

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

موضوع :

اصلاح و ارزیابی غشاهای کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی لایه نازک اسمز رو به

جلو

استاد راهنما :

دکتر محسن جهانشاهی

استاد مشاور:

دکتر احمد رحیم پور

اساتید داور:

دکتر مصطفی رحیم نژاد

دکتر محسن قربانی

نام دانشجو:

نوید نیک صفت اباتری

شهریور ماه ۱۳۹۲

تقدیم به عزیزانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگی، مدیون حضور آنهاست.

تقدیم به خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی:

از زحمات بی شائبه و راهنمائی‌های جناب آقایان دکتر محسن جهانشاهی و دکتر احمد رحیم پور که مرا در تهیه‌ی این پایان‌نامه یاری رساندند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

## چکیده

اسمز مستقیم فرآیندی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. اسمز مستقیم یک فرآیند جداسازی غشایی است که بر خلاف فرآیند اسمز معکوس از اختلاف فشار اسمزی (اختلاف غلظت) در دو سمت غشا بهره می‌برد و سبب انتقال آب از غشای نیمه تراوا می‌گردد. بنابراین اسمز مستقیم به دلیل مزایای زیادی از جمله گرفتگی اندک غشا و هزینه پایین عملیاتی در مقایسه با اسمز معکوس در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفت. در این تحقیق غشاهای لایه نازک نانوکامپوزیتی به منظور استفاده در فرآیند اسمز مستقیم به روش پلیمریزاسیون سطحی بر روی زیر لایه پلی‌سولفونی سنتز شد. تأثیر شرایط مختلف ساخت غشا از جمله، غلظت مونومرهای آبی و آلی، زمان واکنش، دما و زمان پخت، و تأثیر نانو ذرات سیلیکا (۲۰-۱۵ نانومتر) بر روی عملکرد و ساختار غشاهای اسمز مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. غشاهای ساخته شده با اسپکتومتر مادون قرمز، میکروسکوپ الکترونی روبشی و اندازه‌گیری آب دوستی سطح مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد فرآیند اسمز مستقیم با استفاده از محلول ۱۰ میلی مولار نمک سدیم کلراید به عنوان خوراک و محلول ۲ مولار نمک سدیم کلراید به عنوان محلول اسمزی در هر دو جهت گیری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که افزایش غلظت<sup>۱</sup> MPD و<sup>۲</sup> TMC، افزایش زمان واکنش و افزایش دمای پخت غشا سبب بهبود میزان پس زنی نمک و کاهش تراوش پذیری غشا می‌گردد. در بهینه‌ترین شرایط ساخت غشا (۰/۱ درصد وزنی TMC، ۲ درصد وزنی MPD، زمان واکنش ۳۰ ثانیه و دما پخت ۸۰°C) میزان پس‌زنی ۷۲٪ و فلاکس آب ۱۰/۳ Lit/m<sup>2</sup>h حاصل گردید. بعد از افزودن نانو ذرات سیلیکا در درصدهای وزنی مختلف (۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۱) به محلول آبی، آب دوستی سطح غشا با افزایش غلظت نانو ذرات بیشتر شد. مطالعات ساختاری غشا نشان داد که حضور نانو ذرات مورفولوژی سطح غشا اصلاح شده را تغییر داد و همچنین مشاهده شد که نانو ذرات سیلیکا در ساختار غشا به خوبی پراکنده شده‌اند. غشاهای نانوکامپوزیتی در غلظت‌های بین wt% ۰/۱-۰/۱۱ نانو ذرات سیلیکا میزان تراوش پذیری و پس زنی بالاتری نسبت به غشای کامپوزیتی دارا هستند. در بهترین حالت غشای نانوکامپوزیتی دارای فلاکس (۳۶/۳۵ Lit/m<sup>2</sup>h) می‌باشد که تقریباً دو برابر فلاکس غشاهای کامپوزیتی است.

