



دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده عمران - محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته

مهندسی عمران

گرایش آب و فاضلاب

عنوان

بررسی عملکردی حذف نیترات به روش الکترودی یونیزاسیون در مقیاس

آزمایشگاهی

استاد راهنما:

دکتر گایک بدلیانس قلی کندی

نگارش:

زهرا تیزمغز

شهریور ماه سال ۱۳۹۳

نسخه نهایی پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهرا تیزمغز

تحت عنوان:

بررسی عملکردی حذف نیترات به روش الکترودی یونیزاسیون در مقیاس آزمایشگاهی

از نظر شکل و محتوی تأیید می شود.

امضاء	آقای / خانم دکتر	استاد راهنما
امضاء	آقای / خانم دکتر	استاد مشاور
امضاء	آقای / خانم دکتر	مدیر گروه

اینجانب زهرا تیزمغز دانشجوی رشته مهندسی عمران- آب و فاضلاب ورودی سال تحصیلی ۱۳۹۱ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده عمران-محیط زیست متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه شهید بهشتی را درانتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع به نام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً" نسبت به جبران فوری ضررو زیان حاصله براساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم."

امضاء.....

تاریخ.....

اینجانب زهرا تیزمغز تهیه کننده پایان نامه کارشناسی ارشد حاضر، خود را ملزم به حفظ امانت داری از زحمات سایر محققین و نویسندگان بنا بر قانون حق تکثیر و مالکیت نتایج می دانم. لذا بدینوسیله اعلام می نمایم که مسئولیت مطالب درج شده با اینجانب بوده و در صورت استفاده از مطالب سایر منابع، بلافاصله منبع آن ذکر شده و سایر مطالب از این کار تحقیقاتی استخراج شده است. در ضمن، در صورتی که خلاف این مطلب ثابت شود، مسئولیت عواقب قانونی آن را می پذیرم.

نام و نام خانوادگی

دانشجو:

## چکیده

در چند دهه گذشته تلاشهای زیادی در خصوص دستیابی به آب دارای درجه خلوص بالا و یا به عبارت دیگر روشهای کارآمد حذف املاح و آلاینده های یونی معدنی از آب انجام پذیرفته اند. فرآیند الکترودی یونیزاسیون یکی از فرایندهای الکتروشیمیایی مورد توجه مربوطه است که در آن از رزین های تبادل یونی استفاده می شود. فناوری نوین الکترودی یونیزاسیون ترکیبی از دو فرآیند الکترودیالیز و رزین های تبادل یونی می باشد که در سالهای اخیر به منظور حذف یونی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. نظر به اینکه از سویی در سالهای گذشته همواره روش الکترودیالیز به عنوان راهکاری کارآمد در این رابطه مورد توجه قرار گرفته است و از سوی دیگر این روش بخشی از این فناوری نوین را تشکیل می دهد، مقایسه عملکردی دو روش مذکور در راستای انتخاب راهکار بهینه از اهمیت بسزایی برخوردار است.

هدف از این تحقیق، بررسی کارآمدی روش الکترودی یونیزاسیون در حذف نیترات موجود در آب و مقایسه آن با روش متعارف الکترودیالیز است. برای این منظور از یک سامانه آزمایشگاهی استفاده گردید. سامانه آزمایشگاهی الکترودی یونیزاسیون به ابعاد  $15\text{cm} \times 17\text{cm}$  مورد بررسی قرار گرفت که از یک محفظه رقیق و دو محفظه غلیظ تشکیل شده بود و جریان به صورت نهرگونه در آن برقرار گردید. سه عامل دبی، ولتاژ و غلظت نیترات به عنوان متغیر در نظر گرفته شدند. به منظور بررسی این عوامل، دبی برابر  $20, 10, 30 \text{ mL/min}$ ، ولتاژهای برابر  $5, 10, 15$  ولت و غلظت های برابر  $400, 200, 600 \text{ mg/L}$  در نظر گرفته شدند. نمونه ها به صورت مصنوعی و با اضافه کردن سدیم نیترات به آب مقطر ساخته شدند. ابتدا آزمایش های شاهد در سامانه مورد بررسی بدون رزین در قالب فرآیند الکترودیالیز انجام پذیرفت. سپس آزمایشها با اضافه کردن رزین به سامانه آزمایشگاهی در قالب فرآیند الکترودی یونیزاسیون تکرار گردید. به منظور دستیابی به میزان مشارکت هر یک از عوامل متغیر بر تابع هدف یعنی کارآمدی فرآیند حذف نیترات از روش آماری طراحی آزمایش تاگوچی (آرایه 19) استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل می توان گفت که در هر دو فرآیند، افزایش ولتاژ باعث افزایش کارآمدی و افزایش غلظت نیترات و دبی باعث کاهش آن می گردد. مقایسه عملکردی دو فرآیند نیز نشان می دهد که با توجه به هر سه عامل متغیر، فرآیند الکترودی یونیزاسیون از کارآمدی بسیار بهتری در مقایسه با روش الکترودیالیز برخوردار است. همچنین لازم به ذکر است که در هر دو فرآیند، بهترین کارآمدی جداسازی در کمترین غلظت نیترات برابر  $200\text{ppm}$ ، کمترین دبی برابر  $200\text{mL/min}$  و بیشترین ولتاژ برابر  $15\text{V}$  حاصل گردید. عامل ولتاژ در هر دو روش از بیشترین تاثیر بر میزان حذف نیترات برخوردار است.

کلیدواژه: حذف نیترات، الکترودی یونیزاسیون، الکترودیالیز، روش تاگوچی

۰	فصل اول:.....	
۱	۱-۱-سرآغاز.....	
۲	۲-۱-تعریف مسئله.....	
۳	۳-۱-سابقه ی پژوهش.....	
۶	۴-۱-فرضیات پژوهش.....	
۸	۵-۱-هدف پژوهش.....	
۹	۲-فصل دوم:.....	
۱۰	۱-۲-مقدمه.....	
۱۱	۲-۲-نیترازدایی و انواع روش های آن.....	
۱۲	۱-۲-۲-فرآیندهای بیولوژیکی.....	
۱۲	۲-۲-۲-اسمز معکوس.....	
۱۳	۳-۲-۲-ستونهای رزین تبادل یونی.....	
۱۴	۴-۲-۲-الکترودیالیز.....	
۱۵	۱-۴-۲-۲-تاریخچه الکترودیالیز.....	
۱۶	۵-۲-۲-مقدمهای از الکترودیونیزاسیون.....	
۱۷	۶-۲-۲-رزین های تبادل یونی.....	
۱۷	۱-۶-۲-۲-تاریخچه ی رزینهای تبادل یونی.....	
۱۸	۲-۶-۲-۲-کارکرد رزینهای تبادل یونی.....	
۱۹	۳-۶-۲-۲-کاربرد رزینهای تبادل یونی.....	
۲۰	۴-۶-۲-۲-تعیین زمان خستگی و احیا رزین.....	
۲۱	۵-۶-۲-۲-احیای یک رزین تبادل یونی.....	
۲۱	۶-۶-۲-۲-فواید و مضرات رزینهای تبادل یونی.....	
۲۲	۷-۲-۲-غشاهای تبادل یونی.....	
۲۲	۱-۷-۲-۲-تاریخچه ی غشاهای تبادل یونی.....	
۲۴	۲-۷-۲-۲-سازوکارهای عبور یونها از غشاهای تبادل یونی.....	
۲۶	۳-۷-۲-۲-انواع غشاهای تبادل یونی.....	
۲۶	۴-۷-۲-۲-کاربردهای غشاهای تبادل یونی.....	
۲۷	۸-۲-۲-فرآیند الکترودیونیزاسیون.....	
۲۹	۳-۲-نتیجه گیری فصل:.....	
۳۱	۳-فصل سوم:.....	
۳۲	۱-۳-طراحی آزمایشها.....	
۳۲	۲-۳-مواد و روش.....	
۳۳	۱-۲-۳-فاصله دهنده.....	

۳۷	..... غشاهای تبادل یونی
۴۰	..... انتخاب سامانه الکترودی مناسب
۴۲	..... رزین
۴۵	..... نحوه انتخاب دبی مناسب با توجه به دامنه تغییرات سرعت خطی
۴۶	..... نحوه بستن پایلوت و قرارگیری اجزا در کنار هم
۴۷	..... تعیین شرایط بهینه ی بهره‌برداری از سامانه ی الکترودی یونیزاسیون
۴۸	..... مقدمه
۴۸	..... الکترودیالیز:
۴۹	..... ۱-۲-۳-۳- تاثیر ولتاژ بر راندمان حذف:
۵۰	..... ۲-۲-۳-۳- تاثیر غلظت بر راندمان حذف:
۵۱	..... ۳-۲-۳-۳- تاثیر دبی بر راندمان حذف:
۵۳	..... الکترودی یونیزاسیون:
۵۳	..... ۱-۳-۳-۳- تاثیر ولتاژ بر راندمان حذف:
۵۴	..... ۲-۳-۳-۳- تاثیر غلظت بر راندمان حذف:
۵۵	..... ۳-۳-۳-۳- تاثیر دبی بر راندمان حذف:
۵۶	..... ۴-۳-۳- نتایج ناگوچی:
۶۳	..... ۵-۳-۳- مقایسه نتایج الکترودیالیز و الکترودیونیزاسیون:
۶۳	..... ۱-۵-۳-۳- تاثیر غلظت
۶۵	..... ۲-۵-۳-۳- تاثیر دبی
۶۶	..... ۳-۵-۳-۳- تاثیر ولتاژ
۶۸	..... فصل چهارم
۶۹	..... ۱-۴- نتایج نهایی حاصل
۷۰	..... ۲-۴- مزایا و معایب
۷۰	..... ۱-۲-۴- مزایا
۷۰	..... ۲-۲-۴- معایب
۷۲	..... ۳-۴- پیشنهادات برای پژوهشهای آتی

- شکل ۱-۲: روابط و چرایی موضوعات ارائه شده در بخش ادبیات موضوعی ..... ۱۰
- شکل ۲-۲: طرحواره ای از ساختار و اجزاء یک مدول اسمز معکوس (Cipollina et al., 2009) ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: طرحواره ای از نحوه عملکرد یک بستر رزین تبادل یونی (Sengupta, 2007) ..... ۱۴
- شکل ۴-۲: تصویر طرح واره از نحوه عملکرد یک سامانه الکترودیالیز متداول (آرشی; بدلیانس قلیکندی، ۱۳۹۲) ..... ۱۵
- شکل ۵-۲: طرحواره ای از ساختار یک غشا تبادل یونی مثبت (Strathmann, 2004) ..... ۲۲
- شکل ۶-۲: (a) طرحواره ای از چگونگی توزیع یون ها بین یک غشا تبادل یون منفی ، (b) جریانی از یک محلول یونی و یک غشا تبادل یونی مثبت و (c) دیاگرام توزیع پتانسیل غشایی دونان. (Strathmann, 2004) ..... ۲۳
- شکل ۷-۲: هیستوگراف روند توسعه غشاهای تبادل یونی ، کاربردها و فنآوریهای مرتبط با آن ( Xu, 2005) ..... ۲۴
- شکل ۸-۲: نحوه عبور جریان غلظت از غشا تبادل یونی با گذشت زمان (Kim et al., 2012) ..... ۲۵
- شکل ۹-۲: نحوه تغییر غلظت در طول مسیر جریان بین دو سلول غلیظ و رقیق در یک فرآیند نمک زدایی (Tanaka, 2007) ..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲: طرحواره ای از نحوه عملکرد و تاثیر نیرو محرکه الکتریکی بر یک غشا تبادل یونی (Tanaka, 2005) ..... ۲۶
- شکل ۱۱-۲: طرحواره ای از چگونگی ایجاد پدیده تجمع غلظتی در سطح یک غشا تبادل یونی (Sengupta, 2007) ..... ۲۷
- شکل ۱۲: طرحواره ی عملکرد سامانه الکترودیونیزاسیون (Anode & Cathod): الکترو آندی و کاتدی - AEM: غشای تبادل آنیونی - CEM: غشای تبادل کاتیونی - IEX: رزینهای تبادل یونی - Feed Stream: محلول یونی ورودی در محفظه رقیق - Concentrate Stream: محلول غلیظ ایجاد شده در محفظه غلیظ - Waste: محلول غلیظ خروجی از سامانه - Dilute: محصول خروجی از سامانه) ..... ۲۹
- شکل ۱۳: فاصله‌دهنده‌های ساخته شده با جریان نه‌رگونه و (Tanaka, 2007) (Strathmann, 2004) و (آرشی; بدلیانس قلیکندی، ۱۳۹۲) ..... ۳۴
- شکل ۱۴: طرح و مشخصات ارائه شده برای فاصله دهنده ها ..... ۳۵
- شکل ۱۵: (a) و (b) توری و عوامل متغیر آن و (c) جریانهای آشفته در فاصله دهنده را نشان میدهد (Tanaka, 2007) ..... ۳۶
- شکل ۱۶: واقعی فاصله‌دهنده و نحوه قرارگیری توری در میان آن ..... ۳۶
- شکل ۱۷: در این تصویر (a) باریک کردن مسیر (b) پیچ دار کردن مسیر و (c) قرار دادن توری به عنوان راهکارهایی برای جلوگیری از نشت داخلی پیشنهاد شده است. (Tanaka, 2007) ..... ۳۶
- شکل ۱۸: ساختار غشاهای تبادل یونی (a) غشا تبادل یون منفی (b) غشا تبادل یون مثبت (Długołęcki 2009) و (آرشی; بدلیانس قلی کندی، ۱۳۹۲) ..... ۳۷
- شکل ۱۹: غشاهای شرکت Fuji film هر دو به رنگ سفید ..... ۳۹

- شکل ۲۰: مدار تست رسانائی ..... ۴۱
- شکل ۲۱: الف) الکتروود خورده شده ب) غشای سوخته شده ..... ۴۱
- شکل ۲۲: طرحواره ای از ساختار درونی یک رزین تبادلگر آنیونی ..... ۴۴
- شکل ۲۳: رزین آنیونی قوی PuroliteA400 ..... ۴۴
- شکل ۲۴: الف) طرح وارهی ب) تصویر سامانهی آزمایشگاهی مورد بررسی ..... ۴۷
- شکل ۲۵: رابطه میزان درصد حذف با تغییرات ولتاژ الف- دبی ۱۰ میلیلیتر بر مین ب- دبی ۲۰ میلیلیتر بر مین پ- ..... ۵۰
- شکل ۲۶: مقایسه میزان درصد حذف با تغییرات ولتاژ در دبیهای مختلف در غلظت ۲۰۰ میلیگرم بر لیتر ..... ۵۰
- شکل ۲۷: منحنی نتایج آزمایش رابطه میزان درصد حذف با تغییرات غلظت الف- دبی ۱۰ میلیلیتر بر مین ب- دبی ..... ۵۰
- ۲۰ میلیلیتر بر مین پ- دبی ۳۰ میلیلیتر بر مین ..... ۵۱
- شکل ۲۸: منحنی نتایج آزمایش رابطه میزان درصد حذف با تغییرات دبی الف- ولتاژ ۵ ولت ب- ولتاژ ۱۰ ولت پ- ..... ۵۱
- ولتاژ ۱۵ ولت ..... ۵۲
- شکل ۲۹: رابطه میزان درصد حذف با تغییرات ولتاژ الف- دبی ۱۰ میلیلیتر بر مین ب- دبی ۲۰ میلیلیتر بر مین پ- ..... ۵۲
- دبی ۳۰ میلیلیتر بر مین ..... ۵۴
- شکل ۳۰: منحنی نتایج آزمایش رابطه میزان درصد حذف با تغییرات غلظت الف- دبی ۱۰ میلیلیتر بر مین ب- دبی ..... ۵۴
- ۲۰ میلیلیتر بر مین پ- دبی ۳۰ میلیلیتر بر مین ..... ۵۵
- شکل ۳۱: منحنی نتایج آزمایش رابطه میزان درصد حذف با تغییرات دبی الف- ولتاژ ۵ ولت ب- ولتاژ ۱۰ ولت پ- ..... ۵۵
- ولتاژ ۱۵ ولت ..... ۵۶
- شکل ۳۲: الف) نسبت S/N برای سطوح مختلف ولتاژ و ب) برای سطوح مختلف غلظت پ) برای سطوح مختلف ..... ۶۱
- دبی (EDI) ..... ۶۱
- شکل ۳۳: الف) نسبت S/N برای سطوح مختلف ولتاژ و ب) برای سطوح مختلف غلظت پ) برای سطوح مختلف ..... ۶۱
- دبی (ED) ..... ۶۲
- شکل ۳۴: مقایسه درصد راندمان حذف دو فرآیند ED و EDI با تغییرات غلظت الف- دبی ۱۰ میلیلیتر بر مین ..... ۶۲
- ب- دبی ۲۰ میلیلیتر بر مین پ- دبی ۳۰ میلیلیتر بر مین ..... ۶۴
- شکل ۳۵: مقایسه درصد راندمان حذف دو فرآیند ED و EDI با تغییرات دبی الف- غلظت ۲۰۰ میلیگرم بر لیتر ..... ۶۴
- ب- غلظت ۴۰۰ میلیگرم بر لیتر پ- غلظت ۶۰۰ میلیگرم بر لیتر ..... ۶۶
- شکل ۳۶: مقایسه درصد راندمان حذف دو فرآیند ED و EDI با تغییرات ولتاژ الف- غلظت ۲۰۰ میلیگرم بر لیتر ..... ۶۶
- ب- غلظت ۴۰۰ میلیگرم بر لیتر پ- غلظت ۶۰۰ میلیگرم بر لیتر ..... ۶۷

