

مروری بر کاربردهای فرایند غشایی اسمز مستقیم

محسن باهوش^۱، سهیلا شکرالله‌زاده^{۲*}، اسلام کاشی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۲- دانشیار مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۹

پیام‌نگار: shokrollahzadeh@irost.ir

چکیده

فرایند اسمز پدیده‌ای فیزیکی است که در آن به علت خواص و ساختار غشا و وجود گرادیان غلظت مواد حل‌شونده، جریان آب در غشاء برقرار می‌شود. اسمز مستقیم یکی از فرایندهای اسمزی است که در سال‌های اخیر توجه بیشتری را جلب کرده است. با این‌که هنوز برای تجاری‌سازی و صنعتی شدن این فرایند، به علت برخی محدودیت‌ها مانند دستیابی به محلول کِشنده مناسب و ساختار غشایی بهینه، مشکلاتی وجود دارد، ولی براساس مطالعات انجام‌شده، می‌توان از این روش در صنایع مختلفی از جمله: صنایع غذایی، نمک‌زدایی آب، تصفیه فاضلاب‌ها، صنایع دارویی و تولید برق استفاده کرد. در این مقاله سعی شده است صنایعی که فرایند اسمز مستقیم در آن‌ها از نظر عملیاتی، بهره‌وری مناسبی دارد یا از توانایی‌های بالقوه برخوردار است، بررسی شود.

کلیدواژه‌ها: فرایندهای غشایی اسمزی، اسمز مستقیم، شیرین‌سازی آب، تصفیه فاضلاب، پیش‌تصفیه

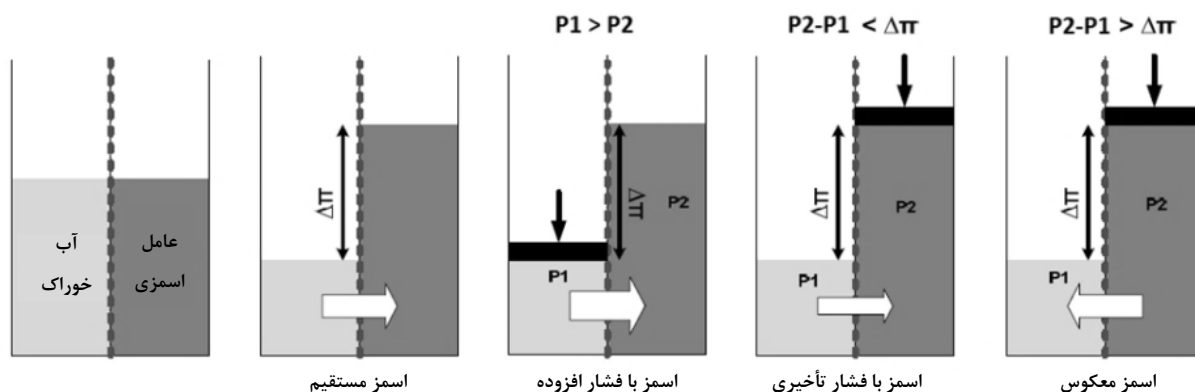
۱. مقدمه

حتی یاخته‌های بدن انسان از آن بهره می‌گیرند. در کاربرد صنعتی این روش، از یک غشای نیمه‌تراوا که تنها توانایی عبور حلال (آب) را دارد استفاده و نیروی محرکه آن از تفاضل اختلاف فشار اسمزی ($\Delta\pi$) و اختلاف فشار هیدرولیکی (ΔP) برآورد می‌شود. بسته به این‌که کدام اختلاف فشار بیشتر باشد یا فشار هیدرولیکی (فشار خارجی) به محلول کدام سمت غشاء وارد آید، این روش مطابق شکل (۱) خود به چهار فرایند تقسیم می‌شود [۱]:

- اسمز مستقیم یا پیشرو^۱ (FO): اختلاف فشار خارجی در این فرایند ناچیز یا صفر در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرکه آن تنها اختلاف فشار اسمزی در دوطرف غشا است ($\Delta P = 0$).

