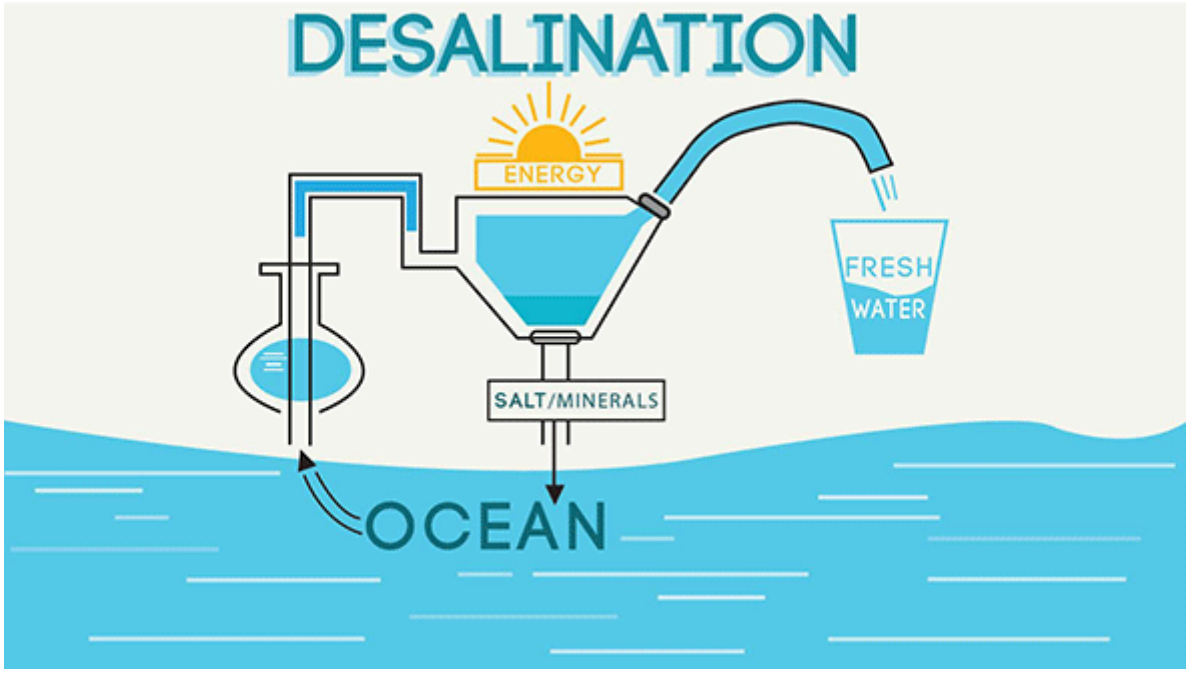
آشنایی با انواع آب‌شیرین‌کن و کلیاتی از عملکرد آن‌ها

اقتباس از نشریه شرکت فرآب



(pic۱)

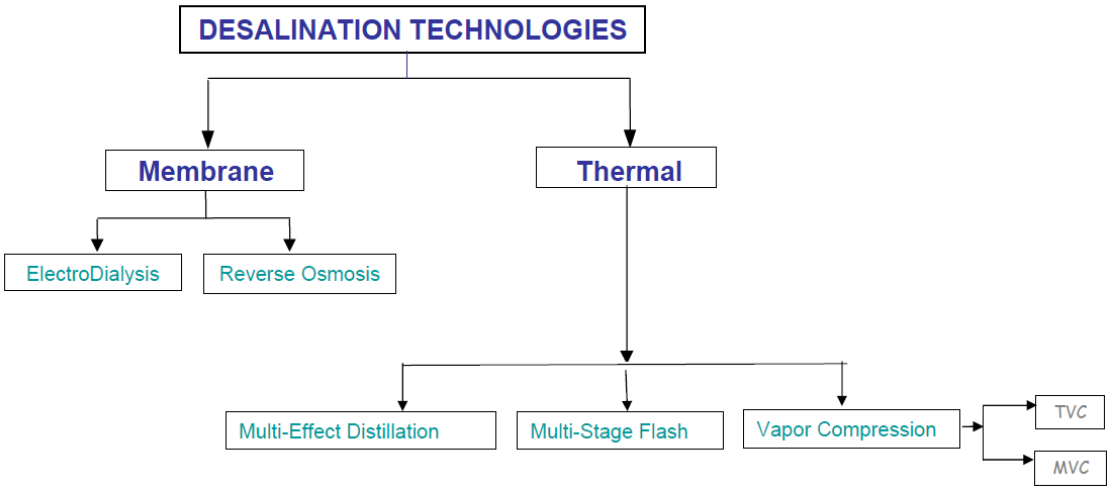
(pic۲)

طی سال‌های اخیر کمبود آب یکی از معضلات عمده در کشورهای درحال توسعه و کشورهای منطقه خاورمیانه بوده است. طبق آمار سازمان ملل متحد، یک سوم مردم جهان با مشکل عدم دسترسی به آب سالم روبرو هستند. مجموع منابع آبی کره زمین ۱/۴

میلیارد کیلومتر متر مکعب است که تنها ۲/۵٪ آن در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، سفره‌های زیرزمینی و سایر منابع آب شیرین قابل استفاده موجودات زنده است[۱ و ۲]. روش‌ها و فرآیندهای زیادی برای شیرین سازی و حذف املاح و نمک‌های آب‌های شور اقیانوس‌ها و دریاها وجود دارد با توجه به اهمیت صنعت آب شیرین‌کن و ورود شرکت فرآب در این صنعت، در این متن تلاش شده است با بیانی ساده به بررسی اجمالی و ساده‌ی آن‌ها پرداخته شود.

