

تعیین شرایط بهینه نمک‌زدایی از آب همراه با فرآیند الکترودیالیز

اردلان گنجی‌زاده و سیدنظام‌الدین اشرفی‌زاده*

دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۳

چکیده

چارچوبی در انتخاب یک راه حل مناسب برای مدیریت آب همراه ضروری و مهم‌ترین گام در مهار این پساب نمک‌زدایی آن است. در این پروژه عمل‌کرد الکترودیالیز در نمک‌زدایی یک نمونه آب همراه، حاوی ۴۳۹۳ ppm نمک، با اعمال ولتاژ ۷ ولت به مدت ۳۶۰ دقیقه مطالعه شد. ۶۲٪ نمک‌زدایی نشان داد که این فرآیند به صورت بالقوه توانایی تامین آب کشاورزی و مصارف احشام از آب همراه را دارد. برای بررسی تاثیر دبی خوراک، ولتاژ و مدت فرآیند بر عمل‌کرد الکترودیالیز، از طراحی آزمایش تاگوچی و آرایه ۹ L استفاده شد. از نتایج آزمایش‌ها چنین برداشت شد که درصد جداسازی با افزایش ولتاژ و مدت فرآیند، افزایش و با افزایش دبی، کاهش می‌یابد. مدت اجرای فرآیند بیش‌ترین تاثیر و دبی خوراک کم‌ترین تاثیر را بر جداسازی نمک دارد. در گستره شرایط انتخاب‌شده برای انجام آزمایش‌ها، ولتاژ ۷ V و دبی ۰/۳ L/min و زمان فرآیند ۲۰۰ min، شرایط بهینه انجام فرآیند تعیین شدند.

کلمات کلیدی: الکترودیالیز، آب همراه، نمک‌زدایی، تصفیه آب، تاگوچی.

مقدمه

روز ۲۵۰ میلیون بشکه آب همراه از تمام چاه‌های نفتی دنیا استخراج می‌شود، در حالی که مقدار نفت برداشت‌شده ۸۰ میلیون بشکه است [۳]. ناخالصی‌های اصلی موجود در آب همراه شامل مواد نفتی معلق و محلول، مواد معدنی محلول، جامدات معلق و گازهای حل‌شده‌اند.

با توجه به حجم بالای تولید آب همراه، باید برای کنترل و مدیریت آن تمهیداتی اندیشید؛ به این منظور، آن را دوباره در چاه تزریق و یا در طبیعت رها می‌کنند؛ از آن برای خنک‌کردن یا شستشوی تجهیزات صنایع نفتی استفاده می‌کنند و یا در کشاورزی و دامداری به کار می‌برند [۱].

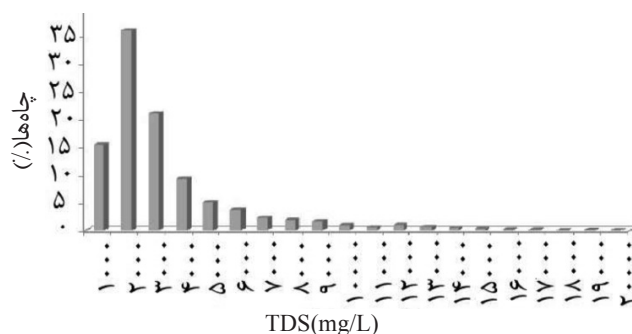
آبی که هنگام استخراج نفت خام و گاز به همراه آنها به سطح زمین می‌آید آب همراه نامیده می‌شود. آب همراه^۱ بزرگ‌ترین حجم محصولات جانبی صنایع نفتی را در بر می‌گیرد و بیش‌ترین سهم از پساب‌های تولیدشده در جهان را نیز تشکیل می‌دهد [۱]. آمارهای ارائه‌شده در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که در ایالات متحده آمریکا به‌طور متوسط به‌ازای هر بشکه نفت استخراجی، ۸ بشکه آب همراه از چاه خارج می‌شود [۲]. در حال حاضر در هر

1. Produced water

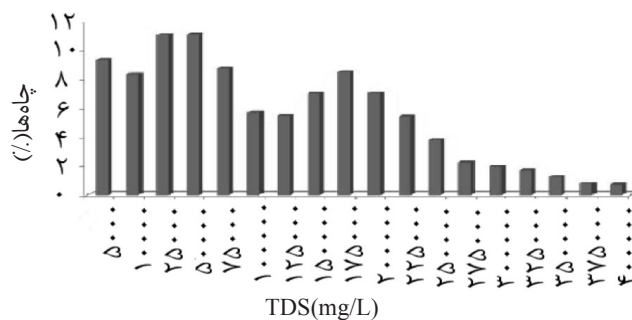
۱ و ۲ و میانگین درصد یون‌ها و نمک‌های موجود در آب همراه نیز در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

در فرآیند الکترودیالیز برای جداسازی یون‌های حل‌شده در آب همراه (یا نمک‌زدایی)، از نیروی محرکه الکتروشیمیایی، به کمک غشاهای تبادل یونی، استفاده می‌شود [۵]. خوراک این فرآیندها، برعکس فرآیندهای اسمز معکوس، در فشاری ناچیز (حدود ۱/۷ اتمسفر) قرار دارد [۶].