کلمات کلیدی: نانو ذره سیلیکا، غشای لایه نازک نانوکامپوزیتی، اسمز مستقیم

---

1- m-Phenylenediamine

2-Trimesoyl chloride

## فهرست مطالب

### فصل اول

- ۱-۱. مقدمه ..... ۲
- ۲-۱. فرآیندهای متداول نمک‌زدایی ..... ۴
- ۱-۲-۱. فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی ..... ۴
- ۱-۱-۲-۱. تقطیر فلش چند مرحله‌ای ..... ۵
- ۲-۱-۲-۱. تقطیر چند مرحله‌ای ..... ۶
- ۳-۱-۲-۱. تقطیر تراکم بخار ..... ۷
- ۲-۲-۱. فرآیند غشایی در نمک‌زدایی ..... ۸
- ۱-۲-۲-۱. الکترودیالیز ..... ۹
- ۲-۲-۲-۱. اسمز معکوس ..... ۱۱
- ۳-۲-۲-۱. تقطیر غشایی ..... ۱۳
- ۳-۱. غشاهای اسمزی ..... ۱۵
- ۴-۱. نیاز به روشهای نمک‌زدایی پیشرفته ..... ۱۷
- ۵-۱. روش نمک‌زدایی نوین - اسمز مستقیم ..... ۲۰
- ۶-۱. تئوری اسمز مستقیم ..... ۲۲
- ۱-۶-۱. محاسبه فشار اسمزی ..... ۲۲
- ۲-۶-۱. محاسبه فلاکس آب ..... ۲۳

- ۳-۶-۱. مدل فلاکس آب ..... ۲۳
- ۴-۶-۱. قطبش غلظتی خارجی ..... ۲۴
- ۵-۶-۱. قطبش غلظت داخلی ..... ۲۵
- ۶-۶-۱. مدلسازی قطبش غلظتی داخلی ..... ۲۷
- ۷-۱. پژوهشهای انجام شده در زمینه ی اسمز مستقیم ..... ۲۸
- ۱-۷-۱. غشاهای اسمز مستقیم ..... ۲۸
- ۲-۷-۱. محلولهای اسمزی ..... ۳۰
- ۸-۱. محدودیتهای نمک زدایی با استفاده از فرآیند اسمز مستقیم ..... ۳۴
- ۹-۱. اهداف پایان نامه ..... ۳۴

## فصل دوم

- ۱-۲. مواد مورد استفاده ..... ۳۷
- ۲-۲. نحوه ساخت غشا ..... ۳۸
- ۱-۲-۲. ساخت غشای الترافیلتراسیون ..... ۳۸
- ۲-۲-۲. ساخت غشای کامپوزیتی اسمز مستقیم ..... ۳۸
- ۳-۲. روش انجام آزمایشهای بررسی عملکرد ..... ۳۹
- ۱-۳-۲. اندازه گیری مشخصات جداسازی غشا ..... ۳۹
- ۲-۳-۲. اندازه گیری عملکرد اسمز مستقیم ..... ۴۰
- ۳-۳-۲. اندازه گیری پارامتر ساختاری غشا ..... ۴۱
- ۴-۲. تست های گرفته شده برای بررسی ساختار غشاها ..... ۴۲

- ۴۲-۱-۴-۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی ..... ۴۲
- ۴۲-۲-۴-۲. AFM آزمون ..... ۴۲
- ۴۴-۳-۴-۲. آزمون زاویه تماس ..... ۴۴
- ۴۴-۴-۴-۲. FTIR-ATR آزمون ..... ۴۴
- ۴۵-۵-۴-۲. تعیین تخلخل غشا ..... ۴۵
- ۴۵-۶-۴-۲. SET-UP آزمایشگاهی ..... ۴۵
- ۴۹-۱-۳. بررسی عوامل مختلف بر عملکرد غشای اسمز مستقیم ..... ۴۹

### فصل سوم

- ۴۹-۱-۳-۱. تاثیر غلظت محلول آبی و آلی بر عملکرد غشا اسمز مستقیم ..... ۴۹
- ۵۲-۲-۱-۳. زمان واکنش ..... ۵۲
- ۵۳-۳-۱-۳. زمان و دمای پخت ..... ۵۳
- ۵۴-۲-۳. مطالعات ساختاری ..... ۵۴
- ۵۴-۱-۲-۳. میکروسکوپ الکترونی روبشی ..... ۵۴
- ۵۷-۲-۲-۳. میکروسکوپ نیروی اتمی ..... ۵۷
- ۵۸-۳-۲-۳. زاویه تماس ..... ۵۸
- ۵۹-۴-۲-۳. FTIR-ATR آزمون ..... ۵۹
- ۶۰-۴-۲-۳. تعیین تخلخل غشا ..... ۶۰
- ۶۱-۵-۲-۳. تاثیر غلظت نانوذره سیلیکا بروی پارامترهای جداسازی غشا ..... ۶۱
- ۶۳-۶-۲-۳. تاثیر غلظت نانو ذرات سیلیکا بر عملکرد فرایند اسمز مستقیم ..... ۶۳