جداسازی نمک‌ها و املاح از آب‌های شور یک فرآیند ترمودینامیکی است که نیاز به مصرف انرژی دارد[۳] طی این فرآیند آب شور را به دو فاز مختلف تبدیل می‌کند یک فاز با غلظت پایین املاح و نمک‌ها، که آب شیرین (Fresh Water) نامیده می شود و یک فاز با غلظت بالای نمک‌های محلول که آب نمک (Brine Water) نامیده می‌شود. محدوده شوری آب‌های لب شور[۱] ppm ۱۰۰۰۰ و آب دریا[۲] ppm ۴۵۰۰۰-۳۵۰۰۰ است و بر اساس تعریفات سازمان بهداشت جهانی (WHO[۳]) و استاندارد آب آشامیدنی ایران، میزان حداکثر مطلوب مواد جامد محلول در آب آشامیدنی ppm ۱۰۰۰ و حداکثر مجاز آن ppm ۱۵۰۰ است[۴].

در حال حاضر بیشتر از ۷۵۰۰ واحد آب‌شیرین‌کن در دنیا وجود دارد که میلیاردها گالن در روز (GD[۴]) آب شیرین تولید می‌کنند. روش‌های تجاری و در دسترس برای شیرین‌سازی آب به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند که در چارت زیر به آن‌ها اشاره شده است[۵ و ۶].



فرآیندهای شیرین‌سازی حرارتی:

یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب‌های شور محسوب می‌شوند که به صورت کلی بر اساس تبخیر[۵] و میعان[۶] انجام می‌شود.

---

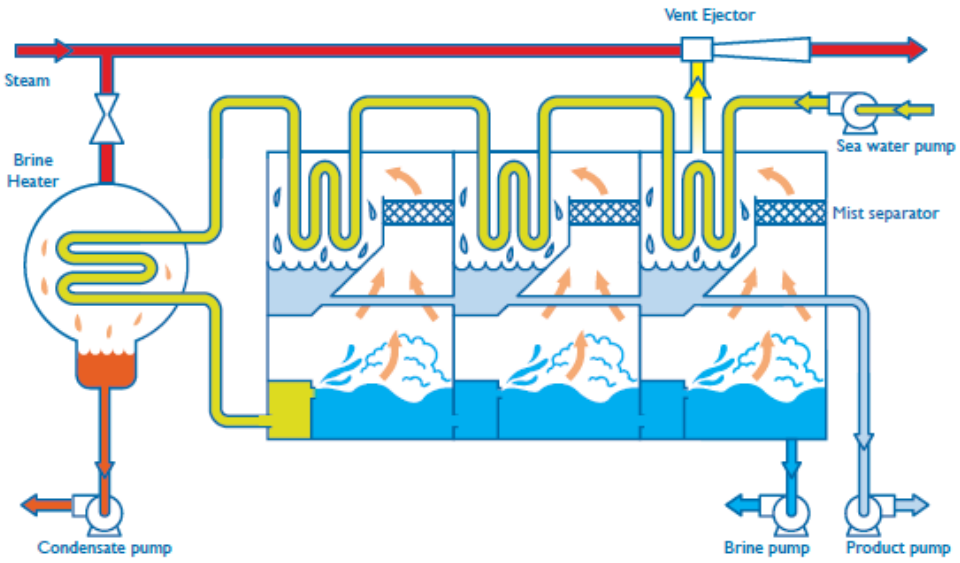
۱ Brackish Water
۲ Sea Water
۳ World Health Organization
۴ Gallon Per Day
۵ Evaporation

Multi-stage flash distillation (MSF):

این روش از دهه ۱۹۵۰ مرسوم شده اساس کار این روش بر این واقعیت علمی استوار است که دمای جوش و تبخیر آب با کاهش فشار کمتر می‌شود در جدول زیر دمای جوش آب در فشار های مختلف آورده شده است.

