

# جزوه اصول تصفیه آب

استاد: ادراکی

## الکترو دیالیز

کمتر از ربع قرن است که الکترو دیالیز به عنوان یک روش صنعتی برای تصفیه آب در جهان مطرح شده است. در الکترو دیالیز از غشاهایی<sup>۱</sup> استفاده می شود که طبعی همانند رزین های تعویض یونی دارند. رزین های تعویض یونی بصورت دانه ای هستند اما غشاها به صورت صفحه ای بوده و مقاومت مکانیکی خوبی هم دارند.

اگر گروه یونی غشا، دارای بار منفی باشد آن را غشا کاتیونی<sup>۲</sup> می گویند. غشاهای کاتیونی نسبت به کاتیون تراوا می باشند یعنی فقط کاتیون ها می توانند از غشا عبور کنند. اما اگر گروه یونی غشا، دارای بار مثبت باشد آن را غشا آنیونی<sup>۳</sup> می گویند. فقط آنیون ها می توانند از غشا آنیونی عبور کنند.

---

۱ - Membranes

۲ - Cation- Exchange Membrane

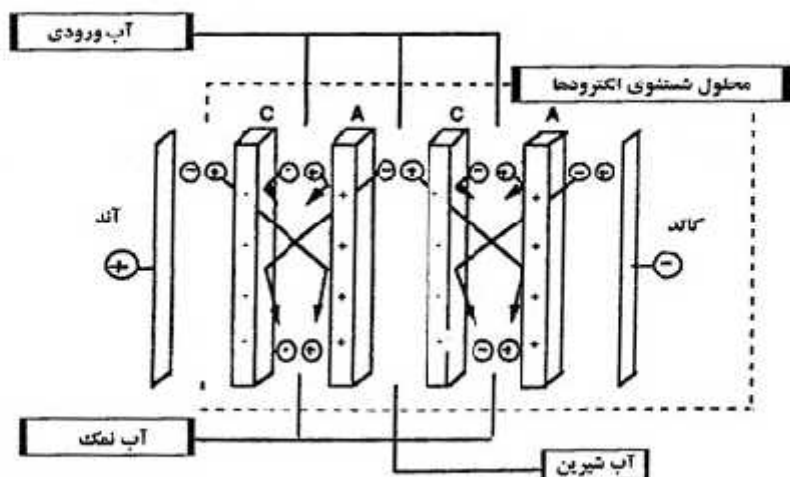
۳ - Anion-Exchange membrane

## ۱-۱۱ اصول کار الکترودیالیز

طرز کار واحدهای الکترودیالیز در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است. در این شکل  $C$  معرف غشا کاتیونی و  $A$  معرف غشا آنیونی است. مشاهده می‌شود که بین آنند و کاتد تعدادی غشاهای کاتیونی و آنیونی بترتیب قرار داده شده‌اند.

اگر آنند و کاتد به یک منبع برق مستقیم وصل شوند، اختلاف ولتاژ آنند و کاتد باعث می‌شود که کاتیون‌ها به طرف کاتد و آنیون‌ها به سمت آنند حرکت کنند. نضای شامل دو غشا غیرهمنام (آنیونی و کاتیونی) را یک سل می‌نامند.

اگر سل شامل غشاهای (۱) و (۲) را در نظر بگیریم، کاتیون باید به سمت راست حرکت کند. در طرف راست این سل، غشا آنیونی است که یون مثبت نمی‌تواند از آن عبور کند. بنابراین کاتیون‌ها در سل باقی می‌مانند. از طرفی آنیون‌های این سل باید به طرف آنند حرکت کنند و لسی در طرف چپ با غشا کاتیونی برخورد می‌کنند که به آنیون‌ها اجازه عبور نمی‌دهد بنابراین از یون‌های آب خام ورودی به این سل نه فقط هیچ یونی کم نمی‌شود بلکه آنیون‌های سل مجاور، یعنی سل شامل غشاهای (۲) و (۳) وارد سل مورد نظر می‌شود.



