده استفاده گردد [۴].

۸- فناوری های نمک زدای الکتروستاتیک نفت خام

برای تشدید عمل تجمع الکتریکی قطرات داخل نمک زدا از انواع میدان های الکتروستاتیکی استفاده می شود. این میدان ها به طور

به طور قابل توجهی لایه امولسیون را کاهش داده و از طرف دیگر BS&W را نیز در نفت خام محصول کاهش داد [۱۵].

۵- مواد شیمیایی مورد استفاده

اصولاً راندمان عملیات نمک زدایی توسط سه عامل تعیین کننده کنترل می شود که عبارتند از: میدان الکتریکی، خواص سیالاتی و مواد شیمیایی. هر چند تأثیر گذاری میدان الکتریکی بسیار مهمتر و تعیین کننده تر می باشد، ولی معمولاً مواد شیمیایی نیز به منظور بهبود عملیات نمک زدایی مورد استفاده قرار می گیرند. دمولسیفایرها برای ناپایدار کردن فیلم احاطه کننده اطراف قطرات آب و انتقال آن فیلم به درون فاز نفتی به کار می رود. دمولسیفایرها با تجمع بر روی سطح قطرات و حذف فیلم مذکور به ادغام قطرات آب کمک می نمایند. مواد دمولسیفایر معمولاً موجب کاهش کشش سطحی بین نفت و آب می شوند [۱۶].

۶- اثر نفت خام سنگین

نفت خام های سنگین معمولاً به دلیل نسبت بالاتر کربن / هیدروژن از نظر ظاهری سیاه تر به نظر می رسند. برخی از ویژگی های نفت خام سنگین عبارتند از: دانسیته بالا، ویسکوزیته بالا، میزان بالای مواد جامد همراه، رسانایی الکتریکی بالا. این ویژگی های نفت خام سنگین به دلایل ذیل موجب بروز مشکلاتی در جداسازی آب از نفت می گردد [۴]:

- ✓ کاهش اختلاف دانسیته بین فازهای نفت و آب و در نتیجه، کاهش نیروی محرکه جداسازی فازها
- ✓ حضور مواد جامد بسیار ریز و در نتیجه، پایدار شدن امولسیون نفت خام
- ✓ افزایش میزان آب همراه در خروجی از جداکننده های واحد فرآورش بالادستی (واحد بهره برداری)
- ✓ نیاز به استفاده از دمای عملیاتی بالا، ابعاد بزرگتر مخزن و استفاده از میزان بالاتر دمولسیفایر
- ✓ افزایش توان الکتریکی مورد نیاز و افت ولتاژ اعمال شده به دلیل رسانایی الکتریکی بالا
- ✓ کاهش راندمان نمک زدا به دلیل افت گرادیان ولتاژ

۷- رسانایی الکتریکی نفت خام

رسانایی الکتریکی نفت خام نقش مهمی در عملکرد میدان الکتروستاتیکی داخل نمک زدا دارد. در صورتی که رسانایی نفت خام خیلی کم باشد، بار الکتریکی به دشواری به قطرات آب می رسد. اگر رسانایی نفت خام خیلی زیاد باشد، در فواصل بین دو قله ولتاژ، به دلیل تخلیه خازنی^{۱۹}، ولتاژ مؤثر و در نتیجه شدت میدان الکتریکی افت می کند (شکل-۱).

با افزایش ضریب رسانایی الکتریکی نفت خام (بسته به میزان

خوبی را ارائه می‌نماید. با این حال در صورتی که از میدان DC برای یک امولسیون با میزان آب بالا استفاده شود موجب بروز خوردگی الکتریکی خواهد شد. این مسأله کاربرد نمک‌زدهای DC را فقط در مورد فرآورده‌های پالایش شده (با میزان آب خیلی کم) محدود کرده است [۱۳].

۳-۸- فناوری CD/CA

کاربرد این فناوری از سال ۱۹۷۲ میلادی آغاز شده است. در این روش امولسیون نفت خام در ابتدا در معرض یک میدان AC ضعیف قرار می‌گیرد و عمده آب خود را از دست می‌دهد و در ادامه در معرض یک میدان DC قوی‌تر قرار می‌گیرد که در آنجا قطرات باقیمانده آب جدا می‌شوند (شکل-۳). از آنجایی که میدان DC فقط بین الکترودها وجود دارد، احتمال خوردگی الکتریکی از بین می‌رود. کاهش مصرف انرژی الکتریکی نیز یکی از مزایای این فناوری محسوب می‌شود به طوری که مصرف برق حدود ۶۰ درصد فناوری AC است. همچنین این فناوری قادر به حذف قطرات با اندازه کوچک‌تر می‌باشد به طوری که فناوری AC قادر است قطرات بزرگتر از ۳۰ میکرومتر را جدا کند ولی در قسمت میدان DC امکان جداسازی قطرات کوچکتر از ۳۰ میکرومتر هم میسر می‌شود. فناوری AC/DC راندمان آیزدایی بالاتری دارد و در مقابل تغییرات آب موجود در نفت خام در دامنه وسیعی (۳۰-۱ درصد) تطابق‌پذیری بالایی دارد.

