Noor Vijeh Co.

# روشهای شیرین سازی آب

# Water Desalination Methods

**تالیف و گردآوری**

**مهندس رضا مختاری**

**(مدیر بهره برداری شرکت نور ویژه)**

**انتشارات ویژه**

**با همکاری شرکت نور ویژه**

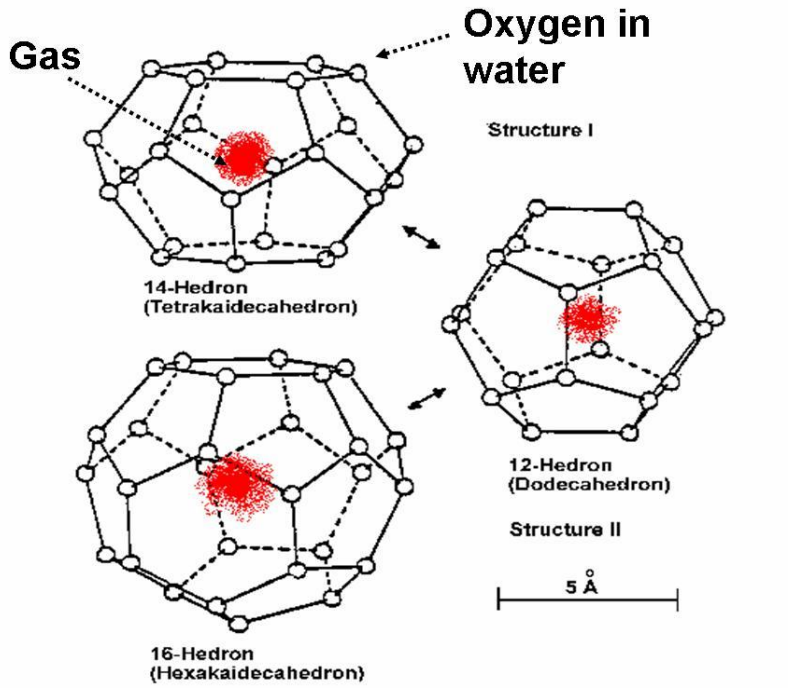
**تیرماه ۱۳۸۶**

Noor Vijeh Co.

# روش‌های دیگر شیرین‌سازی آب

## ۱- کـریستـالیزاسیـون بـا متـان هیـدرات (Methane Hydrate Crystallization)

روش گاز هیدرات، متمرکز کردن کریستال‌های دارای پیوند هیدروژنی مولکول آب در اطراف مولکول گاز مرکزی می باشد. این ترکیبات کریستالی عموماً در فشار بالا تشکیل می‌شوند که در این فشارها دمای انجماد حداقل۱۲ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود. کلاتریت‌ها (Clathrates) ترکیباتی هستند که شرایط ورود مولکول‌ها به شبکه کریستالی را مهیا می‌کنند. نسبت آب به مولکول گاز برای این ترکیبات حدود ۶ تا ۱۷ می‌باشد.

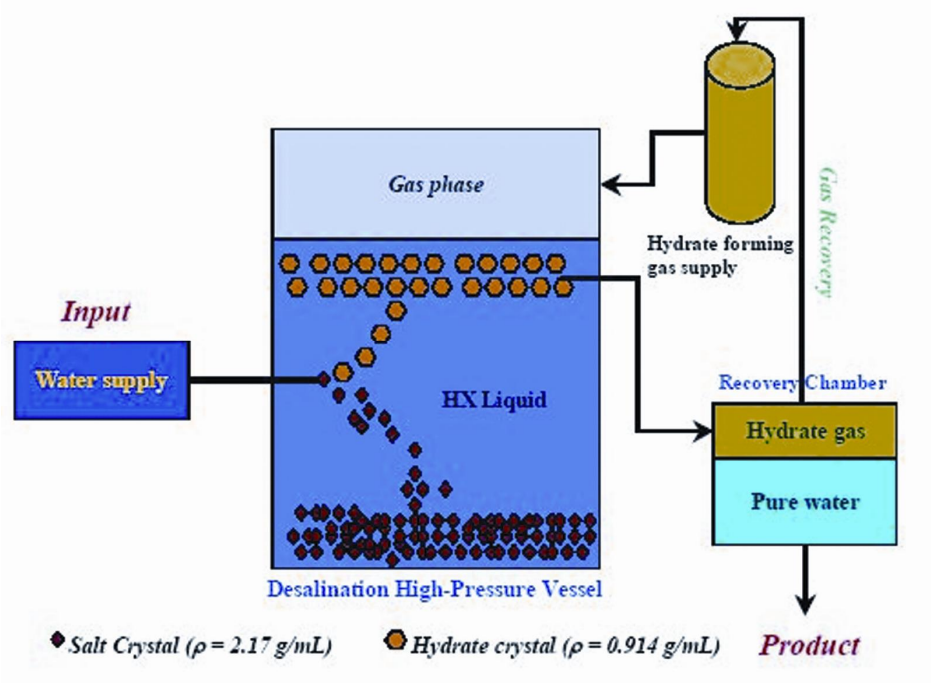



در روش هیدرات، گاز هیدرات و آب مخلوط می‌شوند و سریعاً کریستال‌های هیدروژنی آب تشکیل‌شده و به‌صورت فیزیکی (معمولا به دلیل اختلاف چگالی کریستال های آب و کریستال های نمک) از پساب جدا می شوند. پس از شستشو و ذوب کریستال آب، گاز کلاتریت از آب خالص جدا شده و کلاتریت برای استفاده مجدد مهیا می‌شود.