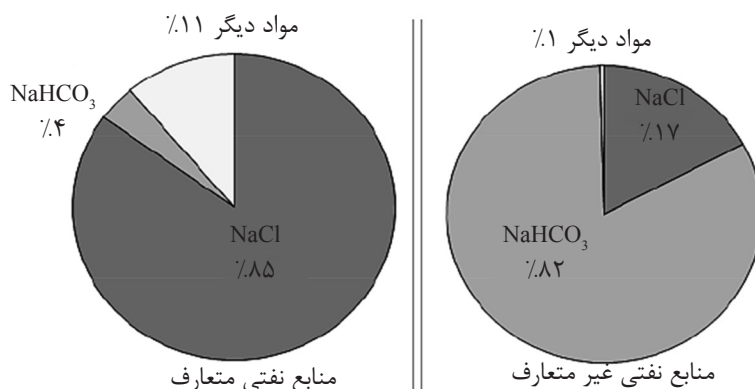
ناخالصی‌های موجود در آب همراه اجرای هر یک از نکات گفته‌شده را با مشکل روبرو می‌کند؛ لذا برای کنترل و مدیریت آب همراه، ابتدا باید آن را متناسب با هدف، طی چند مرحله تصفیه کرد. یکی از مهم‌ترین مراحل پاک‌سازی آب همراه نمک‌زدایی از آن با روش‌هایی مانند اسمز معکوس، تقطیر غشایی، الکترودیالیز و ... است که در میان این روش‌ها، الکترودیالیز کم‌تر مطالعه شده است. پراکندگی غلظت مواد معدنی (یون‌ها) در آب همراه استخراجی از چاه‌های مختلف آمریکا در شکل‌های



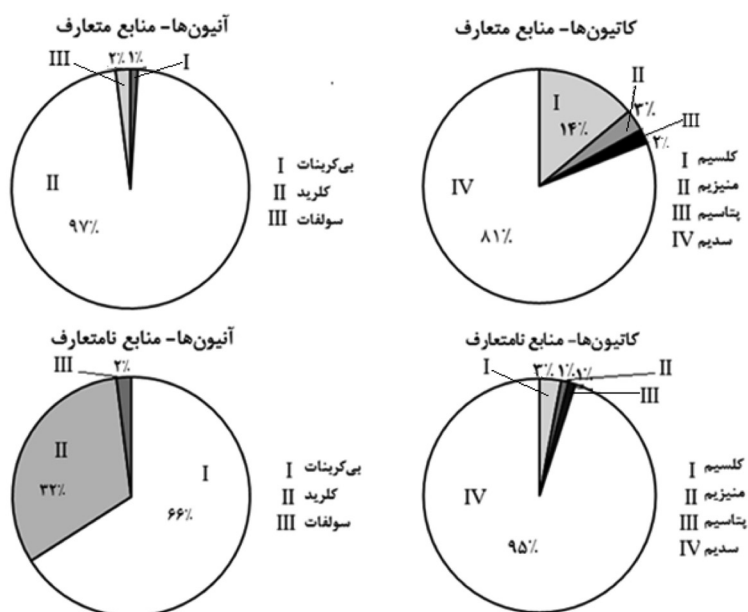
شکل ۱ پراکندگی غلظت مواد معدنی در آب همراه استخراجی از چاه‌های نفتی غیرمتعارف آمریکا [۴].



شکل ۲ پراکندگی غلظت مواد معدنی در آب همراه استخراجی از چاه‌های نفتی متعارف آمریکا [۴].



شکل ۳ میانگین درصد نمک‌های موجود در آب همراه [۴].



شکل ۴ میانگین درصد یون‌های موجود در آب همراه [۴].

شدت رسوب‌گذاری خوراک و رسوب‌گیری غشا و ... بستگی دارد. هم‌چنین وی اعلام کرد که با افزایش غلظت خوراک، گزینش‌پذیری کاهش و هزینه اجرای این فرآیند تا ۲۳ برابر افزایش می‌یابد [۹]. تحقیق حاضر با دو هدف کلی انجام شده است. ۱- بررسی عمل‌کرد و توانایی روش الکترودیالیز در نمک‌زدایی از آب ۲- بررسی مشخصه‌های عملیاتی موثر بر عمل‌کرد این فرآیند و تعیین شرایط بهینه عملیاتی.

