

# فرآیندهای شیرین سازی آب

مجتبی میرزاخانی سیاهکلرودی دانشجوی کارشناسی مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی [Mojtaba.mirzakhani@yahoo.com](mailto:Mojtaba.mirzakhani@yahoo.com)

## چکیده

طی سال های اخیر ، هزینه تولید آب بوسیله دستگاههای نمک زدایی تا حد قابل توجهی کاهش یافته ، اما هزینه تولید آب به کمک آنچه ما روش های سنتی می نامیم ، افزایش پیدا کرده است . این افزایش قیمت به واسطه بهره برداری بیش از حد از منابع زیر زمینی آب ، نفوذ نمک و افزایش آلودگی آنان بوجود آمده است .

منابع آب شیرین حاصل از رودخانه ها و منابع آب زیرزمینی محدود است و با سرعت فزاینده ای در حال تهی شدن است و زنگ خطر را در بسیاری از مناطق جهان به صدا در آورده است . از این رو از فرآیندهای شیرین سازی آب دریا، جهت تامین آب شیرین مورد نیاز استفاده می شود.

یک فرآیند شیرین سازی آب دریا را به دو جزء تقسیم می کند. یکی جریان آب شیرین با ذرات نمک حل نشده کم و دیگری جریان آب شور.

آب شیرین کن ها به عنوان فرآیندهای هزینه بر مطرح بوده و بازده انرژی بسیار پایینی دارند.

در این مقاله به بررسی و مقایسه چند نمونه از آب شیرین کن ها متداول پرداخته و نمودارها و جداول مربوطه ارائه شده است.

## مقدمه

اکثر کشورهای خشک و نیمه خشک بامشکلات ناشی از کمبود آب مطلوب مواجه هستند. در نتیجه این کشورها درصدد تامین منابع آب به میزان بالا هستند. شیرین سازی آب دریا تبدیل به یک منبع عظیم برای تولید آب جهت مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی در بسیاری از مناطق جهان گردیده است.

## فناوری های شیرین کردن آب

فرآیندهای شیرین سازی فرآیندهایی به منظور خالص سازی آب دریا برای مصارف آشامیدنی است، یک سیستم آب شیرین کن به طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می کند، یکی جریان آب خالص با درصد بسیار کمی از نمک و املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک املاح باقیمانده می باشد.

جداسازی نمک از مخلوط آب نمک، یک فرآیند ترمودینامیکی است که نیاز به انرژی دارد، یک فرآیند ایده آل آب شیرین کن به عنوان یک فرآیند جداسازی برگشت پذیر محسوب می شود.

کارآمدترین تکنولوژی آب شیرین کن دارای مصرف ۴ تا ۵ کیلووات به ازای تولید یک مترمکعب آب شیرین هستند.

\* فرآیندهایی که در آنها تغییر فاز صورت می گیرد:

- Multi effect distillation (MED)
- 
- Multi stage flash distillation (MSF)
- 
- Vapor compression distillation (VCD)

\* فرآیندهایی که در آنها شیرین سازی آب بدون تغییر فاز انجام می پذیرد:

- Reverse osmosis (RO)
- Electro dialysis (ED)

کارایی هر کدام از این فرآیندها بستگی به غلظت نمک در آب تغذیه و همچنین ارزش هزینه آب دارد.

هریک از فناوری های آب شیرین کن برای انجام فرآیند جداسازی به انرژی احتیاج دارند که این انرژی می تواند از طریق انرژی گرمایی ، مکانیکی یا الکتریکی تامین شود.

## ۱- کلیاتی در مورد روش ها

پنج فناوری عمده به منظور زدودن نمک و دیگر مواد جامد غیر قابل حل از آب وجود دارد که عبارتند از:

تقطیر، اسمز معکوس، الکترو دیالیز، تبادل یونی، نمک زدایی انجمادی .

تقطیر و انجماد شامل خارج ساختن آب خالص، به صورت بخار آب و یا یخ، از آب شور می باشد. در فناوری های ED, RO یک غشا بسیار ظریف باعث جداسازی نمک ها و املاح سبک تر و مطلوب تر در طی عبور آب از یک محفظه شیمیایی می باشد.

بعضی از فناوری های آب شیرین کن علاوه بر جداسازی و خارج سازی نمک ها و دیگر مواد جامد غیر قابل حل در آب، مواد معلق، مواد آلی، بعضی از باکتری ها و ویروس ها را نیز از آب خارج می سازد.

این فناوری ها به منظور استفاده در مقیاس های بالا پیشرفت کرده و تکامل یافته اند و حجم بسیار بالایی از آب را تصفیه می نمایند. ولی بعضی از آنها در حجم های بسیار پایین و در حد مصارف خانگی مورد استفاده قرار می گیرند.

اکثر راه های معمول نمک زدایی آب، شامل فرآیندهای جوشش و تبخیر می باشد. در یک دستگاه تقطیر، آب می تواند به جوش آید و بخار تولید نماید که از چگالش این بخار آب خالص تولید می گردد. بعضی از دستگاه های تقطیر را می توان به هم متصل نمود و دستگاهی با کارایی بالا ایجاد کرد.