یکی از مزیت‌های این روش نسبت به روش انجماد، کارکرد آن در دمای بالا می‌باشد، در نتیجه انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. در سال‌های ۱۹۶۰ یک واحد نمونه از شیرین سازی آب به این روش با استفاده از ۲ نوع کلاتریت (بوتان و

($CHCLF_2$) طراحی و نصب گردید. این طرح در نهایت به‌علت بسیار ریزبودن کریستال‌های‌هیدرات و یا بلورهای شاخه نباتی آن، برای جدا کردن آن از آب شور با مشکل مواجه شد.

شکل زیر طرح شماتیکی از روش هیدرات را نشان می‌دهد.




طبق محاسبات به عمل آمده، قیمت تمام شده برای هر متر مکعب آب در این روش در صورت عملی شدن ۰/۴۶ تا ۰/۵۲ دلار خواهد بود. مشکلات موجود این روش شامل جدا سازی کریستال از پساب و پیدا کردن موادی است که بتواند با وارد شدن در کریستال، قابلیت فیلتر شدن کریستال کلاتریت‌ها را افزایش دهند.

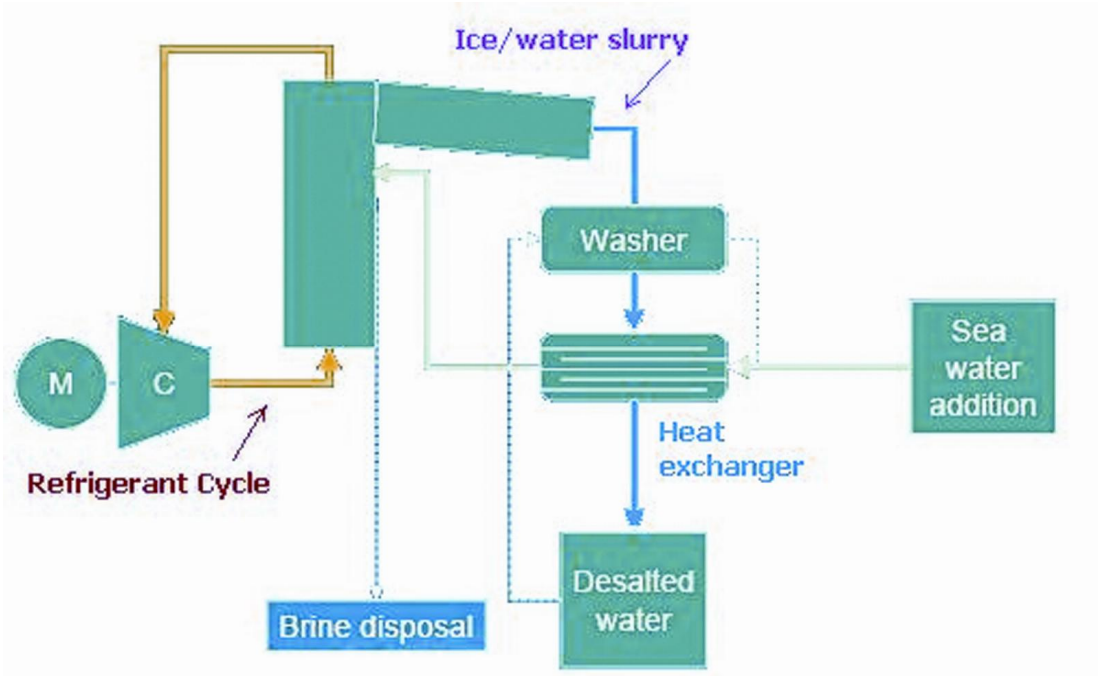
## ۲- روش فریزینگ (freezing)

به دست آوردن آب خالص از یخ از هزاران سال قبل توسط بومیان آسیای مرکزی و سیبری جهت بدست آوردن آب شرب برای حیوانات و بعضاً مصرف شخصی مرسوم بوده است.

آب شور دمای بحرانی ثابتی دارد و زمانی‌که دمای آب شور تا این نقطه بحرانی کاهش داده شود، ترکیبات کریستال آب در آن شکل می‌گیرد. پس از آن می توان به‌صورت مکانیکی کریستال‌های یخ را از محلول جدا کرد و پس از ذوب مجدد، آب خالص تهیه کرد.

در این روش طی عمل یخ زدن و تشکیل کریستال آب، نمک‌های محلول از آن جداشده و به بیرون رانده می‌شوند زیرا پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب به مراتب از پیوند واندروالس بین مولکول آب و مولکول‌های سدیم کلراید قوی‌تر است. آب دریا را می‌توان با استفاده از این روش یعنی سرد کردن تا تشکیل کریستال آب، شیرین کرد.

برای کاهش ناگهانی دمای آب، نیاز به یک ماده مبرد است. اگرچه خود آب می تواند به عنوان ماده مبرد مورد استفاده قرار گیرد ولی عموماً از یک ماده ثانویه به عنوان مبرد استفاده می‌کنند. شکل زیر یک طرح شماتیکی از روش منجمدسازی غیر مستقیم می‌باشد.



در این مدل، همان‌طوری‌که می بینید، از یک کمپرسور برای چرخاندن مبرد، محفظه برای منجمد کردن و یک مبدل حرارتی برای ذوب کردن یخ استفاده شده است.