مواد و روش‌ها

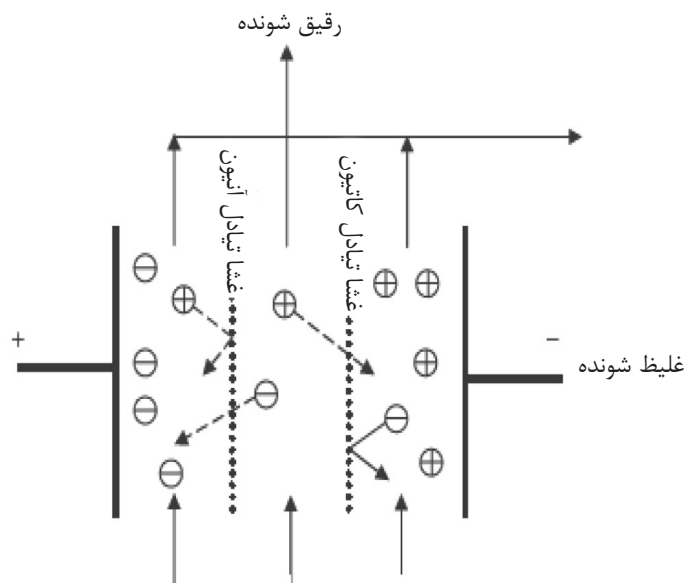
برای بررسی قابلیت فرآیند الکترودیالیز در پاک‌سازی آب همراه، ضمن مطالعه ویژگی‌های آب‌های همراه حوزه‌های نفتی کشورهای مختلف [۱۰]، یک نمونه آب همراه حاوی مقداری ناچیز یون‌های دو ظرفیتی انتخاب شد. دلیل این انتخاب رسوب‌گذاری یون‌های مزبور روی غشاها و ایجاد اختلال در فرآیند الکترودیالیز است.

در فرآیند الکترودیالیز، یون‌ها پس از گردش خوراک در فضاهای میان غشاهای تبادل کاتیون و آنیون و بر اثر اعمال میدان الکتریکی از خوراک جدا می‌شوند. به فاصله هر دو غشای مجاور یک سل و به هر دو سل یک جفت سل گفته می‌شود. سیستم‌های معمول استفاده‌شده در فرآیندهای الکترودیالیز، که از صدها سل تشکیل شده‌اند، انباشته^۱ غشایی نامیده می‌شوند [۶]. شکل ۵ نمایی از فرآیندی را که در یک سل اتفاق می‌افتد نشان می‌دهد. تا به حال دو تحقیق مستقل درباره نمک‌زدایی از آب همراه به روش الکترودیالیز انجام شده است. هیز^۲ ابتدا با شناورسازی قطرات نفتی را حذف و سپس مواد آلی حل‌شده در آب همراه را به کمک راکتور بستر سیال جداسازی کرد. وی سپس برای انجام آزمایش واحد الکترودیالیز را به کار برد و توانست تا ۸۹٪ از نمک موجود در آب همراه را حذف و نمک‌زدایی کند [۸]. سیریودین^۳ توانایی الکترودیالیز را برای تصفیه آب همراه آزمایش کرد و به این نتیجه رسید که این روش قابلیت بالایی در نمک‌زدایی از آب همراه دارد. وی از نتایج آزمایش خود چنین استنباط کرد که بازدهی الکترودیالیز به عواملی مانند انرژی مصرفی، زمان ماند، غلظت خوراک و

1. Stack

2. Hayes

3. Sirivedhin



شکل ۵ نمایی از یک سل الکترودیالیز [۷].

لازم به ذکر است که چون در اکثر منابع الکترودیالیز برای نمکزدایی از محلول‌های غلیظ توصیه نمی‌شود، در این تحقیق از نمونه‌ای نسبتاً رقیق استفاده شد، اگر چه آب همراه تولیدشده در حوزه‌های نفتی ایران جزء آب‌های همراه بسیار شور است. غلظت جامدات محلول در آب همراه استخراجی تعدادی از حوزه‌های نفتی خلیج فارس حدود mg/L ۱۸۷۰۰۰ است [۱۱]. جدول ۱ ویژگی‌های نمونه آب همراه انتخابی را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ ویژگی‌های نمونه‌های آب همراه انتخابی.

TDS (mg/L)	HCO_3^{-1} (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	pH	نمونه
۴۳۹۳	۷۶۳	۲۰۲۴	۱۶۰۶	۷/۵	

همچنین با بررسی منابع مختلف در زمینه نمکزدایی از آب به‌روش الکترودیالیز، تصمیم گرفته شد از محلول نیترات سدیم به‌عنوان سیال شوینده الکترو استفاده شود. تمام مواد شیمیایی استفاده‌شده در این پژوهش از گرید صنعتی و ساخت کشور چین بودند: سدیم کلرید محصول شرکت چانگشا یونتا^۱، سدیم بی‌کربنات محصول هنان شیتونگ تردینگ^۲ و سدیم نیترات ساخت شرکت هاربین^۳.