جدول ۱-۱: تکامل تدریجی الکترودیونیزاسیون (Alvarado, 2014) .....	۴
جدول ۱-۲: ساختار رزینهای کاتیونی و آنیونی .....	۱۷
جدول ۱-۳: نتایج آزمایش اندازه گیری سرعت خطی بیشینه آب بین غشاها .....	۴۶
جدول ۲-۳: آرایه ارتوگونال L9 ، نتایج آزمایشات و مقادیر S/N الکترودیونیزاسیون .....	۵۹
جدول ۳-۳: آرایه ارتوگونال L9 ، نتایج آزمایشات و مقادیر S/N الکترودیالیز .....	۵۹
جدول ۳-۴: نتایج تحلیل ANOVA برای تعیین میزان اثر گذاری هریک از عوامل متغیر برای EDI .....	۶۲
جدول ۳-۵: نتایج تحلیل ANOVA برای تعیین میزان اثر گذاری هریک از عوامل متغیر برای ED .....	۶۳

۱- فصل اول:

مقدمه ی پژوهش

## ۱-۱- سرآغاز

حضور نیترات در منابع آب از جمله عوامل آلاینده منابع آب محسوب می‌شود و به عنوان یک مشکل جهانی مطرح است. حد مجاز نیترات که توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) تعیین شده ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات بوده که در استاندارد ایران نیز همین مقدار می‌باشد (Elmidaoui et al., 2001; Kapoor et al., 1997; Meyer et al., 2005; Salem et al., 1995). برای حذف نیترات تاکنون روشهای مختلفی شامل فرایندهای بیولوژیکی (Fernández-Nava et al., 2010)، شیمیایی، فیزیکی-شیمیایی از جمله دنان دیالیز<sup>۲</sup> (Altintas et al., 2009; Wiśniewski et al., 2005)، الکترودیالیز<sup>۳</sup> (Meyer et al., 2003; Menkouchi Sahli et al., 2006)، الکترودیونیزاسیون<sup>۴</sup> (Meyer et al., 2005; Salem et al., 1995)، تبادل یونی<sup>۵</sup> (Danielsson et al., 2006) و اسمز معکوس<sup>۶</sup> (Bohdziewicz et al., 1999) مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان فرایندهای ذکر شده فرایندهای غشایی که به فرایندهای جداسازی نیز معروفند کارآمدی خود را ثابت کرده‌اند. (Salem et al., 1995) فرایندهای دنان دیالیز، الکترودیالیز، الکترودیونیزاسیون که از روشهای جداسازی غشایی به‌شمار می‌روند، امروزه روشهای پرکاربردی در صنعت می‌باشند (Nagaraleet al., 2006; Strathmann, 2010; Xu, 2005). هدف از تحقیق حاضر آنست که کارایی یکی از این روشهای جداسازی غشایی (الکترودیونیزاسیون) را برای حذف آلودگی آب نیترات‌دار بررسی کند. در فرآیند دنان دیالیز یک نوع غشای تبادل یونی (یا کاتیونی و یا آنیونی) به منظور جداسازی دو محلول الکترولیتی با یون‌های مخالف برای رسیدن به یک محلول الکترولیتی جدید به‌کار می‌رود. در این فرآیند، نیروی محرک برای انتقال یون‌ها اختلاف غلظت‌های دو محلول الکترولیتی در دو فاز جدا شده توسط غشا می‌باشد (Altintas et al., 2009). الکترودیالیز یکی از روشهای معمول الکتروغشایی است که به‌طور گسترده برای نمک‌زدایی از آب‌های لب‌شور، تولید نمک از آب دریا، حذف انواع یون‌های سمی به‌کار می‌رود (Strathmann, 2010). برای افزایش انتقال جرم در آب حاوی مواد معدنی پایین در سامانه

---

<sup>1</sup> World Health Organization

<sup>2</sup> Donnan dialysis

<sup>3</sup> Electrodialysis

<sup>4</sup> Electrodionization

<sup>5</sup> Ion Exchange

<sup>6</sup> Reverse osmosis

الکترودیالیز می‌توان از رزین‌های تبادل یونی در محفظه میانی الکترودیالیز استفاده نمود. حضور رزین‌های تبادل یونی باعث کاهش پدیده پلاریزاسیون خواهد شد. این سامانه الکترودی‌یونیزاسیون (EDI) نامیده می‌شود (Lucía Alvarado et al., 1990; Giuffrida et al., 2014) و (پهلوانی؛ محب و اعتماد، ۱۳۸۲). در این تحقیق نمونه‌ها با اضافه کردن سدیم نیترات در سه غلظت متفاوت به صورت مصنوعی ساخته شدند و به بررسی عوامل متغیر بر بهره‌برداری سامانه الکترودی‌یونیزاسیون پرداخته شد.

نظر به اینکه در بسیاری از صنایع از جمله داروسازی و تولید نیمه هادی‌ها مصرف آب خالص از اهمیت بسزایی برخوردار است، امروزه به کارگیری سامانه الکترودی‌یونیزاسیون (EDI) برای این منظور مورد توجه ویژه قرار گرفته است (Hernon et al., 1994; Wen et al., 2005). فرآیند الکترودی‌یونیزاسیون ترکیبی از دو فرآیند الکترودیالیز و تبادل یونی رزین‌ها می‌باشد (Spiegel et al., 1999). به دلیل ساختار ترکیبی غشائی-رزینی این سامانه از مشکلات متنابه راهبری منفرد فرآیندهای مذکور از جمله پلاریزاسیون غلظتی و نیاز به احیای شیمیایی رزین‌ها جلوگیری بعمل آمده یا محدود می‌گردد.

## ۱-۲- تعریف مسئله

بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده که قسمتی از نتایج آن در بخش مقدمه آورده شده است، با توجه به رشد جمعیت و استفاده بی‌رویه از کودهای کشاورزی و همین‌طور کاهش منابع آب آشامیدنی و استفاده از چاههای زیر زمینی در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورها از جمله ایران با مشکل آب آلوده به نیترات مواجه می‌باشند (Burt, 1993). روش‌های زیادی برای نیترات‌زدایی از قبیل اسمز معکوس، تبادل یونی و الکترودیالیز وجود دارد. این روش‌ها یا انرژی زیادی مصرف می‌کنند (Cipollina et al., 2009) و یا سازگار با محیط‌زیست نمی‌باشند. لازم به ذکر است که غیر از روش‌های پرکاربرد معرفی شده در فصل ادبیات موضوعی، روش‌های بسیاری برای نیترات‌زدایی وجود دارند که کماکان در مراحل آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی هستند و یا به صورت محدود در مناطقی خاص استفاده می‌شوند. به دلایل ذکر شده نیاز است تا در پی روش‌های نیترات‌زدایی جدیدی بود که کارآمدی بالا و نیاز به انرژی و سرمایه گذاری اولیه کمی داشته باشد تا هزینه‌های جاری و ثابت نیترات‌زدایی کاهش یابد. علاوه بر این‌ها در این سامانه می-

بایست آثار مخرب زیست‌محیطی (مثل پساب حاصل از ستون رزین تبادل یونی پس از احیا) به نحوی مهار شود تا در صورت گسترش این سامانه، توسعه پایدار محقق گردد. در صورت وجود چنین سامانه‌ای می‌توان فن‌آوری نیتراژزدایی را با روشی که سازگار با محیط‌زیست باشد تا حدی گسترش داد.

با در نظر گرفتن موارد فوق بررسی‌های جامع و گسترده‌ای در خصوص روش‌های ممکن نیتراژزدایی انجام پذیرفت و روش نیتراژزدایی سازگار با معیارهای ذکر شده حاصل شد، سامانه حاصل (الکترودی‌یونیزاسیون) این قابلیت را داشت که با استفاده از یک جفت غشای تبادل یونی و رزین‌های تبادل یونی، آب با درجه خلوص بالایی را تولید کند. الکترودی‌یونیزاسیون روشی است که هزینه‌ی تقریباً یکسانی با سایر روش‌های الکتروغشایی داشته و از آن به عنوان یک تکنولوژی سبز نامبرده می‌شود (Alvarado, 2014). اما در ابتدای پژوهش منبع علمی قابل استناد یا گزارشاتی از عملکرد یک سامانه ساخته شده در این رابطه موجود نبود. بنابراین ضروری به نظر می‌رسید که این سامانه مورد بررسی‌های علمی و تجربی قرار گیرد.

### ۱-۳- سابقه‌ی پژوهش

الکترودی‌یالیز شناخته‌شده‌ترین تکنولوژی غشایی در صنعت است که نیروی محرکه آن الکتریسیته است. این تکنولوژی غشایی ترکیبی از دو فرآیند دیالیز و الکترولیز می‌باشد، که برای اولین بار برای جداسازی مواد معدنی در سال ۱۸۹۰ به کار گرفته شد (Strathmann, 2010). مطالعات اولیه که طرز کار الکترودیالیز را بیان می‌کند، به صورت رسمی برای اولین بار در یک مجله علمی در سال ۱۹۳۰ به چاپ رسید (Shaposhnik, 1997). از آن زمان تاکنون این تکنولوژی در زمینه‌های متفاوتی همچون نمک‌زدایی، تولید اسید و باز (Vertova, 2009)، تصفیه فاضلاب رادیواکتیوی، تولید آب بسیار خالص و جداسازی یونی به کار می‌رود (Zaheri, 2010). بعدها به منظور کاهش پدیده پلاریزاسیون غلظتی، الکترودی‌یونیزاسیون در سال‌های ۱۹۵۰ معرفی شد. این تکنولوژی بسیار موفق ظاهر شد به طوری که، حداکثر جداسازی یونی را از ۵۰٪ در الکترودیالیز به ۹۰٪ رساند (Alvarado, 2014). برای اولین بار الکترودی‌یونیزاسیون در سال ۱۹۵۵ توسط Walters et al در Argonne National Laboratory برای حذف مقادیر ناچیز رادیواکتیو به کار گرفته شد (Walters, 1955). در اواخر سال‌های ۱۹۵۰ بود که Permutit company با ترکیبی از رزین‌های آنیونی و کاتیونی

الکترودی‌یونیزاسیون را راه‌اندازی کرد. در تحقیق دیگری Sammons & Watts در مرکز انرژی هسته‌ای Harwell از الکترودی‌یونیزاسیون برای نمک‌زدایی استفاده کردند و اثر تغییرات غلظت، دبی، ولتاژ را بر طرز عملکرد این فرآیند بررسی نمودند. در سال‌های بعد مطالعاتی برای حذف یون‌های مختلفی مثل کلسیم، آهن، فسفات و غیره انجام گرفت تا توانایی‌های این فرآیند را در تمام زمینه‌ها به اثبات رساند. در سال‌های ۱۹۸۰ برای اولین بار الکترودی‌یونیزاسیون به صورت تجاری برای تولید آب خالص به کار گرفته شد. در جدول ۱-۱ تکامل تدریجی الکترودی‌یونیزاسیون نشان داده شده است، که نشان می‌دهد پیشرفت‌های اولیه در این زمینه بسیار کند صورت گرفته است.

جدول ۱-۱: تکامل تدریجی الکترودی‌یونیزاسیون (Alvarado, 2014)

سال	محقق	تحقیق	سرمایه گزار
۱۹۵۳	Kollsman	به کارگیری EDI جهت تولید استون خالص	Dutch company
۱۹۵۵	Walters et al	EDI: غلظت فاضلاب رادیواکتیویته	Argonne National Lab.
۱۹۵۹	Glueckauf	نگاهی به EDI از نظر نظری و عملی	NA
۱۹۶۰	Sammons and Watts	نمک زدایی به وسیله EDI	Harwell Atomic Energy Authority
۱۹۷۱	Matejka	تولید آب خالص با استفاده از EDI	NA
۱۹۸۶	Giuffrida, Jha, Ganzi	ویژگیهای EDI	Millipore Co.
۱۹۸۹	Parsi	حذف نمکهای محلول با استفاده از غشاهای دو قطبی در EDI	Ionics Inc.
۱۹۹۱	Katz, Elyanow, Sims	ویژگیهای قطبیت معکوس در EDI	Ionics Inc.
۱۹۹۲	White	EDI & UV ترکیب دو فرآیند	Millipore Co.

۱۹۹۹	DiMascio, Gary, Ganzy	ویژگیها و روشهای EDI	United States Filter Co.
۲۰۰۴	Srinivasan, Nebojsa, Avdalovic	روشهای خالص سازی آب	Dionex Co.
۲۰۰۵	Chidambaran, Devesh, Sharma, Raina	فرآیندهای حذف یون در EDI	Aquatech International Co.
۲۰۰۵	Avijit, Gareth	ویژگیها و روشهای EDI	Chemitreat Pte. Ltd.
۲۰۰۸	Barber	ویژگیهای EDI	General Electric Company
۲۰۱۱	Riviello	روشهای کروماتوگرافی یونی با استفاده از EDI	Trovion Singapore Pte. Ltd.
۲۰۱۲	Riviello	روشهایی برای متوقف سازی هم زمان آنیونها و کاتیونها در EDI	Trovion Singapore Pte. Ltd., Co.