آب دریا از مبدل حرارتی عبور کرده و تبادل حرارت که باعث ذوب یخ و کاهش دمای خود می‌گردد انجام می دهد. سپس توسط مبرد، دمای آن کاهش یافته و تقریباً یخ خالص تولید می شود (یخ به شکل کریستال کوچک، از برفک های روی آب ورودی تشکیل می‌شود) و مقدار املاح باقی مانده به عنوان پساب دفع می‌شود. ضمن این‌که ماده مبرد جهت احیای مجدد به کمپرسور بر می‌گردد.

خط زرد رنگی که در شکل فوق می بینید، مبرد به کار رفته می باشد که به آب تغذیه اضافه می شود و به منجمدسازی آب کمک می‌کند. از طرف دیگر مخلوط یخ و آب وارد مخزن شستشو شده و توسط آب شیرین شسته می شود و املاح باقی‌مانده از این طریق از یخ جدا می‌گردد و در مرحله نهایی، یخ در مبدل حرارتی به آب شیرین تبدیل می‌شود.

راه‌های مختلفی برای جدا کردن یخ از آب تغذیه وجود دارد، یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، حرکت دادن جریان به سمت بالا از یک ستون می‌باشد که آب باقی‌مانده توسط صفحه تخلیه به خارج تخلیه می‌شود. مقدار مشخصی از آب خالص برای شستشوی ستون به منظور پاک‌کردن پساب باقی‌مانده استفاده می‌شود. در بعضی جاها که دمای محیط و دمای آب ورودی پایین است، برای ذوب کردن یخ ناگزیر از انرژی حرارتی استفاده می‌کنند.

در روش منجمدسازی مستقیم، خود آب بدون هیچ نوع مبردی منجمد می‌شود، اما این عملیات باید در فشار پایین (زیر فشار اتمسفر) انجام گیرد. از مزایای این روش کارکرد در محدوده پایین دما می‌باشد، لذا کار کمتری بر واحد تولید آب شیرین نیاز دارد. البته از بوتان می‌توان به‌عنوان مبرد در روش مستقیم استفاده کرد. یکی از مزایای استفاده از بوتان، عدم نیاز به خلاء کامل در منجمدسازی است. با وجودی‌که روش مستقیم منجمدسازی‌راندمان‌بالایی دارد، اما در پروژه‌هایی در سطح بزرگ از روش غیر مستقیم استفاده می‌کنند. بعضی از ملاحظات کاربردی شامل طراحی، سایز قطعات، مشکلات بهره‌برداری و مشکلات پیشنهاد کمپروسور، باعث این انتخاب می‌شود.

تأسیسات جانبی شامل سیستم شستشو و جداسازی می‌باشد. در این دستگاه جرم مخصوص محاسبه شده و جریان محلول در یک ستون افقی (صفحه‌ای) و کریستال یخ در یک ستون شناور در آن جریان دارد. وقتی‌که میزان نمک به ستون کریستال برسد، به طور خودکار توسط آب خام شستشو داده می‌شود و نمک‌ها به بیرون تخلیه می‌شوند.

نیاز به انرژی کم، پتانسیل پایین خوردگی، ناچیز بودن ته نشینی و رسوب، و همچنین عدم استفاده از مواد شیمیایی، از مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌ها است. یکی دیگر از مزایای این روش کارکرد در دمای پایین (حتی زیر صفر است) که خوردگی و رسوب (ته نشینی) در این دما بسیار پایین است. کار کردن در دمای پایین این اجازه را به ما می‌دهد تا با استفاده از پوشش پلاستیکی و پوشش‌های محافظتی، لوله‌ها را در مقابل خوردگی محافظت کنیم.

از معایب این روش اقتصادی نبودن تولید آب و مشکل مکانیکی جابجایی و عملیات مخلوط یخ و آب می‌باشد. اولین و بزرگترین مشکل، هزینه بالای سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است که مقرون به‌صرفه نمی باشد .مشکل دوم راندمان ترمودینامیکی آن در طرح‌های با ظرفیت بالاست. یکی دیگر از اشکالات این روش، رسوب و ته‌نشینی در زمان ذوب ناگهانی یخ است که به‌صورت کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سولفات، سدیم و یون‌های کلـرین در آب مشـاهده می‌شود. رسوبـات سختی در داخـل لوله‌ها شکل می‌گیرد که هزینه بالایی برای نگهداری و تعمیرات نیاز دارد.

حدود ۴۰ سال پیش مجموعه کوچکی برای شیرین سازی آب با استفاده از این مدل ساخته شد اما از نظر اقتصادی برای تولید آب شیرین شهری مقرون به‌صرفه نبود. سپس مهمترین پروژه از این نوع با استفاده از نیروی خورشیدی در سال ۱۹۸۰ در عربستان راه‌اندازی شد اما این پروژه نیز پس از مدتی متوقف شد. در حال حاضر از این روش فقط برای تصفیه فاضلاب صنعتی استفاده می‌شود.

مطالعات اخیر در جهت تولید آب از آب‌های لب شور (TDS = 5000) در داکوتای شمالی با استفاده از روش تبرید طبیعی به نتیجه نزدیک شده است و در صورت عملی شدن این طرح، بیش از یک میلیون گالن در روز تولید آب شیرین خواهد داشت، و هزینه هر متر مکعب آب در این روش به کمتر از ۰/۳۴ دلار آمریکـا خـواهد رسیـد کـه بسیـار مقرون به صرفه‌تر از سایر روش هاست.

Noor Vijeh Co.