شکل ۱-۱۱ طرز کار واحدهای الکترودیالیز -  $C$  معرف غشا کاتیونی و  $A$  غشا آنیونی است

اگر سل شامل غشاهای (۲) و (۳) را در نظر گرفته، مشاهده می‌شود که آنیون‌های آب داخل این سل به طرف سمت چپ حرکت می‌کنند و چون غشا (۲) آنیونی است و بالطبع آنیون‌ها را از خود عبور می‌دهد پس آنیون‌ها وارد محلول سل مجاور می‌شوند و به همین صورت کاتیون‌های این سل به سمت راست حرکت کرده و با غشا کاتیونی برخورد می‌کنند که می‌توانند از آن غشا عبور کرده و وارد محلول سل مجاور شوند.

بنابراین دیده می‌شود که در الکترودیالیز، از یون‌های آب بعضی از سل‌ها کاسته شده و آب تصفیه می‌شود ولی در سل مجاور آن، به یون‌ها آب خام افزوده می‌شود و محلول غلیظ از یون‌ها حاصل می‌شود. نکات قابل توجه در الکترودیالیز عبارتند از:

۱- عامل تصفیه در الکترودیالیز جریان برق مستقیم است.

۲- هرچه فاصله سل کمتر باشد مقاومت الکتریکی کمتر می‌شود و در نتیجه در هزینه برق صرفه‌جویی می‌شود.

۳- هرچه فاصله سل‌ها کمتر باشد برای تصفیه مقدار معینی آب به تعداد سل‌های بیشتری نیاز است. در عمل نیز یک دستگاه الکترودیالیز ممکن است تا حدود ۵۰۰ جفت سل داشته باشد.

۴- هرچه تعداد یون‌های آب تصفیه شده کمتر باشد (آب خالص‌تر باشد) مقاومت الکتریکی بیشتر می‌شود و هزینه برق افزایش می‌یابد بنابراین تهیه آب کاملاً خالص و بدون یون ناخالصی با الکترودیالیز عملاً غیراقتصادی می‌باشد زیرا که مقاومت الکتریکی آب مقطر بسیار زیاد است.

۵- در الکترودیالیز فقط می‌توان یون‌های آب را کاهش داد. بنابراین ذرات معلق بدون بار و یا رنگ آب را نمی‌توان با الکترودیالیز بهبود بخشید.

۶- شدت جریان لازم در الکترودیالیز مستقیماً بستگی به تعداد یون‌هایی دارد که از غشاها عبور می‌کند و برابر است با

$$I = \frac{ZFQ\Delta C}{\xi}$$

که  $Q$  معرف دبی حجمی آب خام و  $\Delta C$  معرف اختلاف غلظت یون‌ها بین آب خام و آب تصفیه شده است.  $\xi$  بازده جریان برق مصرفی،  $Z$  ظرفیت یون و  $F$  ثابت فاراد است که برابر با ۹۶۵۰۰

کولمب به ازاء هر گرم اکسی‌والان است. بازده جریان برق مصرفی مستقیماً بستگی به تعداد جفت سل‌های الکترودیالیز دارد.

$$E = \frac{nIRZtFQ\Delta C}{\zeta} \quad \text{۷- انرژی الکتریکی مصرفی الکترودیالیز از رابطه مقابل بدست می‌آید:}$$

که در آن  $n$  تعداد جفت سل،  $I$  شدت جریان،  $R$  مقاومت هر جفت سل،  $Z$  ظرفیت یون منتقل شده،  $t$  زمان کار و بقیه علائم همان مفاهیم سابق را دارند.

۸- باید توجه داشت که مقاومت یک جفت سل بستگی به غلظت یون‌های آب خام و آب تصفیه شده دارد. هر چه تعداد یون‌های آب تصفیه شده کمتر باشد مقاومت، بیشتر می‌شود و مقدار مقاومت الکتریکی هر جفت سل برای آبهای معمولی حدود ۵-۵۰۰ اهم سانتیمتر مربع است.