آدمی همواره برای چیره شدن بر چالش‌های جدید دست به خلاقیت، نوآوری و به‌کارگیری روش‌های جدید زده است. یکی از دشواری‌هایی که به‌خصوص در ۶۰ سال اخیر رخ نموده و بی‌گمان در سال‌های آینده به مشکلی جهانی بدل خواهد شد، کمبود منابع آب آشامیدنی و یا وجود آب با میزان تصفیه نامناسب است. از این‌رو، یکی از روش‌هایی که برای غلبه بر این مشکل، از سال ۱۹۶۰ به بعد، موردتوجه بیشتری قرار گرفته، فرایند اسمز معکوس است. فرایند اسمز فرایندی برگرفته از طبیعت است که گیاهان، جانوران و

* تهران، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی



شکل ۱. مقایسه فرایندهای گوناگون روش اسمز [۱].

جلب کرده است، زیرا عملیات FO در فشار و دمای پایین انجام می‌شود [۱۱ و ۱۲].

سامانه اسمز مستقیم دارای سه جزء عمده است: ۱. آب خوراک^۵، که طی فرایند اسمز مستقیم میزان آب آن کاهش می‌یابد و غلیظ‌تر می‌شود؛ ۲. محلول کِشنده^۶، این محلولی است که میزان شوری یا فشار اسمزی آن بیشتر از محلول آب خوراک است و باعث می‌شود به علت اختلاف فشار اسمزی، آب از درون غشا و از سمت محلول آب خوراک به سمت محلول کِشنده تراوش کند؛ ۳. غشای اسمز مستقیم که خود از دو قسمت لایه فعال^۷ و لایه پشتیبان^۸ تشکیل شده است. کار اصلی غشاء، عبور دادن حداکثری آب از سمت محلول آب خوراک به سمت محلول کِشنده و مخالفت از عبور با عبور حداقلی مواد حل‌شونده در محلول‌های دو طرف غشا به سمت مخالف است. در مقایسه با روش‌های سنتی فشار محور [۱۳]، FO دارای برتری‌های ویژه‌ای از جمله: پس‌زنی بالای مواد محلول، رسوب‌گرفتگی کمتر غشا و مصرف انرژی کمتر است. به همین دلیل، غشای FO توانایی بالایی برای جایگزینی با غشاهای فراصافش دارد که در حال حاضر در راکتورهای زیستی غشایی^۹ (MBR) به‌کار گرفته می‌شود [۱۴-۱۶].

در چندین گزارش، پیش‌بینی شده که در سال‌های آینده ارزش بازار سالیانه غشاهای اسمز مستقیم در زمینه انرژی اسمزی، باز مصرف

• اسمز معکوس^۱ (RO): در این روش اختلاف فشار خارجی بر اختلاف فشار اسمزی غلبه می‌کند و از این‌رو آب در جهت مخالف جریان در فرایند اسمز مستقیم جاری می‌شود ($\Delta P > \Delta \pi$).

• اسمز با فشار تأخیری^۲ (PRO): اگر اختلاف فشار اسمزی بر اختلاف فشار هیدرولیکی غلبه کند و P_2 بیشتر از P_1 باشد، این فرایند، اسمز با فشار تأخیری نامیده می‌شود.

• اسمز با فشار افزوده^۳ (PEO): در این فرایند نیز مانند روش اسمز مستقیم و اسمز با فشار تأخیری، اختلاف فشار اسمزی از اختلاف فشار خارجی بیشتر است، ولی در این فرایند P_1 از P_2 بیشتر است.

به مجموعه فرایندهای اسمز مستقیم، اسمز با فشار تأخیری و اسمز با فشار افزوده، فرایندهای غشایی اسمز محور گفته می‌شود. این فرایندها از توانایی‌های نهفته‌ای در کاربردهای گوناگون، از جمله: نوشیدنی‌های اضطرابی [۲]، تولید برق [۳]، بازیافت نفت [۴]، عملیات تولید آب [۵]، تغلیظ سیال [۶]، نمک‌زدایی گرمایشی آب خوراک [۷]، جابجایی آب [۸] و نمک‌زدایی از آب [۹] برخوردارند. بیشترین سهم پژوهش‌های FO بر تولید انرژی متمرکز بوده است (راه‌اندازی نخستین نیروگاه برق اسمزی به وسیله شرکت نیروی استاتکرافت^۴ در سال ۲۰۰۹ [۱۰])، ولی با افزایش بهای حامل‌های انرژی، نمک‌زدایی از آب دریا از طریق FO توجه زیادی را