### ۳- روش رطوبت خورشیدی(Solar Humidification)

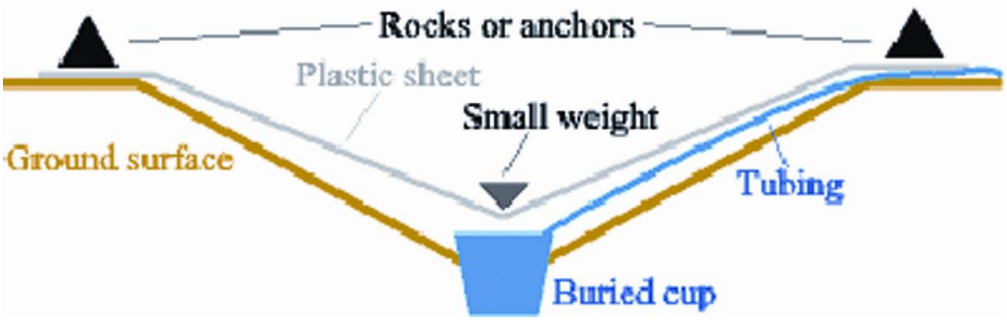
دستگاه تقطیر خورشیدی اولین بار در سال ۱۵۵۱ توسط یک شیمیدان عرب ساخته شد (متأسفانه در منبع ذکر شده به نام این دانشمند اشاره نشده اما به یقین می‌توان گفت که ایرانی بوده چون در اکثر منابع خارجی بسیاری از دانشمندان ایرانی را به عنوان دانشمند عرب نام می‌برند).

اولین پروژه عمومی استفاده از تقطیر خورشیدی در سال ۱۸۷۲ توسط یک مهندس سوئدی به‌نام چارلز ویلسون در یک معدن نیترات در شیلی کنونی اجرا شد. این تأسیسات، آب شیرین مورد نیاز معدن را تأمین می‌کرد. مساحت این تأسیسات ۴۷۰۰ متر مربع بود و در روز بیش از ۲۳۰۰ لیتر آب شیرین تولید می‌کرد. از این تأسیسات تا چهل‌سال بعد نیز بهره‌برداری می شد.

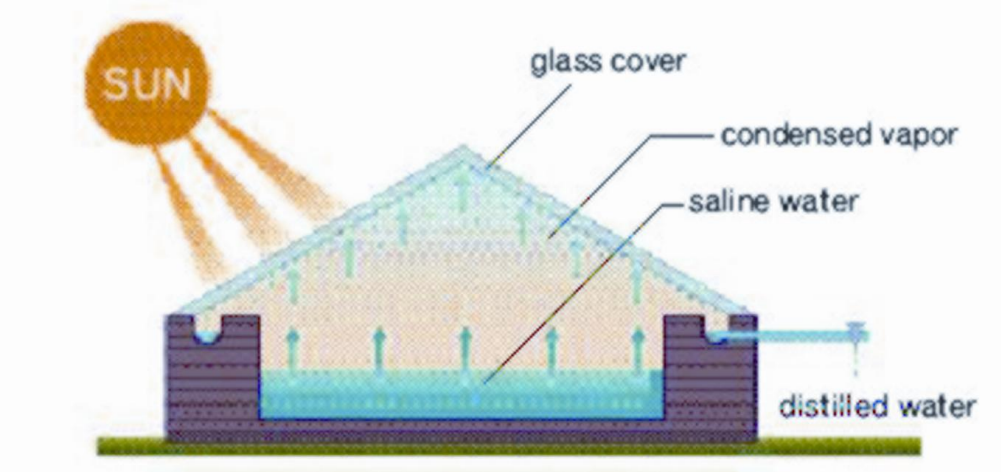
در زمان جنگ جهانی دوم تلاش گسترده‌ای برای استفاده از دستگاه‌های تقطیر خورشیدی برای تولید آب بر روی شناورهای دریایی انجام شد و پس از جنگ نیز روش‌ها و دستگاه‌های متعددی آزمایش شدند. این دستگاه‌ها عموماً تقلیدی از چرخه طبیعی تبخیر آب از دریاها توسط حرارت خورشید و برگشت دوباره آن به زمین است.

شاید بارها برای شما اتفاق افتاده‌باشد که وقتی اتومبیل خود را در معرض نور خورشید (مخصوصاً در فصل تابستان) پارک می‌کنید، داخل اتومبیل از فضای بیرون گرم‌تر می‌شود. این پدیده به‌خاطر مقاومت شیشه اتومبیل در برابر بازتاب اشعه مادون قرمز نور خورشید است که داخل اتاق ماشین حبس می شود. جالب است بدانید مشکل افزایش دمای زمین نیز به خاطر انباشته شدن گازهای گلخانه‌ای در جو و ممانعت این گازها از بازتاب اشعه مادون قرمز نور خورشید می باشد. در سیستم تقطیر خورشیدی نیز براساس این اصل، فضای داخل از فضای بیرون گرم‌تر می باشد.

در شکل زیر یک سیستم تقطیر کوچک خورشیدی که کشاورزان در بعضی نقاط برای تأمین آب آشامیدنی خود در بیابان استفاده می‌کنند نشان داده شده است.



برای ساختن این سیستم شیرین سازی آب، گودال کوچکی به شکل مخروط در زمین ایجاد کرده و سپس داخل آن آب شور می‌ریزند. با یک سطح نایلونی روی گودال را پوشانده و وزنه کوچکی را جهت ایجاد شیب لازم مطابق شکل روی نایلون قرار می‌دهند. گرمای خورشید باعث تبخیر آب شور شده و بخارات آب پس از برخورد با صفحه نایلونی تقطیر شده و به خاطر شکل هندسی آن به داخل لیوان هدایت می‌شود. این سیستم نمونه کوچکی از شیرین‌سازی آب به این روش است. شکل زیر طرح شماتیکی از یک تأسیسات شیرین سازی خورشیدی آب در مقیاس بزرگتر را نشان می‌دهد.




همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، حرارت خورشید باعث تبخیر آب داخل اتاقک شده و بخار آب به سمت بالا حرکت می‌کند. بخار پس از برخورد با سقف شیشه‌ای تقطیر شده و در نهایت توسط مجراهایی به بیرون هدایت می شود. یک متر مکعب فضای تقطیر خورشیدی حدود ۴ لیتر آب شیرین در ۲۴ ساعت تولید می‌کند. به عبارتی برای تولید ۴۰۰۰ متر مکعب در روز به حدود ۱۰۰ هکتار فضا نیازمندیم.

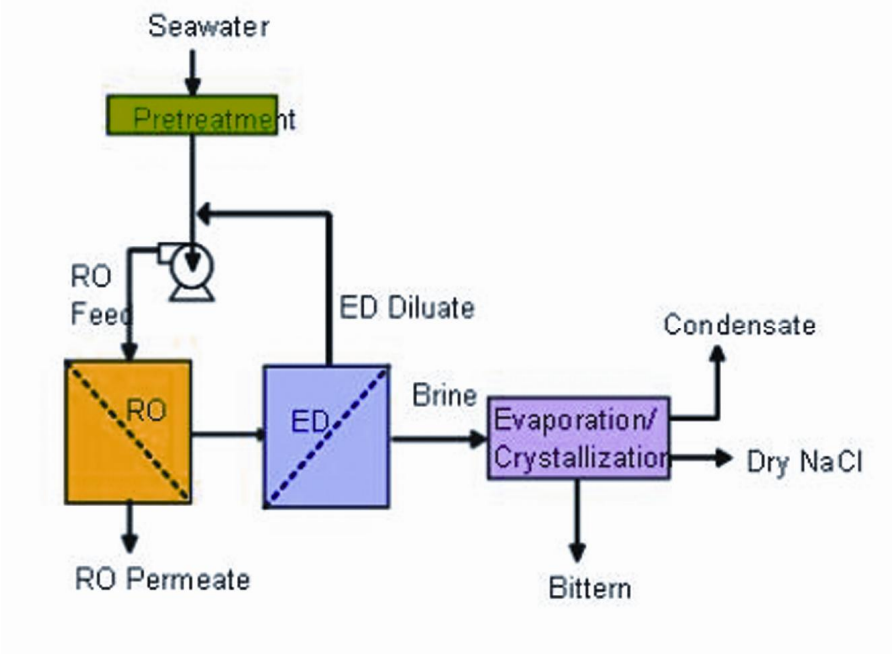
همین مثال معایب عمده این روش را نشان می‌دهد. تنها مزیت این سیستم رایگان‌بودن انرژی تبخیر آب است. از معایب‌دیگر این سیستم بالابودن هزینه نگهداری و جلوگیری از رسوب‌گرفتن صفحات‌خشک و حوضچه‌های بخار و نیاز به انرژی پمپ جهت انتقال آب می‌باشد. با توجه به مطالب فوق، استفاده از این سیستم تنها در روستاها و مزارع کوچک که به انرژی الکتریکی دسترسی ندارند اقتصادی می‌باشد.

### ۴- هیبرید RO و ED (دو گانه)

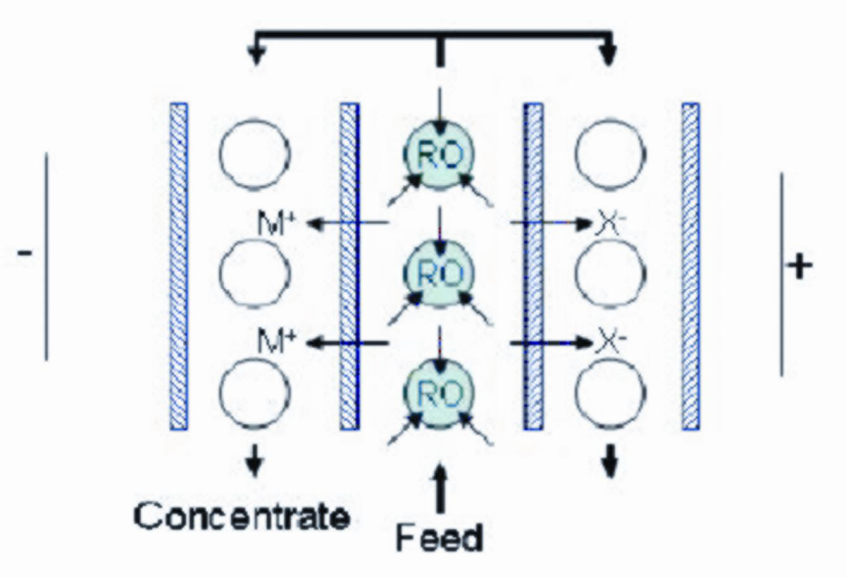
ریکاوری (نسبت تولید به پساب) در سیستم RO (اسمز معکوس) با افزایش فشار اسمزی در جریان آب تغلیظ شده، با میزان حلالیت نمک‌های معین، با رسوب و ته‌نشینی زیاد املاح و همچنین جریان فوق اشباع روی غشاء محدود می شود. این محدودیت‌ها روی طراحی سیستم و همچنین پارامترهای بهره‌برداری تأثیر می‌گذارد، اما با استفاده از کاهش غلظت آب ورودی به RO (آب خام) می‌توان ریکاوری را افزایش داد. در سیستم هیبریدی RO و ED این دو سیستم هم به صورت موازی و هم سری می‌توانند فعالیت کنند.