فرآیند تبخیر مولکول های آب می تواند به وسیله گرم کردن آب شور تا دمای جوش آن و یا کم کردن فشار بخار بالای آب شور سرعت بیشتری یابد. به منظور بالا بردن کارایی فرآیند تقطیر، گرمای ایجاد شده از مرحله چگالش را برای پیش گرم کردن آب تغذیه مورد استفاده قرار می دهند و یا برای دوباره گرم کردن آب شور تبخیر نشده استفاده می کنند.

## ۱-۱ شیرین کردن آب دریا به روش تقطیر

اکثر راه‌های معمول نمک زدایی آب شامل فرآیندهای جوشش و تبخیر می‌باشد، در یک دستگاه تقطیر آب به جوش می‌آید و بخار تولید می‌نماید که از چگالش این بخار آب خالص تولید می‌شود.

تقطیر آب هنوز بهترین و مرسوم‌ترین روش شیرین‌سازی آب دریا است. در این فرآیند از تبخیر آب شور و چگالش آب به آب خالص می‌رسیم، با این تکنولوژی غشا به خاطر اطمینان بیشتر و مصرف انرژی کمتر به طور گسترده‌ای طی ۱۰ سال اخیر گسترش یافته است. فرآیندهای خالص‌سازی آب به روش تقطیر نسبت به فرآیندهای غشایی دارای کیفیت بالاتری است.

فرآیندهای تقطیر هنوز سهم بزرگی در صنعت شیرین کردن آب دریا داراست.

روش تقطیر موقعی به صرفه است که بخار با انرژی حرارتی پایین به عنوان منبع اصلی انرژی در دسترس باشد، بنابراین روش‌های حرارتی در کشورهای که کویلینگ با ایستگاه‌های قدرت ممکن نیست، کمتر استفاده می‌شود. از طرف دیگر بزرگترین پلنت‌های آب شیرین در کشورهای شبه جزیره عرب و یا جاهایی که تولید همزمان توان و آب دارند، بر پایه تقطیر است.

دلایلی که هنوز روش تقطیر بهترین انتخاب برای شیرین‌سازی آب دریا به خصوص در ایستگاه‌های قدرت می‌باشد به شرح زیر است:

- فرآیندهای تقطیر آب با کیفیت بالا تولید می‌کنند (با باقیمانده نمک ۲-۱ ppm) و به شوری آب دریا بستگی ندارند در صورتی که فرآیندهای غشایی کاملاً به ذرات جامد حل شده و ترکیب آب دریا بستگی دارند و آب با کیفیت پایین‌تر تولید می‌کنند.
- انرژی مصرفی در واحدهای تقطیر آب دریا، حرارت ورودی به وسیله بخار سطح حرارتی پایین است که معمولاً به ارزانی در ایستگاه‌های توان حرارت و در خروجی توربین‌های بخار قابل دسترس است.
- شیرین‌سازی به روش تقطیر نسبت به نوع غشایی کمتر به کیفیت آب دریا حساسیت دارند در حالی که پیش تصفیه آب دریا در مورد نوع غشایی حتماً باید صورت گیرد.
- هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگه‌داری با وجود یک نیروگاه حرارتی، به طور عمومی برای تقطیر پایین‌تر از واحدهای غشایی است.

## ۱-۲ انواع فرآیندهای تقطیر

فرآیندهای مختلف تقطیر آب دریا به شرح زیر است:

- تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی (MSF)
- تقطیر چند مرحله‌ای به همراه لوله افقی و فیلم نازک انبساط (MED)
- MED با گردش بخار به وسیله ترموکمپرسور (TVC\_MED)
- تقطیر یک یا چند مرحله‌ای به وسیله تراکم بخار مکانیکی (MVC)
- 

### ۱-۱-۲ فرآیند MSF

فرآیند MSF در داخل محفظه‌ای به نام گرمکن، محلول آب شور دریا گرم می‌شود. این کار عمدتاً از طریق چگالیده شدن بخار روی تعداد لوله موازی که در داخل محفظه عبور کرده و در عین حال آب دریا را گرم می‌کنند، انجام می‌شود. آب گرم شده دریا سپس به داخل محفظه‌ی دیگری

که مرحله اوپراتور (تبخیر کننده) نامیده می‌شود، جریان یافته و در آنجا غشاء درحدی تنظیم می‌گردد که آب بلافاصله به جوش می‌آید، تغذیه ناگهانی آب گرم به داخل اطاقک باعث به جوش آمدن سریع آن می‌گردد. در واقع آب به صورت انفجاری یا فلاشینگ به بخار تبدیل می‌گردد این تبدیل به فشار کنترل شده در این مرحله بستگی دارد، زیرا فرآیند جوشش تا زمانی ادامه می‌یابد که آب سرد شود. مفهوم تقطیر آب به کمک ظرفی که تحت فشار کاهش داده شده، کار می‌کنند جدید نیست، بلکه بیش از یک قرن است که کاربرد دارد. در دهه ۱۹۵۰، دستگاهی که از یک سری طبقات STAGE باشیب فزاینده فشارهای اتمسفری پایین تر تشکیل می‌شد ابداع گردید در این دستگاه، آب تغذیه می‌توانست از یک مرحله به مرحله دیگر راه یافته بطور مکرر و بدون افزودن حرارت به حالت جوش برسد.