## ۱۱-۲ حداکثر جریان و بازده شدت جریان در الکترودیالیز

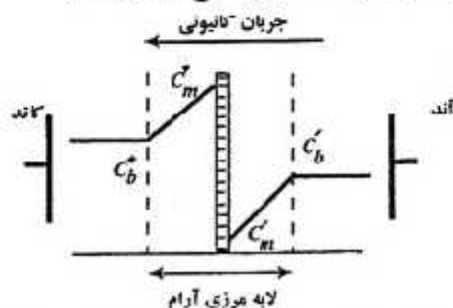
حداکثر جریانی که ممکن است از غشا الکترودیالیز بگذرد بدون آن که اثر منفی روی کار دستگاه داشته باشد (یعنی مقاومت الکتریکی را افزایش ندهد و یا اینکه بازده جریان کاهش نیابد) اهمیت زیادی دارد. در حامل مهمی که روی حداکثر جریان اثر دارند عبارتند از:

۱- غلظت یون‌ها در آب تصفیه شده

۲- پدیده پلاریزاسیون غلظتی

شکل ۱۱-۲ تغییرات غلظت را در اطراف غشا نشان می‌دهد.

$C'$  غلظت کاتیون در قسمت تصفیه شده و  $C''$  غلظت کاتیون در قسمت تغلیظ شده است. اندیس  $m$  و  $b$  برترتیب معرف غلظت در داخل محلول‌ها و غلظت روی سطح غشا می‌باشد.



شکل ۱۱-۲ توزیع غلظت یون‌ها در اطراف یک غشا کاتیونی الکترودیالیز

توجه کنید که در شکل ۱۱-۲، توزیع غلظت کاتیون ها در اطراف غشا کاتیونی رسم شده است اما توزیع غلظت آنیون ها در اطراف غشا آنیونی نیز به همین صورت است.

مشاهده می شود که غلظت کاتیون ها در بخش آب تصفیه شده در فیلم مایع کناره غشا بتدریج کاهش یافته ولی غلظت کانیون ها در بخش آب تغلیظ شده، هرچه به طرف داخل محلول پیش برویم، کاهش می یابد.

یون های داخل محلول عامل عبور جریان برق از غشا هستند. بنابراین اگر شدت جریان زیاد شود و به اندازه کافی کاتیون نباشد که از غشا عبور کند، در آن صورت جریان برق صرف تجزیه آب شده و  $H^+$  تولیدی از غشا عبور کرده و  $OH^-$  در قسمت آب تصفیه شده باقی می ماند که منجر به افزایش شدید  $pH$  شده و حتی می تواند باعث صدمه زدن به جنس غشا گردد.

واضح است که مصرف برق برای تجزیه آب مطلوب نبوده و در واقع باعث تولید محصول فرعی و در نتیجه کاهش بازده جریان برق می شود.

البته این مسئله قابل توجه است که تجزیه آب توسط جریان برق مقاومت زیادی را طلب می کند، یعنی در چنین شرایطی مقاومت الکتریکی محلول زیاد شده و اختلاف ولتاژ دو طرف سل به شدت افزایش می یابد.

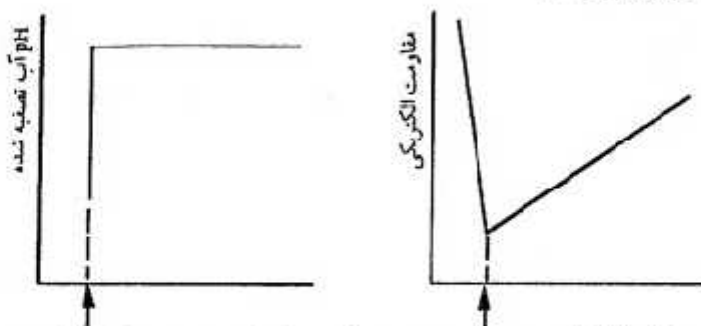
حداکثر جریان مجاز در الکترودیالیز موقعی است که غلظت کاتیون ها در سطح غشا به صفر برسد. بنابراین در الکترودیالیز وقتی شدت جریان دستگاه از حداکثر جریان مجاز بیشتر شود، بازده فرآیند به شدت کاهش می یابد، چون مقاومت الکتریکی بسیار زیاد می شود.

انتظار داریم که در حداکثر جریان مجاز تغییر ناگهانی هم در مقاومت الکتریکی و هم در  $pH$  آب تصفیه شده داشته باشیم همانگونه که در شکل ۱۱-۳ دیده می شود. حداکثر جریان، تعیین کننده حداقل سطح غشا الکترودیالیز است.