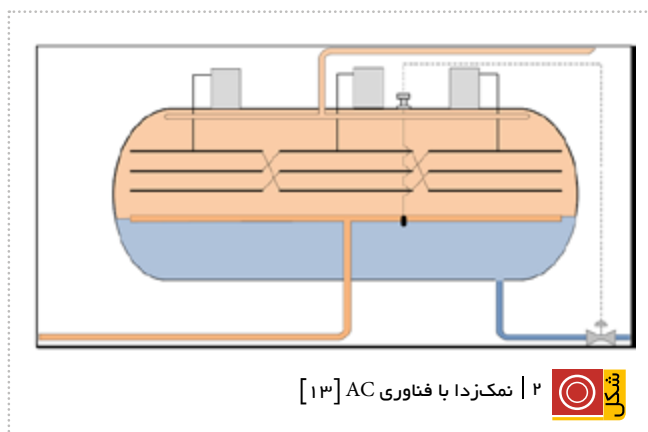
در این فناوری از صفحات عمودی به عنوان الکترود استفاده می‌شود که به صورت یک در میان مثبت و منفی هستند (شکل-۴). طراحی منبع الکتریکی به گونه‌ای است که صفحات مثبت و منفی در نیم‌پروده‌های مخالف برادار می‌شوند و بنابراین، گرادیان ولتاژ وارد بر قطرات دو برابر می‌شود. از طرف دیگر، با این کار احتمال جریان DC ثابت نیز از بین رفته و در نتیجه امکان الکترولیز قابل توجه نخواهد بود. همچنین، به دلیل آنکه صفحات الکترود در محیط نسبتاً خشک و نارسانای نفت قرار گرفته‌اند، اتلاف جریان DC نیز محدود می‌شود. در سیستم AC/DC که با عنوان فناوری قطبیت دوگانه نیز شناخته شده است، بدنه مخزن و فاز آب اتصال زمین شده‌اند تا خوردگی به حداقل برسد [۱۷].

اندازه قطره آب در اثر افزایش بیش از حد شدت میدان الکتریکی کاهش خواهد یافت. بنابراین، بهترین گزینه استفاده از کمترین شدت میدانی است که در آن عمل تجمع قطرات عملی باشد. با این وجود شدت میدان پایین برای حرکت دادن و تجمع قطرات خیلی کوچک از انرژی کافی برخوردار نیست. بنابراین، در اغلب موارد می‌باید شدت میدان را بر اساس ملاحظات فوق تنظیم نمود تا راندمان جداسازی بهینه گردد. برای غلبه بر این تضاد و فراهم شدن امکان فرآورش نفت خام‌های با رسانی بالا و کشش سطحی پایین، با استفاده از مدولاسیون الکتریکی در فناوری AC/DC، راندمان

کلی به سه دسته میدان AC، میدان DC و میدان ترکیبی (AC/DC) تقسیم بندی می‌شوند. میدان AC/DC بر اساس پیشرفت‌هایی که در نسل‌های فناوری حاصل شده است از فناوری اولیه قطبیت دوگانه آغاز شده و سپس با مدوله کردن میدان و اعمال تغییرات دیگر، به دو فناوری جدیدتر با عنوان فرکانس دوگانه و الکتروپنایمیک منتهی شده است.

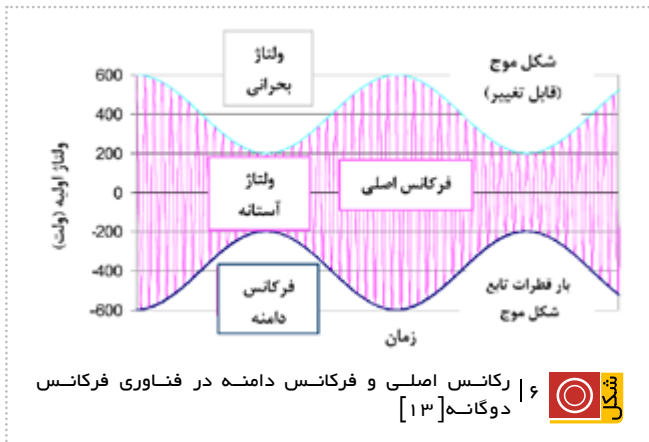
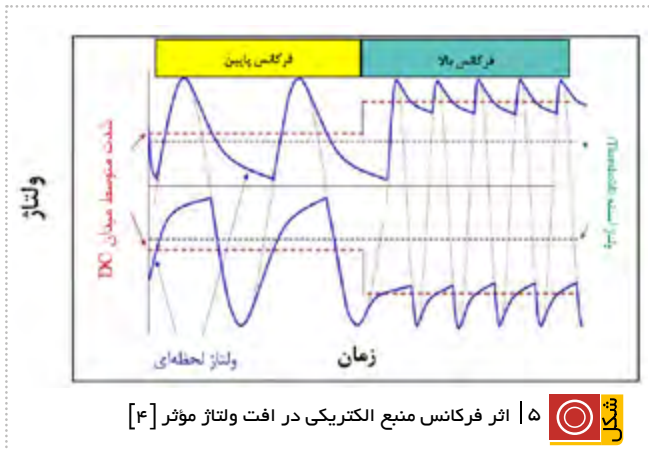
۱-۸- فناوری CA

کاربرد فناوری جریان متناوب برای نمک‌زدایی نفت خام از سال ۱۹۱۵ میلادی آغاز شده و قدیمی‌ترین و متداول‌ترین فناوری مورد استفاده در این زمینه است. در این فناوری یک میدان الکتریکی جریان متناوب با فرکانس ۵۰ تا ۶۰ هرتز بر امولسیون اعمال می‌شود. این میدان نیروی جاذبه دوقطبی را بین سرهای قطبی شده قطرات به وجود می‌آورد. نمک‌زدای AC برای جداسازی حجم قابل توجه آب همراه نفت بسیار کارآمد است. با توجه به ماهیت نیروی جاذبه دوقطبی، هنگامی که درصد آب همراه بالا باشد فاصله قطرات از یکدیگر کم و در نتیجه اندازه این نیرو قابل توجه می‌باشد. ولی زمانی که درصد آب همراه کم باشد فاصله قطرات از یکدیگر زیاد شده و در نتیجه اندازه نیروی دوقطبی به شدت افت می‌کند. بنابراین عملکرد این نوع از نمک‌زدا به میزان آب همراه نفت حساسیت بالایی دارد. معمولاً الکترودهای نمک‌زدای AC به صورت شبکه میل‌گردهای فولادی می‌باشد [۱]. در فناوری AC که دارای سه ردیف گرید است، هر ردیف الکترود به صورت مجزا از یک منبع الکتریکی تغذیه می‌شود (شکل-۲). منبع الکتریکی معمولاً دارای چند وضعیت^{۱۱} ولتاژ (مثلاً ۲۲ KV-۲۰-۱۸-۱۶-۱۴) قابل انتخاب است. توزیع کننده ورودی خوراک می‌تواند به صورت لوله‌ای و یا مکعبی کف باز^{۱۲} باشد [۱۳].