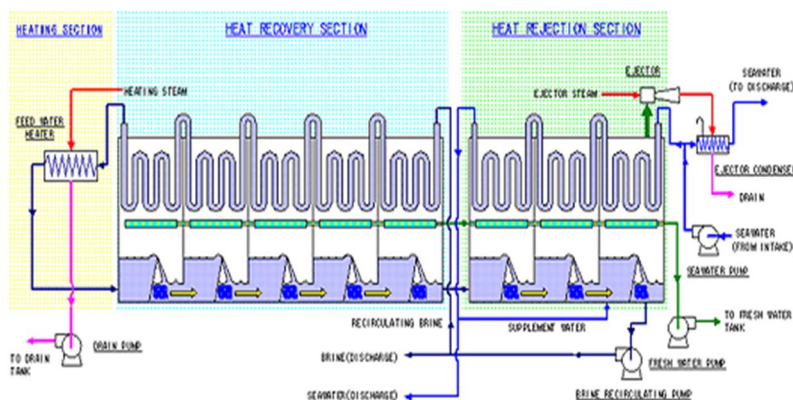
معمولاً یک مجموعه آب شیرین کن MSF می تواند ۴ تا ۴۰ مرحله داشته باشد. بخار تولید شده از طریق فرآیند فلاش پس از چگالیدن روی لوله های مبدل حرارتی که در طول هر مرحله تعبیه شده‌اند، به آب شیرین تبدیل می‌گردد. لوله‌ها به وسیله آب تغذیه ورودی که به گرم کن آب شور می‌رود خنک می‌شود. با این کار آب تغذیه به نوبه خود گرم می‌شود، به نحوی که مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز در گرم کن آب شور جهت افزایش دمای آب دریا کاهش می‌یابد. از دهه ۱۹۵۰ دستگاه‌های آب شیرین کن MSF به طور تجاری ساخته شدند. این دستگاه‌ها عموماً به صورت واحدهایی با حدود ۵۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ مترمکعب در روز ساخته می‌شود. MSF معمولاً با حداکثر دمای تغذیه ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (پس از گرم کردن آب شور) عمل می‌کند. یکی از عواملی که بر روی راندمان حرارتی واحد تاثیر دارد و اختلاف بین دما از گرم کن آب شور تا چگالنده در انتهای سرد دستگاه است.

در سیستم‌های MSF چندگذر، ۵۰ تا ۷۵ درصد آب شور غلیظ شده از آخرین مرحله به آب تغذیه ورودی مخلوط می‌شود و به واسطه این فرآیند بازیافت حرارتی افزایش و مقدار مواد لازم برای تصفیه مقدماتی کاهش می‌یابد. متأسفانه این عمل به سبب افزایش غلظت نمک در چرخه آب شور، میزان خوردگی و تشکیل رسوب را افزایش می‌دهد و به همین دلیل کنترل رسوب باید با دقت بیشتری صورت گیرد.

افزایش تعداد مراحل فرآیند MSF بازده کلی در بخش بازیافت حرارت را افزایش می‌دهد و البته در آن صورت هزینه سرمایه‌گذاری نیز افزایش خواهد یافت. در این روش از گرمای محسوس برای تولید گرمای نهان تبخیر در هر بخش استفاده می‌شود.

فرآیند MSF این روزها مهمترین نقش را در تقطیر آب دریا دارد، ولی اخیراً فرآیند MED با اوپراتوری اسپری فیلم نازک به جای نوع لوله‌های غوطه‌ور به همراه کمپرسور حرارتی یا مکانیکی بخار پیشرفت چشمگیری یافته است و باعث کاهش تشکیل رسوب و بهبود عملکرد ترمودینامیکی شده است.