همان طور که گفته شد تاکنون تحقیقات فراوانی برای حذف یونهای مختلف به کمک الکترودی یونیزاسیون انجام شده است. این فرآیند قادر است که یونها را با راندمان بالا حذف کرده و آبی با خلوص بالا تولید کند، بنابراین می توان توقع داشت که این فرآیند کاربرد چشمگیری در صنعت پیدا کرده باشد. از الکترودی یونیزاسیون برای حذف یونهای فلزات سنگین از فاضلاب صنایعی همچون: معدن، آبکاری فلزات و فرآیندهای هسته ای استفاده می شود که می توان به حذف یونهایی از جمله کروم، نیکل، کبالت، مس و غیره در این زمینه اشاره کرد، که در ادامه از هر کدام تاریخچه مختصری ذکر خواهد شد. برای تصفیه فاضلاب معادن معمولاً از روش رسوبدهی استفاده می شود، محققان در تلاش برای یافتن راهی جایگزین برای تصفیه فاضلاب این صنعت، الکترودی یونیزاسیون را به کار گرفتند که می توان به حذف آرسنیک، به عنوان اولین کاربرد الکترودی یونیزاسیون در این زمینه اشاره کرد (Basha, 2008). بعدها Yeon et al در مورد حذف یونهای آهن، کبالت، کروم و نقره از فاضلاب ساختمانی و سینتتیک به کمک الکترودی یونیزاسیون پرداخت که به راندمان حذف ۹۹ درصد رسید (Yeon, 2004; Park, 2007). سپس Souilah et al تحقیقی در مورد مقایسه بازیافت یونهای فلزی همچون: روی، مس، کادمیم و سرب با استفاده از ستونهای رزین تبادل یونی و الکترودی

یونیزاسیون انجام داد که نشان‌دهنده راندمان بالای الکترودی یونیزاسیون بود (Souilah, 2004). کروم یکی از فلزات سنگین مضر است که به صورت مکرر در فاضلاب صنایعی همچون معدن و فرآیند آبکاری فلزات دیده می‌شود (Costa, 2006). تا به حال فرآیندهای بسیاری به منظور حذف کروم به کار برده شده است که الکترودی یونیزاسیون یکی از آنهاست (Bergmann, 2009). در تحقیقی که به منظور مقایسه طرز عملکرد سه فرآیند ستون رزین تبادل یونی، الکترودیالیز، الکترودی یونیزاسیون با هدف حذف  $Cr^{6+}$  انجام گرفت، نتایج به روشنی قدرت و برتری الکترودی یونیزاسیون با قابلیت حذف  $Cr^{6+}$  با راندمان حذف ۹۹.۸ درصد را نشان داد. در تحقیق دیگری Xing et al محلول با غلظت ۴۰ ppm تا ۱۰۰ ppm کروم را به عنوان خوراک ورودی الکترودی یونیزاسیون مورد بررسی قرار داد که نتایج خروجی آزمایش در محدوده ۰.۰۹ ppm تا ۰.۴۹ ppm بود (Xing, 2007). در مورد یکی دیگر از کاربردهای الکترودی یونیزاسیون می‌توان به بازیافت مس از  $CuSO_4$  آبی که برای شستشوی صفحات مسی در صنعت آبکاری استفاده می‌شود، اشاره کرد (Arar, 2011). در تحقیق دیگری که در ارتباط با نیکل صورت گرفت نتایج نشان داد که الکترودی یونیزاسیون برای محلول ورودی با غلظتی پایین‌تر از ۵۰ ppm قابلیت حذف نیکل تا ۹۹.۸ درصد را داراست (Lu, 2012)، که همین تحقیق با یون کبالت با غلظت ۳۰۰ ppm نتایج ۰.۱ ppm را داشت (Dermentzis, 2010). در ادامه می‌توان به حذف یون‌های دیگری مانند: آمونیوم، سیلیکون و برم به کمک این فرآیند نیز اشاره کرد (Goffin, 2000 ; Wen, 2005) همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد نیترات به طور مکرر در آب‌های زیرزمینی یافت می‌شود که با توجه به تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، الکترودی یونیزاسیون قابلیت حذف نیترات با درصد راندمان حذف ۹۹ را داراست (Kabay, 2007 ; Salem, 1995).

## ۴-۱- فرضیات پژوهش

در این قسمت فرضیاتی که پژوهش بر پایه آنها استوار است در ۴ بخش ارائه شده است، دو فرض اول، فرضیاتی هستند که نیاز به اثبات دارند و فرضیات ۳ و ۴، ساده‌سازی‌هایی هستند که برای بیان مسئله مورد بررسی و انجام ساده‌تر آزمایش‌ها مد نظر قرار گرفته‌اند و نیازی به اثبات ندارند.

فرض ۱

نیاز است تا فن‌آوری موجود در سامانه مذکور مورد بررسی‌های علمی و تجربی قرار گیرد، با توجه به موارد گفته شده، برای بررسی‌های علمی و تجربی حول محورهای عملکرد و ساخت سامانه مذکور، یک فرض مثبت با عنوان زیر مبنای پژوهش قرار گرفت.

« فرض می‌شود که چنین سامانه‌ای از قابلیت عملکردی لازم جهت کاهش غلظت نیترات آب برخوردار است »

## فرض ۲

در نتیجه فرض اول، طرح فرض دومی نیز الزامی است و آن اینکه به دلیل ماهیت آب‌گریزی غشا‌های تبادل یونی و تراوانی ناچیز آن‌ها نسبت به آب، فرض می‌شود که خاصیت اسمزی تأثیری بر فرآیند تبادل یونی غشایی نخواهد داشت. (Banasiak, 2009) در صورتی که فرض اول اثبات شود فرض دوم نیز اثبات خواهد شد چرا که فرض دوم در نتیجه صحت فرض اول مورد توجه قرار گرفته است.

## فرض ۳

برای انجام آزمایش‌ها و اثبات عملکرد سامانه در صورت صحت فرض اولیه، و علم به این نکته که آب حاوی نیترات و کلا هر آبی از یون‌های مختلفی تشکیل شده است، به دلیل اینکه در یک فرآیند الکتروشیمیایی هر کدام از این یون‌ها ممکن است رفتار متفاوتی از خود نشان دهند، فرض می‌گردد که آب تنها از یون‌های سدیم و نیترات تشکیل شده است و در آزمایش‌ها تنها از محلول‌های سدیم نیترات با غلظت‌های متفاوت به عنوان آب‌نیترات دار استفاده خواهد شد. (Nikbakht et al., 2007)

## فرض ۴

میزان غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی و سایر آب‌ها دامنه گسترده‌ای از غلظت‌ها را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها و بررسی عوامل متغیر تأثیرگذار بر عملکرد سامانه، با توجه به محدودیت انکار ناپذیر تعداد آزمایش‌ها تنها می‌توان چند غلظت را به عنوان نماینده منابع ذکر شده مورد آزمایش قرار داد. بنابر این فرض می‌شود خوراک ورودی به سامانه دارای دامنه غلظتی از ۰.۲ الی ۰.۶ گرم بر لیتر می‌باشد. غلظت‌های بالاتر و کمتر از این مقادیر نیز قابل آزمایش هستند، اما به دلیل اینکه هدف پایان‌نامه به صورت خلاصه انجام نیترات زدایی به روش مذکور و یافتن درکی از چگونگی تغییر متغیرها نسبت به هم می‌باشد لذا دامنه تغییرات غلظت به این بازه محدود می‌شود.

## ۱-۵- هدف پژوهش

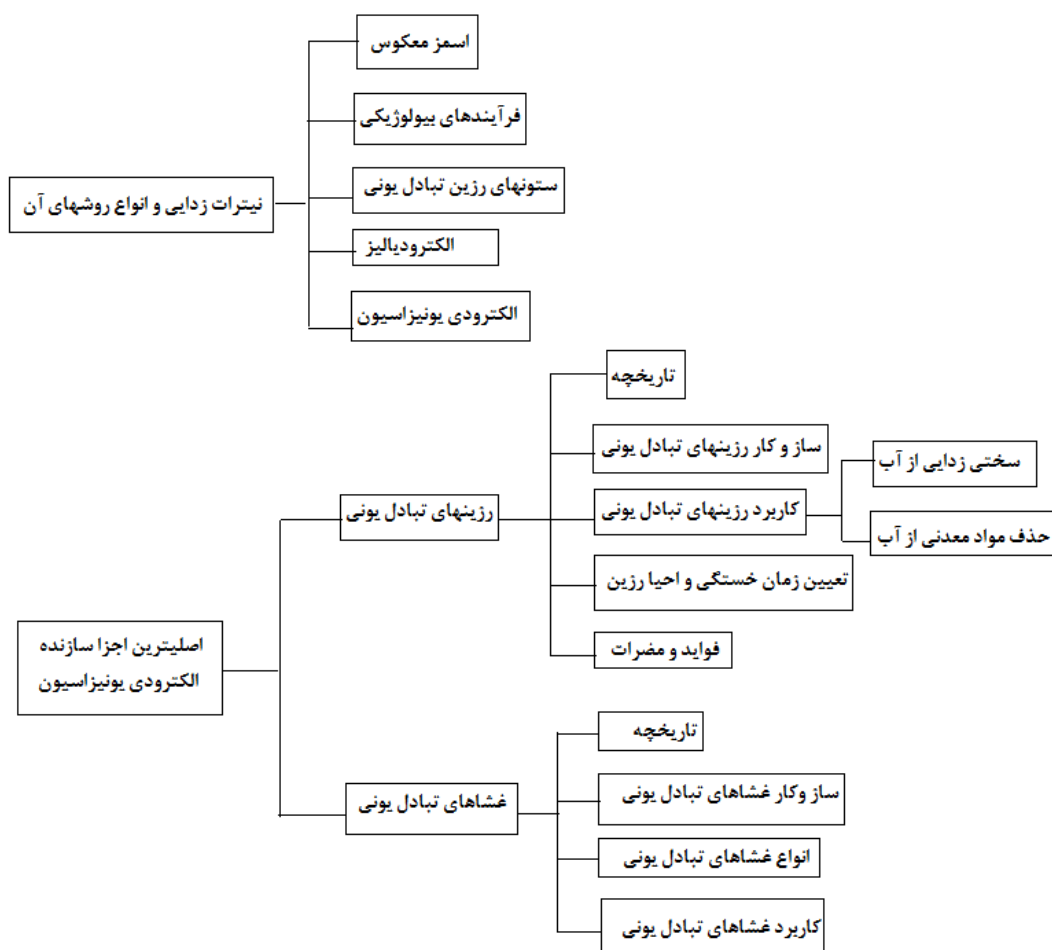
الکترودی یونیزاسیون یک روش جداسازی یونی است که بیش از نیم قرن است که از ظهور آن می گذرد. در ابتدا، کاربرد این پدیده نوظهور تنها به تصفیه فاضلاب رادیواکتیو محدود می شد. در سال های ابتدایی ظهور الکترودی- یونیزاسیون، به علت فقدان اطلاعات کافی از نحوه کار این سامانه، این روش به کندی توسعه و کاربرد پیدا کرد. بعدها تلاش برای شفاف سازی جزییات مکانیزم کاربردی این سامانه افزایش یافت و سال ها زمان گذشت تا این روش، راه خود را در تصفیه خانه دیگر صنایع خاص و حساس، باز کند. امروزه الکترودی یونیزاسیون، به عنوان روشی فوق العاده برای خالص سازی آب شناخته شده که سازگار با محیط زیست نیز می باشد (Alvarado, 2014). این روش در دنیا به سرعت در حال توسعه و تکامل است چرا که فواید عظیم اقتصادی و محیط زیستی آن به اثبات رسیده است، اما در کشور ما هنوز جایگاه بخصوصی برای این روش فراهم نشده است. در این پایان نامه هدف معرفی این تکنولوژی جدید است که ترکیبی از فرآیندهای الکترودیالیز و تبادل یونی می باشد. در بیشتر موارد استفاده از الکترودی یونیزاسیون برای تولید آب با خلوص بالا در صنایع هسته ای، نیمه هادی ها و داروسازی محدود شده است و مقدار کمی تحقیق در خصوص این سامانه برای استحصال آب قابل شرب انجام شده است (Salem, 1995). هدف این پژوهش ساخت یک سامانه ی الکترودی یونیزاسیون است تا بتواند آب آلوده به نیترات را با راندمان حذف بالایی نیترات زدایی نماید و اهداف دیگر، شناخت و بررسی عوامل متغیر بر ساخت و بهره برداری و چگونگی اثر آنها بر سامانه ی مورد نظر می باشد. نتیجه در این پایان نامه با استفاده از درصد حذف گزارش شده است. تحقیق حاضر به منظور معرفی و شناخت این روش و زمینه سازی برای رشد آن در کشور، انجام گرفته است.

۲- فصل دوم:

مطالعات کتابخانه‌ای

## ۱-۲- مقدمه

در این بخش ابتدا از اهمیت نیترات زدایی و سپس به انواع روش‌های حذف آن اشاره می‌گردد. سپس به منظور معرفی سامانه الکترودی یونیزاسیون مروری بر عوامل ساختاری آن یعنی رزین‌های تبادل یونی و غشاهای تبادل یونی که مهمترین عضوهای سامانه هستند از منظر ساختار، عملکرد و جایگاه آن در سامانه‌های غشایی می‌شود. شکل ۱-۲ به طور خلاصه به موضوعات مطرح شده در بخش مطالعات کتابخانه‌ای، لزوم و روابط بین این بخش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: روابط و چرایی موضوعات ارائه شده در بخش ادبیات موضوعی

## ۲-۲- نیترات زدایی و انواع روش های آن

یکی از منابع عمده آلودگی آب آشامیدنی، نیترات می باشد که در بخش های گسترده ای از اروپا مانند بریتانیا، فرانسه، هلند، آلمان، سوئیس و چندین منطقه آمریکا و نیز در بخش هایی از ایران رایج است. علل آلودگی منابع آب به نیترات می تواند ناشی از نفوذ فاضلاب های صنعتی کارخانه ها و یا استفاده بیش از حد از کودهای حاوی نیتروژن در کشاورزی باشد (Spalding et al., 1993). اولین ریسک سلامتی مرتبط با افزایش سطح نیترات، مت هموگلوبینی<sup>۱</sup> یا همان سندرم نوزادان آبی<sup>۲</sup> است. این سندرم ناشی از تبدیل نیترات به نیتريت توسط باکتریهای احیا کننده نیترات در مجرای معدی - روده ای است. پس از اکسید شدن  $Fe^{2+}$  هموگلوبین توسط نیتريت به  $Fe^{3+}$  هموگلوبین به یک رنگدانه قهوه ای به نام مت هموگلوبین تبدیل می شود که این ترکیب قادر به تشکیل پیوند با اکسیژن معمولی نبوده و نتیجه نهایی آن خفگی است. نوزادان نسبت به مت هموگلوبین حساسترند، زیرا pH بالاتر در معده آنها باعث احیا بیشتر نیترات به نیتريت به وسیله باکتریهای احیا کننده نیترات می شود. همچنین نیترات دارای پتانسیل سرطان زایی است زیرا در صورت احیا آن به نیتريت، با آمین های ثانویه موجود در غذا ترکیب شده و تشکیل نیتروز آمینها را می دهد که این مواد موتاژنیک هستند. همچنین تحقیقات نشان می دهد که وجود غلظتهای نیترات بیش از 10 میلی گرم در لیتر در آب باعث افزایش احتمال سقط جنین در زنان می شود (Winton, 1971). به منظور کاهش این اثرات حد مجاز نیترات در آب آشامیدنی که توسط سازمان بهداشت جهانی<sup>۳</sup> (WHO) تعیین شده، 50 میلی گرم بر لیتر نیترات بوده و در استاندارد ایران نیز همین مقدار می باشد. البته این حد در بعضی کشورها نظیر آمریکا و کانادا 10 میلی گرم در لیتر و در کشورهای اتحادیه اروپا 25 میلی گرم در لیتر است. (Kapoor et al., 1997)

تاکنون روش های متعددی برای نیترات زدایی به کار برده شده است. به طور کلی این روش ها به دو دسته بیولوژیکی و فیزیکی شیمیایی تقسیم می شوند. در روش بیولوژیکی نیترات احیا و تجزیه شده و در دیگری، فرآیند جداسازی صورت می گیرد. فرآیندهای جداسازی شامل تبادل یونی، اسمز معکوس، الکترو دیالیز و الکترو دی یونیزاسیون می باشند. هر کدام از این فرآیندها دارای مزایا و معایبی می باشند. بر خلاف فرآیندهای بیولوژیکی، فرآیندهای

---

<sup>1</sup> Methmoglobin

<sup>2</sup> Blue baby

<sup>3</sup> World health organization(WHO)

جداسازی فیزیکی یا الکتروغشایی می‌توانند به سادگی آغاز و پایان گیرند، که این ویژگی آن‌ها را برای کاربردهای فصلی مناسب می‌سازد. در ادامه شرح مختصری از فرآیندهای مذکور آورده شده است.