در حالت سری، آب ورودی پس از پیش تصفیه وارد پمپ فشار قوی شده و سپس وارد غشاء نیمه تراوا می‌شود. پساب سیستم RO به عنوان ورودی دستگاه (ED) الکترودیالیز استفاده می شود و در نهایت پساب خروجی از الکترودیالیز به مقدار بسیار کم به مخزن تصفیه پساب هدایت می‌شود.

شکل زیر طرح شماتیکی از مدل سری را نشان می‌دهد.




در طرح فوق به‌خاطر مسائل زیست محیطی پساب خروجی که مقدار زیادی نیست تصفیه‌شده و کلریدسدیم خشک و غیره از آن به‌دست می‌آید. درصد بازیافت (ریکاوری) در این سیستم به‌بالای ۹۰ درصد می‌رسد. شکل زیر طرح شماتیکی از مدل موازی را نشان می‌دهد.




مطابق شکل فوق غشاء RO به‌صورت موازی بین دو غشاء یونی دستگاه الکترودیالیز واقع شده است.

در این سیستم دستگاه ED به‌صورت مداوم یون‌ها را از آب ورودی غشاء نیمه تراوا (فیلتر RO) جدا می‌کند و اثر الکترو فورتیک (اثر تأخیر کننده روی حرکت خاص یک یون در محلول که در معرض یک افت پتانسیل قرار می‌گیرد) باعث کاهش غلظت روی سطح فیلترهایRO می‌شود. کاهش فشار اسمزی آب خام و اثرات تغلیظ قطبی، باعث افزایش جریان در سیستم RO شده و در نتیجه میزان انرژی حدود ۱۵ درصد درسیستم هیبریدی در مقایسه با سیستم RO کاهش می‌یابد.

در حالی‌که استفاده از سیستم ED برای آب با درجه غلظت نسبتاً کم اقتصادی بوده اما در غلظت‌های بالا اقتصادی نیست. اما با استفاده از سیکل ترکیبی RO و ED در غلظت‌های بالا نیز مقرون به صرفه می‌باشد.

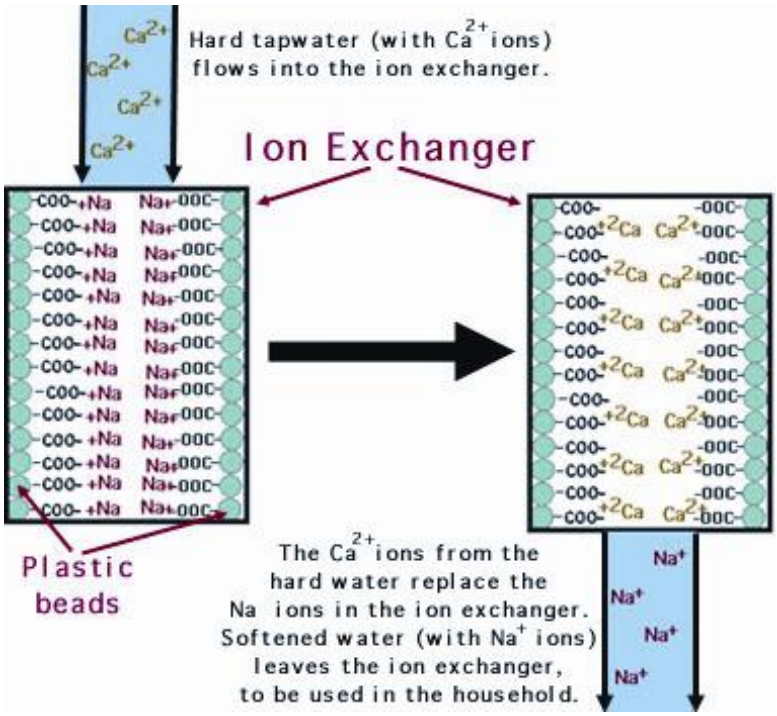
Noor Vijeh Co.

## ۵- تعویض یونی (ION EXCHANGE)

در روش تعویض یونی، جامدات ارگانیکی یا غیر ارگانیکی که قابلیت تعویض یونی دارند از یک نوع مثلاً کاتیون (یا آنیون) در ماده با کاتیون (یا آنیون) از نوع دیگر در محلول تعویض می‌شود. به‌طور مثال یون $Na^+$ در محلول می‌تواند با یون $H^+$ توسط تعویض کننده کاتیونی جابجا شود و $Cl^-$ می‌تواند متعاقباً با $OH^-$ بوسیله تعویض‌کننده آنیونی تعویض شود و در نهایت NaCl از محلول جدا می‌شود. تعویض‌کننده‌های کاتیونی به‌وسیله اسید و تعویض‌کننده‌های آنیونی به وسیله باز احیا می‌شوند.