5. Feed Water (FW)
6. Draw Solution (DS)
7. Active Layer (AL)
8. Support layer (SL)
9. Membrane Bioreactor

1. Reverse Osmosis
2. Pressure Retarded Osmosis
3. Pressure Enhanced Osmosis
4. Statkraft

۲-۱-۱ تغلیظ پساب صنعتی رقیق

نخستین پژوهش‌های امکان‌سنجی کاربرد FO در بخش تصفیه فاضلاب صنعتی در سال‌های ۱۹۷۴ [۲۰] و ۱۹۷۷ [۲۱] منتشر شد. انگیزه آن‌ها به کارگیری یک فرایند کم‌مصرف برای انجام عملیات فاضلاب صنعتی، حاوی غلظت کمی از فلزات سنگین، به‌منظور بازمصرف بود. در این مطالعه، از سامانه‌ای در ابعاد کارگاهی از یک غشای سلولزی RO نو، بهره گرفته شد تا جریان‌های خالص یا ترکیب‌شده مس یا کرم را تغلیظ کند. بدون آگاهی از آثار قطبش غلظتی داخلی^۱ (ICP)، پژوهشگران مشاهده کردند که شار آب واقعی کمتر از میزان شار آب محاسبه‌شده از معادله انتقال جرم و اطلاعات ارائه‌شده از سوی سازنده غشا است. در این آزمایش، از آب دریا به‌عنوان محلول کُشنده استفاده شد زیرا این ماده یک منبع ارزان‌قیمت و فراوان در نواحی ساحلی است. با توجه به کارکرد ضعیف غشای RO، دیگر آزمایش‌ها با این غشا متوقف شد و پیشنهاد شد غشاء بهینه‌سازی شود [۱۱].

۲-۱-۲ عملیات روی مواد نشتی از جایگاه‌های دفن پسماند (شیرابه‌ها)

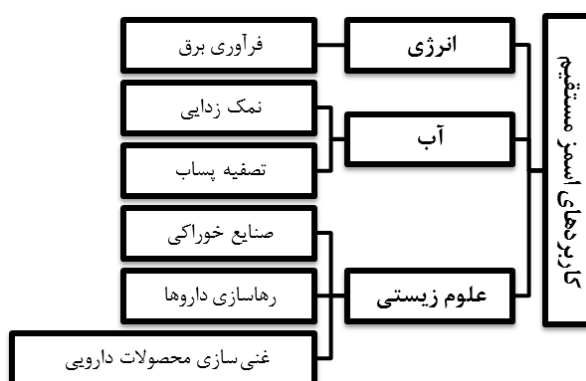
شیرابه‌ها یا مواد نشتیافته از جایگاه‌های ویژه دفن پسماند یکی از محلول‌های خوراک^۲ با بیشترین تغییرات ترکیبی به‌شمار می‌آیند که این خود باعث دشواری در انجام عملیات روی آن‌ها می‌شود، به‌ویژه هنگامی که کیفیت مطلوبی از جریان خروجی نیز موردنظر باشد. شیرابه‌ها معمولاً ترکیب پیچیده‌ای از چهار آلاینده‌اند: ترکیبات آلی، فلزات سنگین محلول، نیترژن آلی و غیر آلی، و مواد جامد حل‌شده^۳ (TDS). فرآوری شیرابه‌ها در واحدهای تصفیه فاضلاب انجام می‌شود، با همه این احوال، این واحدها معمولاً تنها بر زدایش ترکیبات آلی، فلزات سنگین و نیترژن تمرکز دارند و اغلب عملیاتی برای کاهش TDS انجام نمی‌دهند و حتی در مواردی باعث افزایش غلظت آن نیز می‌شوند [۲۳].

دو مورد عملیات فرایندی تجاری‌سازی شده که می‌توانند TDS را از پساب حذف کنند، عبارتند از تبخیر مکانیکی (مانند فشردن فشرده‌سازی بخار، لوله‌های عمودی با فیلم نزولی، لوله‌های افقی با افشانه کردن

آب، نمک‌زدایی و سایر کاربردها، از ترکیب بازارهای اسمز معکوس و فراصافش بیشتر خواهد شد [۱۷ و ۱۸]. بنابراین، در این نوشتار تلاش شده کاربردهای گوناگون فرایند اسمز مستقیم به‌عنوان یک فرایند غشایی نو به همراه پیشینه، روش اجرا، و چالش‌های مرتبط به هر مورد کاربردی بررسی شود تا افزون‌بر پرداختن بیشتر به این فرایند به‌منظور بهینه‌سازی کاربردهای مرسوم، به کاربردهای نو آن نیز با انجام پژوهش‌های جدید توجه شود.