## ۲-۲-۱- فرآیندهای بیولوژیکی

از مزایای دنیتریفیکاسیون بیولوژیکی<sup>۱</sup> می‌توان به تجزیه مستقیم نترات به نیتروژن مولکولی اشاره کرد. تنها محصول جانبی این فرآیند مقدار کمی بیومس<sup>۲</sup> می‌باشد. به دلیل فعالیتهای بیولوژیکی، این فرآیندها برای عملکردهای تمام وقت قابل اجرا هستند و عملکرد ضعیفی در برابر تغییرات ناگهانی غلظت نترات در جریان ورودی دارند. عیب دیگر این فرآیند، نیاز به یک منبع کربن مانند اتانول و همچنین فسفر به منظور عملکرد بهتر فرآیند می‌باشد (Sun, 2013). این روش به طور خیلی وسیع در اروپا به کار گرفته شده است، اما کاربرد چندانی در تصفیه آب نداشته و کاربرد آن در تصفیه فاضلاب است. سرعت حذف نترات در این روش بسیار بالا بوده و همین امر علت کاربرد گسترده این روش می‌باشد. این روش قادر به تغییر چشمگیر شوری آب نبوده، پس برای مناطق با شوری یا سختی بالا مناسب نمی‌باشد (van der Hoek, 1988).

## ۲-۲-۲- اسمز معکوس

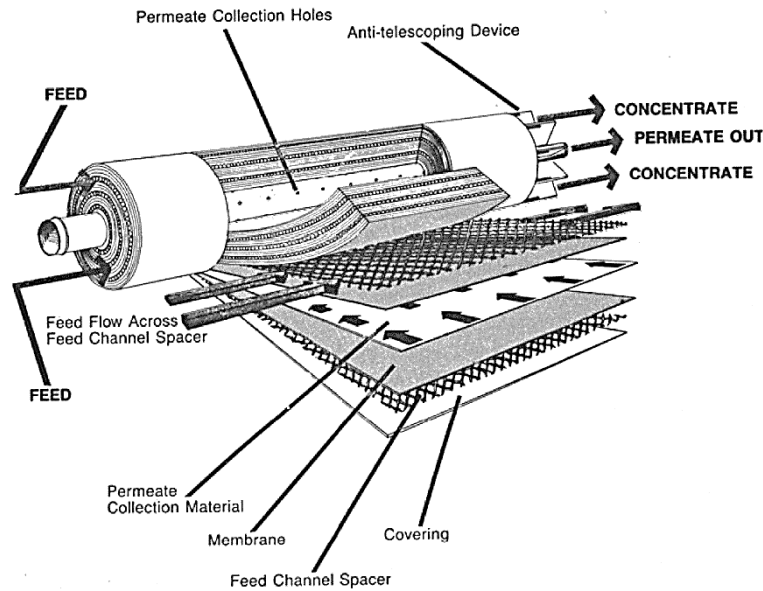
به طور کلی هنگامی که غشا نیمه تراوایی، دو سیال با غلظت متفاوت جامدات محلول را از یک دیگر جدا کند، طی فرآیند اسمزی آب از سیال رقیق به سمت سیال غلیظ جریان می‌یابد تا آن را رقیق نماید، در روش اسمز معکوس با اعمال فشار بیشتر از فشار اسمزی بر سیال غلیظ، می‌توان مولکول‌های آب را از سیال غلیظ با عبور از غشا نیمه تراوا، به طرف سیال رقیق حرکت داد. از معایب این روش می‌توان به حذف مواد معدنی به صورت بالا و غیر اختیاری اشاره کرد. از طرفی نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا، جهت خرید تجهیزاتی است که قابلیت تحمل فشار بالا را داشته‌باشند. در

---

<sup>۱</sup> Biological Denitrification

<sup>۲</sup> biomass

انتها توجه به هزینه‌ی بالای انرژی به‌منظور تولید فشار مورد نیاز ضروری است. در مقایسه با فرآیند تبادل یونی، اسمز معکوس به مواد شیمیایی کمتری نیازمند است. در شکل ۲-۲ طرحواره‌ای از ساختار یک مدول RO نشان داده شده است.

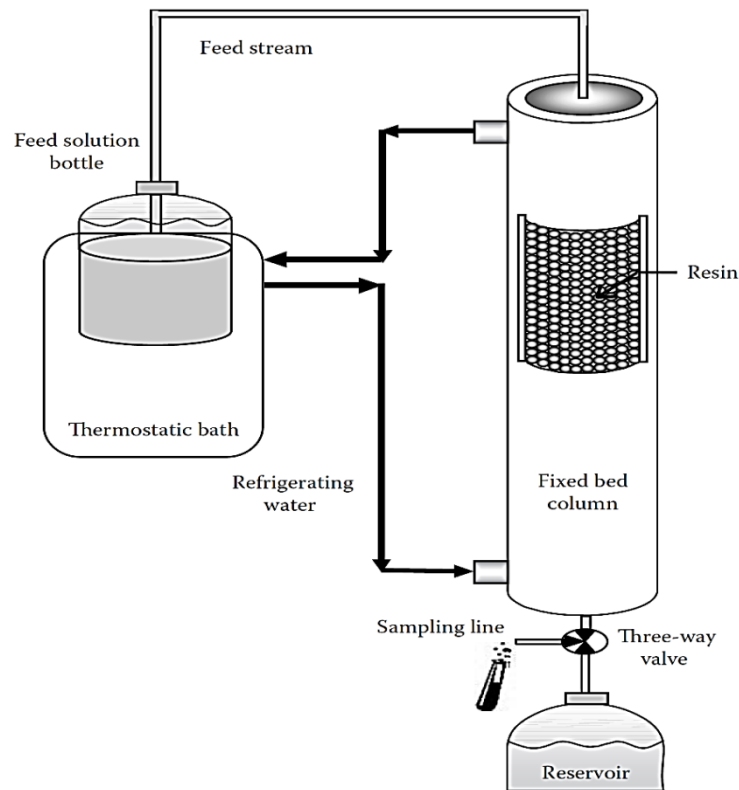


شکل ۲-۲: طرحواره‌ای از ساختار و اجزاء یک مدول اسمز معکوس (Cipollina et al., 2009)

## ۲-۲-۳ - ستون‌های رزین تبادل یونی

در این روش یک بستر ثابت (این بستر دارای یون‌هایی با بار الکتریکی مشابه می‌باشد) از جنس رزین وجود دارد که محلول از سطح آن عبور داده می‌شود. در نهایت یون‌هایی که قرار است از محلول جدا شوند روی سطح بستر جذب می‌شوند. در روش تبادل یونی با استفاده از رزین‌های تبادل آنیونی و کاتیونی، یون‌های محلول در آب با یون‌های موجود در ساختار رزین جایگزین می‌شوند. این سامانه همچنین برای حذف انواع یون‌های نامطلوب استفاده می‌شود. فرآیند تبادل یونی به دلیل نیاز رزین‌ها به احیا کردن عمدتاً برای مصارف خاص در غلظت‌های کم مانند خالص سازی آب نیروگاه‌ها به عنوان یک فرآیند تکمیلی پس از یک سیستم تصفیه دیگر مانند RO کاربرد دارد، که از معایب آن می‌توان

به مقادیر بالای ماده‌ی احیا کننده دور ریختنی که شامل غلظت بالایی از مواد شیمیایی و یون جایگزین شده است اشاره نمود. طرح‌واره‌ای از ساختار و اجزاء یک بستر<sup>۱</sup> حاوی رزین‌های تبادل یونی در شکل ۲-۳ ارائه شده است.



شکل ۲-۳: طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد یک بستر رزین تبادل یونی (Sengupta, 2007)

## ۲-۲-۴ - الکترودیالیز

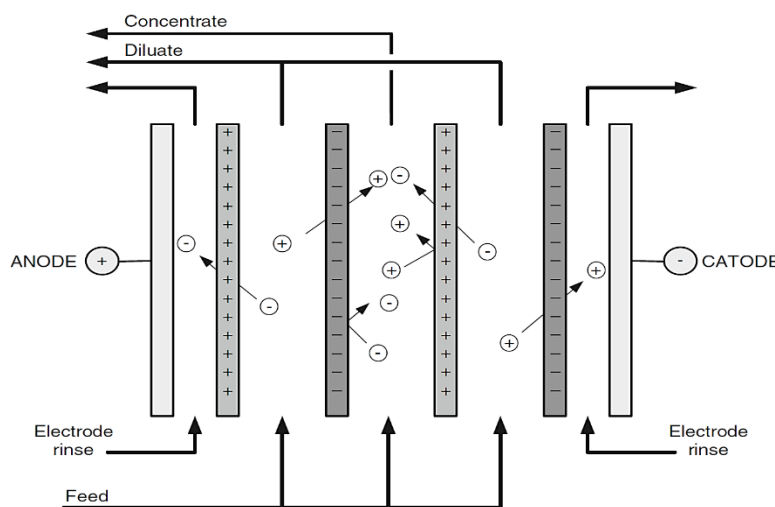
الکترودیالیز (ED) یکی از پرکاربردترین فرآیندهای نمک‌زدایی یا به عبارت دیگر یک فرآیند جدا سازی الکتروغشایی<sup>۲</sup> است، که در آن یون‌های موجود در آب با استفاده از نیروی الکتروسیسته و اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی از طریق جریان مستقیم<sup>۳</sup> از غشاهای تبادل یونی مثبت و منفی عبور داده می‌شوند که طی این عمل بخشی از املاح موجود در آب حذف شده و در شوراب تجمع می‌یابد. (Brauns et al., 2012) در این فرآیند از دو نوع غشا

<sup>۱</sup> Ion Exchange Resin Bed

<sup>۲</sup> ElectroMembrane

<sup>۳</sup> Direct-Current (DC)

تبادل یونی آنیونی و کاتیونی در مدولی قاب و صفحه استفاده می‌شود. این غشاها در مدول به صورت یکی در میان و به تعداد زیاد قرار می‌گیرند. در فضای بین غشاها فاصله دهنده قرار دارند که جریان آب از درون آن عبور می‌کند. کل غشاها و فاصله دهنده‌ها بین دو الکتروود کاتد و آند قرار دارند و تمام این مجموعه در یک مدول پیچ و مهره دار برای آب بندی تحت فشار قرار می‌گیرد. با برقراری جریان برق یون‌ها با عبور از غشاهای هم‌نام در جهت حرکت به سوی الکتروود مخالف وارد محفظه پساب می‌شوند و با برخورد به غشا ناهم‌نام متوقف می‌شوند. در طول حرکت آب محفظه تولید آب شیرین پیوسته شیرین‌تر شده و محفظه پساب پیوسته شورتر می‌گردد (Sadrzadeh et al., 2008). کاهش جامدات محلول موجود در آب‌های لب‌شور زیر زمینی، مهم‌ترین کاربرد فرآیند الکترودیالیز محسوب می‌شود (Strathmann, 2004). الکترودیالیز فرآیندی پرکاربرد و دارای استفاده‌های متنوعی مانند نمک زدایی از آب‌های لب‌شور، شور، بسیار شور و تغلیظ یونی محلول‌ها است. تولید نمک از آب دریا، تولید اسید و باز، حذف انواع یون‌های سمی مانند فلزات سنگین، آرسنیک و برم، تصفیه خون، تولید آب بدون یون برای مصارف نیروگاهی و داروسازی از جمله کاربردهای این فرآیند است. طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد یک سامانه الکترودیالیز متداول با کاربرد نمک‌زدایی در شکل ۴-۲ ارائه شده است.



شکل ۴-۲: تصویر طرح‌واره از نحوه عملکرد یک سامانه الکترودیالیز متداول (آرشی؛ بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۹۲)

## ۲-۴-۱-۲- تاریخچه الکترودیالیز

در سال ۱۹۴۰ جاذبه‌های صنعتی منجر به توسعه‌ی سنتز غشاهای تبادل یونی بر پایه «فنول-فرمالدهید-پلی‌کاندشن» شد. به طور هم‌زمان میبیر و استراوس فرآیند الکترودیالیز را برای نمک زدایی با استفاده از انرژی الکتریکی و

غشاهای تبادل یونی مثبت و منفی ارائه کردند، در آن زمان هنوز موقعیت برای تجاری‌سازی این اختراع به دلیل مقاومت بالای الکتریکی غشاهای موجود در بازار وجود نداشت. با توسعه غشا‌های تبادل یونی با قدرت انتخابی و گذردهی بالای یون‌ها و همچنین مقاومت الکتریکی پایین در سال ۱۹۵۰ توسط جودا و مکری از کمپانی یونیکس و وینگر و همکاران از روهم در سال ۱۹۵۳، الکترودیالیز بر پایه غشاهای تبادل یونی به سرعت به یکی از فرآیندهای صنعتی یون زدایی و همچنین تغلیظ یونی تبدیل شد. از آن به بعد هم غشاهای تبادل یونی و هم فرآیند الکترودیالیز به طور فزاینده‌ای ارتقا پیدا کردند و به طور گسترده‌ای در بسیاری از بخش‌های صنعت مورد استفاده قرار گرفتند.

## ۲-۲-۵- مقدمه‌ای از الکترودی‌یونیزاسیون

الکترودی‌یونیزاسیون فرآیندی است که برای حذف یون‌ها از محلول، با استفاده از غشاها و رزین‌های تبادل یونی و یک منبع پتانسیل الکتریکی خارجی (برای افزایش عبور و انتقال یون‌ها) کار می‌کند. محیط فعال الکتریکی در این سامانه به عنوان یک بستر جهت ذخیره و تخلیه یون‌ها عمل می‌کند. به عبارتی این بستر فعال الکتریکی به منظور تسهیل در انتقال یون‌ها به صورت مداوم با مکانیزم جایگزینی یونی کار می‌کند (Mir, 2001)، به علاوه اینکه حضور رزین‌ها باعث کاهش مقاومت الکتریکی جریان می‌شود. یک سامانه الکترودی‌یونیزاسیون حداقل بایستی از یک جفت غشای کاتیونی و آنیونی تشکیل یابد. الکترودی‌یونیزاسیون را می‌توان شاخه‌ای از علم جداسازی در زمینه علم غشایی دانست. تنها تفاوت سامانه الکترودی‌یونیزاسیون با الکترودیالیز به حضور رزین‌ها در محفظه میانی بازمی‌گردد. در حقیقت سامانه الکترودی‌یونیزاسیون ترکیبی از سامانه الکترودیالیز به همراه رزین‌های تبادل یونی می‌باشد (Wen, 2005). اگرچه الکترودی‌یونیزاسیون نامی بسیار مناسب برای این سامانه است اما این سامانه با عناوینی مانند الکترودیالیز رزینی نیز خوانده می‌شود (Wen, 2005). به منظور درک بهتر ساز و کار داخلی الکترودی‌یونیزاسیون، ابتدا لازم است که فرآیندهای داخلی و سازنده‌ی آن شناخته‌شوند، بنابراین در ادامه اصلی‌ترین اجزا سازنده این سامانه الکتروغشایی، یعنی رزین‌ها و غشاهای تبادل یونی هر یک به طور جداگانه شرح داده خواهند شد.