بازده جریان برقی، معرف کسری از کل جریان برق مصرفی است که واقعاً صرف حرکت یون های ناخالصی شده است. بازده جریان برق همیشه کمتر از ۱۰۰٪ می باشد زیرا:

الف: عبور ملکول های آب به همراه یون های ناخالصی از غشا

ب: انتخابگری غشاها صدمه‌رسان نیست<sup>۱</sup> (یعنی ممکن است مثلاً تعداد معدودی آنیون هم بتواند از غشا کاتیونی عبور کند)



شکل ۱۱-۳ تعیین حداکثر جریان در الکترودیالیز با رسم بر حسب عکس دانسته جریان:  
الف- تغییرات مقاومت الکتریکی محلول ب- تغییرات pH آب تصفیه شده

ج: جریان برق اتلافی از قسمتهای دیگر الکترودیالیز بجز غشا

حداقل سطح غشا از رابطه  $A = \frac{nZFQ\Delta C}{i\zeta}$  محاسبه می‌شود که در آن:

$A$  حداقل سطح مؤثر غشا،  $Q$  دبی آب تصفیه شده،  $\Delta C$  اختلاف غلظت یونهای آب ورودی و آب تصفیه شده،  $n$  تعداد جفت سل،  $i$  شدت جریان برق که می‌بایستی حدود ۸۰٪ حداکثر شدت جریان باشد و  $\zeta$  بازده جریان برق مصرفی است.

لازم به ذکر است که سطح غشا مورد نیاز اغلب خیلی بیشتر از حداقل سطح غشا می‌باشد.

### ۱۱-۲ مشکلات واحدهای الکترودیالیز

همانطور که قبلاً ذکر شد، غشا الکترودیالیز از جنس رزین‌های تعویض یونی می‌باشد. با توجه به آن

۱- اگر غلظت یونها در آب ورودی به الکترودیالیز خیلی کم باشد در آن صورت غلظت یونها در آب خیلی کمتر از غلظت گروههای باردار موجود در سطح غشا می‌باشد. بنابراین غشا الکترودیالیز، تراوانسبت به یونها با بار مخالف (ناهمنام) و تهریباً کاملاً تراوانسبت به یونها با بار یکسان (همنام) یا گروههای باردار روی سطح غشا می‌باشد. اما اگر غلظت یونها در آب ورودی به الکترودیالیز زیاد و قابل مقایسه با غلظت گروههای باردار موجود در سطح غشا باشد، آنگاه یونها با بار یکسان (همنام) هم می‌توانند از غشا عبور کنند، یعنی قدرت گزینش پذیری غشا کاهش می‌یابد.

که خواص مکانیکی و نیز انبساط و انقباض رزین‌ها با غلظت محیط، دما و حتی نوع یون دستخوش تفسیر می‌گردد و اینکه غشاهای الکترودیالیز عموماً به صورت صفحاتی با طول حدود ۲۰۰۰ میلیمتر می‌باشند، می‌توان حجم مشکلات ایجاد شده را تصور کرد. برای کاهش اینگونه مشکلات است که امروزه معمولاً همه غشاها را به صورت صفحات مشبک بافته شده می‌سازند تا استحکام کافی داشته باشند.

معمولاً اطلاعاتی که توسط سازنده غشا در اختیار خریدار قرار می‌گیرد، گمراه کننده است. بعنوان مثال مقاومت الکتریکی کمی که گزارش می‌کنند در شرایط محلول‌های غلیظ و با برق متناوب با فرکانس خیلی بالا اندازه‌گیری کرده‌اند در حالی که در الکترودیالیز باید از جریان برق مستقیم استفاده کرد.

غشاهای تازه مخصوصاً برای آب‌های نیمه‌شور دارای درجه گزینش‌پذیری<sup>۱</sup> بالایی هستند و کاهش درجه گزینش‌پذیری معمولاً علت ایجاد سوراخ‌های سوزنی<sup>۲</sup> در غشا می‌باشد که از این منافع، یون‌ها و همچنین ملکول‌های آب عبور می‌کنند.

همان‌گونه که ذکر شد حداکثر جریان بستگی به غلظت ناخالصی در آب تصفیه شده دارد و هرچه آب تصفیه شده خالص‌تر باشد حداکثر جریان، کمتر خواهد شد. چون مقاومت الکتریکی محلول بیشتر می‌شود و بالطبع هزینه برق مصرفی افزایش خواهد یافت.