۲-۸- فناوری CD

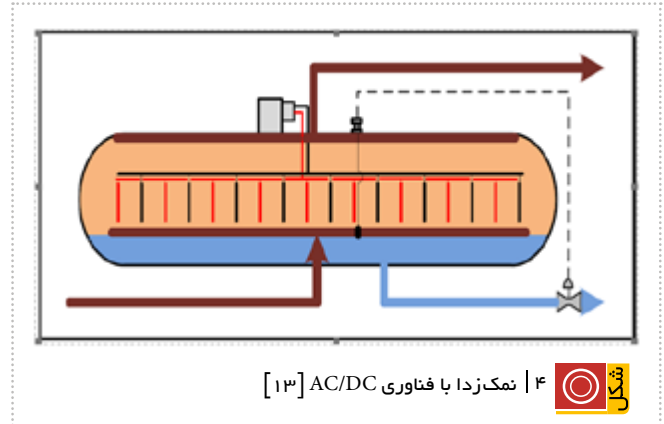
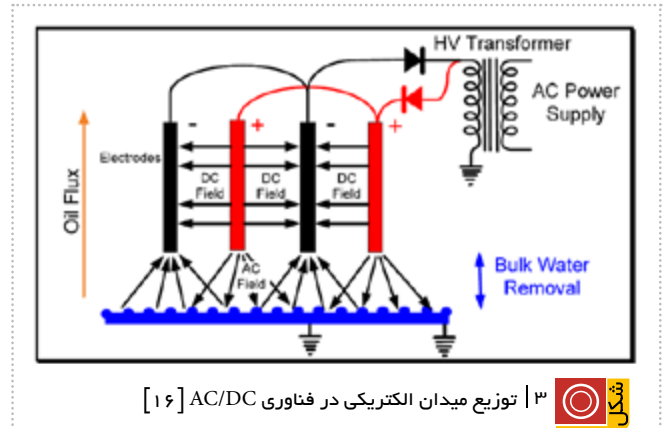
میدان DC به دلیل استفاده از حرکت الکتروفورتیک موجب افزایش برخورد بین قطرات آب می‌شود و در نتیجه راندمان تجمع بسیار



مدوله کردن میدان الکتریکی در فرکانسی نزدیک به فرکانس رزونانس (تشدید) قطرات آب انجام شود. این کنترل دوگانه‌ی فرکانس تحت عنوان یک فناوری جدید توسعه یافته است. فرکانس اصلی^{۲۵} منبع الکتریکی به اندازه‌ای بالا در نظر گرفته می‌شود که افت ولتاژ را به حداقل برساند. از طرف دیگر، دامنه ولتاژ^{۲۶} طوری مدوله می‌شود که سطح قطرات را پراثری نماید (شکل-۶). نتیجه این کار ایجاد میدان الکتریکی است که قدرت بالایی را در طول زمان حفظ کرده و به شدت قطرات را انرژی‌دار می‌نماید تا به آسانی با یکدیگر جمع شوند [۴]. در فناوری فرکانس دوگانه هم شکل موج مدولاسیون دامنه و هم فرکانس پالس قابل تغییر می‌باشد. مزایایی که در این فناوری ایجاد شده عبارتند از [۱۹]:

- ۱- کوچک شدن ابعاد مخزن در ظرفیت مشخص و یا افزایش ظرفیت (تا دو برابر) برای ابعاد مشخص مخزن
 - ۲- کاهش دمای عملیاتی و یا کاهش مصرف دمولسیفایر
- فناوری فرکانس دوگانه از سال ۲۰۰۴ میلادی در فرآیند نمک‌زدایی نفت خام مورد استفاده قرار گرفته است.
- هنگامی که فرکانس مدولاسیون با فرکانس رزونانس قطرات آب یکسان باشد، سیستم فیزیکی در حالت تشدید (رزونانس) تمایل به جذب انرژی خواهد داشت. بنابراین میزان نسبتاً بالاتری از انرژی می‌تواند به قطرات آب تزریق شود. این انرژی گردابه‌های داخلی

بهبود می‌یابد. فناوری قطبیت دوگانه مدوله شده از سال ۱۹۸۷ در مورد نفت‌خام‌هایی که فرآورش دشوار دارند مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]. ولتاژ مورد استفاده در فناوری AC/DC غیرمدوله^{۲۳} تا حدود ۲۵ KVDC می‌باشد؛ ولی در میدان‌های مدوله شده ولتاژ می‌تواند تا ۶۰ KVDC نیز استفاده شود [۱۳].

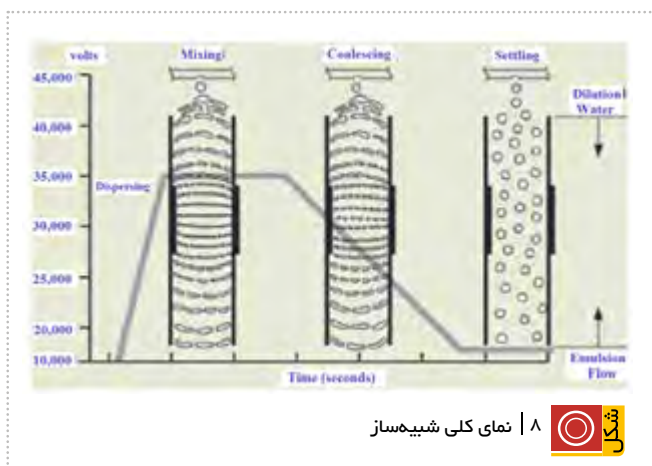


۸-۴- فناوری فرکانس دوگانه^{۲۴}

فرآورش نفت‌خام‌هایی با رسانایی بالا و کشش سطحی پایین نیازمند استفاده از یک شیوه دوگانه برای کنترل افت میدان الکتریکی از یکسو و کشش سطحی از سوی دیگر می‌باشد. در یک سیستم فرآورش AC/DC، همواره یک دسته از صفحات الکتروود در حال افت بار هستند در حالی که دسته دیگر از صفحات در حال شارژ شدن می‌باشند. در نفت‌خام‌های با رسانایی بالا در صورتی که فرکانس منبع الکتریکی پایین باشد، افت بار منجر به افت در میدان DC می‌گردد (شکل-۵، سمت چپ). برای رفع این مشکل زمان بین شارژها (فواصل بین دو قله ولتاژ) باید کاهش یابد. به عبارت دیگر، فرکانس منبع الکتریکی باید افزایش یابد (شکل-۵، سمت راست).