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمک زدایی به روش فلش چند مرحله ای ..... ۶
- شکل ۱-۲. نمک زدایی به روش تقطیر چند مرحله ای ..... ۷
- شکل ۱-۳. نمک زدایی به روش تراکم بخار ..... ۸
- شکل ۱-۴. فرایند الکترودیالیز ..... ۱۱
- شکل ۱-۵. اسمز معکوس ..... ۱۳
- شکل ۱-۶. فرایند اسمز معکوس ..... ۱۳
- شکل ۱-۷. هزینه های فرایند های نمک زدایی گرمایی ..... ۱۸
- شکل ۱-۸. درصد هزینه های فرایند اسمز معکوس ..... ۱۸
- شکل ۱-۹. درصد کاربرد روشهای مختلف نمک زدایی در خاورمیانه ..... ۱۹
- شکل ۱-۱۰. فرایندهای اسمزی ..... ۲۱
- شکل ۱-۱۱. (۱) پروفایل غلظت در غیاب ICP (۲) پروفایل غلظت در حضور ECP ..... ۲۶
- شکل ۱-۱۲. پروفایل غلظت با در نظر گرفتن ICP ..... ۲۷
- شکل ۱-۱۳. فشار اسمزی اندازه گیری شده در غلظت های مختلف ..... ۳۱
- شکل ۱-۱۴. استفاده از آمونیوم بی کربنات به عنوان محلول اسمزی ..... ۳۳
- شکل ۲-۱. SET-UP آزمایشگاهی ..... ۴۵
- شکل ۲-۲. تصویر SET-UP آزمایشگاهی ..... ۴۶

- شکل ۳-۱. الف. تاثیر غلظت MPD بر روی تراوش پذیری ب. تاثیر غلظت MPD بر روی پس زنی ..... ۵۰
- شکل ۳-۲. الف. تاثیر غلظت TMC بر روی تراوش پذیری ب. تاثیر غلظت TMC بر روی پس زنی ..... ۵۱
- شکل ۳-۳. الف. تاثیر زمان واکنش بر روی تراوش پذیری ب. تاثیر زمان واکنش بر روی پس زنی ..... ۵۲
- شکل ۳-۴. الف. تاثیر دمای پخت بر روی تراوش پذیری ب. تاثیر دمای پخت بر روی پس زنی ..... ۵۳
- شکل ۳-۵. تصاویر عرضی گرفته شده بامیکروسکوپ الکترونی از غشای TFN۰/۰۵ ..... ۵۵
- شکل ۳-۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح غشا ..... ۵۶
- شکل ۳-۷. تصاویر گرفته شده از سطح غشاهای سنتز شده با میکروسکوپ اتمی ..... ۵۷
- شکل ۳-۸. آزمون FTIR-ATR ..... ۶۰
- شکل ۳-۹. تاثیر غلظت نانو ذرات بر عملکرد اسمز مستقیم ..... ۶۵

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱. میزان استفاده از کل ظرفیت نمک زدایی ..... ۹
- جدول ۱-۲. مواد مورد استفاده ..... ۳۷
- جدول ۱-۳. تاثیر غلظت نانو ذره سیلیکا بر روی پارامتر ساختاری غشا ..... ۵۶
- جدول ۲-۳. پارامترهای تعیین زبری سطح ..... ۵۸
- جدول ۳-۳. تاثیر غلظت نانو ذره سیلیکا بر روی میزان آب دوستی ..... ۵۹
- جدول ۴-۳. تاثیر غلظت نانو ذره سیلیکا بر روی تخلخل غشا ..... ۶۱
- جدول ۵-۳. تاثیر نانو ذرات بر مشخصه ای جداسازی غشا ..... ۶۲

# فصل ۱:

## مقدمه و طرح مسئله

---

## ۱-۱. مقدمه

آب یکی از پارامترهای ضروری برای حفظ یک محیط سالم در جوامع امروزی به شمار می‌آید. حدود ۷۵٪ از سطح زمین را آب فراگرفته است و تقریباً ۹۷٪ از آب سطحی را آب دریا و اقیانوس شامل می‌شود و حدود ۲٪ در توده‌های یخ محفوظ شده است [۱]. اگرچه آب در دسترس بسیار فراوان است اما آب شیرین به راحتی از این منابع نامحدود قابل استخراج نیست. در یک دهه‌ی گذشته، آگاهی جوامع بشری نسبت به نقش آب شیرین به عنوان منبع مهم و حیاتی افزایش یافته است [۲]. کشورهای زیادی در جهان از کمبود آب سالم رنج می‌برند به علاوه به دلیل رشد صنایع مختلف، کشاورزی، جمعیت و بهبود استانداردهای زندگی، نیاز به آب سالم رشد چشم‌گیری یافته است [۳]. طبق آمار سازمان بهداشت جهانی حدود ۲۵٪ از جمعیت جهان در کشورهایی زندگی می‌کنند که به دلیل کمبود زیرساخت‌ها و امکانات برای تصفیه‌ی آب رودخانه‌ها و سفره‌های زیر زمینی به آب سالم دسترسی ندارند [۴]. خاورمیانه و شمال آفریقا حدود ۶/۳ درصد از جمعیت جهان را در خود جای داده است در حالی که ۱/۴ درصد از آب شیرین تجدیدپذیر در این مناطق وجود دارد [۵]. با افزایش جمعیت، تقاضا برای آب شیرین افزایش پیدا کرده است، اما عرضه‌ی آن با این افزایش هم راستا نیست. در واقع، طبق پیش‌بینی‌های به عمل آمده در سال ۲۰۲۵ بیش از ۶۰٪ جمعیت جهان ممکن است کمبود آب را تجربه کنند. مگر اینکه کشور های جهان، به ویژه کشورهای توسعه یافته مصرف را کاهش دهند و یا از منابع جدیدی برای تأمین آب بهره‌مند شوند [۶، ۷].