۲. کاربردها

به‌طور کلی، می‌توان کاربردهای FO را به‌صورت نمودار شکل (۲) نشان داد. در ادامه به بررسی تفصیلی‌تر هر کدام از این کاربردها خواهیم پرداخت.



شکل ۲. چکیده کاربردهای فرایند اسمز مستقیم [۱۹].

۲-۱-۲ تصفیه پساب

چندین مورد از کاربردهای FO در زمینه تصفیه فاضلاب در نشریات گوناگون انتشار یافته است. این موارد پژوهش‌های اولیه تغلیظ پساب صنعتی رقیق [۲۰ و ۲۱]، عملیات روی مواد نشتی از جایگاه‌های دفن پسماند [۲۲ و ۲۳]، بازمصرف فاضلاب در سامانه‌های پشتیبانی پیشرفته برای کاربردهای فضایی [۲۴-۲۶]، و تغلیظ مایعات برآمده از هضم بی‌هوازی لجن‌ها در کارخانه تصفیه فاضلاب خانگی [۲۷] را دربر می‌گیرند. باید توجه کرد که معمولاً در سامانه‌های تصفیه پساب، FO بیشتر به‌عنوان مرحله فرآوری پیش از فرایند اصلی ایفای نقش می‌کند [۱۱].

1. Internal Concentration Polarization
2. Feed Solution
3. Total Dissolved Solids

۲-۱-۳- سامانه های پشتیبانی پیشرفته برای کاربردهای

فضایی

مأموریت های طولانی مدت انسان در فضا نیازمند منبعی پایدار و تجدیدپذیر آب برای آشامیدن و مصارف بهداشتی است. مأموریت های دوربرد بشر مانند مأموریت کاوش مریخ یا ماه به سامانه بازیابی آب از فاضلاب های جمع آوری شده در سفینه یا سیاره نیاز دارد. سه منبع اصلی فاضلاب که در سفرهای فضایی از امکان جمع آوری و باز مصرف برخوردارند، عبارتند از: فاضلاب بهداشتی، ادرار، و چگالش رطوبت. سامانه تصفیه این فاضلاب ها باید قابل اطمینان، مقاوم، دارای توانایی بازیابی پرمایه و وزن کم باشد. به علاوه، این سامانه باید مستقل، نیاز به مراقبت کم داشته، و مصرف انرژی و نیاز به ماده مصرفی آن نیز کم باشد [۲۸].

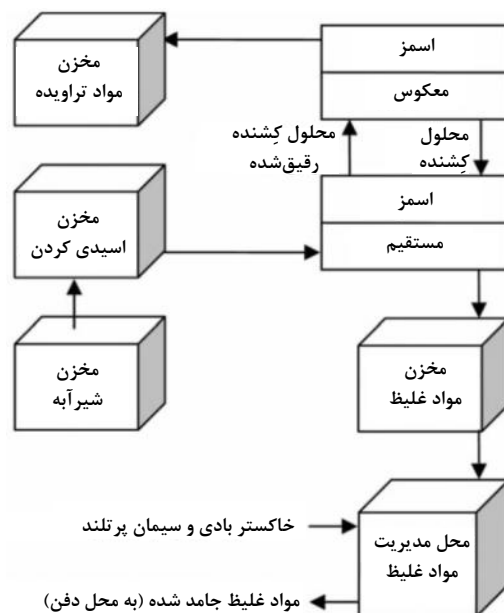
یک سامانه آزمایشگاهی فرایند FO با عنوان سامانه تغلیظ اسمز مستقیم^۳ (DOC)، به منظور باز مصرف از آب در فضا ابداع و به کار گرفته شد. DOC یکی از چندین فناوری است که به دست سازمان هوافضای آمریکا^۴ (NASA) به منظور باز مصرف آب در فضا ارزیابی شده است. مطابق شکل (۴)، واحد DOC مورد آزمایش شامل اتصال متوالی دو سامانه (به عنوان واحدهای پیش فرآوری) به واحد RO است. در نخستین زیر سامانه (DOC#1) یک فرایند FO و در زیر سامانه بعد (DOC#2) از ترکیب فرایند FO و تقطیر اسمزی^۵ (OD) استفاده شده است. فرایند OD وظیفه حذف ترکیبات کم را (مانند اوره که به راحتی از غشاهای نیمه تراوا عبور می کنند) برعهده دارد [۲۵ و ۲۹].