برای مقابله با کشش سطحی، سطح قطره باید به اندازه کافی انرژی‌دار شود تا بتواند بر آن غلبه نماید. این کار می‌تواند از طریق

- ✓ افزایش راندمان اختلاط، راندمان آب‌زدایی و راندمان نمک‌زدایی
- ✓ دو برابر کردن ظرفیت فرآورش سیستم‌های دو مرحله‌ای موجود
- ✓ امکان فرآورش نفت خام حاوی مقادیر بالاتر آب ورودی، ضمن حفظ spec نفت خام خروجی
- ✓ بهبود کیفیت پساب خروجی
- ✓ انعطاف‌پذیری بالا برای فرآورش دامنه وسیعی از انواع نفت خام
- ✓ کاهش مصرف دمولسیفایر
- ✓ کاهش مصرف آب شستشو



۸ | نمای کلی شبیه‌ساز

۹- وضعیت فناوری نمک‌زدایی در کشور

آغاز استفاده از واحدهای نمک‌زدای الکتروستاتیک نفت خام در صنعت نفت کشور به چند دهه گذشته باز می‌گردد. در آغاز بسیاری از موارد واحدهای بهره‌برداری بدون نیاز به واحد نمک‌زدایی تأسیس شدند ولی به دلیل بالا رفتن عمر مخازن، تولید نفت خام به سمت نمکی شدن پیش رفت و احداث واحدهای جدید نمک‌زدایی در دستور کار شرکت‌ها قرار گرفت. همچنین در واحدهای قدیمی که نمک‌زدایی تک مرحله‌ای وجود داشت، این واحدها به حالت دو مرحله‌ای تبدیل شده یا در حال اصلاح می‌باشند. در حال حاضر طراحی مفهومی نمک‌زدا، ساخت و تأمین قطعات داخلی آن توسط برخی شرکت‌های خارجی انجام می‌شود. به دلیل اهمیت این فناوری و جایگاه آن در فرآورش نفت خام و با توجه به نیاز کشور به احداث و راهبری واحدهای نمک‌زدایی در حوزه صنایع بهره‌برداری نفت، دستیابی به این دانش فنی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

۹-۱ - ضرورت بومی‌سازی فناوری

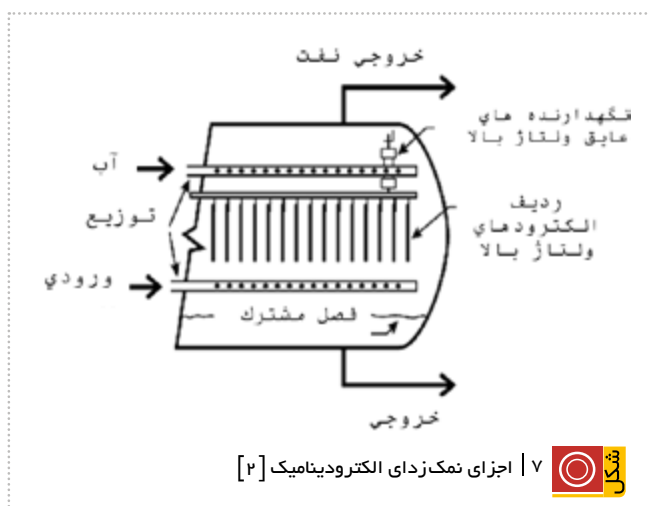
فناوری نمک‌زدایی تاکنون در کشور بومی نگردیده و با وجود آنکه ساخت بخش‌های حجیم نظیر مخازن معمولاً توسط شرکت‌های داخلی انجام می‌پذیرد، از نظر فناورانه در تمام پروژه‌ها شرکت‌های خارجی به عنوان صاحب لیسانس، طراحی مفهومی دستگاه

در قطرات ایجاد می‌کند و بر کشش سطحی که قطرات را به صورت کروی حفظ می‌کند غلبه کرده و در نتیجه، موجب تغییر شکل آنها می‌گردد. قطرات تغییر شکل یافته با سهولت بیشتری با یکدیگر ادغام خواهند شد [۴]. منبع الکتریکی مورد استفاده در فناوری فرکانس دو گانه با استفاده از کنترل گر ویژه‌ای به نام LRC کنترل می‌شود. این کنترل گر قادر است فرکانس اصلی، فرکانس پالس، سطوح ولتاژ و شکل موج مدولاسیون دامنه را کنترل نماید [۱۹].

۸-۵- فناوری الکتروستاتیک^{۲۸}

نمک‌زدای الکتروستاتیک عبارت است از سیستمی که در آن، اختلاط آب تازه با نفت خام در داخل مخزن نمک‌زدا و به صورت اختلاط الکتروستاتیکی انجام می‌شود (شکل-۷). این فناوری علاوه بر اختلاط الکتروستاتیک آب تازه، دارای یک سیستم کنترل هوشمند LRC بر روی منبع الکتریکی، الکترودهای کامپوزیتی و جریان ناهمسوی آب رقیق‌کننده است. استفاده از جریان ناهمسوی آب کمک می‌کند تا یک سیکل چند مرحله‌ای شامل پراکنده‌سازی^{۲۹} / اختلاط^{۳۰} / تجمع^{۳۱} / ته‌نشینی^{۳۲} درون نمک‌زدا تکرار شود (شکل-۸). از آنجایی که استفاده از جریان ناهمسوی آب به صورت چند مرحله‌ای راندمان اختلاط را افزایش می‌دهد، میزان آب مورد نیاز در فرآیند نمک‌زدایی کاهش خواهد یافت. برای دستیابی به این مزیت لازم است که آب از فضای بالای الکترودها و در ناحیه نفت خشک تزریق شود. بنابراین ضرورت دارد که اندازه قطرات آب در این ناحیه درشت باشند تا از خروج همراه جریان نفت بصورت carry-over ممانعت گردد [۱۵]. مزایای فناوری نمک‌زدای الکتروستاتیک عبارتند از [۱۵]:

- ✓ استفاده از یک دستگاه به جای دو دستگاه به‌ویژه در صورت محدودیت فضا
- ✓ امکان دستیابی به spec‌های بسیار سخت‌گیرانه نمک در نفت خام خروجی (تا حدود ۱ PTB)



۷ | اجزای نمک‌زدای الکتروستاتیک [۲]

حاکم بر فرآیند و بخش‌های کلیدی فناوری شناسایی شدند. سپس در مقیاس آزمایشگاهی، سیستمی برای مطالعه مکانیزم فرآیند (پدیده پیوستن قطرات تحت اثر میدان الکتریکی) طراحی و ساخته شد (شکل ۹-۹). تجهیزات الکترونیکی ولتاژ بالا با مشخصات ویژه مورد نیاز به صورت داخلی طراحی و ساخته شدند. نهایتاً با استفاده از این تجهیزات آزمایشگاهی و با انجام آزمایش‌های دقیق مورد نظر، مکانیزم عملکرد نمک‌زدا مورد مطالعه قرار گرفت [۲۲، ۲۱، ۱۰]. به کمک این سیستم ضمن اثبات کارایی فناوری در مقیاس آزمایشگاهی، اثر برخی از عوامل مؤثر

نمک‌زدایی و تأمین اجزای مهم این فناوری نظیر ترانسفورماتور، الکترودها، بوشینگ ورودی ولتاژ و سایر اجزای داخلی دستگاه را بر عهده دارند. با توجه به کلیدی بودن طراحی و تأمین این اجزا در دستگاه نمک‌زدایی از نظر راهبردی و اقتصادی، بومی‌سازی این فناوری بسیار حیاتی به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، راهبری عملیات واحدهای نمک‌زدایی موجود، با توجه به تغییر مشخصات نفت‌خام تولیدی هر مخزن در طول زمان و همچنین با تغییر خوراک ورودی به هر یک از واحدهای نمک‌زدایی که می‌تواند از طریق چاه‌های مختلف و به صورت مخلوط شده تأمین گردد، اهمیت دستیابی به دانش فنی این فرآیند را بیشتر نمایان می‌سازد.

در حال حاضر، فناوری‌های نمک‌زدایی که در پروژه‌های صنعت نفت کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل دو فناوری AC و AC/DC (غیر مدوله) می‌باشد. فناوری‌های جدیدتر که همچنان در انحصار شرکت توسعه‌دهنده آنها (شرکت NATCO) قرار دارد، هنوز در کشور مورد توجه قرار نگرفته‌اند. این فناوری‌های جدیدتر همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد از راندمان بالاتری نیز برخوردار هستند و در موارد خاص و دشوار نظیر نمک‌زدایی از نفت‌خام‌های فوق‌سنگین و یا در شرایط دمایی پایین قابل استفاده می‌باشند. به منظور همگام شدن با روند پیشرفت فناوری و بر اساس پیش‌بینی نیاز سال‌های آینده کشور، دستیابی به این فناوری‌های جدید نیز می‌تواند به‌عنوان یکی از اهداف در مسیر توسعه فناوری مورد توجه قرار گیرد.

پژوهشگاه صنعت نفت بر اساس ضرورت‌های مورد اشاره در بالا اقدامات هدفمندی را به منظور بومی‌سازی این فناوری به انجام رسانیده است که در ادامه به بررسی آنها خواهیم پرداخت.

۹-۲- تعریف سطوح بلوغ تکنولوژی (LRT)

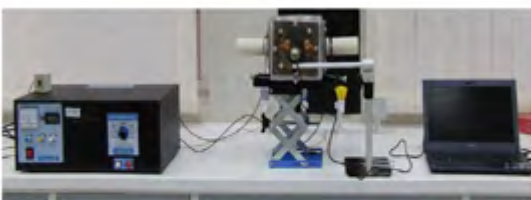
امروزه کاربرد شیوه‌های علمی ارزیابی و تکامل مرحله به مرحله در مسیر توسعه فناوری، به منظور مدیریت ریسک و هزینه‌های مربوطه، در حال افزایش است. سطوح آمادگی فناوری^{۳۳} اولین بار توسط آژانس ملی هوافضای آمریکا^{۳۴} مطرح گردید. طبق این تعریف، تکامل یک فناوری از ایده اولیه تا تبدیل شدن به یک فناوری تجاری، مستلزم اجرای ۹ مرحله پیش‌بینی شده است [۲۰]. این مراحل به گونه‌ای تعریف شده‌اند که ریسک افزایش مقیاس را به حداقل ممکن برساند. مسیر دستیابی به فناوری نمک‌زدایی در پژوهشگاه صنعت نفت با همین رویکرد تدوین گردیده و سطوح ۹ گانه بلوغ فناوری به صورت جدول ۲-۲ تعریف شده است.