با توجه به حجم زیاد دریا در خاورمیانه و آفریقا، از نقطه نظر فنی دسترسی به آب شیرین نامحدود است اما آب دریا برای مصرف بشر باید مورد تصفیه قرار گیرد. شیرین‌سازی یکی از روش‌های جداسازی است که آب شور را به دو جریان تبدیل می‌کند، یک جریان آب نسبتاً خالص و دیگری آبی با غلظت بالای نمک.

طبق آمار، بیش از ۷۵ میلیون نفر در جهان، آب شیرین مورد نیاز خود را از روش‌های شیرین‌سازی آب دریا تأمین می‌کنند. با توجه به گزارشات به عمل آمده حدود ۱۸۰۰۰ واحد صنعتی برای شیرین کردن آب با ظرفیت تولید ۳۸ میلیون مترمکعب آب در هر روز نصب و راه‌اندازی شده است. اما با توجه به هزینه‌ی بالای شیرین‌سازی آب دریا، محققین در تلاش هستند که روشی مناسب برای این مقصود پیدا کنند. در

نتیجه بیش‌تر روش‌های جدید شیرین‌سازی بر روی مقوله‌ی کاهش هزینه‌ها برای تأمین آب سالم متمرکز شده‌اند [۸،۹].

به این نکته می‌توان اذعان داشت که سراسر جهان دچار کمبود آب شده است به ویژه منطقه‌ی خاورمیانه، که یکی از کم‌آب‌ترین مناطق جهان است. در کشورهای حوزه خلیج فارس خشکی زیاد آب و هوا منجر به تبخیر حجم بالای منابع آبی می‌شود. علاوه بر این بارندگی کم نیز سبب کمبود آب در این مناطق شده است [۱۰]. این کشورها آب مورد نیاز خود را از تصفیه آب و فاضلاب، شیرین‌سازی آب و منابع زیرزمینی تأمین می‌کنند [۱۱]. اما در سال‌های اخیر آب‌های زیرزمینی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و امروزه حجم قابل توجهی از آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب آشامیدنی این مناطق وجود ندارد. در سال‌های اخیر، تعداد واحدهای شیرین‌سازی آب بطور چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است [۱۲-۱۴]. اگرچه افزایش ظرفیت کارخانه‌های آب شیرین‌کن منجر به برطرف کردن بخش عمده‌ای از نیازهای جامعه شده است اما این امر سبب افزایش هزینه‌های اقتصادی در بخش نمک زدایی شده است. متأسفانه روش‌های متداول نمک زدایی شامل  $MSF^1$  و  $RO^2$  نیازمند مقدار زیادی انرژی است که منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شود [۱]. به همین دلیل یک فرآیند با هزینه کم و مصرف پایین انرژی برای شیرین‌سازی آب مورد نیاز است، در نتیجه پیدا کردن فناوری مناسب برای نمک زدایی از آب یکی از نگرانی‌های جامعه علمی است..

تصور می‌شود نمک زدایی با استفاده از اسمز مستقیم یک گزینه امیدوارکننده است که می‌تواند بطور قابل توجهی سبب کاهش هزینه‌ها در تولید آب آشامیدنی شود.

## ۲-۱. فرآیندهای متداول نمک‌زدایی

از جمله فرآیندهای نمک‌زدایی می‌توان به جداسازی غشایی، تبخیر گرمایی، الکترودیالیز اشاره کرد [۲۰-۱۴]. به طور کلی، فرآیندهای نمک‌زدایی به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- تغییر فاز یا فرآیندهای گرمایی

۲- فرآیندهای غشایی

فلش چندمرحله‌ای، جوشاندن چند مرحله‌ای، تراکم بخار، انجماد، رطوبت‌دهی و رطوبت‌زدایی از جمله فرآیندهای تغییر فاز هستند و اسمز معکوس، تقطیر غشایی و الکترودیالیز از جمله فرآیندهای غشایی می‌باشند [۲۱-۲۳].