شکل ۱ - شماتیک آب شیرین کن MSF



FLOW DIAGRAM OF MULTI STAGE FLASH DESALINATION PLANT  
BRINE RECIRCULATION TYPE

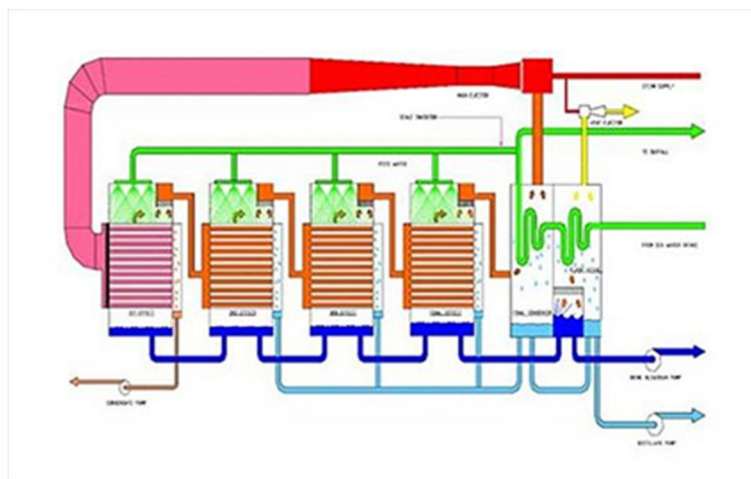
## ۲-۱-۲ فرآیند MED

فرآیند MED مدت زیادی است که در تقطیر صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از کاربردهای معمول این فرآیند، تبخیر شیره از نیشکر در تولید نمک با استفاده از پدیده تبخیر می‌باشند. فرآیند تقطیر چند مرحله‌ای اولین فرآیندی است که برای تولید مقادیر قابل توجهی آب شیرین از آب دریا و در مقیاس تجاری به کار گرفته شده است. در ۲۵ سال گذشته این فرآیند از لحاظ تکنیکی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. در حال حاضر ۵٪ ظرفیت تولید آب شیرین در جهان به این روش اختصاص دارد. فرآیند این دستگاه آب شیرین کن بر پایه سیستم نمک‌زدایی تقطیری به روش چند مرحله‌ای به همراه چرخش بخار می‌باشد. مانند شکل ۲ هر واحد آب شیرین کن از چندین افکت و یک کندانسور تشکیل شده است. افکت‌ها مبدل‌های پوسته-لوله‌ای با آرایش افقی می‌باشند.

اساس کار واحدهای MED بدین صورت است که ابتدا بخار خروجی از نیروگاه‌های بخار و یا بخاری که به واسطه سوزاندن زغال سنگ و یا سوخت‌های فسیلی دیگر حاصل شده است وارد اولین مرحله می‌شود. این بخار از دما و فشار پایینی برخوردار است و از آن به عنوان بخار اولیه نام برده می‌شود. هنگامی که آب تغذیه به اولین مرحله وارد می‌شود، بر روی لوله‌های اواپراتور که در آنها بخار اولیه جریان دارد پاشیده شده و بدین ترتیب بخشی از آب تغذیه تبخیر و وارد مرحله دوم می‌گردد. از این بخار به عنوان بخار ثانویه نام برده می‌شود. بخار اولیه درون لوله‌های اواپراتور نیز بر اثر از دست دادن حرارت خود چگالش یافته و به درون بویلر برگشت داده می‌شود. همچنین آب شور موجود در مرحله اول به وسیله یک پمپ به مرحله دوم وارد شده و بخار ثانویه نیز که از تبخیر آب تغذیه حاصل شده بود در مرحله دوم با انتقال گرمای نهان خود به آب شور چگالش یافته و بخشی از آب شور را تبخیر می‌کند و تمام فرآیند فوق به تعداد مراحل که وجود دارد تکرار می‌گردد و بدین ترتیب بخار چگالش یافته از مرحله دوم به بعد به عنوان آب شیرین جمع آوری شده و تصفیه نهایی (برای رساندن PH آب به سطح قابل قبول) بر روی آن صورت می‌گیرد.

حداقل تعداد مراحل طراحی شده برای انجام یک فرآیند MED به دمای آب تغذیه وابسته است. بدین ترتیب که هر چه دمای آب تغذیه بیشتر و اختلاف آن با دمای جوش آب کمتر باشد تعداد مراحل انجام فرآیند هم می‌تواند کمتر شود افزایش تعداد مراحل سبب می‌شود که نسبت آب شیرین تولیدی به بخار مصرفی آن بازده حرارتی طرح نیز افزایش یابد. البته در صورت افزایش تعداد مراحل، هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه نیز باید افزایش پیدا کند.

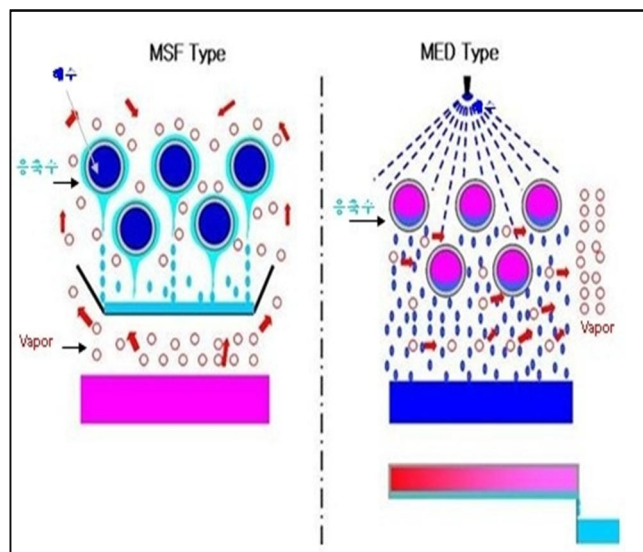
شکل ۲- شماتیک آب شیرین کن تقطیری MED



اتونی وال-دسوکیدرسال ۲۰۰۲ مقایسه‌ای بین سه آب شیرین کن MED، MSF و پیشرو و موازی را برای آب تغذیه با غلظت ۴۲۰۰۰ ppm و دمای بخار ۹۰ درجه سلسیوس انجام دادند که نتایج حاصل از این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است.