۹-۳- مسیر توسعه فناوری در پژوهشگاه صنعت نفت

در ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای و سپس مطالعات میدانی از طریق بازدید و بررسی عملکرد واحدهای نمک‌زدایی موجود در صنعت نفت انجام شد (TRL 1,2). در این مراحل اصول پایه‌ای

۲ | سطوح بلوغ فناوری

شرح اقدامات ضروری	سطح آمادگی فناوری
مطالعات کتابخانه‌ای به منظور شناخت اصول پایه‌ای فناوری	TRL 1
مطالعات میدانی به منظور فرموله نمودن مفاهیم حاکم بر فناوری	TRL 2
طراحی و ساخت دستگاه در مقیاس آزمایشگاهی	TRL 3
داده‌گیری و بررسی عملکرد دستگاه آزمایشگاهی (اثبات فناوری در مقیاس آزمایشگاهی)	TRL 4
طراحی و ساخت دستگاه در مقیاس پایلوت	TRL 5
راه‌اندازی، داده‌گیری و بررسی عملکرد پایلوت (اثبات فناوری در مقیاس پایلوتی)	TRL 6
طراحی و ساخت سوپر پایلوت و انجام تست میدانی (اثبات فناوری در محیط عملیاتی)	TRL 7
طراحی مفهومی، پایه و تفصیلی یک واحد صنعتی	TRL 8
ساخت، راه‌اندازی و رفع مشکلات در واحد صنعتی (اثبات فناوری در مقیاس صنعتی)	TRL 9



(الف)



(ب)

۹ | (الف) سیستم آزمایشگاهی پژوهشگاه صنعت نفت؛ (ب) نتایج آزمایش بررسی مکانیزم نمک‌زدا [۲۲]

ظرفیت ۲۰ بشکه در روز به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت تغییر پارامترهای عملیاتی در یک دامنه وسیع را دارا می‌باشد. در این پیلوت، تمامی ملزومات واحد صنعتی نظیر قطعه بوشینگ ورودی ولتاژ بالا، الکترودهای داخلی مخزن نمک‌زدا و نحوه نصب و استقرار آنها، ترانسفورماتور ولتاژ بالا با قابلیت تنظیم ولتاژ ثانویه و دارای محافظت‌های ایمنی، و ادوات اختلاط آب رقیق‌کننده، طراحی و ساخته شدند. پس از انجام تست‌های اولیه (پیش‌راه‌اندازی) و ارائه عملکرد موفق، پیلوت راه‌اندازی گردید و به مدت سه ماه برای انواع نفت‌خام با اعمال شرایط عملیاتی مختلف در عملیات پیوسته (شبانه‌روزی) قرار گرفت. نتایج حاصل از این داده‌گیری‌ها از یک سو عملکرد موفق پیلوت با راندمان جداسازی بسیار بالا (حدود ۹۹ درصد) را تأیید نموده است و از سوی دیگر، با توجه به بررسی تأثیر شرایط عملیاتی مختلف (دمای $50-90^{\circ}\text{C}$ ، ولتاژ $20-50\text{ kV}$ ، افت فشار $1-0\text{ Bar}$ ، میزان آب $1-10\% \text{ vol}$ ، شوری آب $20-0\% \text{ wt}$) و نوع نفت‌خام (سه نوع نفت‌خام سبک، متوسط و سنگین)، منجر به ایجاد دانش فنی این فرآیند در مقیاس نیمه‌صنعتی گردید (TRL 5,6). شناسایی رفتار دقیق هیدرودینامیکی نمک‌زدای الکترودستاتیک از طریق انجام شبیه‌سازی CFD می‌تواند نقش موثری در طراحی بهینه این تجهیزات و بهبود عملکرد آنها داشته باشد. از آنجایی که پارامترهای مؤثر بر عملکرد نمک‌زدا متعدد می‌باشند، تعیین میزان اثر هر یک از این عوامل بر راندمان جداسازی نقش به‌سزایی در تعیین ابعاد و شرایط بهینه عملیاتی نمک‌زدا خواهد داشت. برای این منظور استفاده از روش CFD در دو بخش مورد توجه قرار گرفت. ابتدا با کمک این روش مکانیزم نمک‌زدایی (پدیده تجمع الکتریکی قطرات) در مقیاس دوقطره‌ای مورد مطالعه قرار گرفت (شکل-۱۲). سپس با توسعه معادلات موازنه جمعیتی^{۳۶} با توجه به تأثیر هم‌زمان هیدرودینامیک و الکترودستاتیک بر معادلات تجمع قطرات، شبیه‌سازی سیستم نمک‌زدا انجام شد. از طریق نتایج این کار تأثیر عوامل مختلف نظیر هندسه توزیع‌کننده خوراک، ابعاد مخزن، مشخصات نفت‌خام و میدان الکتریکی بر سرعت رشد اندازه قطرات و نهایتاً پیش‌بینی راندمان جداسازی و شرایط نفت خروجی میسر گردید.

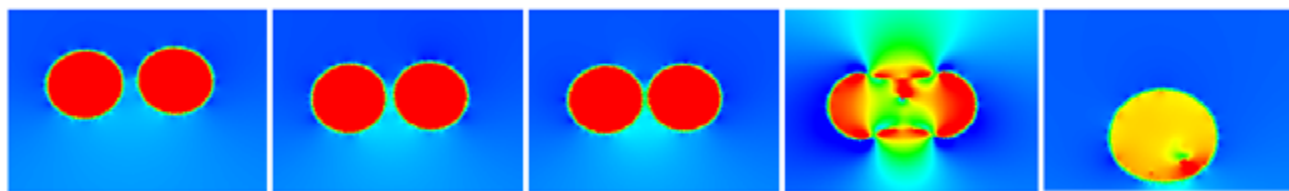


شکل ۱۰ | (الف) بوشینگ ورودی ولتاژ بالا ساخت پژوهشگاه صنعت نفت؛ (ب) سیستم آزمون عملکرد قطعه [۲۳]



شکل ۱۱ | پیلوت نمک‌زدای نفت‌خام در پژوهشگاه صنعت نفت

در مقیاس قطرات بررسی گردید (TRL 3,4). در مرحله بعد، طراحی و ساخت پیلوت نمک‌زدای الکترودستاتیک نفت‌خام انجام شد. حین طراحی و ساخت پیلوت، برخی از مهمترین گلوگاه‌های ساخت (نظیر قطعه بوشینگ ورودی ولتاژ بالا) مشخص گردید. طراحی و ساخت این قطعه (در ابعاد صنعتی) در پژوهشگاه صنعت نفت انجام شد (شکل-۱۰). این قطعه پس از موفقیت در آزمون عملکردی در پیلوت نمک‌زدا مورد استفاده قرار گرفت [۲۳]. برای اولین بار در کشور یک واحد نیمه‌صنعتی نمک‌زدای الکترودستاتیک نفت‌خام در پژوهشگاه صنعت نفت طراحی و ساخته شد (شکل-۱۱). این پیلوت برای جریان پیوسته^{۳۵} به