## ۲-۲-۶- رزین‌های تبادل یونی

رزین‌های تبادل یونی پلیمرهای غیر محلولی هستند که دارای گروه‌های یونی ثابتی هستند که با پیوند کووالانسی به پلیمر متصل شده‌اند. ساختار پلیمری رزین‌ها ماتریکس<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. رزین‌ها به تبادل یون با یون‌های موجود در درون محلول می‌پردازند. یون‌هایی که دارای بار مخالف با گروه یونی ثابت هستند با رزین شروع به تبادل می‌کنند، این یونها ناهم‌نام<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند و یون‌هایی که دارای باری مشابه با گروه یونی ثابت هستند یونها هم‌نام<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. رزین‌های تبادل یونی که قادر به تبادل کاتیون هستند رزین کاتیونی و رزین‌های تبادل یونی که قادر به تبادل آنیون هستند، رزین آنیونی نامیده می‌شوند. رزین‌هایی که قادر به تبادل هم کاتیون و هم آنیون باشند به نام آمفوتریک<sup>۴</sup> شناخته شده‌اند. به طور کلی می‌توان گفت که رزین‌های تبادل یونی ترکیبی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها هستند که یکی از آنها با ساختار پلیمری ماتریکسی پیوند کووالانسی داده و به صورت بار ثابت قرار گرفته و دیگری به صورت متحرک و در حال تبادل یون با محلول یونی است. خلاصه آنچه گفته شد در جدول ۱-۲ دیده می‌شود (Wachinski, 1997).

جدول ۱-۲: ساختار رزین‌های کاتیونی و آنیونی

نوع	بارهای ثابت شده	بارهای ناهم‌نام	بارهای هم‌نام
رزین تبادل کاتیونی	(-)	Cations(+)	Anions(-)
رزین تبادل آنیونی	(+)	Anions(-)	Cations(+)

## ۲-۲-۶-۱- تاریخچه رزین‌های تبادل یونی

پدیده تبادل یونی در طبیعت در سلول‌های زنده و پروتئین‌ها نیز مشاهده می‌گردد و جدید نیست، اما برای اولین بار در دهه سی میلادی بود که استفاده از رزین‌های ساخته شده از زغال و فنول برای کاربردهای صنعتی معرفی شد. (Helfferich, 1962). سپس بعد از گذشت چند سال رزین‌هایی که شامل پلی استرن با گروه سولفانات<sup>۵</sup> بودند رزین‌های

<sup>۱</sup> Matrix

<sup>۲</sup> Counter ions

<sup>۳</sup> co ions

<sup>۴</sup> amphoteric

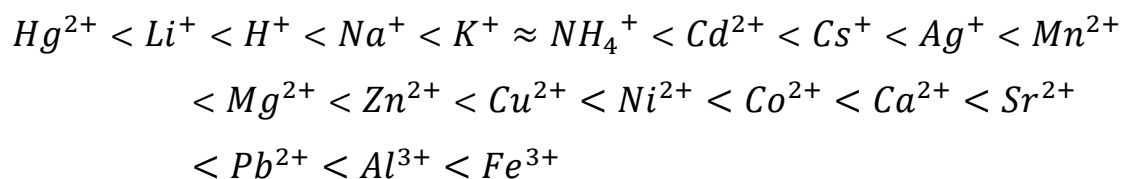
<sup>۵</sup> Polystyrene with sulphonate

کاتیونی را تشکیل دادند و پلی استرنهایی با گروه عاملی آمین جای رزین‌های تبادل آنیونی را گرفتند. این دو نوع رزین امروزه از پرکاربردترین رزین‌ها به شمار می‌روند

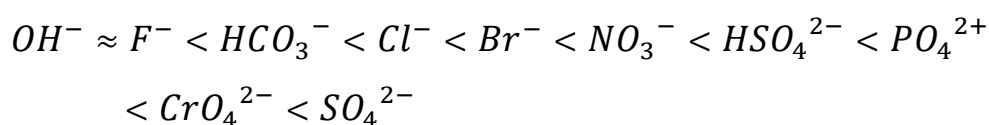
## ۲-۶-۲-۲- کارکرد رزین‌های تبادل یونی

رزین‌های تبادل یونی از ذرات کروی شکل با قطر ۰.۵ تا ۱ میلی‌متر تشکیل شده‌اند. این ذرات حتی در زیر میکروسکوپ نیز به صورت جامد دیده می‌شوند اما در مقیاس مولکولی ساختار تقریباً بازی دارند که باعث می‌شود هنگامی که محلولی از رزین عبور داده می‌شود به راحتی در بین بافت‌های پلیمری رزین نفوذ کند و در تماس بسیار نزدیکی با یون‌های جایگزین قرار بگیرد. قدرت جاذبه رزین‌ها با تغییر در سایز یون‌ها و بار الکتریکی یون‌ها تغییر پیدا می‌کند. در کل جاذبه برای یون‌های بزرگتر با نیروی والانس بزرگتر بیشتر است (Bolto, 1972).

به طور تقریبی قدرت جاذبه رزین تبادل کاتیونی برای برخی از کاتیون‌ها رایج به صورت زیر است :

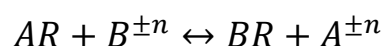


به طور متناظر قدرت جاذبه رزین تبادل آنیونی برای برخی از آنیون‌ها به قرار زیر است:



به طور مثال فرض کنید که رزین وابستگی بیشتری به یون B نسبت به A دارد. اگر رزین شامل یون A باشد و یون B در آب به صورت محلول باشد و از رزین عبور داده شود تبادل یون به صورت زیر اتفاق خواهد افتاد :

R نشان‌دهنده رزین است.



با گذشت زمان رزین به خستگی می‌رسد و بیشتر به صورت BR خواهد بود. حال اگر یک محلول غلیظ که حاوی یون A می‌باشد را از رزین عبور دهیم رزین احیا خواهد شد و به صورت AR در خواهد آمد و آماده استفاده مجدد

خواهدبود و می‌تواند از نو یون B را از آب تبادلی کند. پروسه احیا و خستگی در کاربرد در تمام رزین‌های تبادلی یونی دیده می‌شود.

## ۲-۶-۳- کاربرد رزین‌های تبادلی یونی

رزین‌ها کاربردهای متفاوتی دارند: از جمله برای حذف یون‌های ناخواسته و نامطلوب، یا برای انباشته کردن مواد معدنی با ارزش، که سپس قابلیت بازیافت را دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از رزین‌های کاتیونی تاکنون عناصر بسیاری کشف و جداسازی شده‌است، که می‌توان به کشف پرومیتیوم<sup>۱</sup> که المنت ۶۱ جدول تناوبی می‌باشد و ۵ المنت دیگر که در سری آکتینیدها<sup>۲</sup> قرار دارند، اشاره نمود (Bolto, 1972). از کاربردهای مهم رزین‌های یونی در تصفیه آب می‌توان به سختی‌زدایی و حذف مواد معدنی از آب اشاره کرد، که در ادامه شرح مختصری از هر یک آمده است.

### ۱. سختی‌زدایی از آب

برای سختی‌زدایی و یا نرم‌سازی آب معمولاً از رزین کاتیونی با عامل سدیم استفاده می‌شود. در این فرآیند فلزات سخت مثل کلسیم و منیزیم از آب گرفته می‌شوند و سدیم به مقدار برابر با آن‌ها در آب جایگزین می‌گردد. در نتیجه مقادیر نامحلول موجود در آب ثابت باقی خواهندماند، همچنین pH و مقادیر آنیون‌ها نیز ثابت باقی خواهدماند (Apell, 2010). ستون رزین تبادلی یونی در بازه‌های زمانی معین، معمولاً با استفاده از سدیم کلراید قوی احیا می‌شود (Wachinski, 1997).

### ۲. حذف مواد معدنی از آب

برای حذف مواد معدنی از آب در دو مرحله از ستون رزین تبادلی یونی استفاده می‌شود. در ابتدا محلول یونی از یک ستون رزین تبادلی کاتیونی که دارای عامل یون هیدروژن می‌باشد عبور داده می‌شود، در طول فرآیند کاتیون‌های

---

<sup>۱</sup> Promethium

<sup>۲</sup> Actinide

موجود در آب با یون هیدروژن جایگزین می‌شوند و محلول خاصیت اسیدی پیدا می‌کند، سپس آب از یک ستون رزین تبادل آنیونی با عامل هیدروکسید عبور داده می‌شود، در این مرحله کلیه آنیون‌های موجود در آب با یون هیدروکسید جایگزین می‌شوند. حال هیدروکسید با هیدروژن واکنش می‌دهد و آب تولید می‌شود. در واحدهای بزرگ مرسوم است که آب پس از عبور از رزین کاتیونی از برج دیگسینگ<sup>۱</sup> عبور داده شود. این برج بیشتر اسید کربنیک را که از واکنش دی‌اکسید کربن با بیکربنات بوجود آمده از بین می‌برد و باری را که قرار است از برج آنیونی عبور داده شود، کاهش می‌دهد. بدون دیگسینگ اسید کربنیک گرفتار رزین آنیونی می‌شود، چرا که اسید کربنیک تبدیل به کربنات شده و سپس توسط رزین‌های تبادل آنیونی گرفتار می‌شود (Dabrowski, 2004).

#### ۲-۲-۶-۴- تعیین زمان خستگی و احیا رزین

زمانی رزین به خستگی می‌رسد که تمامی یا بیشتر یون‌های موجود در رزین با یون‌های موجود در محلول جایگزین شده باشند. خستگی یا زمان احیا معمولاً به وسیله یک سل رسانای الکتریکی که در خروجی نصب می‌شود تشخیص داده می‌شود. طبقه عملکرد آن بدین صورت می‌باشد که وقتی رسانایی افزایش پیدا می‌کند، که نشان‌دهنده نقطه شکست<sup>۲</sup> یونی است، فرآیند احیا به طور اتوماتیک آغاز می‌شود. در واحدهای کوچکتر می‌توانیم از پی-هاش ایندیکاتور<sup>۳</sup> استفاده کنیم که به عنوان مثال، در رزین تبادل آنیونی درست هنگامی که پی-هاش از قلیائیت به خنثی می‌رسد احیا به صورت اتوماتیک آغاز می‌شود (Bell, 1995).

---

<sup>۱</sup> *Degassing tower*

<sup>۲</sup> *Break point*

<sup>۳</sup> *pH indicator*

## ۲-۲-۶-۵- احیای یک رزین تبادل یونی

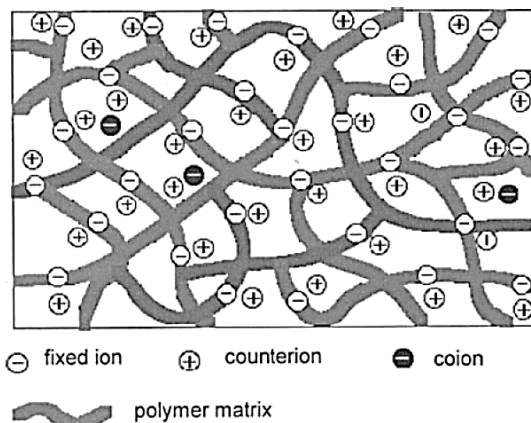
در صنعت معمولاً یک ستون رزین تبادل یونی پس از ۱۲ الی ۴۸ ساعت احیا می‌شود. احیا از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که با کاهش عمل احیا کیفیت آب کاهش پیدا می‌کند، به علت آنکه تعداد یون‌هایی که از رزین بدون تبادل یون عبور می‌کنند افزایش پیدا می‌کند. برای مثال، وقتی از یک ستون با رزین تبادل کاتیونی و آنیونی برای تصفیه آب شور استفاده می‌کنیم اگر رزین کاتیونی هیدروژنی به خوبی احیا نشده باشد باعث نشت مقداری سدیم خواهد شد که سدیم هنگامیکه از ستون رزین تبادل آنیونی می‌گذرد تبدیل به سدیم هیدروکسید خواهد شد. برای احیا به مقدار زیادی مواد احیا کننده نیازمندیم که در عمل غیراقتصادی می‌باشد. برای همین از یک مقدار بهینه از مواد احیا کننده برای احیای رزین استفاده می‌شود. معمولاً رزینها به نسبت دو به سه ظرفیتشان احیا می‌شوند (Bell, 1995). بعلاوه برای بسیاری از کاربردها خالص‌سازی کامل مورد نیاز نمی‌باشد. معمولاً فرآیند احیا با جریان مخالف یعنی هم از بالا و هم از پایین بطور همزمان کارایی بالایی خواهد داشت. بدین صورت این اطمینان حاصل می‌شود که قسمت پایین رزین بسیار بیشتر از قسمت بالای آن احیا شده است، آبی که از این رزین عبور می‌کند بیشترین امکان تبادل و تعویض یون را داراست.

## ۲-۲-۶-۶- فواید و مضرات رزین‌های تبادل یونی

یکی از فواید چشمگیر فرآیند تبادل یونی هزینه پایین راهبری می‌باشد. در این فرآیند انرژی بسیار کمی مورد احتیاج است، از طرفی مواد احیا کننده ارزان هستند و اگر به خوبی از ستون رزین تبادل یونی نگهداری شود می‌توانیم سالها بدون جایگزینی از آن استفاده کنیم. البته استفاده از ستونهای رزین تبادل یونی مضراتی همچون نیاز به احیا و مواد احیا کننده و نگهداری را دارند که بایستی در طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته شوند (Bolto, 1972). اما با توجه به فوایدی که در بالا ذکر شد می‌توان به این نتیجه رسید که فواید این فرآیند بسیار چشمگیرتر از مضرات آن است.

## ۲-۲-۷- غشاهای تبادل یونی

غشاهای تبادل یونی یکی از بخش‌های سازنده سامانه‌های الکتروغشایی هستند. این غشاها در دو گروه آنیونی و کاتیونی به کار گرفته می‌شوند. عامل اصلی سازنده آن‌ها پلیمرهای دارای گروه‌های مثبت و منفی است. وجود این گروه‌های یونی موجب خاصیت تراوایی انتخابی در غشاها می‌گردد. خاصیت تراوایی انتخابی در غشاهای تبادل یونی موجب می‌گردد تا غشا تنها یکی از یون‌های مثبت و یا منفی را بر حسب کاتیونی و یا آنیونی بودن از خود عبور دهد. غشاهای کاتیونی که یون‌های مثبت توانایی عبور از آن‌ها را دارند، دارای گروه‌های منفی و غشاهای آنیونی دارای گروه‌های مثبت بر روی شبکه پلیمری خود هستند. طرح‌واره‌ای از ساختار یک غشا تبادل یونی مثبت در شکل ۲-۵ ارائه شده است (Strathmann, 2004).