غشاهای به‌کاررفته در این تحقیق ناهمگن از نوع

1. Changsha Yonta Industry
2. Henan Shitong Trading
3. Harbin

جدول ۲ خواص غشاهای استفاده شده [۱۲].

CMI7000CR	AMI7001S	مشخصات
ناهمگن	ناهمگن	نوع غشا
>۰/۴۵	۰/۴۵	ضخامت استاندارد (mm)
>۳۰	۴۰	مقاومت الکتریکی (cm ² Ω) ۰/۵ M NaCl
۹۴	۹۰	نفوذ گزینشی (۰/۱ mol KCl.kg ⁻¹ /۰/۵ mol KCl.kg ⁻¹)
۱/۶	۱/۳	ظرفیت تبادل (meq.g ⁻¹)
>۳۲	>۳۲	تراوایی نسبت به آب (cm ³ h ⁻¹ m ⁻² @ 35 kPa)
۹۰	۹۰	پایداری گرمایی (°C)

با این تفاوت که به جای نمونه‌برداری از محلول رقیق‌شونده در فواصل زمانی معین، تنها در انتهای آزمایش نمونه‌برداری انجام می‌شد. سپس با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه و استفاده از روابط سرانگشتی، مقدار غلظت نمک‌ها در هر کدام از نمونه‌ها تعیین شد. پس از آن، نتایج غلظت نمونه‌ها به‌عنوان پاسخ هر آزمایش به نرم‌افزار وارد شدند. نرم‌افزار با تحلیل آزمایش‌ها و نتایج آنها اثر هر کدام از مشخصه‌ها بر بازدهی عمل کرد الکترودیالیز را پیش‌بینی کرد و هدف دوم این پروژه نیز محقق شد.

نتایج و بحث

در آزمایش بررسی توانایی الکترودیالیز در نمک‌زدایی از آب همراه که در آن، ولتاژ ۷ v به مدت ۳۶۰ دقیقه به خوراک اعمال شد، جداسازی معادل ۶۲٪ به دست آمد. در شکل ۷ روند کاهش غلظت نسبی نمک در نمونه آب همراه نشان داده شده است. در جدول ۵ غلظت محلول نهایی حاصل از الکترودیالیز نمونه آب همراه با مقادیر مجاز برای استفاده در زمینه‌های مختلف مقایسه شده است. از این مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که محصول به‌دست‌آمده از الکترودیالیز برای مصارف آبیاری و آب‌دهی به احشام مناسب است، لذا می‌توان گفت الکترودیالیز بالقوه می‌تواند از برخی آب‌های همراه نمک‌زدایی کند.

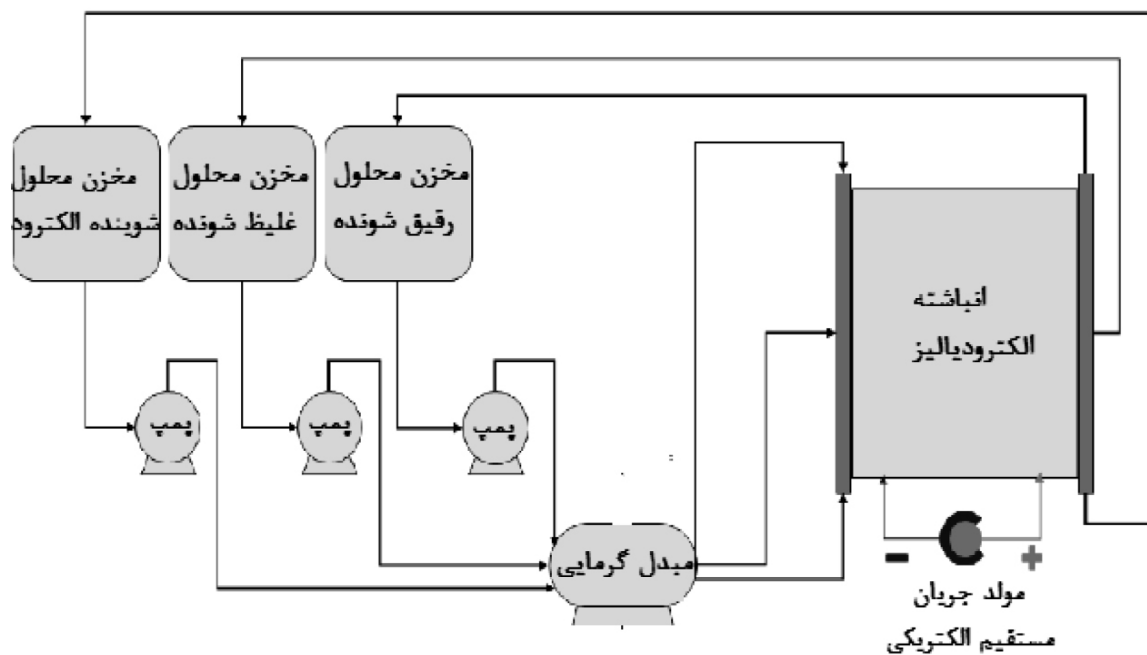
نمونه‌ها در مخزن خوراک ریخته و به کمک پمپ در انباشته، با دبی ۰/۳ L/min و به مدت ۳۶۰ min، گردانده شدند. ولتاژی مشخص (۷ V) به انباشته اعمال و به فواصل زمانی معین (هر ۲۰ min) از محلول نمونه‌برداری شد. در نهایت، روند کاهش غلظت نمک در محلول رقیق‌شونده و توانایی الکترودیالیز در پاک‌سازی آب همراه در حال بررسی با اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌ها آزمایش شد.