MED parallel	MED Forward	MSF	
۸	۸	۲۴	تعداد مراحل
۴.۹	۵.۲	۸	نسبت عملکرد
۳۳۵	۲۱۲	۲۵۹	سطح حرارتی مخصوص
۶۲۲۴۷	۷۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	غلظت پساب خروجی
۸.۹	۲.۶	۲.۴	دبی آب خنک کن
۷.۷۸	۴.۱۲	۸.۳	مصرف انرژی پمپاژ مخصوص

جدول ۱ - مقایسه آب شیرین کن‌های MED و MSF



شکل ۳- مقایسه آب شیرین کن‌های MED و MSF

همانطور که مشاهده می‌شود آب شیرین کن MSF دارای نسبت عملکرد بالاتر، دبی آب خنک کن کمتر و سطح حرارتی مخصوص نسبتاً مناسبی در مقایسه با آب شیرین کن MED می‌باشد. ولیکن از مزایای MED نیز مصرف انرژی الکتریکی مخصوص کمتر می‌باشد.

### ۱-۳ روش اسمز معکوس

فرآیند غشایی به شیوه‌های فیزیکی برای جداسازی حلال از نمک‌های محلول در آن با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا اطلاق می‌شود. این فرآیندها در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی داشته است. سابقه استفاده از غشا برای صاف کردن به اوایل قرن بیستم باز می‌گردد. در دهه سوم قرن بیستم غشاها برای جداسازی، خالص‌سازی و یا غلیظ‌سازی محلول‌ها به ویژه سیال‌های حاوی میکرواورگانیزم‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سیر تکاملی این پدیده با انجام پژوهش‌ها بر روی ساخت انواع غشاها و شناخت فرآیند در طی زمان به گونه‌ای ادامه یافت که در حال حاضر این فرآیند یکی از شیوه‌های اصلی شیرین‌سازی آب محسوب می‌شود. فرآیندهای غشایی بر اساس اندازه کوچکترین ذره که تحت تاثیر نیروی فشاری از غشا عبور می‌کند به نام‌های زیر نامیده می‌شوند.

(الف) میکروفیلتراسیون (Micro filtration)

(ب) اولترافیلتراسیون (Ultra filtration)

(پ) نانوفیلتراسیون (Nano filtration)

در یک فرآیند غشایی به طور معمول دو فاز بوسیله فاز سوم که غشا می‌باشد از یکدیگر جدا گردیده‌اند. غشا تعیین‌کننده پدیده انتقال جرم است. هرکدام از دو فاز به صورت محلولی از جزءهای مختلف می‌باشد که برخی از این جزءهای عبوری مخفی و دیگر از این جزءها تهی می‌گردد. دو ویژگی اصلی در انتقال که توسط غشاء اعمال می‌شود عبارت هستند از:

۱- نفوذپذیری یا تراوایی (permeability)

۲- انتخاب‌گری یا گزینش پذیری (selectivity)

تمام موادی که به عنوان غشاء عمل می‌نماید دارای ویژگی عبور مواد مختلف به طور انتخابی هستند.

فرآیند غشایی دارای مزایای متنوع زیر می‌باشد:

۱- صرفه جویی در مصرف انرژی به دلیل عدم تغییر فاز

۲- کاهش فضای مورد نیاز به علت کم حجم بودن مدول‌های غشایی

۳- سریع تر بودن فرآیند به دلیل نازک بودن غشاء و بالا بودن سرعت انتقال جرم در آن

۴- توانایی انجام در دمای پایین که مزیت بالایی برای محلول‌های حساس به گرماست

۵- پایین بودن هزینه سرمایه گذاری در مقایسه با سایر روش‌ها در سطح جهانی

۶- سهولت در گسترش دادن سیستم

غشاها دارای عمر زیادی می‌باشند. عمر مفید غشاهای اولترافیلتراسیون بیش از دو سال و عمر مفید غشاهای اسمز معکوس بیش از پنج سال گزارش شده‌اند.

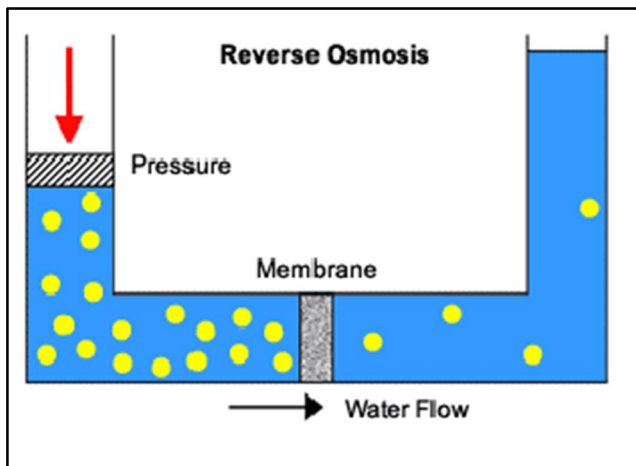
شناخت پدیده اسمز معکوس نیازمند شناسایی خاصیت اسمزی است. به طور کلی انتقال جرم از یک محیط به محیط دیگر در اختلاف غلظت یابه عبارت بهتر در اثر اختلاف پتانسیل شیمیایی به وجود می‌آید. به عنوان مثال ظرف آبی را در نظر بگیرید که یک قطعه بلور نمک طعام به درون آن انداخته می‌شود. در بخشی از ظرف که بلور نمک وجود دارد غلظت نمک زیاد و غلظت آب ناچیز است و در بخش دیگر ظرف غلظت نمک صفر غلظت آب بسیار زیاد است. در اثر اختلاف غلظت مولکول‌های بلور نمک، نفوذ به بخش دیگر را که آب است آغاز می‌نماید و از سوی دیگر مولکول‌های آب نیز به بخش بلور نمک نفوذ می‌کند. این عمل تا یکسان شدن غلظت آب و نمک در دو بخش ادامه می‌یابد.