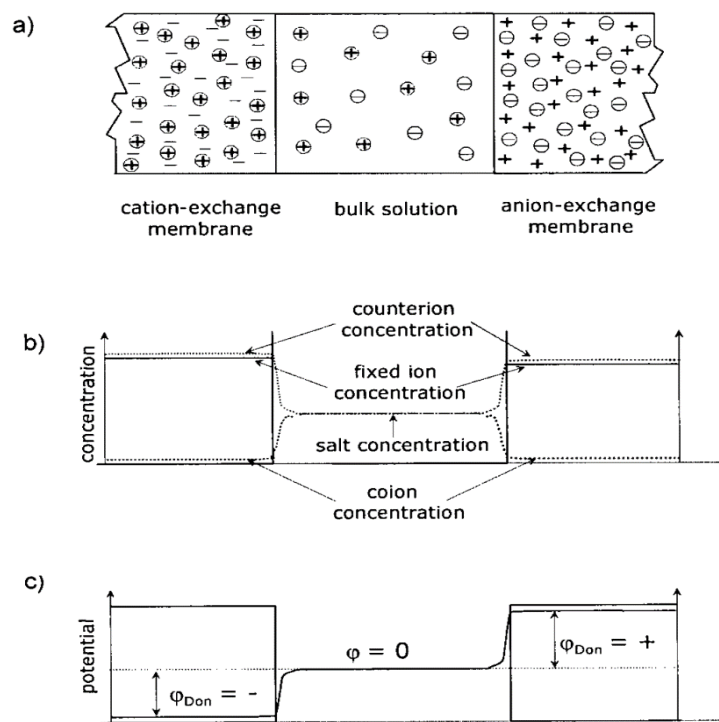


شکل ۲-۵: طرح‌واره‌ای از ساختار یک غشا تبادل یونی مثبت (Strathmann, 2004)

## ۲-۲-۷-۱- تاریخچه‌ی غشاهای تبادل یونی

توسعه فرآیندهای غشایی بر پایه تبادل یونی با کارهای استوالد در سال ۱۸۹۰ آغاز شد، او هنگامی که در مورد مشخصات غشاها مطالعه می‌کرد کشف کرد که غشاها می‌توانند نسبت به کاتیون‌ها یا آنیون‌ها در محلول‌های یونی نیمه تراوا باشند. این پدیده در مرز بین غشا و محلول یونی «پتانسیل غشایی» نامیده شد و به عنوان نتیجه وجود اختلاف غلظت بین محلول‌های دو طرف غشا در نظر گرفته شد. در سال ۱۹۱۱ دونان وجود این لایه مرزی را تأیید کرد (موضوع شکل ۲-۶) و روابط حاکم بر این پدیده را با نام «پتانسیل دافعه دونان» ارائه کرد اما در واقع مطالعات پایه در رابطه با غشاهای تبادل یونی برای اولین بار در سال ۱۹۲۵ توسط میشل و فوجیتا با کار بر روی غشا «و یک

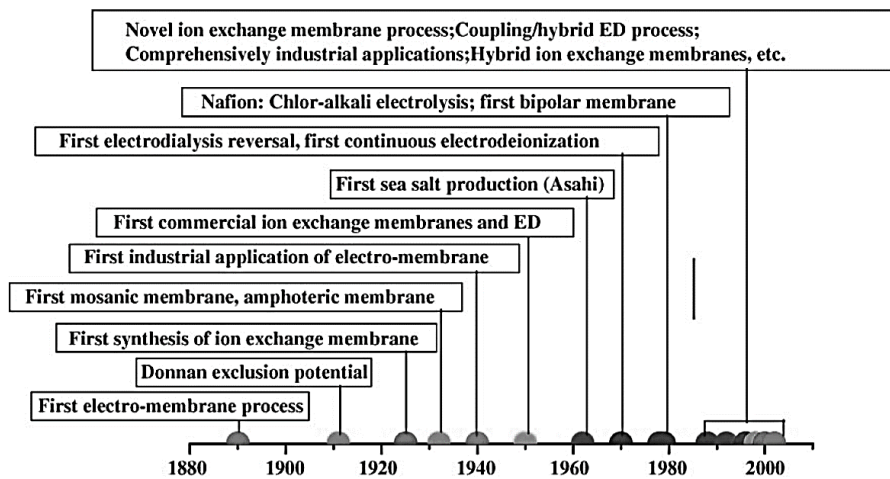
اسید کلودیوم» انجام شد. در سال ۱۹۳۰ سولنر ایده‌اش را با غشا امفوتری متشکل از هر دو بار مثبت و منفی ارائه داد و توسط آن پدیده جابه‌جایی یون‌ها را نشان داد. در سال ۱۹۴۰ جاذبه‌های صنعتی منجر به توسعه‌ی سنتز غشاهای تبادل یونی بر پایه «فنول-فرمالدهید-پلی‌کاندشن» شد. به طور هم‌زمان میسر و استراوس فرآیند الکترودیالیز را برای نمک زدایی با استفاده از انرژی الکتریکی و غشاهای تبادل یونی مثبت و منفی ارائه کردند، در آن زمان هنوز موقعیت برای تجاری‌سازی این اختراع به دلیل مقاومت بالای الکتریکی غشاهای موجود در بازار وجود نداشت.



شکل ۲-۶: (a) طرح‌واره‌ای از چگونگی توزیع یون‌ها بین یک غشا تبادل یون منفی، (b) جریانی از یک محلول یونی و یک غشا تبادل یونی مثبت و (c) دیاگرام توزیع پتانسیل غشایی دونان. (Strathmann, 2004)

با توسعه غشاهای تبادل یونی با قدرت انتخابی و گذردهی بالای یون‌ها و همچنین مقاومت الکتریکی پایین در سال ۱۹۵۰ توسط جودا و مک ری از کمپانی یونیکس و وینگر و همکاران از روهم در سال ۱۹۵۳، الکترودیالیز بر پایه غشاهای تبادل یونی به سرعت به یکی از فرآیندهای صنعتی یون زدایی و همچنین تغلیظ یونی تبدیل شد. از آن به بعد هم غشاهای تبادل یونی و هم فرآیند الکترودیالیز به تور فزاینده‌ای ارتقا پیدا کردند و به طور گسترده‌ای در بسیاری از بخش‌های صنعت مورد استفاده قرار گرفتند. برای مثال در سال ۱۹۶۰ برای اولین بار سامانه تولید نمک از آب دریا توسط کمپانی آساهی ژاپن با استفاده از غشاهایی که یون‌های تک ظرفیتی مانند سدیم و کلر را عبور می‌دادند تحقق یافت. در سال ۱۹۶۹ اختراع سامانه الکترودیالیز معکوس شونده باعث افزایش زمان بهره‌برداری از سامانه

الکترودیالیز بدون تجمع یون‌ها در سطح غشا و الکترودها شد. در سال ۱۹۷۰ غشاهای پایدار از نظر شیمیایی بر پایه «سولفونیتد پلی تترا-فلئوروتیلن» برای اولین بار توسط شرکت دوپونت با نام تجاری نفیون عرضه شد و جنبشی از فعالیت‌های مختلف صنعتی، مانند تولید اسید و باز، ذخیره انرژی، تولید انرژی را رهبری کرد. افزایش کیفی غشاها به لحاظ تحمل فیزیکی، شیمیایی و حرارتی، کاهش مقاومت الکتریکی، بهبود خواص گزینش پذیری و سایر مشخصات کیفی غشاهای تبادل یونی باعث شده است تا این غشاها علاوه بر نمک زدایی آب‌های لب شور، سایر نیازهای ما را در صنایع غذایی، دارویی، نیروگاهی، شیمیایی، فن‌آوری‌های زیستی<sup>۱</sup> و تصفیه فاضلاب مرتفع سازند (Xu, 2005). در شکل ۷-۲ هیستوگراف روند توسعه غشاهای تبادل یونی، کاربردها و فناوری‌های مرتبط با آن ارائه شده است.



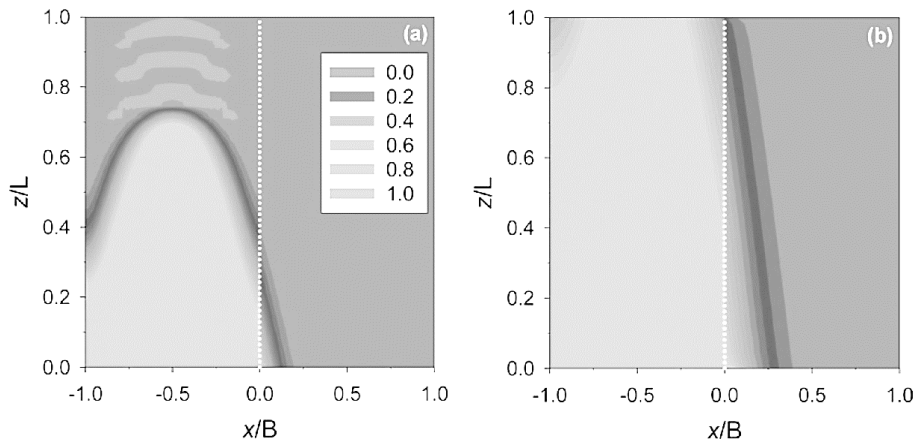
شکل ۷-۲: هیستوگراف روند توسعه غشاهای تبادل یونی، کاربردها و فن‌آوری‌های مرتبط با آن (Xu, 2005)

## ۲-۷-۲-۲- سازوکارهای عبور یونها از غشاهای تبادل یونی

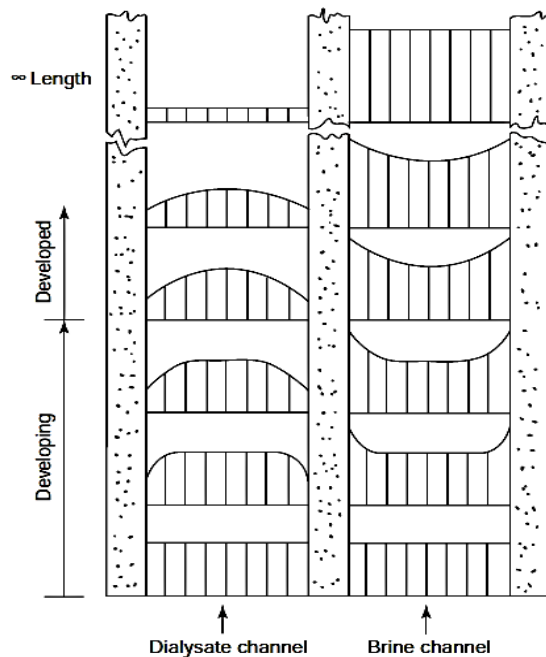
یون‌ها برای عبور از غشاهای تبادل یونی به نیرو محرکه احتیاج دارند. نیرو محرکه لازم برای عبور یون‌ها از دو راه قابل تأمین است یکی اختلاف پتانسیل الکتریکی و دیگری اختلاف پتانسیل غلظتی. اختلاف پتانسیل الکتریکی نیرو محرکه لازم برای فرآیندهای الکتروغشایی جدا سازی نظیر الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس است به این صورت که با قرار دادن دو الکتروود در محلول‌های یونی در دو طرف غشا و برقراری جریان الکتریکی یون‌های مثبت و یا منفی برای خنثی شدن به لحاظ بار الکتریکی با عبور از غشا هم نام به سمت الکتروود نا هم‌نام حرکت می‌کنند. شکل تصویری

<sup>۱</sup> Bio technology

واقعی از نحوه جریان یونی عبوری از غشا را با گذشت زمان در یک فرآیند تولید انرژی با نیرو محرکه اختلاف غلظت و شکل طرح‌واره‌ای نظری را از نحوه تغییر غلظت در طرفین غشا در یک سامانه نمک زدایی با نیرو محرکه الکتریکی نشان می‌دهد نشان می‌دهد.



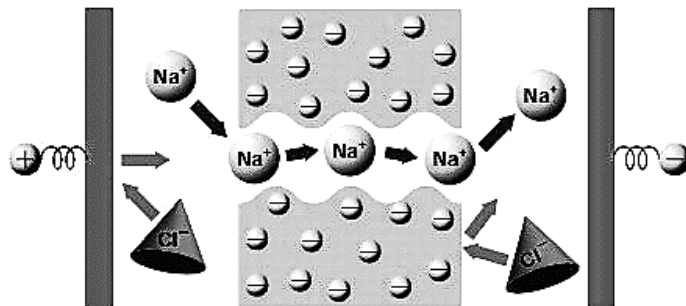
شکل ۲-۸: نحوه عبور جریان غلظت از غشا تبادل یونی با گذشت زمان (Kim et al., 2012)



شکل ۲-۹: نحوه تغییر غلظت در طول مسیر جریان بین دو سلول غلیظ و رقیق در یک فرآیند نمک زدایی (Tanaka, 2007)

در شکل ۲-۱۰ طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد و تاثیر نیرو محرکه الکتریکی بر یک غشا تبادل یونی ارائه شده است. از این سازوکار عبور یون‌ها در فرآیندهای نمک زدایی و یا تغلیظ یونی استفاده می‌گردد. از جمله فرآیندهای تغلیظ می‌توان به نمک سازها و یا تغلیظ کننده‌ها در صنایع لبنی و دارویی اشاره کرد. اختلاف پتانسیل غلظتی، نیرو محرکه‌ی فرآیند تولید انرژی با نام معکوس الکترودیالیز است به این صورت که اختلاف غلظت یون‌های محلول در دو طرف غشا

موجب حرکت یون‌ها از محیط غلیظ به رقیق می‌گردد. از این سازوکار همچنین در فرآیندهای پیل سوختی با استفاده از غشاهای تبادل یونی نیز استفاده می‌گردد.



شکل ۲-۱۰: طرح‌واره‌ای از نحوه عملکرد و تاثیر نیرو محرکه الکتریکی بر یک غشا تبادل یونی (Tanaka, 2005)

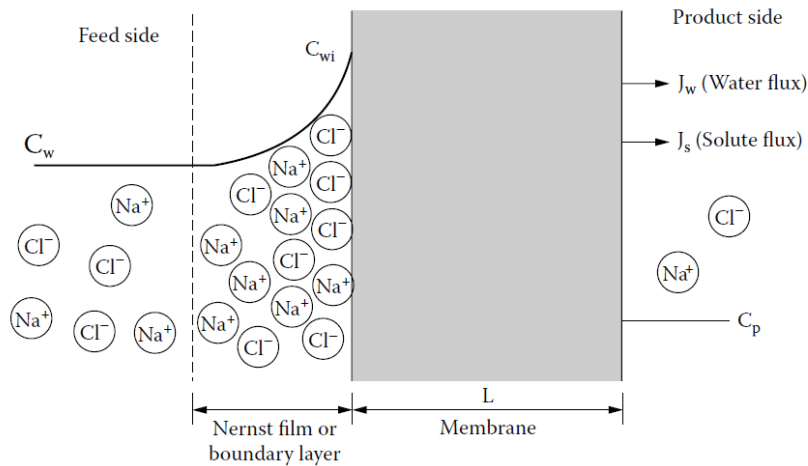
### ۲-۷-۳- انواع غشاهای تبادل یونی

غشاهای تبادل یونی در کل به دو گروه غشاهای تبادل یونی مثبت و منفی تقسیم می‌شوند که نوع آن بستگی به گروه عاملی ثابتی دارد که به ماتریس اصلی پلیمری غشا متصل است. غشاهای تبادل یونی مثبت دارای گروه‌های عاملی منفی ثابتی نظیر، -SO، -COO، -PO، -POH، -CHO- بر روی شبکه اصلی پلیمری خود هستند که باعث دفع یون‌های منفی و عبور یون‌های مثبت از غشا می‌گردد (Xu, 2005) در حالی که غشا تبادل یون منفی دارای گروه‌های عاملی منفی بر روی شبکه پلیمری خود هستند.

### ۲-۷-۴- کاربردهای غشاهای تبادل یونی

از غشاهای تبادل یونی در فرآیندهای جداسازی و تولید انرژی استفاده می‌شود. از جمله فرآیندهای جداسازی که در آن‌ها از غشاهای تبادل یونی استفاده می‌شود می‌توان به فرآیند تولید اسید و باز و همچنین حذف انواع یون‌ها از آب و فاضلاب را نام برد. از جمله فرآیندهای تولید انرژی نیز می‌توان به پیل‌های سوختی هیدروژن، تولید برق از فاضلاب و تولید برق از اختلاف غلظت نمک در محل تلاقی رودخانه و دریا اشاره کرد.

با این همه بهره‌برداری از غشاهای تبادل یونی دارای مشکلاتی همانند سایر فرآیندها غشاها می‌باشد مانند انواع گرفتگی‌ها از جمله بیولوژیکی که در نتیجه رشد میکروارگانیسم‌ها روی غشا اتفاق می‌افتد و پدیده تجمع غلظتی<sup>۱</sup> که در اثر تجمع یون‌های همانام با یون‌ها تثبیت شده روی بستر پلیمری اتفاق می‌افتد. در شکل ۱-۲ طرح‌واره‌ای از چگونگی ایجاد پدیده تجمع غلظتی در سطح یک غشا تبادل یونی ارائه شده است.