شکل ۱۲ | شبیه‌سازی CFD مکانیزم نمک‌زدایی (پدیده تجمع الکتریکی قطرات) [۵]

رسانایی نفت خام داخل مخزن طراحی می‌شود، با انواع نفت خام تطابق پذیری بالاتری داشته و عملیات را آسان تر می‌نماید. ✓ فناوری AC/DC راندمان آبرزدایی بالاتری دارد و نسبت به نفت خام‌های با میزان آب متفاوت (۳۰%-۱) تطابق پذیری بالاتری دارد. ✓ کاهش نیاز به مصرف مواد شیمیایی (دمولسیفایر) و در نتیجه تمیزتر شدن فاز آب

۴- فناوری AC/DC برای فرآورش نفت خام با رسانایی الکتریکی بالا و رفع مشکل لایه امولسیون، به ویژه در مواردی که از فناوری AC/DC مدوله شده استفاده شود، عملکرد بالاتری دارد. ۵- سیستم حذف جامدات به ویژه هنگامی که با فرآورش نفت خام سنگین سر و کار داریم بسیار اهمیت دارد، چراکه جامدات در کف مخزن رسوب خواهند کرد. در صورت عدم استفاده از سیستم شست و شو و انباشته شدن جامدات ته نشین شده، مجبور به صرف هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری برای بازرسی ایترنال‌ها و تخلیه دستی جامدات خواهیم بود. ۶- در هنگام طراحی سیستم نگهدارنده الکترودها برای فرآورش نفت خام سنگین (با میزان جامدات بالا) می‌باید بار مکانیکی اضافی که به واسطه جامدات بر سیستم نگهدارنده اعمال خواهد شد، در محاسبات مد نظر قرار گیرد.

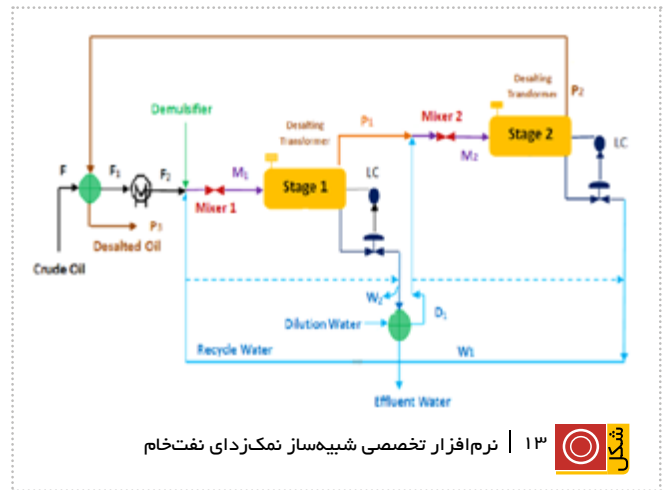
۷- در مواردی که میزان آب همراه نفت بالا باشد، استفاده از الکترودهای غیر آهنی برای جلوگیری از بُروز جرقه (arc) مؤثر خواهد بود. در نتیجه، علاوه بر امکان افزایش ظرفیت فرآورش نفت خام، امکان فرآورش نفت خام با میزان آب بالاتر نیز فراهم می‌شود.

۸- پژوهشگاه صنعت نفت بر اساس نیاز کشور، پژوهش هدفمندی را با هدف بومی‌سازی فناوری نمک‌زدایی انجام داده است. این اقدامات در مسیر توسعه فناوری از طریق مقیاس آزمایشگاهی، مقیاس نیمه‌صنعتی و تدوین نرم‌افزار منجر به شناسایی دقیق مکانیزم فرآیند، شناخت تأثیر عوامل مختلف بر راندمان جداسازی، و توانمندی طراحی و ساخت قطعات مهم فناوری گردیده است.

۹- طراحی، ساخت و تست میدانی یک سوپرپایلوت نمک‌زدایی می‌تواند موجب ارتقاء سطح آمادگی فناوری پژوهشگاه صنعت نفت از TRL 6 به TRL 7 گردد.

۱۰- از آنجایی که فناوری نمک‌زدایی مورد استفاده در پروژه‌های صنعت نفت کشور، شامل دو فناوری AC و DC/AC (غیرمدوله) می‌باشد، توجه به برخی فناوری‌های جدیدتر نظیر "فرکانس دوگانه" و "الکتروپنماتیک" به منظور همگام شدن با روند پیشرفت فناوری و بر اساس پیش‌بینی نیاز سال‌های آینده کشور، لازم است به‌عنوان یکی از اهداف مهم مورد توجه قرار گیرد. ■

شبیه‌سازی فرآیند با هدف کمینه نمودن هزینه‌های تحقیقاتی و صنعتی با استفاده از مدل‌های دقیق به منظور پیش‌بینی رفتار سیستم انجام می‌گیرد. فرآیند نمک‌زدایی الکتروستاتیک نفت خام در هیچ‌یک از نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی فرآیند وجود ندارد. از اینرو توابع ریاضی منطبق بر داده‌های پایلوتی استخراج شد و بر اساس آن روابط یک نرم‌افزار تخصصی برای شبیه‌سازی این فرآیند تدوین گردید (شکل-۱۳).



نتیجه‌گیری

۱- در فرآورش نفت خام سنگین به دلیل پایین بودن اختلاف دانسیته فاز آب و نفت، ویسکوزیته بالا، اندازه کوچک قطرات، وجود ذرات ریز و رسانایی بالای نفت خام، عملیات آبرزدایی و نمک‌زدایی با دشواری‌های خاصی مواجه خواهد بود.