اما، فرآیندهای تقطیر فلش چند مرحله‌ای و اسمز معکوس، مهمترین تکنیک نمک‌زدایی صنعتی می‌باشند. در حقیقت، در سال ۱۹۹۹، تقریباً ۷۸٪ از کل ظرفیت نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از روش MSF بود. از سوی دیگر، RO تنها ۱۰٪ از کل ظرفیت نمک‌زدایی آب دریاها را به خود اختصاص داده است [۲۴-۲۶].

### ۱-۲-۱. فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی

ساده‌ترین فرآیند حرارتی برای نمک‌زدایی، تقطیر می‌باشد. خوراک آب نمک برای تولید بخار گرمادهی می‌شود سپس برای تولید آب مقطر با غلظت پایین‌تر نمک، چگالش می‌یابد. آب چگالش یافته می‌تواند برای اهداف صنعتی، آبیاری یا خانگی به کار رود. در فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی، فشار به طور کلی برای کاهش مقدار گرمای مورد نیاز برای تبخیر خوراک کاهش می‌یابد. فرآیندهای نمک‌زدایی گرمایی دارای قابلیت کاهش نمک آب شور تا  $10 \text{ mg/L}$  یا کمتر، از  $70,000 - 60,000 \text{ mg/L}$  TDS هستند. روش‌های متعددی از تقطیر برای نمک‌زدایی در مقیاس صنعتی به کار می‌روند:

• تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای (MSF)

• تقطیر چند مرحله‌ای (MED)<sup>۱</sup>

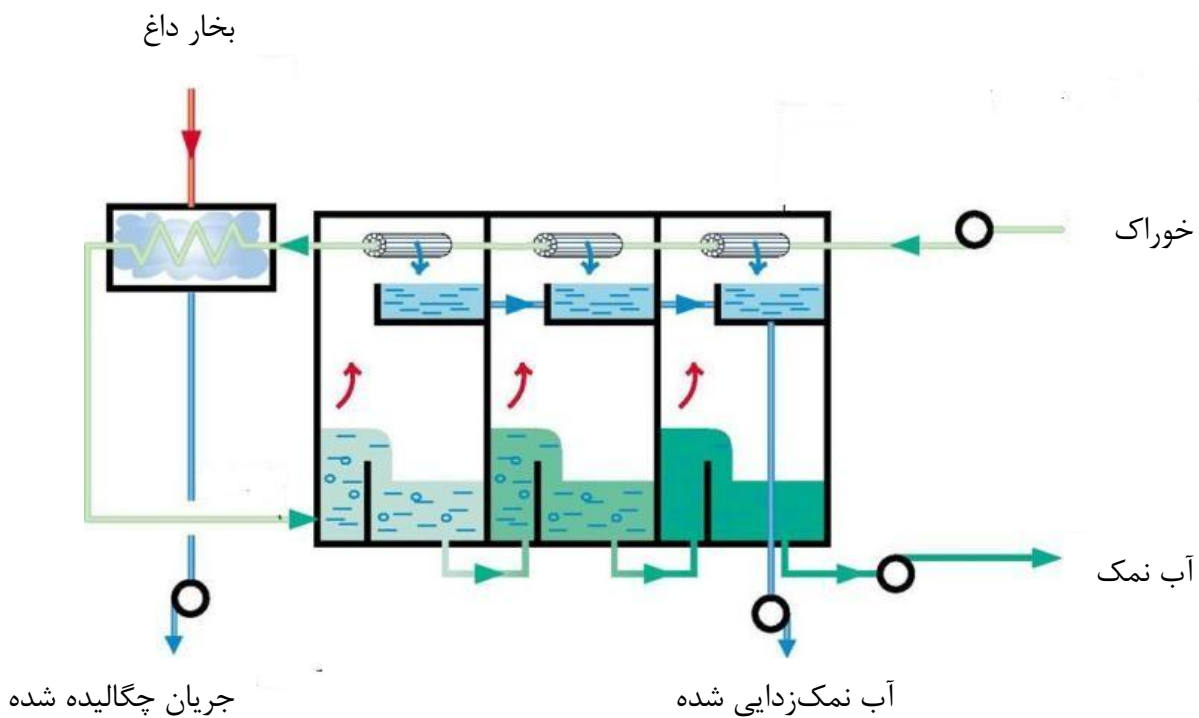
• تراکم بخار<sup>۱</sup> (VCD)

۱-۲-۱-۱. تقطیر فلش چند مرحله‌ای

تقطیر فلش چند مرحله‌ای اکثراً در خلیج فارس مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت، شناخته شده‌ترین تکنیک به کار رفته برای نمک‌زدایی می‌باشد [۲۷]. شکل ۱-۱ طرح ساده شده از تقطیر MSF را نشان می‌دهد [۲۳].