فشار (بار)	۱	۰،۴۷	۰،۳۲ (قله اورست)	۰،۲۵	۰،۱
دمای جوش (°C)	۱۰۰	۸۰	۷۰	۶۵	۴۵

یک واحد آب‌شیرین‌کن MSF از اتصال چندین چمبر که به تدریج فشار و به تبع آن دمای جوش کاهش می‌یابد تشکیل شده‌است. آب دریا پس از پیش‌گرم شدن توسط آب‌شور حاصل از فرآیند و بخار تولیدی بویلر، وارد چمبر اول می‌شود و به واسطه فشار کم محفظه به صورت انفجاری یا فلاشینگ به بخار تبدیل می‌شود و بخار حاصل روی تیوب‌های کندانسور به مایع تبدیل می‌شوند و به این ترتیب در هر مرحله با کنترل فشار محفظه قسمتی از آب دریا تبخیر و شیرین می‌شود. آب‌شیرین‌کن‌های MSF معمولا از ۱۵تا ۲۵ مرحله یا Stage تشکیل شده‌اند این فرآیند با توجه به مصرف انرژی بالا در مناطقی مثل خاورمیانه که دسترسی به انرژی ارزان وجود دارد بیشتر استفاده می‌شود[۷ و ۱].



(pic۳)

مزایا و معایب روش MSF:

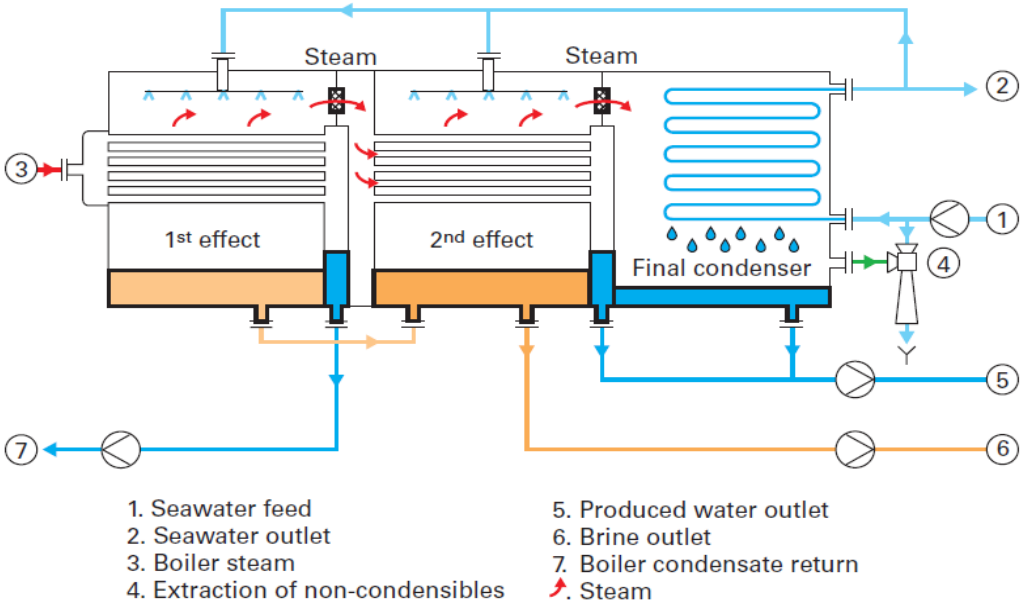
- نصب و راه اندازی آسان

[۶] Condensation

- کیفیت بالای آب تولیدی (محدوده‌ی غلظت نمک محلول در آب تولیدی ppm ۲۰-۱۲) و نیاز به افزودن املاح لازم طی عملیات بعد از فرایند اصلی
- اهمیت پایین کیفیت آب ورودی نسبت به روش‌های ممبرانی
- بالا بردن دمای بالاتر از °C ۱۱۵ باعث بالارفتن بهره‌وری می‌شود ولی از طرفی باعث ایجاد رسوب، کاهش هدایت حرارتی، گرفتگی و خوردگی تیوب‌ها و متریال می‌شود
- افزایش تعداد STAGEها باعث بالارفتن راندمان ولی هزینه سرمایه‌گذاری و پیچیدگی راه‌اندازی بیشتر خواهد شد

:MULTIPLE EFFECT DISTILLATION (MED)

این روش همانند MSF از چندین محفظه یا تبخیرکننده[۷] که Effect نامیده می‌شود تشکیل می‌شود، آب دریا ابتدا پس از عبور از کندانسور نهایی و پیش‌گرم‌شدن، در هر Effect روی دسته تیوب[۸]های حاوی بخار اسپری می‌شود. دمای داخل محفظه‌ها رفته‌رفته کمتر شده و با کاهش فشار شرایط برای جوشیدن و تبخیر فراهم می‌گردد. حرارت اولیه تیوب‌های تبخیر-کننده توسط بخار ورودی که معمولا محصول نیروگاه حرارتی یا بویلر است تامین می‌شود. بخار داخل دسته تیوب‌ها پس از کندانس به صورت محصول نهایی جمع‌آوری و بخار ناشی از تبخیر آب ورودی در هر مرحله وارد تیوب‌های مرحله بعد شده و حرارت لازم برای تبخیر در آن را تامین می‌کند و این روند تا آخرین Effect ادامه می‌یابد. هر چه تعداد effectها بیشتر شود راندمان فرآیند و بهره‌وری انرژی بیشتر خواهدشد و تعداد بهینه آنها توسط دمای بخار ورودی و اختلاف دمای بین effectها تعیین می‌گردد[۷-۹].