هدایت الکتریکی محلول‌های نمونه براساس مراجع معتبر با استفاده از دستگاه متلر تولدو^۱ و روابط سرانگشتی بین غلظت جامدات حل‌شده و هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد [۱۳]:

$$EC \left(\frac{\mu S}{cm} \right) \times 0.7 = TDS \left(\frac{mg}{L} \right) \quad (1)$$

شکل ۶ شماتیک واحد الکترودیالیز استفاده‌شده را نشان می‌دهد. برای بررسی تاثیر برخی مشخصه‌های عملیاتی (دبی، ولتاژ و مدت اجرای فرآیند) بر بازدهی نمک‌زدایی فرآیند الکترودیالیز، از روش طراحی آزمایش تاگوچی (آرایه ۹ L) به کمک نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. جدول ۳ مشخصه‌های عملیاتی بررسی‌شده و سطوح در نظر گرفته‌شده برای آنها و جدول ۴ آزمایش‌های تعریف‌شده به کمک نرم‌افزار را نمایش می‌دهد.

هر کدام از آزمایش‌های تعریف‌شده اجرا شدند. روش انجام این آزمایش‌ها مشابه آزمایش بررسی توان الکترودیالیز در نمک‌زدایی از آب همراه بود،



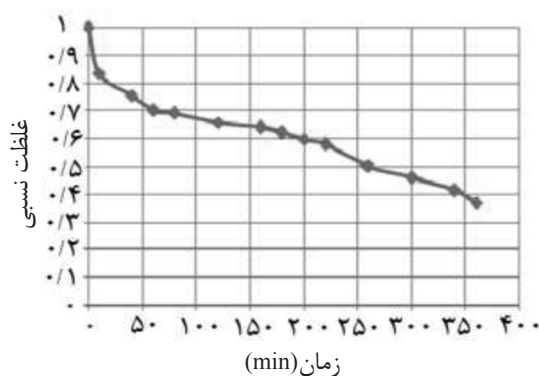
شکل ۶ شماتیک فرآیند الکترودیالیز.

جدول ۳ مشخصه‌های عملیاتی بررسی شده و سطوح آنها.

فاکتور سطح	دبی خوراک (L/min)	ولتاژ (V)	مدت زمان اجرای آزمایش (min)
۱	۰/۳	۲/۵	۶۰
۲	۰/۵	۵	۱۲۰
۳	۱	۷	۲۰۰

جدول ۴ آزمایش‌های طراحی شده با نرم‌افزار مینی‌تب.

شماره آزمایش									متغیرها
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ولتاژ (V)
۷	۷	۷	۵	۵	۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	دبی (L/min)
۱	۰/۵	۰/۳	۱	۰/۵	۰/۳	۱	۰/۵	۰/۳	مدت زمان (min)
۱۲۰	۶۰	۲۰۰	۶۰	۲۰۰	۱۲۰	۲۰۰	۱۲۰	۶۰	



شکل ۷ روند کاهش غلظت نمک در فرآیند الکترودیالیز آب همراه.

جدول ۵ مقایسه غلظت محلول نهایی با مقادیر مجاز [۱۳].

غلظت نمک در محلول خروجی (mg/L)	حداکثر غلظت مجاز برای آب آشامیدنی (mg/L)	حداکثر غلظت مجاز برای آبیاری (mg/L)	حداکثر غلظت مجاز استفاده احشام (mg/L)
۱۵۷۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰

۹ نشان می‌دهد که افزایش دبی خوراک، از ۰/۳ تا ۱ L/min، به کاهش ۹ درصدی متوسط بازدهی فرآیند منجر شده است.