این کار عمدتاً از طریق چگالش بخار روی تعدادی لوله موازی که از داخل محفظه عبور کرده و در عین حال آب دریا را گرم می‌کنند، انجام می‌شود. سپس آب دریا گرم شده به داخل محفظه دیگری که مرحله تبخیر کننده نامیده می‌شود، جریان یافته و در آنجا فشار در حدی تنظیم می‌گردد که آب بلافاصله به جوش می‌آید، تغذیه ناگهانی آب گرم به داخل اطاقک باعث به جوش آمدن سریع آن می‌گردد [۲۸-۳۱]. در واقع آب به صورت انفجاری به بخار تبدیل می‌گردد. این تبدیل به فشار کنترل شده در این مرحله بستگی دارد، زیرا فرآیند جوشش تنها تا زمانی ادامه می‌یابد که آب سرد شود. به طور معمول یک مجموعه آب شیرین کن MSF می‌تواند شامل ۴ تا ۴۰ مرحله باشد [۲۳، ۲۵]. بخار تولید شده از طریق فرآیند فلش پس از چگالیدن بر روی لوله های مبدل حرارتی که در طول هر مرحله تعبیه شده اند، به آب شیرین تبدیل می‌گردد. MSF معمولاً با حداکثر دمای تغذیه ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد عمل می‌کند. یکی از عواملی که بر روی راندمان حرارتی واحد تاثیر دارد، اختلاف بین دما از گرمکن آب شور تا چگالنده کندانسور است [۳۲]. عموماً، آب حاصل از فرآیند MSF دارای غلظت بسیار پایینی از نمک در حدود ۱۰-۲ ppm می‌باشد. هزینه اجرایی در صورتی که حرارت برای تقطیر موجود نباشد، بالاست [۳۳-۳۶].





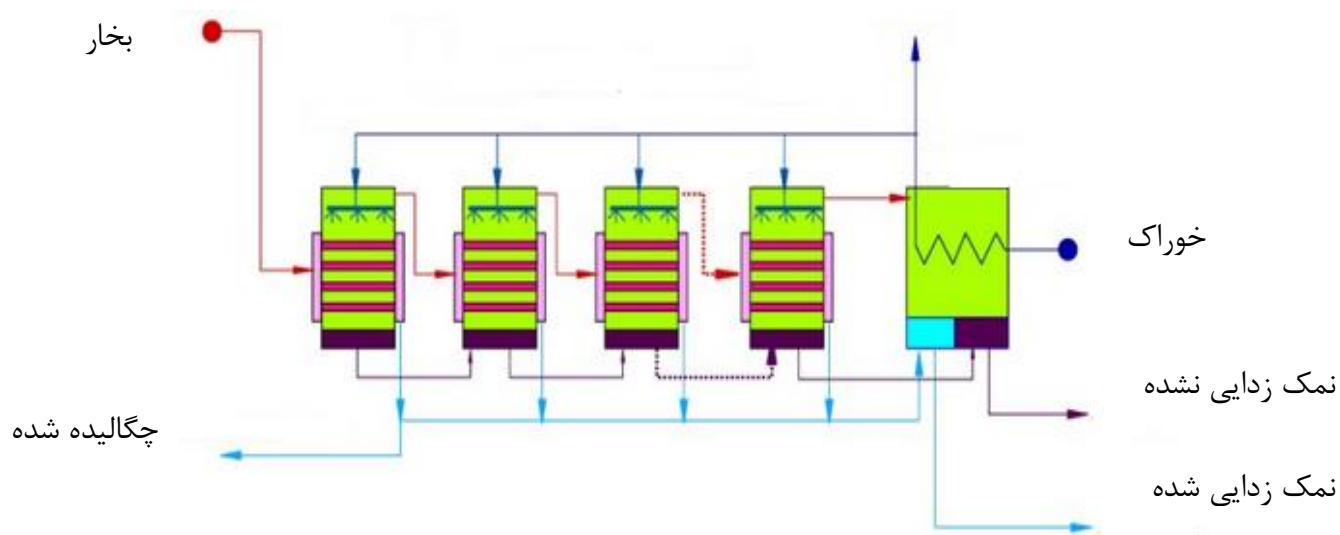
شکل ۱-۱. نمک زدایی به روش فلش چند مرحله ای [۲۳]

### ۱-۲-۱-۲. تقطیر چند مرحله ای

فرآیند تقطیر چند مرحله ای به تبخیر ناگهانی چند مرحله ای شباهت دارد با این تفاوت که بخار برای تبخیر آب دریا در اولین مرحله استفاده می شود [۳۷].