(pic۴)

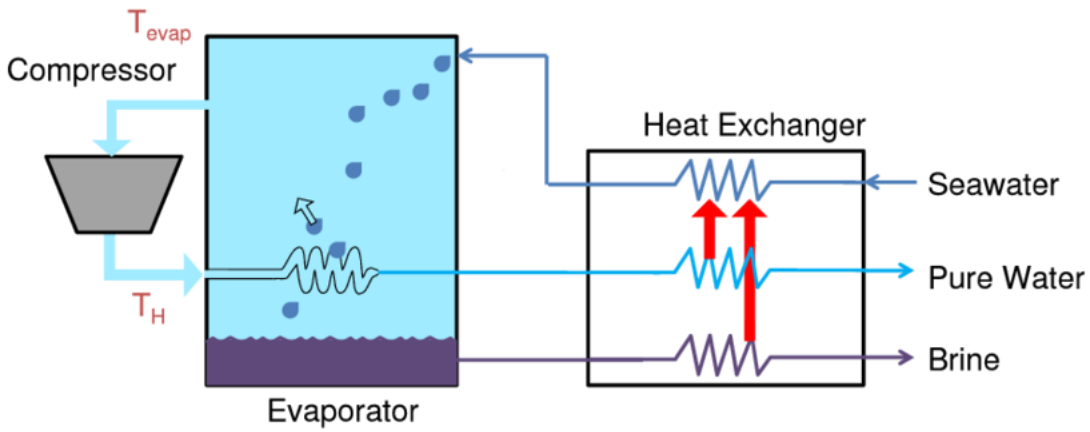
[۷] Evaporator
[۸] Tube Bundle

مزایا و معایب روش MED:

- اهمیت پایین کیفیت آب ورودی نسبت به روش‌های ممبرانی
- عدم نیاز به عملیات آماده‌سازی آب ورودی
- مصرف انرژی کمتر از روش MSF
- دمای فرآیند حدود ۷۰°C و کم کردن دما باعث کاهش پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی می‌شود.
- به دلیل راندمان بالای روش MED هزینه تولید آب به این روش نسبت به سایر روش‌های تبخیری کمتر است.

Vapor Compression (VC):

این روش در واحدهای با ظرفیت کم یا متوسط شیرین‌سازی آب دریا به عنوان مثال برای مجتمع‌های توریستی و صنعتی کوچک یا به عنوان مکمل در کنار سایر روش‌ها برای افزایش راندمان واحد استفاده می‌شود.. در این فرآیند حرارت مورد نیاز برای تبخیر از فشرده سازی بخار تامین می‌گردد به این ترتیب که با استفاده از یک کمپرسور مکانیکی (MVC[۹]) که با انرژی الکتریکی کار می‌کند یا به روش حرارتی (TVC[۱۰]) و توسط یک Steam jet thermo-compressor، خلا داخل چمبر برای کاهش دمای تبخیر ایجاد شده و با فشرده سازی بخار و ارسال آن به داخل تیوب‌های داخل چمبر حرارت دمای آب ورودی تا رسیدن به دمای بخار در خلا ایجاد شده افزایش داده می‌شود. بخار کندانس شده به عنوان محصول نهایی از تیوب ها خارج می‌شود[۷ و ۱۰].



(pic۵)

مزایا و معایب روش VC:

- راحتی و قابل اطمینان بودن کارایی برای واحدهای کوچک با ظرفیت حدودی ۳۰۰۰-۲۰ مترمکعب در روز
- بازدهی بالا، رسوب‌گذاری پایین و خوردگی تیوب‌های پایین به علت دمای کاربری پایین

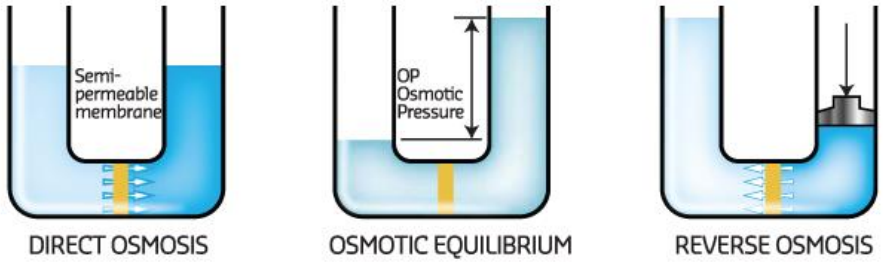
[۹] Mechanical Vapor Compression
[۱۰] Thermal Vapor Compression