۲-۱-۴- تغلیظ محلول به دست آمده ناشی از هضم بی هوازی

لجن ها

برای کاهش بیشتر مواد جامد آلی مقاوم تر و یا به منظور پایدار سازی لجن تولید شده در واحدهای تصفیه فاضلاب، غالباً عملیات روی لجن در یک واحد هاضم بی هوازی^۶ اجرا می شود. لجن، پس از هضم معمولاً از طریق فرایند مرکزگریزی آگیری می شود و محصولات نهایی این فرایند، مواد جامد زیستی فشرده و جریان مایع (آبلجن)^۷ است. آبلجن در برگیرنده غلظت فراوانی از مواد

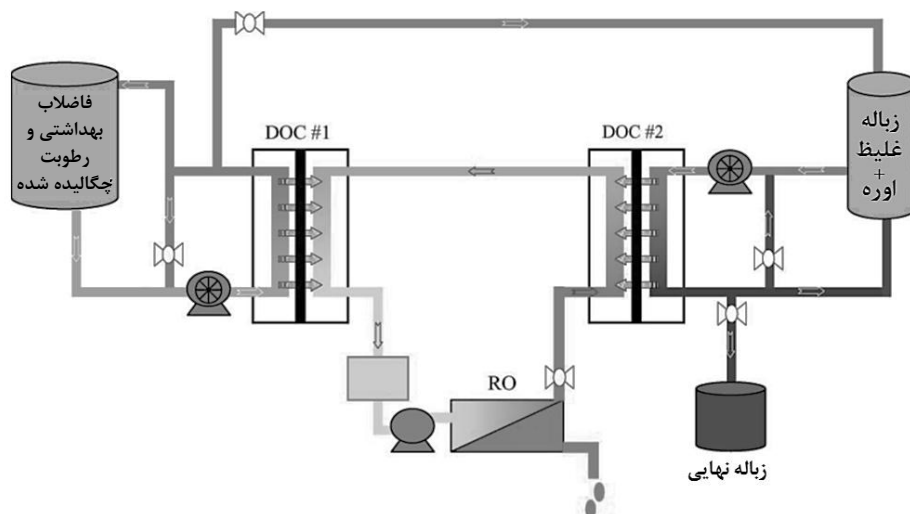
فیلم و گردش اجباری) و فرایندهای غشایی. بنابر یکی از ارزیابی های فراگیر، فرایند اسمز مستقیم می تواند در انجام عملیات شیرابه های ناشی از جایگاه دفن پسماند بسیار کارآمد باشد [۲۳]. در سال ۱۹۹۸، شرکت اسموتک^۱ یک سامانه FO در ابعاد آزمایشگاهی برای فرآوری شیرابه های حاصل از جایگاه دفن پسماند کافین بیوت در شهر کوروالیس ایالت اورگن آمریکا، ساخت. از آنجا که این مکان جایی بود که میزان بارندگی در آن بیشتر از ۱۴۰۰ میلی متر در سال بود، سالیانه بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمکعب شیرابه از آن جمع آوری می شد. برای دستیابی به محدوده استاندارد ملی دفع آلاینده ها^۲ (NPDES) باید میزان سطح TDS به کمتر از ۱۰۰ میلی گرم در لیتر می رسید. شرکت اسموتک با به کارگیری غشای FO، توانست به میزان ۹۴ تا ۹۶ درصد بازیابی آب با حذف گسترده مواد آلاینده دست یابد. موفقیت نمونه آزمایشگاهی باعث شد تا طراحی و ساخت سامانه اصلی انجام شود (شکل (۳)). در این سامانه، شیرابه خام پیش از ورود به بخش FO، جمع آوری و پیش فرآوری شده و سپس از سامانه RO برای تولید آب خالص و تغلیظ مجدد محلول کِشنده استفاده شد. شیرابه های تغلیظ شده نیز از طریق موادی مانند سیمان و خاکستر بادی، جامد و سپس دفن می شدند [۲۳].



شکل ۳. نمودار جعبه ای فرایند FO برای فرآوری شیرابه یک واحد دفن پسماند [۲۳].