خاصیت اسمزی به عبور یک حلال از بخش محلول رقیق به بخش محلول غلیظ از درون یک غشاء نیمه تراوا گفته می‌شود. تئوری اسمز معکوس با یک مثال در زیر آمده است.

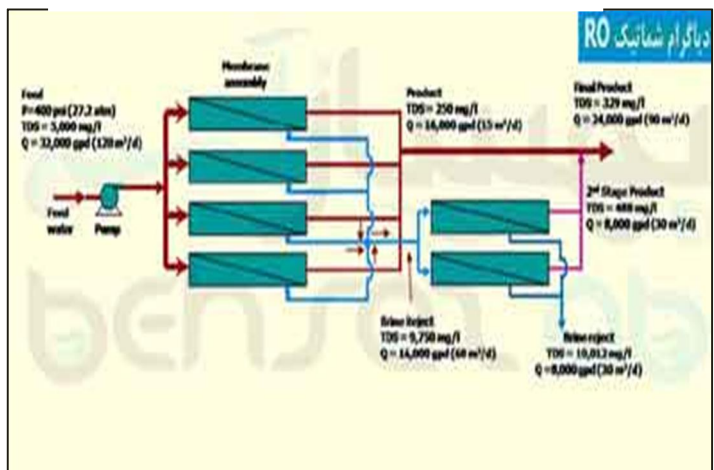
در ظرف سمت چپ شکل ۴، یک لوله در آب غوطه‌ور شده است همانطور که می‌بینید سطح آب داخل لوله و بیرون آن برابر است. در شکل میانی لوله دهانه غوطه‌ور را با یک غشاء نیمه تراوا می‌پوشانیم و داخل آن را آب شور می‌ریزیم، پس از چند لحظه سطح آب داخل لوله به علت حرکت آب شیرین به سمت آب شور برای ایجاد تعادل بالا می‌رود. این عمل را خاصیت اسمزی و ارتفاع آب داخل لوله را برابر فشار اسمز می‌نامند.

در اسمز معکوس با ایجاد فشار مصنوعی به سمت آب شور، جریان آب را (که در حالت طبیعی از سمت شیرین به سمت شور است) معکوس می‌کنیم به طوری که آب خالص از غشاء عبور کرده و نمک‌ها در سمت دیگر می‌مانند.

شکل ۴- شماتیک عملکرد روش اسمز معکوس



شکل ۵- دیاگرام شماتیک آب شیرین کن RO



### ۱-۱-۳ برخی از کاربردهای روش اسمز معکوس:

- تهیه و تولید آب شرب از آب‌های شور ( مصارف شرب)
- تهیه و تولید آب مورد نیاز جهت رشد سریع دام و طیور
- تامین و تولید مناسب جهت مصارف کشاورزی، گلخانه‌ای
- تامین و تولید آب فرآیندی کارخانه‌های داروسازی و لوازم بهداشتی
- تامین و تولید آب فرآیندی کارخانه‌های پتروشیمی، نساجی، کاغذسازی، رنگ‌سازی
- تولید آب مصرفی نیروگاه‌های بخاروسیکل ترکیبی
- تامین و تولید آب دستگاه‌های دیالیز بیمارستان‌ها
- بازیافت پساب‌های صنعتی

### ۱-۴ الکترودیالیز (ED)

فرآیند الکترودیالیز بصورت تجاری از اوایل دهه ۶۰ یعنی حدود ۱۰ سال قبل از RO به بازار عرضه شد. طراحی و ساخت سیستم الکترودیالیز راه موثری برای کاهش هزینه در فرآیند نمک زدایی آب های کم نمک ابداع کرد و در این زمینه موفقیت قابل ملاحظه‌ای بدست آورد.

فرآیند الکترودیالیز به اصول کلی زیر بستگی دارد:

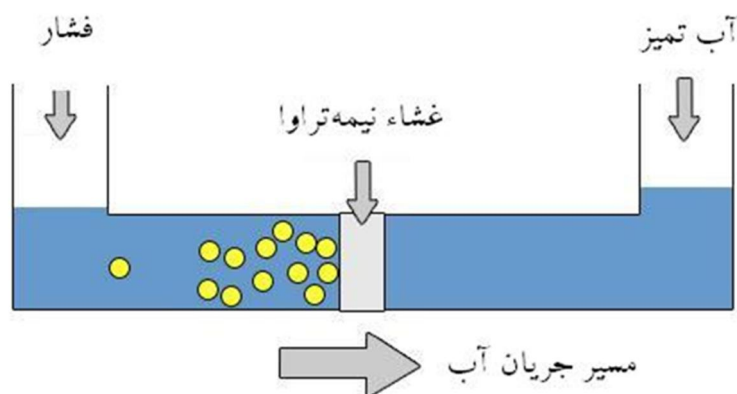
- اکثر نمک‌های محلول در آب، به شکل یون بوده و بصورت مثبت ( کاتیون ) یا منفی ( آنیون ) باردار می‌گردند.