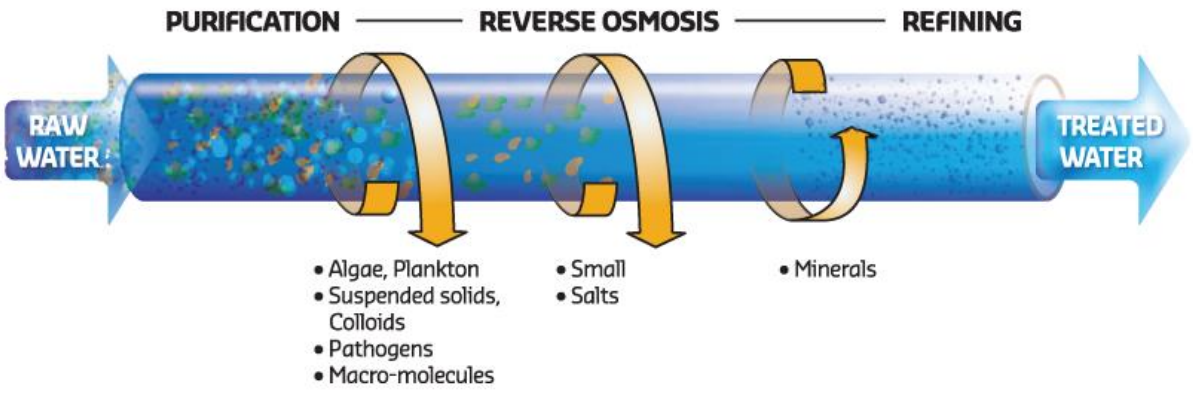
فرآیندهای شیرین‌سازی با ممبران:

ممبران‌ها یا غشاهای سنتزی از سال‌های ۱۹۶۰ برای تفکیک ذرات و املاح محلول‌ها به کار گرفته شده است و از اواخر دهه ۱۹۸۰ در صنعت آب‌شیرین‌کن و جداسازی ترکیبات شیمیایی، آنزیم‌ها و خالص‌سازی آب شور مورد استفاده قرار گرفته است. این روش جایگزینی برای روش‌های سنتی و حرارتی می‌باشد[۱۱].

Reverse Osmosis (RO):

در سال‌های اخیر واحدهای آب‌شیرین‌کن RO با ظرفیت بسیار بالا در منطقه خاورمیانه بخصوص کشور عربستان احداث و به بهره-برداری رسیده است. در این فرآیند با استفاده از اسمز معکوس جداسازی املاح و نمک‌های آب شور توسط ممبران و بدون نیاز به حرارت و تبخیر انجام می‌شود. عمده انرژی مورد نیاز برای تامین فشار لازم برای غلبه بر فشار اسمزی و عبور آب از ممبران می-باشد. ممبران‌ها از انواع خاص پلیمرها که نیمه‌تراوا[۱۱] نامیده می‌شود ساخته شده‌اند این ممبران‌ها مولکول‌های آب را از خود عبور داده و مانع عبور سایر مولکول‌ها و املاح می‌شوند بنابر این غلظت املاح یا شوری آب عبور کرده بسیار کمتر از آب پشت ممبران خواهد بود. فاکتورهای زیادی میزان فشار مورد نیاز را تعیین می‌کند مثل: دما و میزان شوری آب ورودی و مقدار املاح مجاز در آب تولیدی[۱ و ۱۲].





(pic۶)

یک واحد آب‌شیرین‌کن شامل ۵ بخش مهم است:

[۱۱] Semi Permeable

۱- تامین آب شور

یک آبراهه یا کانال انتقال، آب مورد نیاز واحد آب‌شیرین‌کن را تامین می‌کند، در مسیر انتقال آب ذرات درشت معلق داخل آب نظیر سنگریزه‌ها، موجودات زنده، زباله‌های احتمالی و ... با عبور دادن از سرندها جدا می‌شوند.

۲- عملیات پیش‌فرآیندی

مهم‌ترین مرحله در یک واحد RO می‌باشد زیرا اجرای صحیح این مرحله باعث عملکرد بهتر کل فرآیند و جلوگیری از رسوب‌گذاری و بسته شدن ممبران‌ها می‌شود. کیفیت و ترکیب‌شیمیایی آب ورودی، نوع ممبران و کیفیت آب تولیدی، عملیات لازم را تعیین می‌کند. ذرات جامد و معلق با ابعاد بیشتر از ۵ میکرون فیلتر شده و با تزریق مواد شیمیایی نظیر هیپوکلریت سدیم، باکتری‌ها، جلبک‌ها و میکروارگانیسم‌ها از بین رفته و به ضدعفونی بیولوژیکی انجام می‌شود. همچنین کلرید آهن به عنوان لخته ساز[۱۲] ، اسید سولفوریک برای تنظیم pH جهت کنترل رسوب‌گذاری و SBS[۱۳] جهت حذف کلر در ورودی به ممبران‌ها و ماده ضدرسوب جهت جلوگیری از رسوب‌گذاری بر روی ممبران‌ها نیز استفاده می‌شود.