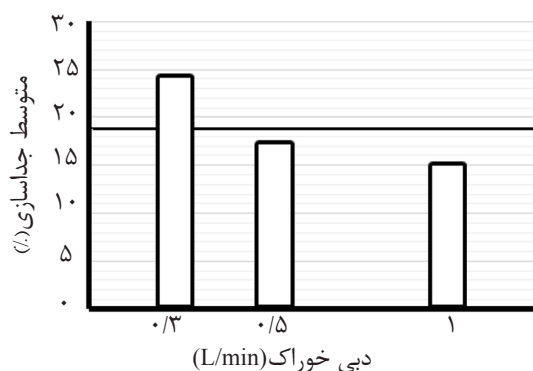
علی و همکارانش این موضوع را بدین صورت توجیه کردند که وقتی دبی جریان کم‌تر است، زمان ماند یون‌ها در بخش‌های مختلف انباشته بیش‌تر است [۱۴]؛ لذا در چنین شرایطی، مقدار نمکی که منتقل می‌شود و در نتیجه مقدار جداسازی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، برای رسیدن به مقدار بیش‌تر جداسازی، استفاده از دبی‌های کم‌تر پیشنهاد می‌شود.

نمودار شکل ۱۰ اثر مدت اجرای فرآیند الکترودیالیز بر متوسط درصد جداسازی را بررسی می‌کند. این شکل نشان می‌دهد که متوسط‌های درصد جداسازی به‌دست‌آمده در زمان‌های اجرای فرآیند ۲۰۰ و ۱۲۰ min بیش از مقدار متوسط آزمایش‌های نه‌گانه (خط افقی) است. هم‌چنین در مدت زمان اجرای فرآیند ۶۰ دقیقه، متوسط درصد‌های جداسازی کم‌تر از متوسط به‌دست‌آمده در آزمایش‌های نه‌گانه بوده است که نشان می‌دهد مدت اجرای فرآیند بر بازدهی آن بسیار موثر است و با افزایش مدت اجرای فرآیند الکترودیالیز، مقدار متوسط جداسازی فرآیند افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل می‌توان گفت متوسط درصد‌های جداسازی فرآیندهایی با مدت انجام ۲۰۰ min حدود ۱۷٪ بیش از فرآیندهای با مدت انجام ۶۰ دقیقه بوده است. شکل ۱۱ مقادیر سیگنال به نویز مربوط به هر یک از مشخصه‌های موثر در فرآیند الکترودیالیز را نمایش می‌دهد.

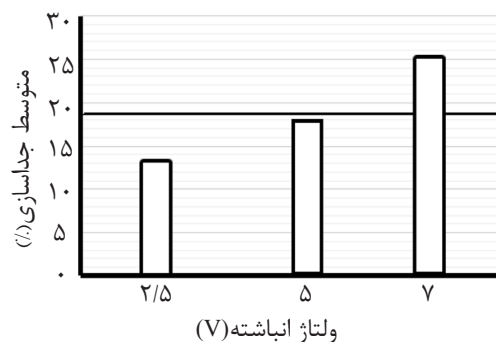
برای بررسی عوامل موثر بر عمل‌کرد فرآیند الکترودیالیز، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی استفاده شد و آزمایش‌های طراحی‌شده اجرا شدند. پس از بررسی هدایت الکتریکی نمونه‌ها در آزمایش‌های انجام‌شده، درصد جداسازی به‌دست‌آمده در هر آزمایش به‌عنوان پاسخ به نرم‌افزار مینی‌تب داده شد. نمودار مقدار متوسط جداسازی برحسب ولتاژ در شکل ۸ نمایش داده شده است.

با توجه به این نمودار می‌توان گفت که با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، متوسط درصد جداسازی در فرآیند الکترودیالیز افزایش می‌یابد. این که متوسط‌های درصد جداسازی به‌دست‌آمده در ولتاژهای ۲/۵ و ۵ V کم‌تر از مقدار متوسط درصد جداسازی کل آزمایش‌های نه‌گانه (خط افقی) است و در ولتاژ ۷ V، متوسط درصد‌های جداسازی بیش از مقدار متوسط به‌دست‌آمده در آزمایش‌های نه‌گانه بوده، اثربخش بودن افزایش ولتاژ بر بازدهی فرآیند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ می‌توان دید که با افزایش ولتاژ اعمالی از ۲/۵ به ۷ V، متوسط بازدهی فرآیند ۱۲٪ افزایش یافته است.