به این ترتیب آب تغذیه شده از دریا فرصت می یابد تا مراحل قلیان را طی کند، بدون اینکه حرارت و انرژی بیشتری به مراحل بعدی تزریق شود. در اکثر واحدهای MED آب دریا بطور موازی و همزمان وارد کلیه مراحل می گردد و بعد از اینکه در لوله ها، گرمای اولیه را دریافت کرد به نقطه جوش می رسد [۳۸-۴۰]. آب دریا یا بصورت اسپری بر روی لوله ها پاشیده می شود یا به شکل لایه نازک بر روی آنها توزیع می گردد. در هر دو صورت عملیات قلیان و تبخیر تسریع می گردد. بخاری که در یک دیگ بخار یا وسیله مشابه تولید شده است لوله ها را گرم کرده و روی جداره داخلی لوله ها چگالیده می گردد. بخار کندانس شده برای استفاده مجدد وارد دیگ بخار می شود.

این عملیات طی مراحل متعدد که در برخی واحدهای بزرگ تعداد آنان به ۴ تا ۱۶ عدد می رسد، ادامه پیدا می کند. باقیمانده آب دریا از هر مرحله به مرحله بعد جریان می یابد [۴۱].



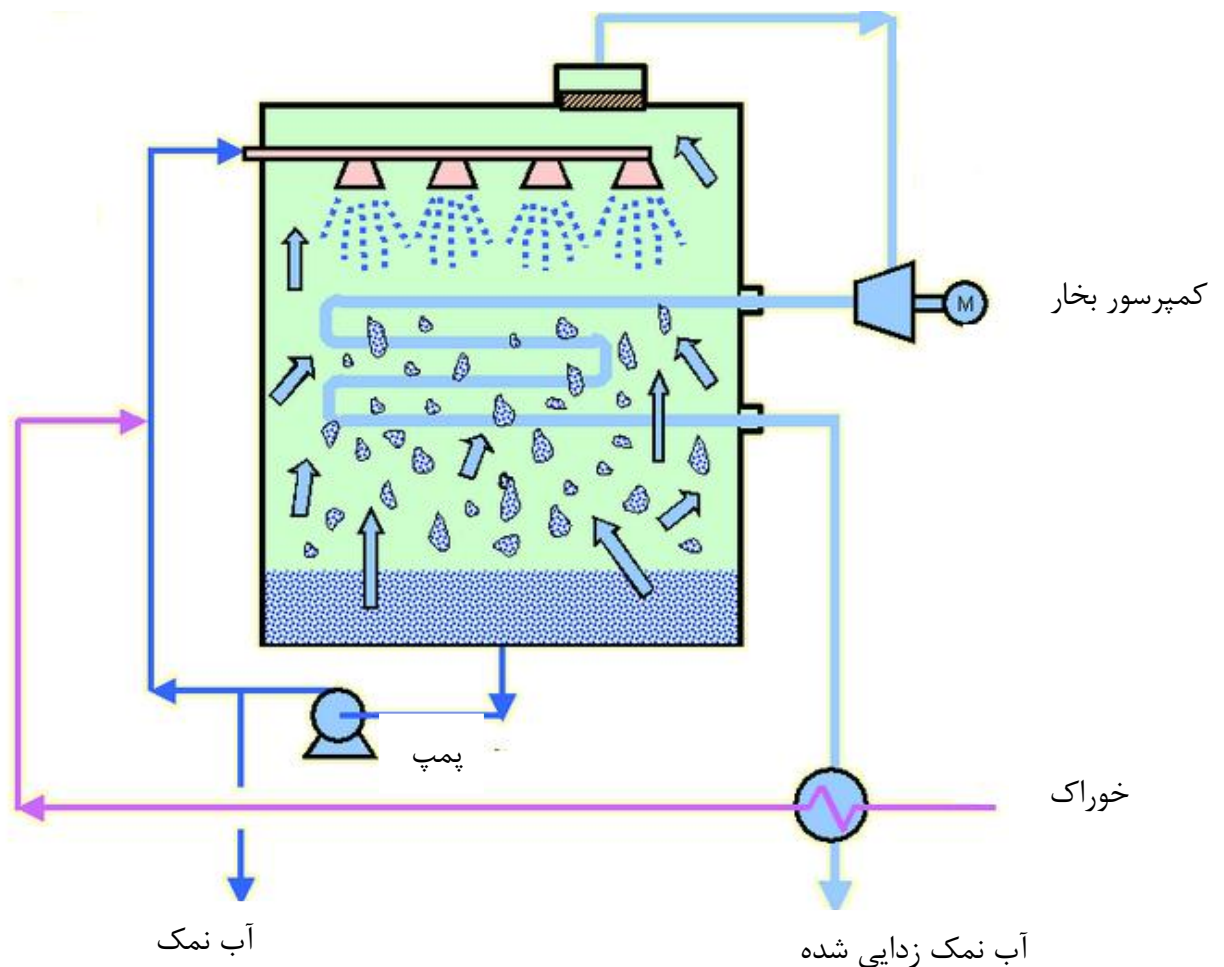
شکل ۱-۲. نمک زدایی به روش تقطیر چند مرحله ای [۲۳]