با فرض اینکه  $TDS$  آب ورودی  $4000 ppm$  باشد و برای آنکه  $TDS$  آب خروجی مطلوب (تصفیه شده) به  $500 ppm$  کاهش یابد، انتخاب‌های مختلفی وجود دارد.

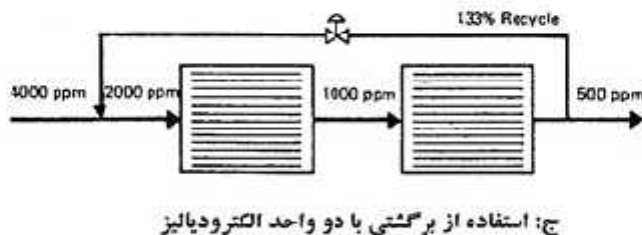
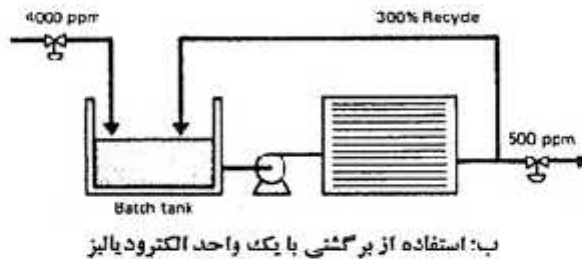
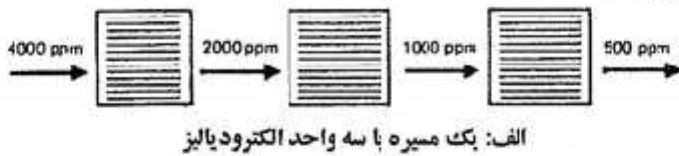
می‌توان سلی را انتخاب کرد که سطح غشا آن بقدری باشد که بتواند این کاهش  $T.D.S$  را ممکن سازد و یا می‌توان از سه دستگاه الکترودیالیز با سطح غشایی برابر ثلث غشا لازم، استفاده کرد و یا اینکه با برگشت دادن قسمتی از آب تصفیه شده، فقط از یک دستگاه الکترودیالیز استفاده کرد. در شکل ۱۱-۴ این سه انتخاب رسم شده است. انتخاب یکی از سه روش به عنوان روش برتر، بسیار مشکل می‌باشد.

روش الف: هرچند که ساده است ولی برای واحدهای کوچک اقتصادی نیست و بعلاوه مشکل افت



فشار وجود دارد.

روش ب: احتیاج به پمپ اضافی دارد و هرچند که کنترل آن آسانتر است اما مقدار جریان برق مصرفی در شروع زیاد است.



شکل ۱۱-۴ سه انتخاب برای تهیه آب شیرین از آب شور

روش ج: مناسب نیست چون با رقیق کردن غلظت ناخالصی‌ها در ورود به الکترودیالیز، عملاً مزیت کم بودن مقاومت الکتریکی (هدایت بالای محلول) حذف می‌شود زیرا کاهش یون‌ها باعث افزایش مقاومت می‌شود. اما همیشه توجه داشته باشید که هرچه غشا در شرایط راحت‌تری باشد کارایی بیشتر دارد. مثلاً اختلاف زیاد غلظت دو طرف غشا مطلوب نیست. مشکل دیگر، الکترودهای دسنگاه الکترودیالیز می‌باشد. در کاتد گاز هیدروژن و سود تولید می‌شود از اینرو لازم است با جریان جداگانه‌ای که اسیدی است، سود تولیدی را خنثی نمود تا تعادل به رسوب گذاری کاهش یابد.

درآند گاز کلر تولید می‌شود. از اینرو لازم است که در الکترود با هم مرتبط نباشند تا خطر انفجار پیش نیاید.

اختلاف ولتاژ دو سر هر سل حدود دو ولت می‌باشد بنابراین برای یک دستگاه الکترودیالیز با ۲۰۰ جفت سل به جریان برق مستقیم با ۴۰۰ ولت نیاز می‌باشد که چنین ولتاژی کاملاً خطرناک است. پس باید به گونه‌ای جدی مراتب بود که دستگاه و همچنین زمین با محلول‌های هادی، مرطوب نشود و محیط کاملاً از نظر الکتریکی عایق باشد.