شکل ۱-۲: طرح‌واره‌ای از چگونگی ایجاد پدیده تجمع غلظتی در سطح یک غشا تبادل یونی (Sengupta, 2007)

## ۲-۲-۸ - فرآیند الکترودی‌یونیزاسیون

بطور کلی فرآیند الکترودی‌یونیزاسیون ترکیبی از دو فرآیند الکترودیالیز و رزین‌های تبادل یونی می‌باشد (Spiegel et al., 1999). برای درک عملکرد این فرآیند ابتدا توضیح مختصری راجع به هر یک از فرآیندهای تشکیل دهنده آن (الکترودیالیز و رزین‌های تبادل یونی) داده خواهد شد. در فرآیند الکترودیالیز، از مجموعه‌ای غشاهای کاتیونی و آنیونی که به صورت یک در میان بین دو الکتروود قرار می‌گیرند، استفاده می‌شود. فضای بین هر دو غشا را یک محفظه<sup>۲</sup> تشکیل می‌دهد. این محفظه‌ها به صورت یک در میان رقیق<sup>۳</sup> و غلیظ<sup>۱</sup> نامگذاری می‌شوند. محلول یونی با عبور از این

<sup>۱</sup> Concentration Polarization

<sup>۲</sup> Stack

<sup>۳</sup> Dilute Stack

محفظه‌ها، تحت تاثیر میدان الکتریکی بین دو الکترود، یون‌های خود را از دست داده و آنیون‌ها با گذر از غشای آنیونی به سمت الکترود با بار مخالف یعنی آند(+) و کاتیون‌ها با گذر از غشای کاتیونی به سمت الکترود با بار مخالف یعنی کاتد(-) مهاجرت می‌کنند. با گذر زمان به طور یک در میان محفظه‌ای از یون خالی (محفظه رقیق) و در دیگری یون‌ها متجمع خواهند شد (محفظه غلیظ) (Nikbakht et al., 2007; Elmidaoui et al., 2001)؛ و (بدلیانس قلی کندی؛ آرشی و وخشوری، ۱۳۹۱). در فرآیند ستون‌های تبادلگر یونی، رزین‌ها به تبادل یون با یون‌های موجود در درون محلول می‌پردازند. بدین وسیله محلول، یون‌های مزاحم خود را از دست می‌دهد. رزین‌ها پلیمرهای غیرمحلولی هستند که از ترکیبی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها تشکیل شده‌اند که یکی از آنها با ساختار پلیمری ماتریکسی رزین پیوند کووالانسی داده و به صورت بار ثابت قرار گرفته‌است و دیگری به صورت متحرک و در حال تبادل یون با محلول یونی است. پس یون‌هایی که دارای بار مخالف با گروه یونی ثابت هستند با رزین شروع به تبادل می‌کنند (Park et al., 2005). در این فرآیند رزین‌ها پس از مدتی با یون‌های ناخواسته اشباع شده و نیاز به احیا و شستشو پیدا می‌کنند (Helfferich, 1995). در واقعیت تکنولوژی الکترودیونیزاسیون، ترکیبی از دو تکنولوژی الکترودیالیز و رزین‌های تبادل یونی می‌باشد که از اثرات حاکم بر فرآیندهای الکترودیالیز و تبادل یونی به‌طور هم‌زمان استفاده می‌کند و معایب این دو فرآیند را کاهش می‌دهد (مانند پلاریزاسیون غلظتی<sup>۲</sup> و نیاز به احیای شیمیایی<sup>۳</sup>) (Mahmoud et al., 2012). به‌طور خلاصه سیستم الکترودیونیزاسیون، سیستم الکترودیالیزی است که فضای ما بین غشاهای آن با رزین‌های تبادلگر یونی پر شده باشد. این رزین‌ها که در واقع در محفظه رقیق قرار می‌گیرند از پدیده پلاریزاسیون غلظتی جلوگیری می‌کنند از طرفی وجود رزین‌ها در این محفظه رسانایی را افزایش داده بنابراین باعث کاهش میزان انرژی صرف شده می‌شود. در الکترودیونیزاسیون، محلول یونی با عبور از بین غشاهای تبادلگر یونی، شروع به تبادل یون با رزین می‌کند و یون‌های مزاحم با جذب بر روی رزین از محلول خارج شده و به نوعی بر روی رزین‌ها متوقف می‌شوند. از طرفی با وجود میدان الکتریکی، آب و محلول شستشوی الکترودی که در اینجا NaCl انتخاب شده است به یون‌های هیدروژن و هیدوکسیل و یون‌های سدیم و کلر تجزیه می‌شوند. این یون‌ها تحت تاثیر میدان با عبور از غشای مربوطه به سمت الکترود با بار مخالف مهاجرت می‌کنند. در این هنگام این یون‌ها جای خود را با یون‌های مزاحم متوقف شده

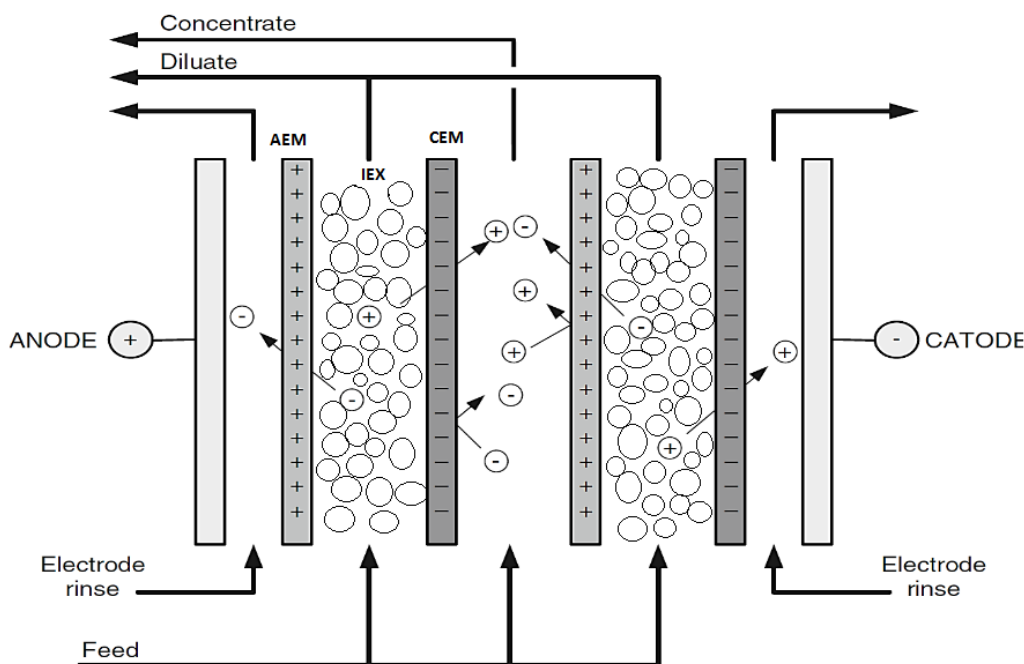
---

<sup>1</sup> Concentrate Stack

<sup>2</sup> Concentration Polarization

<sup>3</sup> Chemical Regeneration

بر رزین‌ها مبادله می‌کنند و یون‌های مزاحم با عبور از غشا مربوطه به سمت الکتروود با بار مخالف مهاجرت می‌کنند و بدین صورت رزین بدون نیاز به مواد شیمیایی خارجی، تنها با الکترولیز آب به صورت پیوسته احیا خواهد شد (DiMascio et al., 1999; L. Alvarado et al., 2009; Mir, 2001). در طرح واره‌ای از عملکرد سامانه الکترودی‌یونیزاسیون آورده شده است.



شکل ۱۲: طرح‌واره‌ی عملکرد سامانه الکترودی‌یونیزاسیون (Anode & Cathod): الکتروود آندی و کاتدی -AEM: غشای تبادل آنیونی -CEM: غشای تبادل کاتیونی -IEX: رزین‌های تبادل یونی -Feed Stream: محلول یونی ورودی در محفظه رقیق - Concentrate Stream: محلول غلیظ ایجاد شده در محفظه غلیظ -Waste: محلول غلیظ خروجی از سامانه -Dilute: محصول خروجی از سامانه)

## ۲-۳- نتیجه گیری فصل:

از مجموع بررسی‌های صورت گرفته در بخش بررسی‌های کتابخانه‌ای می‌توان گفت که تاکنون روش‌های زیادی جهت حذف نیترات با توجه به محل و نوع کاربرد وجود داشته‌است، که هر یک دارای محدودیت‌های بخصوصی نیز

می‌باشند. امروزه الکترودی‌یونیزاسیون به عنوان یک تکنولوژی جدید راه خود را در صنایع خاص و حساس باز کرده-  
است. این روش به علت فواید عظیم اقتصادی و زیست محیطی به سرعت در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد. عوامل  
متغیر زیادی بر عملکرد این سامانه تاثیرگذار می‌باشند. بنابراین جهت طراحی بهینه و افزایش کارایی این سامانه می-  
بایست بهره‌وری توسط عوامل متغیر کنترلی سنجیده و با سامانه‌های مشابهی که دارای هدف حذف نیترات هستند،  
مقایسه گردد. برای پایش کمی عملکرد، از شاخص درصد راندمان حذف استفاده می‌شود.

۳- فصل سوم:

بررسی‌های آزمایشگاهی

### ۳-۱- طراحی آزمایش‌ها

کارآمدی بیشینه سامانه ترکیبی الکترودیونیزاسیون (EDI) تابعی از بهره‌برداری بهینه‌ی از سامانه الکترودیالیز (ED) می‌باشد. همچنین باید توجه داشت که اصول بهره‌برداری و ساختار سامانه الکترودیونیزاسیون و الکترودیالیز از بسیاری جهات مشابه یکدیگرند. در نتیجه طراحی آزمایش‌ها با رویکرد ساخت و بهینه‌سازی سامانه الکترودیالیز انجام شد. پس از طی این مرحله سامانه ترکیبی الکترودیونیزاسیون با قرار دادن رزین‌های تبادل یونی بین غشاهای تبادل یونی اجرا و راهبری شد. و در نهایت شرایط بهینه بهره‌برداری سامانه ترکیبی مذکور از طریق آزمایش تحت شرایط مختلف بهره‌برداری تعیین شد. آزمایش‌های تعیین شرایط بهینه بهره‌برداری در هر دو سامانه یک بار به روش نرمال و بار دیگر به روش تاگوچی طراحی و به روش آنالیز سیگنال به نویز S/N تحلیل شدند. میزان اثرگذاری عوامل متغیر بر تابع هدف نیز به روش ANOVA تعیین شد. آزمایش‌های مربوطه با ساخت و راهبری سامانه الکترودیالیز و تعیین شرایط بهینه عملکردی، آغاز شد سپس آزمایش‌های مربوط به راهبری سامانه الکترودیونیزاسیون و تعیین شرایط بهینه عملکردی با هدف تعیین میزان اثرگذاری هر یک از عوامل متغیر بر درصد حذف نیترات تحت عنوان « بهره‌برداری از سامانه الکترودیونیزاسیون » صورت پذیرفت.

### ۳-۲- مواد و روش

آزمایش‌ها با استفاده از یک پایلوت آزمایشگاهی الکترودیونیزاسیون شامل مخازن خوراک حاوی آب نیترات دار انجام پذیرفت. با توجه به پیچیدگی اجزا این سامانه معرفی مواد و روش به کار برده‌شده در ۶ مرحله به ترتیب زیر صورت گرفت:

۱- فاصله‌دهنده‌ها و توری‌های به کار برده‌شده

۲- غشای به کار برده شده و ویژگی‌های آن

۳- الکتروود مناسب و نحوه قرارگیری آن در سامانه

۴- رزین به کار برده شده و مشخصات آن

۵- نحوه انتخاب دی مناسب با توجه به دامنه تغییرات سرعت خطی

۶- نحوه بستن و نحوه قرارگیری اجزا در کنار هم در پایلوت

در این تحقیق همان طور که در ابتدای فصل بیان شد، ابتدا یک بار تمامی آزمایشات به صورت نرمال طراحی شدند سپس به منظور دستیابی به میزان مشارکت هر یک از عوامل متغیر بر تابع هدف از روش طراحی آزمایش تاگوچی، آزمایش‌های لازم طراحی شد، سپس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق تابع هدف درصد راندمان حذف در نظر گرفته شد، در واقع میزان کارایی و راندمان سیستم با درصد حذف تعریف شده که برابر با تفاضل غلظت نیترات ورودی و خروجی بر غلظت نیترات ورودی می‌باشد.

### ۳-۲-۱- فاصله دهنده<sup>۱</sup>

در فرآیندهای بر پایه غشاهای تبادل یونی<sup>۲</sup>، همواره یک غشا تبادل یونی مثبت و یک غشا تبادل یونی منفی حضور دارند و محلول یونی در فضای بین این دو غشا جریان دارد. این فاصله بین دو غشا توسط عنصری به نام فاصله‌دهنده تأمین می‌شود. فاصله دهنده‌ها از اجزای توری و صفحات پلاستیکی در اطراف تور که وظیفه آب‌بندی مجاری را بر عهده دارند، تشکیل شده‌اند. ضخامت پلاستیک نرم، تعیین‌کننده ضخامت فاصله دهنده است و تور جهت ایجاد فاصله و نجسبیدن غشاها به یکدیگر استفاده می‌شود. بسیاری از خواص فرآیندهای الکترودیالیز به مشخصات فاصله دهنده بستگی دارد. جنس تور و ضخامت فاصله دهنده از جمله متغیرهایی هستند که تأثیر زیادی بر کارآمدی فرآیندهای الکترودیالیز دارند.

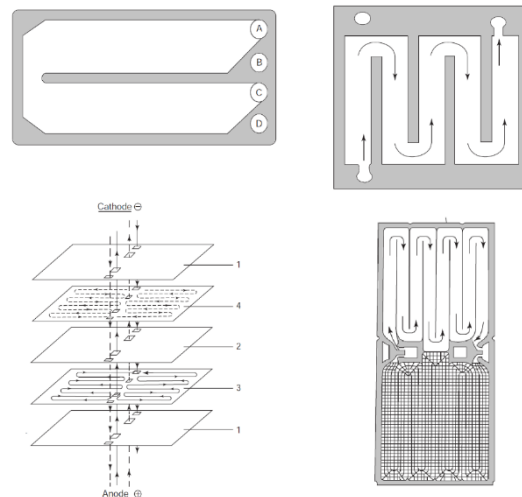
یکی از راه‌های افزایش طول جریان و جلوگیری از میانبر هیدرولیکی استفاده از جریان نهرگونه در فاصله‌دهنده‌ها است. استفاده از جریان نهرگونه در فرآیندهای الکتروغشائی یک ایده جدید و خلاقانه است که در این تحقیق نیز از آن

---

<sup>۱</sup> Spacer

<sup>۲</sup> Ion Exchange Membrane (IEM)

بهره‌گرفته‌شده‌است. شکل ۱۳ نشان دهنده نمونه هائی از فاصله دهنده‌هائی است که توسط محققین در زمینه فرآیندهای الکتروغشایی ساخته شده است.



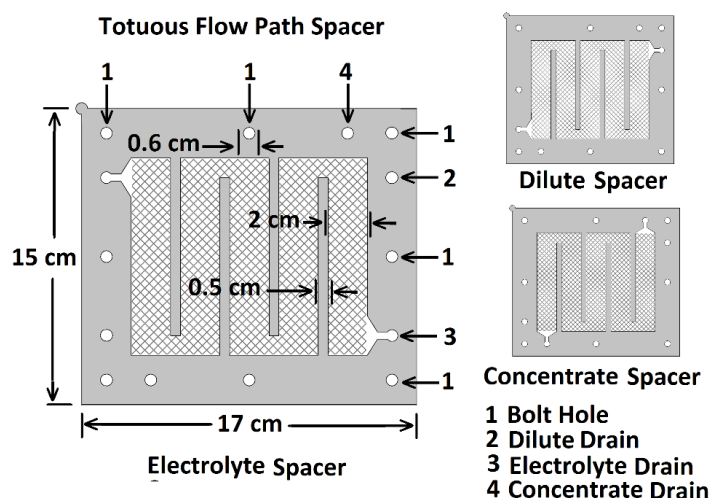
شکل ۱۳: فاصله‌دهنده‌های ساخته شده با جریان نهرگونه و (Strathmann, 2004) (Tanaka, 2007) و (آرشی؛ بدلیانس قلی-

کندی، ۱۳۹۲)

فاصله دهنده‌ها از صفحات پلاستیکی سلفونی موجود در بازار ساخته‌شدند. این صفحات پلاستیک سلفونی با ضخامت‌های مختلفی از ۰/۱۲ تا ۰/۲۵ میلی متر تحت عنوان پلاستیک‌های رو میزی یافت می‌شوند. از مزایای این پلاستیک‌ها، نرم بودن و قابلیت آن‌ها در آب‌بندی سامانه بود.