- آنیون‌ها بوسیله بار الکتریکی مخالف الکترو، جذب آنان می‌شود.

- غشاءها را می‌توان طوری ساخت که بصورت انتخاب شده عبور آنیون‌ها یا کاتیون‌ها را امکان‌پذیر کنند.



اجزاء محلول شده یونی در یک محلول نمکی مثل سدیم + ، کلر - ، کلسیم ++ و کربنات - در آب توزیع و بخش می گردند و بطور موثر بارهای منفرد خود را خنثی می کنند. وقتی الکترودها به یک منبع جریان مستقیم مثل باطری متصل می گردند ، در داخل یک ظرف حاوی محلول آب نمک قرار گرفته ، جریان الکتریکی از میان محلول (الکترولیت ) عبور می کند. در این حالت یون هاسعی می کنند به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت کنند.



شکل ۶- روش الکترودیالیز

## ۱-۵ آب شیرین کن های ترکیبی

امروزه ترکیب آب شیرین کن های حرارتی و مکانیکی خصوصا در سیستم های تولید همزمان توان و حرارت بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

### ۱-۱-۵ آب شیرین کن ترکیبی MSF-RO

این سیستم از ترکیب آب شیرین کن MSF با RO ساخته شده است. این ترکیب باعث می شود که آب شیرین کن RO با TDS نسبی بیشتری کار می کند لذا تعویض ممبران آن دیرتر اتفاق می افتد. چنانچه از این طریق عمر مفید ممبران از ۳ به ۵ سال افزایش پیدا کند هزینه تعویض ممبران حدود ۴۰٪ کاهش می یابد. ویژگی اصلی این شیرین کن ها انعطاف پذیری در عملکرد، مصرف انرژی مخصوص کمتر، هزینه احداث کمتر و کویلینگ بهتر با نیروگاه های حرارتی جهت تولید همزمان توان و آب شیرین می باشد.

آب شور در ابتدای ورود به سیستم به دو قسمت تقسیم می شود. سهمی وارد RO و ما بقی وارد MSF می شود. محصول به دست آمده از MSF دارای خلوص بیشتری (TDS بیشتر) است. این دو محصول طوری با هم ترکیب می شوند که آب شیرین نهایی دارای TDS کمتر از ۵۰۰ باشد. (استاندارد سازمان جهانی سلامت W.H.O)

### ۲-۱-۵ آب شیرین کن ترکیبی NF-MSF

یک روش مناسب دیگر برای پیش تصفیه آب دریا استفاده از نانو فیلترها (NF) است. مزایای این روش کاهش و خارج کردن سختی‌های یونی  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{So}_4^{2-}$  و  $\text{Hco}_3^-$  از آب تغذیه است که رسوب‌زدگی در سطوح انتقال حرارت آب شیرین کن را کاهش می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که ماکزیمم دمای آب شور در آب شیرین کن‌های حرارتی و به تبع آن نسبت عملکرد افزایش یابد.

آب دریا پس از تصفیه وارد NF می‌شود. در آنجا پس از دفع بسیاری از سختی‌ها یونی وارد آب شیرین کن حرارتی MSF می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که با این روش می‌توان ماکزیمم دمای آب شور را به  $130^\circ\text{C}$  درجه افزایش داد و زمان مورد نیاز جهت رسوب زدایی از سطوح انتقال حرارت آب شیرین کن به  $1200$  ساعت افزایش می‌یابد.

### ۳-۱-۵ آب شیرین کن ترکیبی NF-RO-MSF

آب دریا پس از تصفیه وارد NF می‌شود. در آنجا پس از دفع بسیاری از سختی‌های یونی وارد آب شیرین کن مکانیکی RO می‌شود. آب شور غلیظ شده (پساب خروجی) از RO وارد آب شیرین کن حرارتی MSF می‌شود و در نهایت محصول خروجی از RO و MSF با هم ترکیب شده و آب شیرین با TDS مورد نظر حاصل می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که با این روش ماکزیمم دمای آب شور به  $130^\circ\text{C}$  درجه افزایش می‌یابد و زمان مورد نیاز جهت رسوب زدایی از سطح انتقال حرارت آب شیرین کن به  $976$  ساعت افزایش می‌یابد.

### ۱-۶ معرفی چند معیار برای عملکرد آب شیرین کن

جهت پی بردن به مقدار آب شیرین کن تولیدی و پارامترهای انتخابی چند معیار معرفی می‌گردد و سپس عملکرد آب شیرین کن با یکدیگر توسط این معیارها مقایسه می‌شود.

#### ۱-نسبت عملکرد (PR)

نسبت آب شیرین کن تولیدشده به مقدار بخار مصرفی را نسبت عملکرد آب شیرین کن حرارتی می‌گویند.