جریانهای سرگردان در اطراف دستگاه الکترودیالیز می‌توانند باعث خوردگی شدید شوند و بنابراین لازم است که اتصال به زمین همواره مورد بازبینی قرار گیرد.

باید توجه داشت که هرچه محیط اطراف غشا یکنواخت‌تر باشد، عمر غشا بیشتر می‌باشد. یکنواختی چه از نظر غلظت یون‌ها و چه از نظر شدت جریان برق و همچنین از نظر فشار مکانیکی اعمال شده به نقاط مختلف غشاء، حائز اهمیت است.

#### ۱۱-۴ کاربردهای الکترودیالیز در تصفیه آب

مهمترین کاربرد الکترودیالیز، شیرین کردن آبهای نیمه شور است.

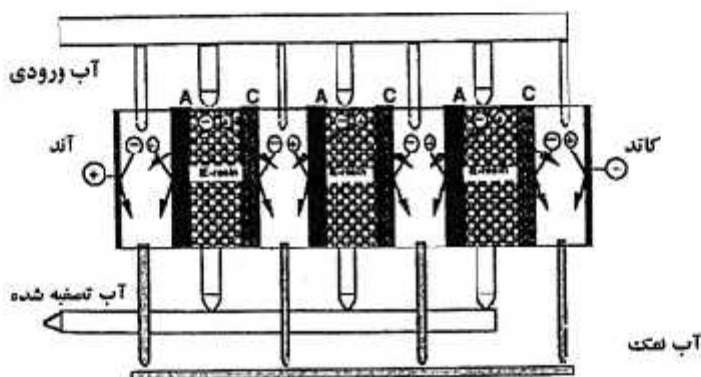
تا سال ۱۳۷۳ شمسی، بیش از ۲۰۰۰ واحد الکترودیالیز در جهان با ظرفیت بیش از یک میلیون متر مکعب در روز در حال کار بودند که مساحت غشا آنها در حدود ۱/۵ میلیون مترمربع است.

اما هم اکنون برای تهیه آب تغذیه بویلرها و نیز تصفیه فاضلاب‌های صنعتی هم از الکترودیالیز استفاده می‌شود. از الکترودیالیز برای تغلیظ آب شور دستگاه اسمز معکوس استفاده می‌کنند زیرا یکی از ویژگی‌های الکترودیالیز این است که می‌توان آب شور را تا ۲۰٪ وزنی تغلیظ کرد بدون آن که بالا بودن غلظت نمک روی هزینه فرآیند اثر محسوسی داشته باشد. از این ویژگی الکترودیالیز همچنین در تهیه نمک طعام استفاده می‌شود.

یک روش موفق برای جلوگیری از ایجاد رسوب و در نتیجه بوجود آمدن پلاریزاسیون غلظتی روی غشاها، تغییر قطب‌های آن‌د و کاتد بطور متناوب است. این تغییر متناوب قطب‌ها، موجب حل شدن

رسوب های موجود روی غشای می شود. برای آن که تناوب در تغییر قطب ها روی تمیزی غشا مؤثر باشد لازم است که دوره تناوب طولانی باشد.

اخیراً از الکترودیالیز برای تهیه آب فوق العاده خالص استفاده شده است. همانطور که می دانید خالص ترین آب را با استفاده از بستر رزین های مختلط تهیه می کنند اما در این روش مشکل احیای رزین پیش می آید. در شکل ۵-۱۱ که تلفیقی از رزین های تعویض یونی مختلط و الکترودیالیز می باشد، می توان آب فوق العاده خالص تهیه کرد. دیده می شود که یون های آزاد شده در واحد تعویض یونی مختلط به کمک جریان برق از محیط رانده می شود و عملاً با الکترودیالیز نیازی به استفاده از مواد شیمیایی برای احیای بستر رزین نیست.



شکل ۵-۱۱ اصول کار احیای رزین های تعویض یونی مختلط با الکترودیالیز برای تهیه آب فوق العاده خالص