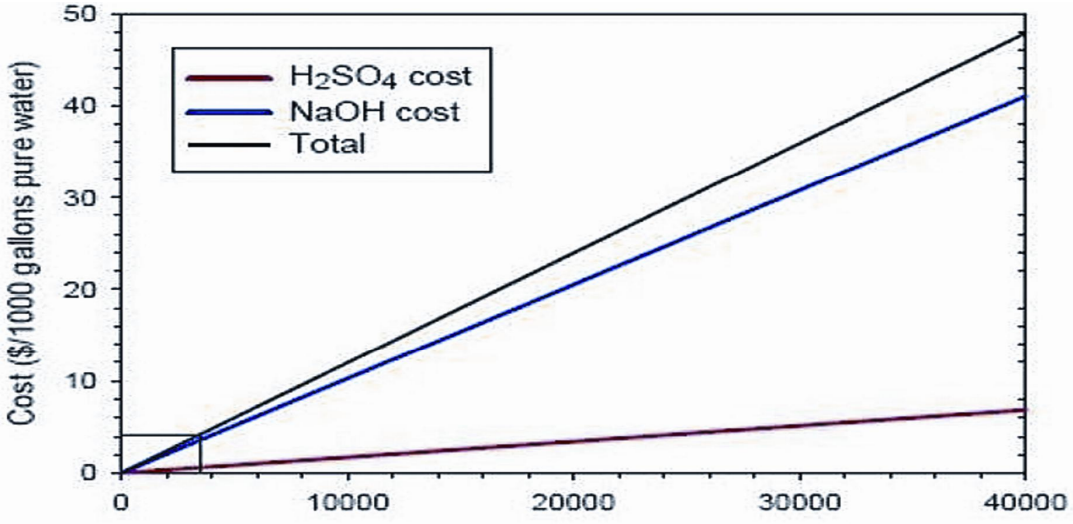
با مدیریت و طراحی صحیح، تعویض یونی می تواند تا درصد بالایی موادمعدنی را از آب جدا می شود. به خاطر بالابودن هزینه این روش، در شیرین‌سازی آب برای مصارف عمومی از این روش معمولا استفاده نمی‌شود.

شکل زیر نیز طرح شماتیکی از تعویض یونی را نشان می‌دهد.




شکل زیر یک دستگاه تعویض‌کننده یونی را نشان می‌دهد.

فرض‌کنید از $H_2SO_4$ و NaOH به‌عنوان عامل تعویض‌یونی استفاده شود. در نمودار زیر رابطه بین مخارج و سختی آب را مشاهده می کنید.

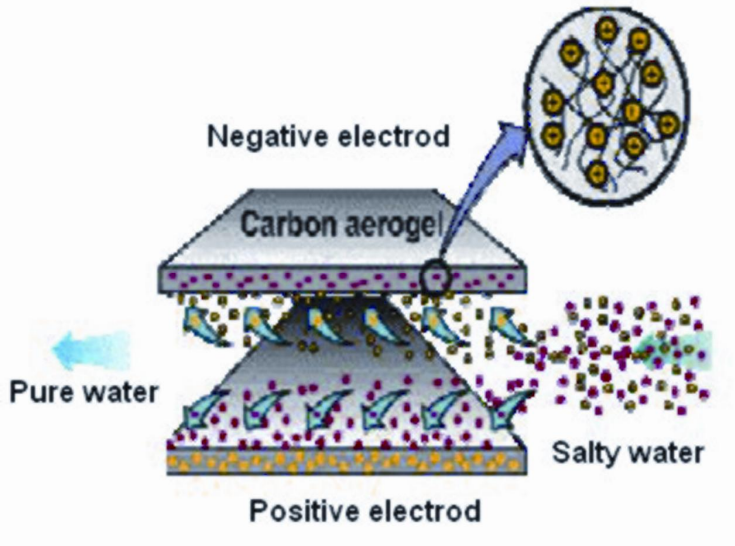


در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه توسعه این روش و کاهش هزینه‌های آن انجام شده است. یکی از این پروژه‌ها تولید آب شرب از آب لب شور با غلظت بالا در حدود ppm ۲۰۰۰ است. در این پروژه که بر پایه تعویض یونی اسید می باشد، اسید به‌وسیله آب داغ (°۹۰) احیا می شود زیرا جدا کردن آب به +H و -OH در °۹۰ ، ۳۰ بار آسان‌تر از جدا کردن در دمای محیط است. در این پروژه آب با غلظت ppm ۲۰۰۰ به حدود ppm ۵۰۰ (که برای آشامیدن مناسب است) تبدیل می‌شود . در طرح‌های شیرین‌سازی آب دریا به دلیل بالابودن غلظت محلول‌های آب بالای ppm ۳۵۰۰۰ از چند تعویض کنندهٔ یونی به‌صورت متوالی (سری) استفاده می‌شود .

در بعضی‌مکان ها نیز از تعویض‌کننده‌های یونی به‌عنوان پیش‌تصفیه دستگاه‌های RO و یا حتی پس تصفیه به‌عنوان مکمل روش‌های دیگر استفاده می‌شود.

## ۶- عبور جریان از خازن

شیرین‌سازی آب به روش عبور از خازن، بسیار شبیه به روش الکترو دیالیز می‌باشد، از این جهت که مقداری یون آزاد شده و به سمت یک جریان الکتریکی کوچ می‌کنند. در این روش در حین چرخه خالص‌سازی آب شور، محلول از بین دو الکترود می‌گذرد. یون‌ها روی الکترودهایی با رسانایی بالا مانند کربن جمع می‌شوند و ولتاژ نیز پایین نگه داشته می‌شود تا مانع واکنش مکانیکی الکترود شود. شکل زیر طرح شماتیکی از این روش را نشان می‌دهد.