۳- پمپاژ فشار بالا

از پمپ‌های فشار بالا جهت تامین فشار مورد نیاز برای عبور آب از ممبران‌ها استفاده می‌شود. فشار مورد نیاز برای آب با شوری پایین (آب لب‌شور) حدود ۱۲-۲۵ بار و برای آب دریا حدود ۵۴-۸۰ بار می‌باشد

۴- RO

ممبران‌های استفاده شده بایستی مقاومت کافی در برابر فشار اعمال شده از طرف پمپ‌ها را داشته باشند همچنین سطح مقطع بیشتر ممبران‌ها باعث ایجاد جریان بیشتر و ظرفیت بالاتر می‌شود. ممبران‌ها در اشکال و لایه‌بندی‌های مختلف ساخته می‌شوند که معمول‌ترین آن‌ها که در واحدهای RO استفاده می‌شود Spiral Wound و Hollow Fine Fiber (HFF) می‌باشند.

۵- عملیات پس‌فرآیندی

در این مرحله عملیات کنترل pH و خروج گازهای محلول و همچنین تنظیم املاح مورد نیاز انجام می‌شود.

مزایا و معایب روش RO:

- استفاده از موارد پلیمری به جای آلیاژهای فلزی و خوردگی پایین متریال به علت دمای پایین فرآیند
- تشکیل رسوب و گرفتگی[۱۴] ممبران‌ها یکی از مشکلات متداول این واحدها است که با تکمیل عملیات پیش‌فرآیندی می‌تواند کنترل شود.
- گرفتگی بیولوژیکی ممبران‌ها ناشی از رشد میکروارگانیسم‌ها و کلونی‌های زنده یا مرده آن‌ها
- انباشت ذرات کلوییدی سیلیکات آلومینیوم، رس، مواد آلی و شوینده‌ها روی سطح ممبران‌ها

با پیشرفت‌های اخیر هزینه روش RO کاهش قابل‌توجهی داشته است که از جمله این پیشرفت‌ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

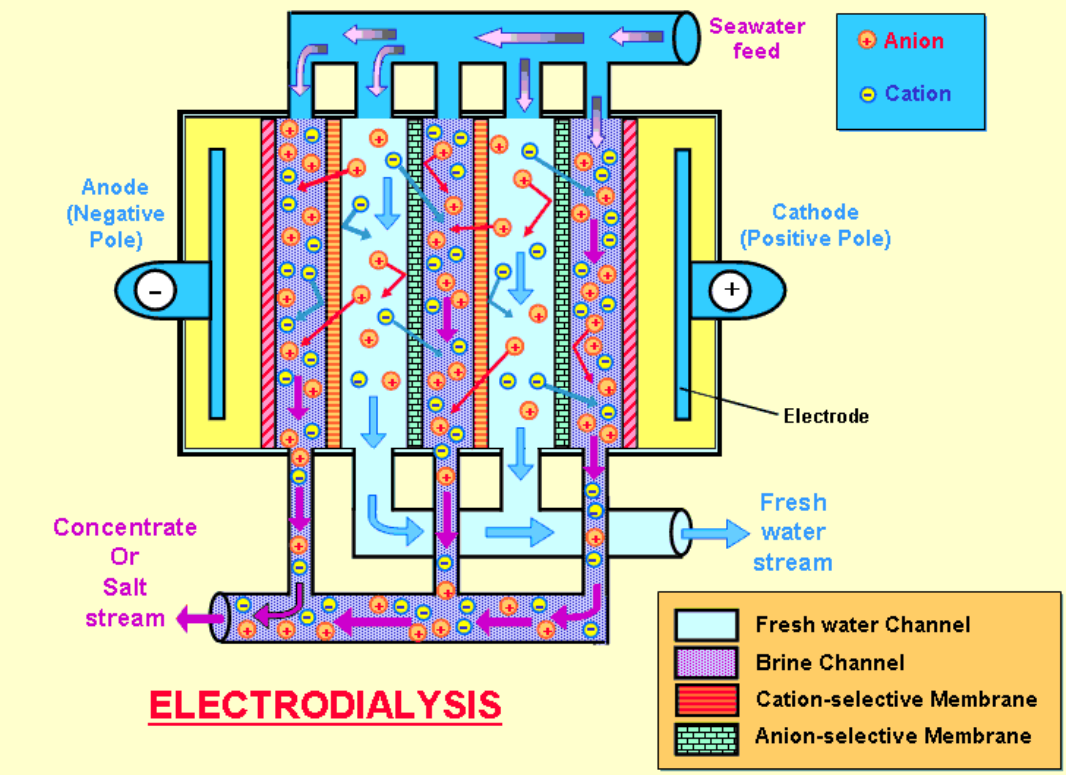
۱- تولید ممبران‌های با دوام بالا و قیمت پایین

۲- استفاده از توربین بازیافت انرژی فشار در حین تخلیه آب شور

[۱۲] Flocculent
[۱۳] Sodium Bisulfite
[۱۴] Plugging

Electro Dialysis (ED):

این روش به صورت تجاری در دهه ۱۹۶۰ تقریبا ده سال قبل از RO معرفی شد در این روش با استفاده از پتانسیل الکتریکی و غشاء یونی فرآیند جداسازی نمک‌ها و یون‌های موجود انجام می‌شود. اکثر نمک‌های محلول در آب به صورت کاتیون و آنیون بوده و جذب الکترود با بار مخالف می‌شوند. غشاء یا ممبران‌ها برای عبور انتخابی انتخاب می‌شوند[۱۳].