در این سامانه با توجه به تحقیقات مشابه انجام شده در این زمینه از فاصله‌دهنده‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده‌شد (Tanaka, 2007). برای ساخت فاصله دهنده‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر، ۸ لایه از سلفون ۰/۲۵ میلی‌متری، با استفاده از آب به یکدیگر چسبانده شدند. استفاده از آب بین لایه‌ها دو دلیل عمده داشت. اول اینکه مانع حضور حباب هوا و غبار بین لایه‌ها می‌شد. علت دوم اینکه پس از خارج کردن آب از بین لایه‌ها با استفاده از فشار عمودی، لایه‌ها به یکدیگر چسبیده و روی یکدیگر سر نمی‌خوردند. پس از برش این صفحات و پانچ سوراخ‌ها به عنوان مجاری آب، فاصله‌دهنده‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر در ابعاد ۱۵ در ۱۷ سانتی‌متر ساخته شدند.

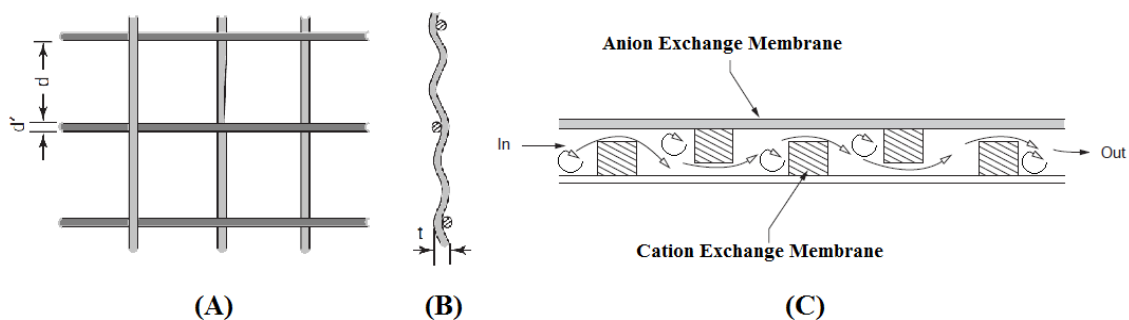
در این پایان‌نامه فاصله دهنده‌های با جریان نهرگونه ساخته شدند، یکی از مزایای این فاصله‌دهنده‌ها کاهش اثر پدیده‌ی رایج میانبر هیدرولیکی و الکتریکی (هیدروالکتریک) در سطح غشا می‌باشد. بنابراین فرم فاصله دهنده‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید که در پابلوت جریان نهرگونه برقرار گردد (شکل ۱۴). (بدلیانس قلی کندی ۱۳۸۸).



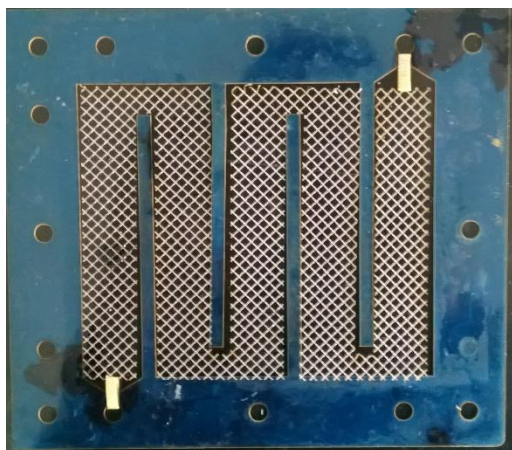
شکل ۱۴: طرح و مشخصات ارائه شده برای فاصله دهنده ها

تورهای مشبک یکی از اجزاء تشکیل دهنده فاصله دهنده ها هستند که به منظور ایجاد فاصله و جلوگیری از تغییر شکل غشاها استفاده می شوند. ضخامت تورها برابر ضخامت فاصله دهنده است. یکی دیگر از دلایل استفاده از تورها جلوگیری از نشت آب در محل ورودی ها و خروجی ها به سلول های مجاور است. بنابراین تور می بایست از تراکم کافی برخوردار باشد تا تکیه گاه مناسبی برای غشا جهت آب بندی در محل ورودی ها باشد به علاوه استفاده از تور به دلیل ایجاد یک حجم نامنظم مطابق شکل ۱۵ در مسیر جریان باعث غلبه بر پدیده پلاریزاسیون غلظتی می شود.

به دلیل وجود فرم نهر گونه در فاصله دهنده ها برای افزایش دقت در برش توری ها، تمامی آنها توسط دستگاه برش لیزری CNC برش داده شدند. در برش CNC توری ها برای جلوگیری از آتش گرفتن توری ها می بایست از وات پائین، اصطلاحی که بین صنعتگران این بخش مرسوم است استفاده شود.

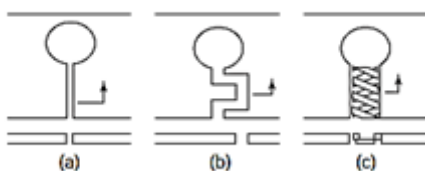


شکل ۱۵: (a) و (b) توری و عوامل متغیر آن و (c) جریان‌های آشفته در فاصله دهنده را نشان می‌دهد (Tanaka, 2007)



شکل ۱۶: فاصله‌دهنده و نحوه قرارگیری توری در میان آن

برای جلوگیری از نشت داخلی در محل ورودی‌ها تا به حال راهکارهای جالب توجهی استفاده شده که در شکل ۱۷ ارائه شده است که در آن (a) باریک کردن مسیر (b) پیچ دار کردن مسیر و (c) قرار دادن توری به عنوان راهکارهایی برای جلوگیری از نشت داخلی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از راهکار سوم یعنی قرارگیری توری با ابعاد ۲ در ۱۰ میلی‌متر جهت جلوگیری از نشت داخلی استفاده شد (شکل ۱۶).

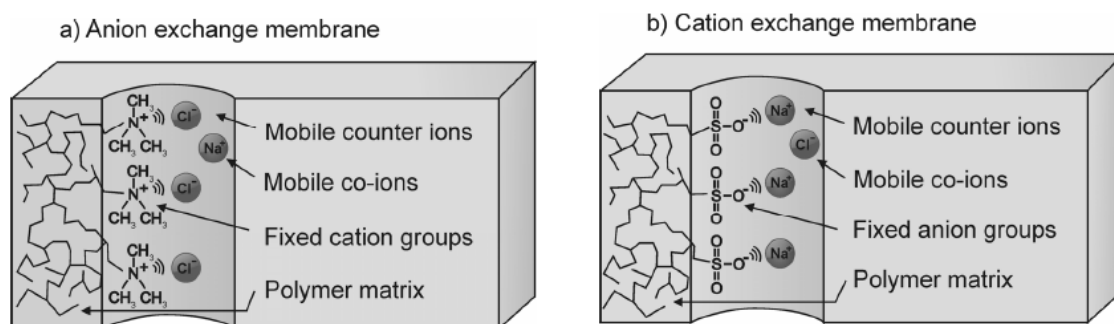


شکل ۱۷: در این تصویر (a) باریک کردن مسیر (b) پیچ دار کردن مسیر و (c) قرار دادن توری به عنوان راهکارهایی برای

جلوگیری از نشت داخلی پیشنهاد شده است. (Tanaka, 2007)

### ۳-۲-۲- غشاهای تبادل یونی

سامانه‌ی الکترودیونیزاسیون همانند سایر فرآیندهای الکتروغشائی<sup>۱</sup> مانند سامانه الکترودیالیز (ED) بر پایه تبادل یون<sup>۲</sup> استوار است چراکه از غشاهای تبادل یونی<sup>۳</sup> در این سامانه استفاده می‌گردد. غشاها اصلی ترین جزء سازنده‌ی این سامانه هستند که به صورت جفت های کاتیونی (IEM) و آنیونی (CEM) متناوب در محفظه قرار می‌گیرند. کارایی سامانه به نوع غشا و کیفیت آن بستگی دارد. از جمله خصوصیات غشاهای تبادل یونی که بر کارایی سامانه تاثیر می‌گذارند مقاومت الکتریکی و گزینش پذیری انتخابی غشا می‌باشند. هرچه مقاومت الکتریکی غشا پایین و گزینش پذیری انتخابی آن بالا باشد، کارایی سامانه بالاتر خواهد بود. این دو مشخصه به نوع و میزان گروه عاملی تبادلگر یونی یا بار تثبیت شده<sup>۴</sup> بر روی بستر پلیمری<sup>۵</sup> بستگی دارند (Długolecki et al. 2008). در شکل ۱۸ ساختار یک نمونه از غشاهای سازنده سامانه الکترودیالیز نشان داده شده است. در این تصویر گروه های عاملی دارای بار جزئی مثبت و جزئی منفی روی بستر پلیمری برای هر دو غشا کاتیونی و آنیونی نشان داده شده است، این گروه های عاملی موجب دفع یونهای هم نام و جذب یونهای نا هم نام از محلول الکترولیت می‌شوند.



شکل ۱۸: ساختار غشاهای تبادل یونی (a) غشا تبادل یون منفی (b) غشا تبادل یون مثبت (Długolecki 2009) و (آرشی؛

بدلیانس قلی‌کندی، ۱۳۹۲)

<sup>۱</sup> Electro Membrane Process

<sup>۲</sup> Ion Exchange

<sup>۳</sup> Ion Exchange Membrane (IEM)

<sup>۴</sup> Fixed ion groups

<sup>۵</sup> Polymer matrix

گزینش پذیری<sup>۱</sup> عددی بدون بعد است و برحسب درصد بیان می‌شود. این متغیر طبق فرمول، از تقسیم تعداد یون‌های مثبت و یا منفی رد شده از غشا کاتیونی و یا آنیونی بر کل یون‌های مثبت و منفی عبور کرده از آن اندازه گیری می‌شود. افزایش میزان گزینش پذیری موجب حرکت تعداد بیشتری از یون‌های مثبت و منفی در جهت مورد انتظار است که این به معنی افزایش نسبت کار مفید به کار تلف شده و افزایش میزان کارآمدی سیستم است. تراوایی<sup>۲</sup> به معنی تعداد ملکول‌های آب عبور کرده از غشا تبادل یونی است. در فرایند های الکترو غشایی انتظار می‌رود که تنها یونها از غشا عبور نمایند و فرض می‌شود که غشا در برابر آب نفوذ ناپذیر باشد اما از آنجایی که یونها در محیط آبی توانائی حرکت دارند بنابراین غشا می‌بایست مقداری آب را به عنوان مسیری برای حرکت یونها در منافذ خود نگاه داری کند و یا در اصطلاح غشا می‌بایست خیس شود. این آب در اثر اختلاف فشار اسمزی در طرفین غشا به سمت محلول شورتر کشیده می‌شود و این یعنی کم شدن از میزان آب نمک زدایی شده. بنابراین حالت مطلوب آنست که غشا در عین حال که میزان بیشتری آب را در خود نگاهداری می‌کند میزان کمتری از آنرا از خود عبور دهد. با این توصیف افزایش میزان تراوایی منجر به افزایش کار تلف شده و کاهش کارآمدی خواهد شد.

مقاومت الکتریکی<sup>۳</sup> غشا برابر است با مقدار اختلاف پتانسیل اعمال شده بر دو سمت غشا، تقسیم بر شدت جریان عبوری از آن. از آنجایی که عامل عبور جریان الکتریکی در محیط های آبی حرکت یونها است بنابراین شدت جریان عبوری را می‌توان برابر تعداد یون‌های عبوری از غشا در نظر گرفت. بنابراین افزایش مقاومت الکتریکی غشا منجر به کاهش تعداد یون‌های عبور کرده از غشا تبادل یونی می‌گردد. از آنجایی که هدف ما در فرآیندهای جداسازی به وسیله فرآیندهای الکتروغشایی با عبور بیشینه یون در کمینه اختلاف پتانسیل محقق می‌گردد، بنابراین افزایش مقاومت الکتریکی غشا منجر به افزایش توان هدر شده و کاهش کارآمدی خواهد شد. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته ضخامت غشاهای تبادل یونی در محدوده ۵۰ μm الی ۸۰۰ μm متغیر است هر چه ضخامت غشا کمتر باشد مسیر حرکت یون در داخل غشا کمتر است در نتیجه میزان مقاومت الکتریکی غشا کاهش پیدا خواهد کرد، در نتیجه افزایش ضخامت غشا تبادل یونی منجر به کاهش میزان کارآمدی خواهد شد.

در تحقیق حاضر هر سل غشایی شامل یک جفت غشاء تبادل یونی (غشای کاتیونی و غشای آنیونی) ساخت شرکت Fujifilm هلند به رنگ سفید می‌باشد (شکل ۱۹). گزینش‌پذیری غشای تبادل آنیونی و کاتیونی مورد استفاده ۹۵

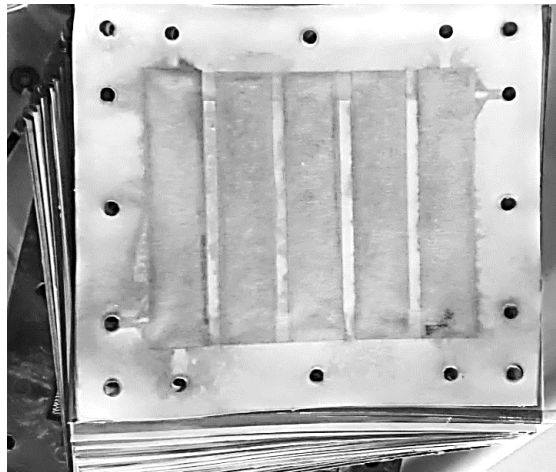
---

<sup>۱</sup> Permselectivity

<sup>۲</sup> Water permeability

<sup>۳</sup> Electrical Resistance

درصد، تراوایی ۳ درصد، مقاومت الکتریکی برای غشای آنیونی ۳.۵ و برای غشای کاتیونی ۶.۱ و ضخامت هر دو غشای تبادل یونی  $160\ \mu\text{m}$  می‌باشد که نشان‌دهنده کیفیت بالای غشای مورد استفاده می‌باشد. مشخصات غشای مورد استفاده در پیوست آورده شده است. با توجه به اینکه غشاها پس از خیس شدن با جذب آب بزرگتر می‌شوند و به دلیل ثابت بودن محل های درگیر با فاصله دهنده ها، در محل های آزاد در مجاورت توری ها دچار اعوجاج می‌شوند و موجبات تداخل جریانها و نشت جریانها را به سلولهای مجاور فراهم می‌کنند قبل از برش دادن و تعیین محل سوراخ های ورودی، طبق دستورالعمل شرکت سازند می‌بایست مراحل پیش آماده سازی را بگذرانند. برای پیش آماده سازی غشاهای شرکت Fuji Film (ارائه شده در پیوست) می‌بایست غشاها را در محلول ۰.۴٪ آب نمک و در دمای ۴۰ درجه آماده سازی می‌کردیم تا افزایش طولها قبل از تعیین محل سوراخها صورت گیرد تا پس از جایگذاری غشاها دچار اعوجاج نشود و محل سوراخ های تعبیه شده به عنوان مجاری آب نیز جابه‌جا نگردند. سطح موثر غشا برابر ۱۰۰ سانتی‌متر مربع در نظر گرفته شد (سطح موثر غشا به سطحی اطلاق می‌شود که در تماس با محلول یونی قرار دارد و عبور و انتقال یونها از این سطح انجام می‌پذیرد (Tanaka, 2011)).



شکل ۱۹: غشاهای شرکت Fuji film هر دو به رنگ سفید