وقتی ظـرفیت الکترودهـا کاهش می‌یابد، جریان متوقف شده و خازن تخلیه می‌شود و یون‌های تخلیه شده به محلول تغلیظ شده جدید برمی‌گردد. راندمان انرژی با تخلیه خازن، در نتیجه پایین‌آوردن حداکثر ولتاژی که خازن باید در حین چرخش عمل کند، افزایش می‌یابد.

انرژی موردنیاز برای خالص‌سازی محلولی با TDS ۵۰۰ ppm به‌سطح ۲۵ppm بنا به مطالعات حدود ۰/۷ $kwhr/m^3$ می‌باشد که از نظر هزینه بسیار نزدیک به روش الکترودیالیز می‌باشد. البته برای آب دریا به بیش از این مقدار (حدود ۳۸ kj/kg) انرژی نیاز است. هزینه تولید در این روش از روش RO پایین‌تر است. از نظر تئوری با افزایش تعداد سیکل های کوتاه و اجرای طرح بازیافت انرژی به‌وسیله تخلیه سیکل شارژ ناتمام به خازن دوم، می‌توان این روش را توسعه داد و هزینه‌ها را باز هم کاهش داد.

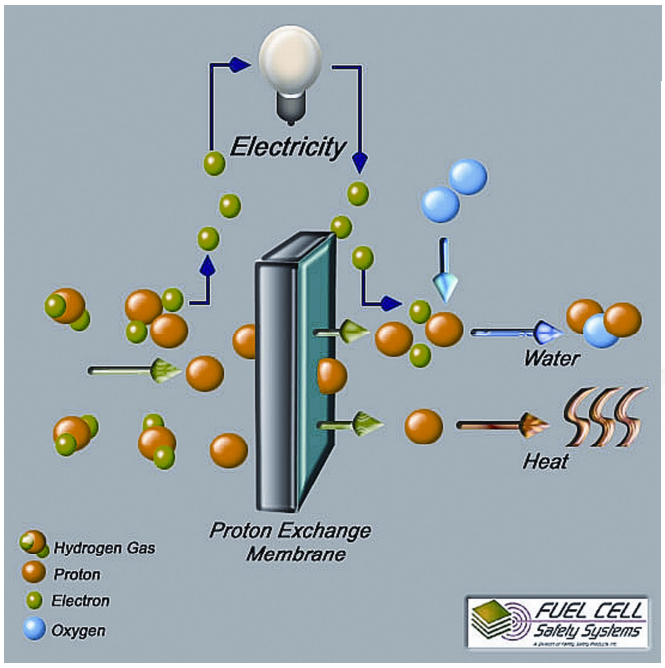
جریان‌هایی که محلول فوق اشباع دارند در این روش از ریکاوری خوبی برخوردار هستند و این امر یک مزیت به شمار می‌آید.

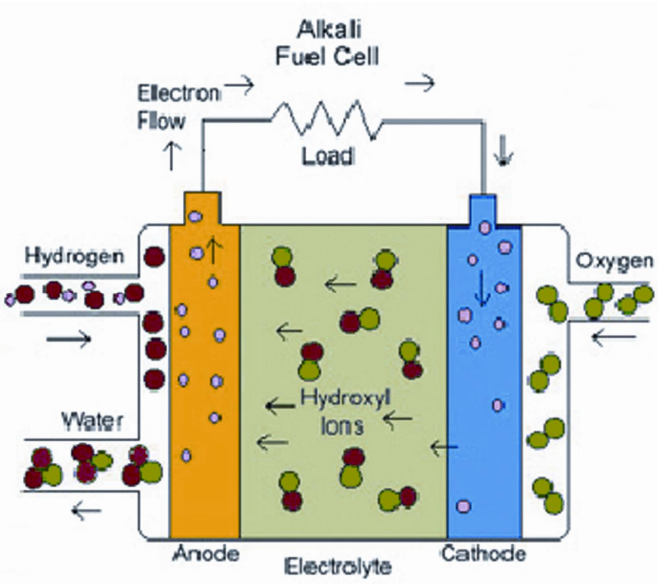
Noor Vijeh Co.

## ۷- نیروگاه هیدروژنی و پیل های سوختی

در نیروگاه‌هایی که سوخت آن‌ها هیدروژن می‌باشد، از طریق پیوند هیدروژن با هوا یا اکسیژن، علاوه بر گرفتن انرژی حرارتی مقداری آب خالص نیز تولید می‌شود که می‌توان استفادهٔ صنعتی و غیره نمود.

هیدروژن که از الکترون و پروتون تشکیل شده به سلول وارد می‌شود، سپس از طریق دو الکترود آنیون و کاتیون الکترون‌ها به‌حرکت درمی‌آیند که حرکت‌الکترون‌ها در الکترودها، منجر به تولید انرژی الکتریکی شده و مقداری از پروتون‌ها و اکسیژن نیز ترکیب شده و آب تشکیل می‌دهند.




مطابق شکل فوق هیدروژن از سمت آند و اکسیژن از سمت کاتد وارد سلـول می‌شوند (برای جدا کردن پروتون و الکترون هیدروژن از کاتالیست استفاده می‌کنند). الکترون‌ها چون نمی‌توانند از محلول الکترولید عبور کنند یک جریان الکتریکی را به وجود می‌آورند.

به‌طورکلی یک نیروگاه‌هیدروژنی از واحدهای تولید بخار، تولید الکتریسیته، تولید هیدروژن به روش الکترولیز (واحد تأمین سوخت نیروگاه) و تولید آب شیرین تشکیل می‌شود.