۲- فناوری متداول AC برای فرآورش نفت خام سنگین از راندمان پایین تری برخوردار است. این موضوع به افت گرادیان ولتاژ، حساسیت بالا نسبت به مقادیر پایین آب و برخی دلایل دیگر برمی‌گردد.

۳- فناوری AC/DC در فرآورش نفت خام سنگین عملکرد بهتری دارد و در نتیجه، این مزایا را در پی دارد:

✓ کوچک شدن ابعاد مخزن نمک‌زدا و یا امکان بالا بردن فلاکس جریان در یک مخزن با ابعاد موجود
 ✓ پایین آمدن دمای عملیاتی و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و کاهش اتلاف نفت خام در اثر تبخیر
 ✓ کاهش مصرف انرژی الکتریکی (به طوری که مصرف برق حدود ۶۰% فناوری AC است)

✓ قادر به حذف قطرات با اندازه کوچک‌تر می‌باشد
 به طوری که فناوری AC قادر است قطرات بزرگتر از ۳۰ میکرومتر را جدا کند ولی در میدان DC امکان جداسازی قطرات کوچک‌تر از ۳۰ میکرومتر هم میسر می‌شود.
 ✓ از آنجایی که نمک‌زدای AC/DC بر اساس توزیع ضریب

1. Dehydration efficiency	13. Floater	25. Base frequency
2. Desalting efficiency	14. Capacitance	26. Pulse frequency
3. Fouling	15. Radar	27. Load Responsive Controller
4. Conductivity	16. Ultra-fine	28. Electro-Dynamic
5. Water cut	17. Interface draw-off system	29. Dispersing
6. Dual Frequency	18. Peak	30. Mixing
7. Electro-Dynamic	19. RC Discharge	31. Coalescing
8. Electrocoalescence	20. Dual polarity	32. Settling
9. Electric double layer force	21. Tap	33. Technology Readiness Level, TRL
10. Coalescence	22. Open bottom box	34. NASA
11. High-high level switch	23. un-Modulated	35. Continuous
12. Low-low level switch	24. Dual Frequency	36. Population balance

- [1] Arnold K. and Stewart M., Surface Production Operations Design of Oil-Handling Systems and Facilities, Vol 1, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [2] Manning F.S. and Thompson R.E., Oilfield Processing Volume Two: Crude Oil, PennWell Publishing Company, 1995.
- [3] Bradley H.B., Petroleum Engineering Handbook, Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [4] Sams G.W. and Warren K.W., New methods of application of electrostatic fields, AIChE spring meeting, New Orleans, 2004.
- [5] Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., Numerical Study of the Collision and Coalescence of Water Droplets in an Electric Field, Chemical Engineering and Technology, Vol.37(1), 2014, pp 27-35.
- [6] 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.
- [7] Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., CFD Based Simulation of Binary Droplet Coalescence, The 3rd National Conference on CFD Applications in Chemical Industries, Tehran, Iran, 2011.
- [8] Love S.D., US Patent No. 8747658 B2, (2014).
- [9] Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., The effect of electric field on water droplets coalescence, The 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition, Kish, Iran, 2011.
- [10] Mohammadi M. and Shahhosseini S., Experimental and Numerical Investigation of Binary Droplet Electrocoalescence in Oil, The 8th International Chemical Engineering Congress and Exhibition, Kish, Iran, 2014.
- [11] مهدی محمدی، شاهرخ شاه‌حسینی و محمود بیات، بررسی اثر ولتاژ و دما بر عملکرد نمک‌زدای نفت‌خام با استفاده از شبیه‌سازی CFD، چهارمین کنفرانس ملی کاربرد CFD در صنایع شیمیایی و نفت، اهواز، ایران، ۱۳۹۱.
- [12] مهدی محمدی، رحمت‌ا... گلپاشا، سعید سلطانی، بررسی نحوه عملکرد انواع نمک‌زدای الکتروستاتیک نفت‌خام، فصلنامه فرآیند نو، شماره ۳۹، ۱۳۹۱، ص ۲۳-۳۳.
- [13] Kvamsdal D., Electrostatic Dehydration of Oil, Separation Technology Conference, Stavanger, Norway, 2011.
- [14] Tracerco Profiler™ GPS: Nucleonic Instrumentation, Tracerco Ltd., (www.tracerco.com/instrumentation/profiler)
- [15] NATCO Electro-Dynamic Desalter Brochure, Cameron International Corporation, (www.c-a-m.com/products-and-services/separation-processing-and-treatment/oil-treatment/natco-electro-dynamic-desalter)
- [16] Sams G.W., Challenges of Desalting Canadian Crudes, Joint Canadian Crude Quality Technical Association/Crude Oil Quality Association Meeting, New Orleans, US, 2010.
- [17] Prestridge F.L., US Patent No. 3772180, (1973).
- [18] Prestridge F.L. and Johnson B.C., US Patent No. 4702815, (1987).
- [19] NATCO Dual Frequency Desalter Brochure, Cameron International Corporation, (www.c-a-m.com/products-and-services/separation-processing-and-treatment/oil-treatment/natco-dual-frequency)
- [20] Definition of Technology Readiness Levels, (http://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf).
- [21] Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., Numerical Prediction of the Electrical Waveform Effect on Electrocoalescence Kinetic, Chemical Engineering Research and Design, Vol.91(5), 2013, pp 904-918.
- [22] Mohammadi M., Shahhosseini S. and Bayat M., Electrocoalescence of Binary Water Droplets Falling in Oil: Experimental Study, Chemical Engineering Research and Design, Vol.92 (11), 2014, pp 2694-2704.
- [۲۳] مهدی محمدی، رحمت‌ا... گلپاشا، منصور بزیمی، ساخت قطعه بوشینگ ورودی ولتاژ بالا جهت جداسازی امولسیون‌ها، شماره ثبت اختراع در اداره کل ثبت اختراعات و مالکیت صنعتی ۷۹۳۶۶، شماره تأییدیه اختراع در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۹۲۰۶۲۱۹، ۱۳۹۲.