3. Direct Osmotic Concentration
4. The National Aeronautics and Space Administration
5. Osmotic Distillation
6. Anaerobic Digesters
7. Centrate

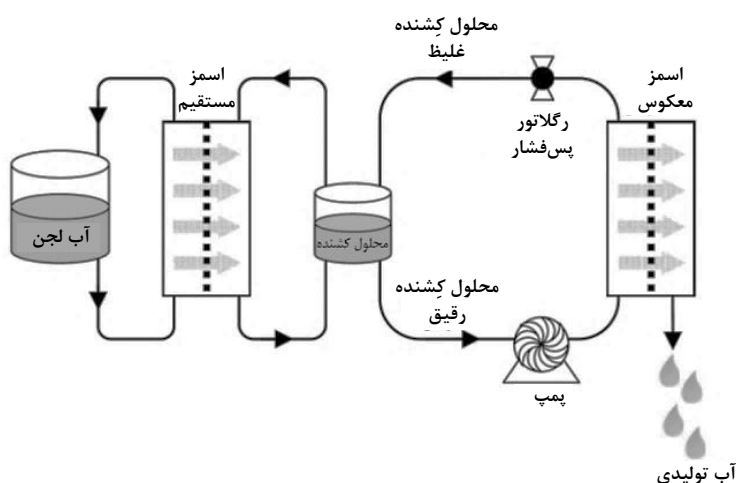
1. Osmotek
2. The National Pollutant Discharge Elimination System



شکل ۴. نمودار جریان در واحد DOC برای تصفیه و باز مصرف آب در کاربردهای فضایی [۲۶].

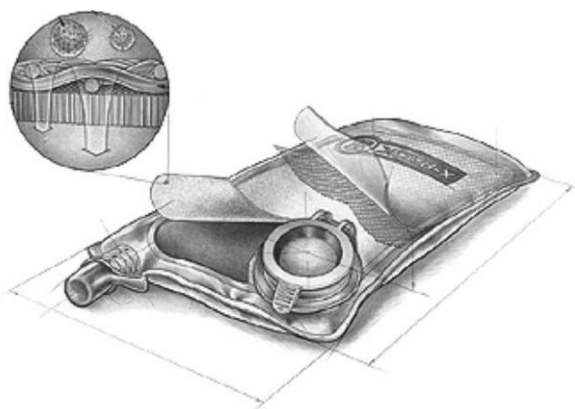
طی یکی از پژوهش‌ها، FO به عنوان یک فرایند بالقوه برای تغلیظ آب لجن در کارخانه TMWRF^۱ در شهر رنو، ایالت نوادای آمریکا بررسی شد [۲۷]. اهداف اصلی این پژوهش شامل تعیین برتری‌ها و محدودیت‌های FO برای تغلیظ آب لجن، طراحی یک سامانه هیبریدی که در آن از FO به عنوان پیش تصفیه RO استفاده می‌شود، تدوین الگوی اقتصادی و بررسی به صرفه بودن فرایند FO، و در پایان ارزیابی توانایی به کارگیری جریان تغلیظ شده به عنوان کود در کشاورزی، بوده است. در شکل (۵)، نمایی از این فرایند را که در ابعاد کارگاهی انجام شده، مشاهده می‌کنید.

مغذی (مانند آمونیم و نیتروژن زیستی)، فلزات سنگین، مواد آلی محلول (TOC)، TDS، رنگ و مواد جامد معلق (TSS) است. در مواردی، از این جریان در صنعت کشاورزی به عنوان کود خاک سود می‌جویند [۳۰]. با این احوال، در فرایندهای مرسوم، آب لجن برای فرآوری مجدد به خط عملیاتی واحد تصفیه بازگردانیده می‌شود. زمانی که این مواد وارد خط عملیاتی می‌شوند، به افزایش بار آلی و هزینه عملیاتی واحد می‌انجامد و از سوی دیگر، گمان می‌رود مقداری از این مواد که پایداری بیشتری دارند (مانند نیتروژن و فسفر)، در جریان خروجی باقی می‌مانند [۱۱].



شکل ۵. فرایند پیوسته FO/RO به منظور تغلیظ آب لجن و تولید آب خالص. در آغاز از طریق فرایند FO، آب لجن پیش تصفیه می‌شود، و در مرحله بعد از طریق RO محلول کشنده برای باز مصرف در فرایند FO تغلیظ و آب خالص نیز تولید می‌شود [۳۱].

1. Truckee Meadows Water Reclamation Facility



شکل ۶. نمایی از کیسه‌های جاذب آب که برای تصفیه آب به کار می‌روند [۳۳ و ۳۴].