### ۱-۲-۳. تقطیر تراکم بخار

فرآیند VCD عموماً در واحدهای کوچک و متوسط آب شیرین کن کاربرد دارد. حرارت مورد نیاز تبخیر آب به جای تبادل مستقیم انرژی حاصل از بخار تولیدشده در دیگ بخار، از طریق تراکم بخار تأمین می گردد [۴۲].

واحدهایی که از این سیستم استفاده می کنند، عموماً براساس اصل کاهش نقطه جوش از طریق کاهش فشار، طراحی می شوند. یکی از سیستم هایی که جهت چگالش بخار مورد استفاده قرار می گیرد تا دمای لازم برای تبخیر آب ورودی از دریا را تأمین کند، مجهز به کمپرسورهای مکانیکی می باشد [۴۳].

نیروی کمپرسورهای مکانیکی معمولاً توسط موتورهای الکتریکی تأمین می گردد تا تقطیر آب به صورت الکتریکی صورت گیرد. به منظور افزایش سطح تبادل حرارت برای تبخیر آب دریا واحدهای VCD درمدل های متنوعی ساخته می شوند [۲۳].



شکل ۱-۳. نمک زدایی به روش تراکم بخار [۲۳]

### ۱-۲-۲. فرآیند غشایی در نمک زدایی

فرآیندهای غشایی به طور گسترده در نمک زدایی آب دریا به کار می‌روند. اسمز معکوس و الکترودیالیز دو فرآیند نمک زدایی غشایی متداول در مقیاس صنعتی هستند که اسمز معکوس، پرکاربردترین فرآیند در این صنعت می‌باشد. جدول ۱-۱ درصد تولید آب نمک زدایی شده را از فرآیندهای مختلف در سراسر جهان نشان می‌دهد [۴۴-۴۸].

فرآیند غشایی می‌تواند تا حد زیادی از مشکلات جداسازی را حل کند. غشاهای مورد استفاده در فرآیندهای جداسازی را می‌توان بر اساس نیرو محرکه‌ای که موجب جریان یافتن تراوش کننده از میان غشا می‌شود

طبقه بندی کرد. مفهوم نمک‌زدایی غشایی پیرامون توانایی غشاهای نیمه تراوای انتخابگر با امکان عبور مولکول‌های آب از سطح غشا مطرح می‌شود.

جدول ۱-۱. میزان استفاده از کل ظرفیت نمک‌زدایی [۴۸]

روش نمک‌زدایی	میزان استفاده از کل ظرفیت نمک‌زدایی در جهان
RO	۴۶ درصد
MSF	۳۶ درصد
ED	۵ درصد
VCD	۵ درصد
ED	۳ درصد
سایر روش‌ها	۵ درصد

#### ۱-۲-۲-۱. الکترودیالیز

غشاهای تبادل یونی در فرآیندهای جداسازی مختلفی کاربرد دارند که از مهمترین آنها می‌توان به الکترودیالیز اشاره کرد. در غشاهای تبادل یونی گروه‌های باردار به زنجیره پلیمری ماده غشاء حمله ور می‌شوند. این گروه‌های باردار ثابت، به صورت جزئی یا به صورت کامل، مانعی برای بارهای مشابه، در روی غشاء ایجاد می‌کند. بدین معنی که غشاهای آنیونی با گروه‌های مثبت ثابت، مانع از عبور یونهای مثبت می‌شود در حالیکه یونهای با بار منفی به راحتی از آن عبور می‌کنند. به طور مشابه، یک غشاء کاتیونی دارای بار منفی ثابتی است که فقط یونهای با بار مثبت می‌توانند از آنها عبور کنند. شکل ۱-۴، نمودار اولیه یک سلول الکترودیالیز را نشان می‌دهد.

در یک سیستم الکترودیالیز، غشاهای آنیونی و کاتیونی درون یک سل چندگانه براساس طرح صفحه و قاب قرار داده می‌شوند به طوری که بیش از ۱۰۰ جفت سل در یک بسته شکل می‌گیرند. غشاهای تبادل آنیونی