(pic۷)

مزایا و معایب روش ED:

- درصد شیرین‌سازی بالا
- برای آب‌های لب‌شور با شوری کمتر از ۶ g/L مناسب بوده و برای غلظت کمتر از ۰/۴ g/L مناسب نیست.
- برای آب‌های با شوری بالا قابل استفاده ولی غیر اقتصادی است.
- مصرف اصلی انرژی سیستم مربوط به جریان الکتریکی مستقیم مورد نیاز برای اعمال به الکترودها و جداسازی یون‌ها است.
- مواد شیمیایی مورد نیاز کم

انرژی‌های تجدیدپذیر و آب‌شیرین‌کن:

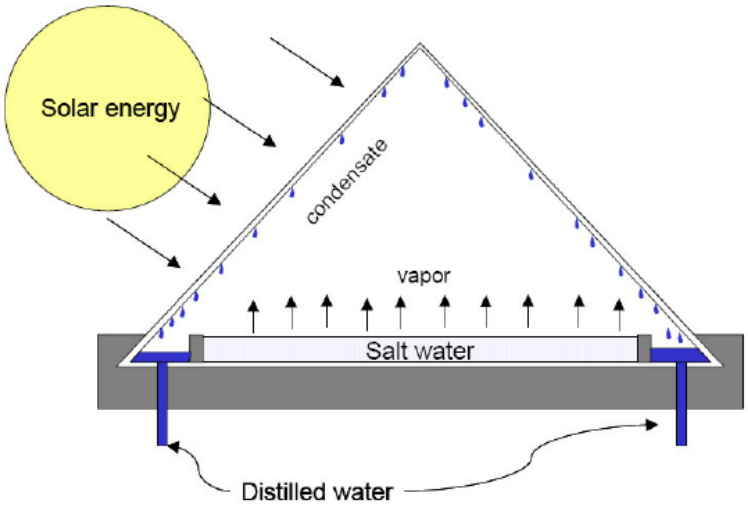
در سال‌های اخیر پتانسیل استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر برای آب‌شیرین کن‌های در سایز کوچک مورد توجه قرار گرفته است بخصوص در کشورهایی که در کنار مشکل کمبود آب شیرین دسترسی آسان به منابع فسیلی وجود ندارد. سیستم‌های آب‌شیرین-کن از انرژی‌های تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و زمین‌گرمایی[۱۵] استفاده می‌کنند[۱].

آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی:

به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند.

آب‌شیرین‌کن خورشیدی مستقیم:

در این فرآیند افزایش حرارت و شیرین‌سازی در یک دستگاه انجام می‌شود. تشعشعات خورشیدی پس ازعبور از یک سطح شفاف در محفظه گیر افتاده و با اثر گلخانه‌ای، حرارت آب درون محفظه بالا رفته و به بخار تبدیل می‌شود و سپس روی سطوح سرد کندانس شده و به مخازن آب شیرین انتقال داده می‌شود. به ازای هر مترمربع زمین می‌توان ۳-۴ لیتر آب شیرین در روز تولید کرد[۱].



(pic۸)

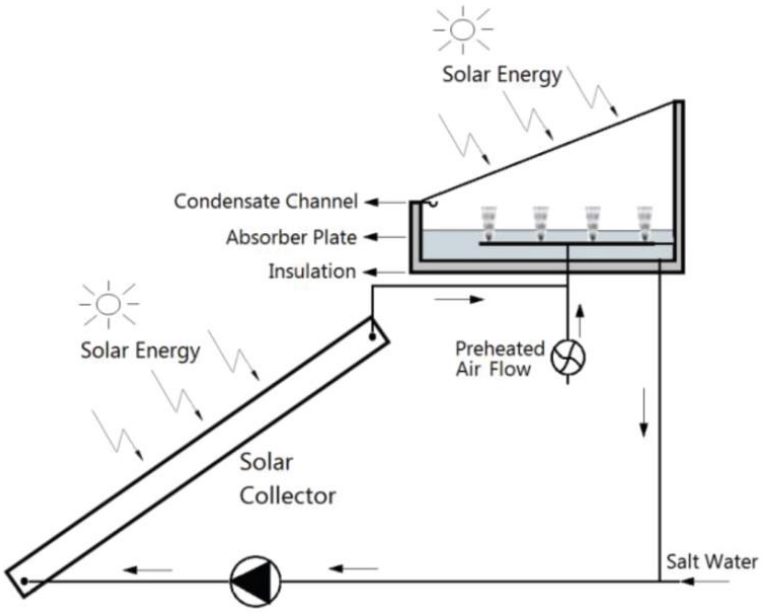
مزایا و معایب روش خورشیدی مستقیم:

- نیاز به زمین با مساحت زیاد
- هزینه احداث بالا
- مستعد خراب‌شدن با آب هوا و هزینه نگهداری بالا به علت رسوب‌گذاری و نشتی بخار از محفظه
- مناسب برای ظرفیت‌های پایین و محل‌هایی که انرژی خورشیدی در دسترس هستند.