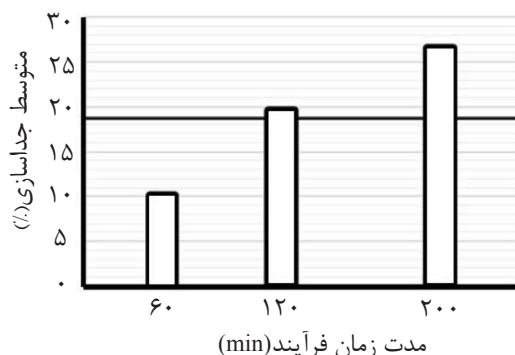
با افزایش ولتاژ پیش‌بینی می‌شود که درصد جداسازی افزایش یابد. این روند ادامه خواهد یافت تا این که در بازه‌ای از ولتاژ پلاریزاسیون غلظتی رخ دهد و بازدهی فرآیند تابعیت خطی خود را از ولتاژ اعمالی از دست بدهد. در شکل ۹ اثر دبی خوراک بر متوسط درصد جداسازی بررسی شده است. از این شکل می‌توان دریافت که درصد جداسازی با مقدار دبی خوراک رابطه معکوس دارد. شکل



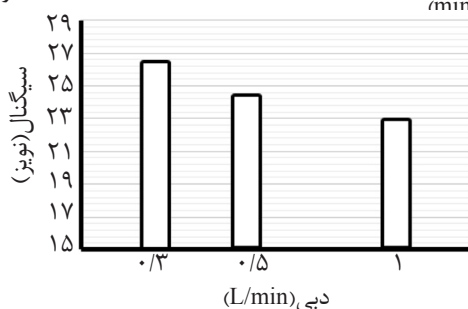
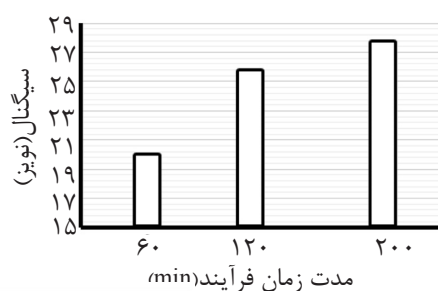
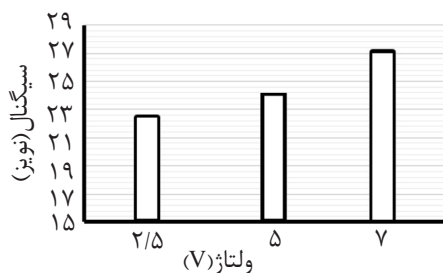
شکل ۹ اثر دبی خوراک بر مقدار متوسط جداسازی.



شکل ۸ نمودار مقدار متوسط جداسازی بر حسب ولتاژ.



شکل ۱۰ اثر مدت انجام فرآیند بر مقدار متوسط جداسازی.



شکل ۱۱ مقادیر سیگنال به نویز مربوط به هر یک از مشخصه‌ها.

که در میان عوامل بررسی شده، مدت اجرای فرآیند بیشترین تاثیر و دبی خوراک کمترین اثر را بر کیفیت جداسازی فرآیند الکترو دیالیز دارد.

چون همواره شرایطی با بیشترین مقدار سیگنال به نویز به عنوان شرایط بهینه عملیاتی انتخاب می‌شوند، با بررسی نمودارهای شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که در میان شرایط انتخاب شده برای

با مقایسه سیگنال به نویز عوامل دبی خوراک، ولتاژ و مدت زمان اجرای فرآیند، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت خروجی فرآیند یا به عبارت دیگر درصد جداسازی نمک از آب بیشترین وابستگی را به تغییر مدت انجام فرآیند دارد و کمترین حساسیت را به تغییر دبی خوراک نشان می‌دهد؛ لذا با بررسی نمودارهای سیگنال به نویز نتیجه گرفته می‌شود

نسبتاً رقیق را، که اغلب پساب منابع نامتعارف تولید نفت را تشکیل می‌دهند، دارد. به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی (آرایه L 9) و با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، اثر سه مشخصه عملیاتی ولتاژ، مدت فرآیند و دبی خوراک بر مقدار نمک‌زدایی بررسی شد. افزایش ولتاژ اعمالی به انباشته الکترودیالیز از ۲/۵ تا ۷۷٪ افزایش ۱۲٪ متوسط بازدهی فرآیند نمک‌زدایی را به همراه داشت. افزایش دبی خوراک ورودی به انباشته الکترودیالیز از ۰/۳ تا ۱ لیتر بر دقیقه به کاهش تقریبی ۹٪ متوسط بازدهی فرآیند نمک‌زدایی منجر شد و هر چه مدت انجام فرآیند (۶۰ تا ۲۰۰ دقیقه) بیشتر شد، درصد نمک‌زدایی هم افزایش یافت (افزایش ۱۷٪ بازدهی).

هم‌چنین در میان عوامل دبی خوراک، ولتاژ اعمالی و مدت اجرای فرآیند، دبی ضعیف‌ترین اثر را بر نمک‌زدایی از آب همراه و مدت اجرای فرآیند شدیدترین اثر را داشت. در میان شرایط انتخاب‌شده برای انجام آزمایش‌ها، حالت بهینه برای انجام فرآیند الکترودیالیز نمک‌زدایی از آب همراه ولتاژ ۷۷، دبی خوراک ۰/۳ لیتر در دقیقه و مدت فرآیند ۲۰۰ min بود.