- $PR = m_w / m_m$

#### ۲-سطح انتقال حرارت مخصوص (SA)

سطح حرارتی مورد نیاز آب شیرین کن حرارتی برای تولید  $1$  کیلوگرم آب شیرین را سطح انتقال حرارت مخصوص می‌گویند.

- $\alpha = A / m_D$

A کل سطح حرارتی مورد نیاز که از مجموع سطح موثر و سطح کندانسور حاصل می‌شود.

#### ۳-اگزرژی مصرفی مخصوص :

مقدار اگزرژی مصرفی جهت تولید یک کیلوگرم آب شیرین را اگزرژی مصرفی مخصوص می‌نامند.

- $e_c = \frac{m_m(e_m - e_{hc})}{m_w}$

- $= (m_m [(h_m - h_{hc}) - T_0(S_m - S_{hc})]) / m_w$

براساس اطلاعاتی که از آژانس انرژی اتمی در سال ۲۰۰۶ منتشر نمود میزان حرارت و برق مصرفی مخصوص برای سه آب شیرین کن MSF و MED و RO مطابق جدول ۲-۲ ارائه می‌گردد.

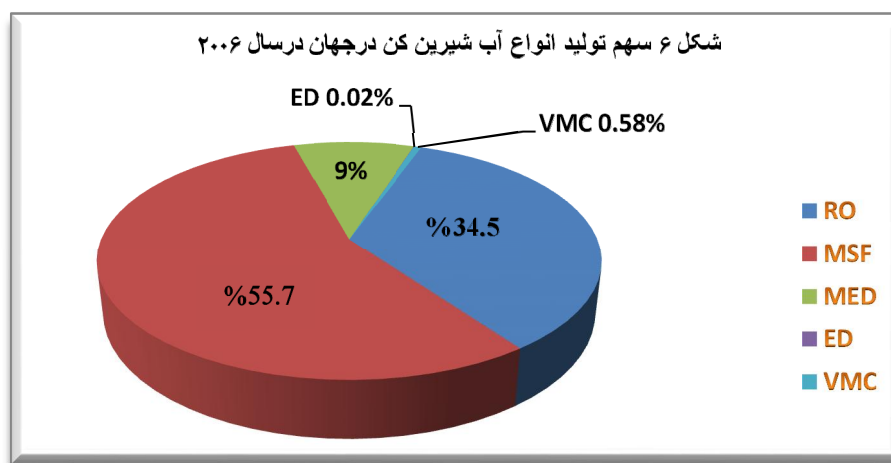
جدول ۲-۲ مقایسه برق مصرفی آب شیرین کن‌ها

آب شیرین کن	حرارت مصرفی مخصوص (کیلووات ساعت حرارتی بر متر مکعب)	برق مصرفی مخصوص (کیلووات ساعت الکتریکی بر متر مکعب)
MSF	۱۰۰	۳
MED	۵۰	۳
RO	۰	۴.۵-۳.۵

همانطور که مشاهده می‌شود آب شیرین کن مکانیکی RO دارای مصرف انرژی الکتریکی بیشتری به ازای تولید یک مقدار مشخص آب شیرین می‌باشد.

براساس آمار ارائه شده توسط اداره اطلاعات عمومی آب در سال ۲۰۰۹ میلادی مشاهده می‌گردد سهم تولید آب شیرین کن‌های MSF نسبت به MED بیشتر است.

سهم انواع آب شیرین کن‌ها در تولید آب شیرین جهان براساس آمار منتشر شده توسط اتحادیه بین‌المللی آبشیرین کن‌ها در سال ۲۰۰۶ میلادی در شکل ۶ نشان داده شده است.



**1-Thermoeconomic analysis with reliability consideration of a combined power and multi stage flash desalination plant.** Seyed Reza Hosseini, Majid Amidpour, Ali Behbahaninia

**2-Experimental study of a multiple-effect humidification solar desalination technique.** Mahmoud Ben Amara, Imed Houcine\*, Amenallah Guizani, Mohammed Mfialej

**3-Performance of MSF desalination plant components over fifteen years at Madinat Yanbu ASinaiyah.** Akili D. Khawaj , Jong-Mihn Wie

**4-MSF nuclear desalination.** Ron S. Falblsh , Hisham Ettouney *International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria*

**Δ-Advances in seawater desalination technologies.** Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubkhanah, Jong-Mihn Wie

**6-Teaching water desalination through active learning** Muftah H. El-Naas

**7-Thermoeconomic analysis with reliability consideration of a combined power and multi stage flash desalination plant.** Seyed Reza Hosseini, Majid Amidpour, Ali Behbahaninia

**λ-Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications**

Kha L. Tua, Long D. Nghiema, \*, Allan R. Chivas

**9-Seawater Desalination by electrodialysis. Part II: a novel approach to combat scaling in Seawater Desalination by electrodialysis.** S.K. Thampy, P.K. Narayanan, W.P. Harkare, K.P. Govinda

**١٠-Operation and reliability of very high-recovery seawater desalination technologies by brine conversion two-stage Ro desalination system.** Masaru Kurihara, Hiroyuki Yamamura, Takayuki Nakanishi, Synichirou Jinno