[۱۵] Geothermal

آب شیرین‌کن خورشیدی غیرمستقیم:

از دو قسمت گیرنده انرژی خورشیدی و واحد شیرین‌سازی تشکیل شده اند که بخش گیرنده انرژی می‌تواند با واحدهای شیرین-سازی که قبلا معرفی شده‌اند جفت شده و حرارت مورد نیاز را تامین کند همچنین می‌توان از انرژی الکتریکی تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی در سیستم‌های RO یا ED استفاده کرد.



(pic۹)

نتیجه‌گیری:

فرآیندهایی که برای شیرین‌سازی از تغییر فاز استفاده می‌کنند به علت مصرف انرژی بالا نسبت به RO و ED گران‌تر هستند از طرفی کیفیت آب ورودی و دسترسی به منابع انرژی اهمیت زیادی در قیمت آب تولیدی دارد.

در واحدهای آب‌شیرین کن تبخیری که عموماً با سوخت فسیلی کار می‌کنند هزینه تولید هر متر مکعب آب به قیمت سوخت وابسته است. هزینه تولید آب در واحدهای RO با توجه به مصرف انرژی پایین و پیشرفت‌های اخیر علمی در این زمینه کمترین مقدار است در صورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، مشکلات محیطزیستی و آلایندگی کمتر و هزینه تولید مقداری بیشتر می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت بالای مسایل زیست‌محیطی، بایستی در انتخاب روش شیرین‌سازی علاوه بر فاکتور اقتصادی بودن و کیفیت آب تولیدی موارد وبا در نظر گرفتن فاکتورهای زیست‌محیطی زیر بهینه‌ترین روش برای دسترسی به آب شیرین در نظرگرفته‌شود.

- استاندارد و محل تخلیه آب غلیظ حاصل از فرآیند
- میزان آلودگی هوا

- استانداردهای آلایندگی صوتی
- زمین مورد استفاده

با توجه به شرایط بارندگی و خشکسالی در اکثر مناطق کشور، دسترسی آسان به انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر و آب‌های شور در سواحل جنوبی، این نواحی پتانسیل خوبی برای احداث واحدهای آب‌شیرین‌کن به روش‌های مختلف می‌باشند. با این دیدگاه اهتمام مجموعه شرکت فرآب و تلاش تیم مهندسی، دستیابی به تکنولوژی، طراحی و ساخت واحدهای آب‌شیرین‌کن در کشور می‌باشد.

مراجع:

[۱] Mahmoud Shatat* and Saffa B. Riffat, Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, Institute of Sustainable Energy Technology, University of Nottingham, Nottingham NG۷ ۲RD, UK, International Journal of Low-Carbon Technologies ۲۰۱٤, ۹, ۱–۱۹

[۲] Eakins, B.W. and G.F. Sharman, Volumes of the World's Oceans from ETOPO۱, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, CO, ۲۰۱۰.

[۳] فرآیند های شیرین سازی آب، مجتبی میرزاخانی سیاهکلرودی، دانشکده مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۵

[۴] ISIRI ۱۰۵۳، استاندارد آب آشامیدنی-ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، استاندارد ملی ایران، تجدید نظر پنجم

[٥] WDI. Water Desalination International: Introduction. Published by WDI.http://www.aterdesalination.com/introduction.htm, ۲۱ April ۲۰۰۸

[٦] WHO/EU drinking water standards comparative table, Water treatment & Air purification and other supporting information. http://www.lenntech. com/WHO-EU-water-standards.html, ۲٦ October ۲۰۰۷

[۷] DESALINATION In the GCC The History, the Present & the Future, The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC) General Secretariat, Desalination Experts Group, ۲۰۱٤

[۸] Wangnick K. IDA worldwide desalting plants inventory: report No. ۱٦.Produced by Wangnick Consulting for the International Desalination Association, ۲۰۰۰.

[۹] Khawaji AD, Kutubkhanah IK, Wie J-M. Advances in seawater desalination technologies. Desalination ۲۰۰۸;۲۲۱:٤۷–٦۹.

[۱۰] Buros OK. The ABCs of Desalting, ۲nd edn. ASIN: B۰۰۰٦S۲DHY, International Desalination Association, ۲۰۰۰, ۳۰.

[۱۱] The Desalting and Water Treatment Membrane Manual: A Guide to Membranes for Municipal Water Treatment, Water Treatment Technology Program, Report No. ۱, September ۱۹۹۳

[١٢] Khawaji AD, Kutubkhanah IK, Wie J-M. Advances in seawater desalination technologies. Desalination ٢٠٠٨;٢٢١:٤٧–٦٩.

[١٣] El-Dessouky H, Ettouny H. Study on Water Desalination Technologies. Prepared for ESCWA, United Nations, ٢٠٠١.