نتایج این پژوهش نشان دادند که الکترودیالیز می‌تواند روشی مناسب برای نمک‌زدایی از آب‌های همراه نسبتاً رقیق باشد. برای نمک‌زدایی از آب‌های همراه غلیظ، با توجه به نیاز به اعمال ولتاژهای بالا و صرف زمان زیاد برای اجرای فرآیند، پیشنهاد می‌شود از این روش به صورت ترکیب با دیگر فرآیندهای نمک‌زدایی مانند اسمز معکوس استفاده شود.

انجام آزمایش‌ها، حالت بهینه برای اجرای فرآیند الکترودیالیز نمک‌زدایی از آب همراه ولتاژ ۷۷، دبی خوراک ۰/۳ L/min و مدت انجام فرآیند ۲۰۰ min است.

بدین ترتیب هدف دوم این تحقیق نیز که بررسی اثر مشخصه‌های عملیاتی بر عملکرد الکترودیالیز و تعیین شرایط بهینه عملیاتی بود محقق شد.

نتیجه‌گیری

چون آب همراه عظیم‌ترین بخش پساب‌های تولیدی در صنایع نفتی را تشکیل می‌دهد و حتی اکثر مواقع حجم آن از حجم نفت تولیدی از یک چاه بیش‌تر است، می‌توان گفت که مدیریت کردن این پساب بسیار سخت و مهم است. با توجه به این که ناخالصی‌های موجود در این پساب گستره‌ای وسیع از مواد آلی، معدنی، مواد رادیواکتیو، گازها و ... را در بر می‌گیرد، از پساب مزبور نمی‌توان مستقیماً استفاده و یا آن را بدون تصفیه شدن در محیط زیست رها کرد.

در این پژوهش عملکرد الکترودیالیز در نمک‌زدایی از آب همراه و نیز نحوه اثر مشخصه‌های عملیاتی بر این فرآیند بررسی شد. در الکترودیالیز نمونه‌ای رقیق از آب همراه با غلظت ۴۳۹۳ ppm، با اعمال ولتاژ ۷ به مدت ۶ hr، ۶۲٪ نمک‌زدایی رخ داد و محصول به‌دست‌آمده برای مصارف آبیاری و آب دادن به احشام مناسب بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این روش توانایی نمک‌زدایی از آب‌های همراه

مراجع

- [1]. Igunnu T. and Chen Z., "Produced water technologies," International Journal of Low-Carbon Technologies, 0, 1-21, 2012.
- [2]. Brunett D. B., "Potential for beneficial use of oil and gas produced water," Global Petroleum Institute, Texas Water Resources Institute, 1-11, 2004.
- [3]. Fakhru'l Razi A., Pendashteh A., Abdullah L. C., Biak D. R. A., Madaeni S. S. and Zainal Abidin Z., "Review of technologies for oil and gas produced water treatment," Journal of Hazardous Materials, Vol. 170, pp. 530-551, 2009.

- [4]. Guerra K., Dahm K. and Dunder S., "Oil and gas produced water and beneficial use in the western united states," US Department of Interior Bureau of Reclamation, Science and Technology Program Report Number 157, 2011.
- [5]. Drewes J. E., "An integrated framework for treatment and management of produced water; technical assessment of produced water treatment technologies," 1st ed., RPSEA Project, 07122-12, 2009.
- [6]. Rype J. U., "Modeling of electrically driven membrane processes," Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, Technical University of Denmark, 2009.
- [7]. Sadrzadeh M. and Mohammadi T., "Sea water desalination using electrodialysis," Desalination, Vol. 221, pp. 440-447, 2007.
- [8]. Hayes T. and Arthur D., "Overview of emerging produced water treatment technologies," The 11th Annual International Petroleum Environmental Conference, Albuquerque, 2004.
- [9]. Sirivedhin T. and McCue J., "Reclaiming produced water for beneficial use: salt removal by electrodialysis," Journal of Membrane Science, Vol. 243, pp. 335-343, 2004.
- [10]. USGS (United States Geological Survey Definition), Produced water data base, 2004.
- [11]. Alkudhiri A., Darwish N. and Hilal N., "Produced water treatment: application of air gap membrane distillation," Desalination, 309, 46-51, 2013.
- [12]. Šljukić B. and Morais A. L., Diogo M. F., Santos and César A. C. Sequeira, "Anion- or cation-exchange membranes for $\text{NaBH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ fuel cells?," Membranes, 2, 478-492, 21 June 2012 .
- [13]. Aquarius Technologies LTD. "Electrolytic conductivity measurement theory and application," Aquarius Technical Bulletin, No. 8, 2005.
- [14]. Ali M. and Mnif A. "Desalination of brackish water using electrodialysis: effect of operational conditions," Zastita Matrijala, Vol. 50, pp. 141-146, 2009.