چندین دهه پیش ارائه شده است [۳۶-۴۳] ولی کاربرد بیشتر آن‌ها به علت فقدان غشای نیمه‌تراوای مناسب به بن‌بست رسید. به‌طور خلاصه، چالش‌های به‌کارگیری FO به‌منظور نمک‌زدایی از آب و تولید انرژی عبارتند از: ۱. غشای مناسب به‌عنوان قلب فرایند اسمز؛ و ۲. محلول کُشنده مناسب به منظور نمک‌زدایی. غشای FO باید دارای توانایی گزینش‌پذیری گسترده، عبور جریان آب زیاد، قطبش غلظتی کم، پایداری فیزیکی مناسب، و کارکرد پایدار باشد تا بتواند به بازار راه یابد [۱۶]. چنده گواهی ثبت اختراع درباره روش‌ها و سامانه‌های گوناگون برای نمک‌زدایی از آب با روش FO به ثبت رسیده است [۴۴-۵۳]. ولی هنوز بیشتر آن‌ها ناقص‌اند یا از لحاظ امکان‌سنجی اقتصادی ثبت نشده‌اند. کراوس و دیویس نمک‌زدایی از آب اقیانوس اطلس را از طریق فرایند FO و به کمک غشاهای سلولز استات صفحه‌ای و فیبر (تار) توخالی با کمک محلول گلوکز به‌عنوان محلول کُشنده انجام دادند [۳۶]. کسلر و مودی نیز فرایند FO را برای فرایند نمک‌زدایی آزمایش کردند [۵۴ و ۳۹]. البته هدف

۲-۱-۵ تصفیه آب به کمک کیسه‌های جاذب آب^۱

این فناوری بیشتر برای اهداف نظامی، تفریحی و یا موارد اضطراری که آب آشامیدنی سالم کم و خارج از دسترس باشد، ابداع و به‌کار گرفته شده است [۳۳ و ۳۲]. کیسه‌های جاذب آب یکی از کاربردهای معدود FO به‌شمار می‌آیند که وارد بازار شده‌اند. اگرچه این کیسه‌ها نسبت به وسایل تصفیه آب از سرعت بالایی برخوردار نیستند، ولی نیاز به برق ندارند و رسوب‌گرفتگی آن‌ها حتی در مواردی که برای آب گل‌آلود به کار روند نیز بسیار کم است. گزینش‌پذیری پر دامنه غشای FO این امکان را پدید می‌آورد که در بیشتر شرایط و برای منابع آب فراوان و متعدد، آب‌نفوذکننده به‌داخل غشا بدون ریزاندامگان‌ها، درشت‌مولکول‌ها و یون‌ها باشد [۱۱].

در کیسه‌های جاذب آب، یک محلول کُشنده خوراکی (شامل موادی مانند شکر یا پودر شربت) در کیسه‌ای که از غشای نیمه‌تراوای FO ساخته شده، بسته‌بندی شده است [۳۲]. هنگام فروبردن کیسه داخل محلول آبی، آب به علت اختلاف فشار اسمزی و به آهستگی محلول کُشنده اولیه را رقیق می‌کند. در پایان فرایند، محلول کُشنده رقیق شده می‌تواند به‌عنوان یک نوشابه شیرین که دربرگیرنده مواد مغذی و معدنی است، مصرف شود. باید توجه داشت که سامانه کیسه‌های جاذب آب به‌تنهایی یک فرایند کامل است و یک فرایند پیش‌فراوری به حساب نمی‌آید. برای مصارف شخصی و کوچک (شکل ۶)، فرایند طی حدود ۳ تا ۴ ساعت به‌طور کامل شربتی حاوی حدود ۳۴۰ کیسه شکر را سرشار از آب می‌کند [۱۱].

کیسه‌ها می‌توانند به‌طور مستقیم داخل منبع آب قرار گیرند یا می‌توانند به‌منظور حمل آسان برای کاربر، در کیسه پلاستیکی دیگری که منبع آب را نگهداری می‌کند، معلق شوند. در سال‌های اخیر، ارتش آمریکا به‌طور گسترده از کیسه‌های جاذب آب در سراسر جهان سود جسته است [۳۵]. با این تفاسیر، این کیسه‌ها آب خالص تولید نمی‌کنند، بلکه فرآورده نهایی آن نوشابه‌ای شیرین است که تنها برای کاربردهای خاص می‌تواند مصرف شود [۱۱].

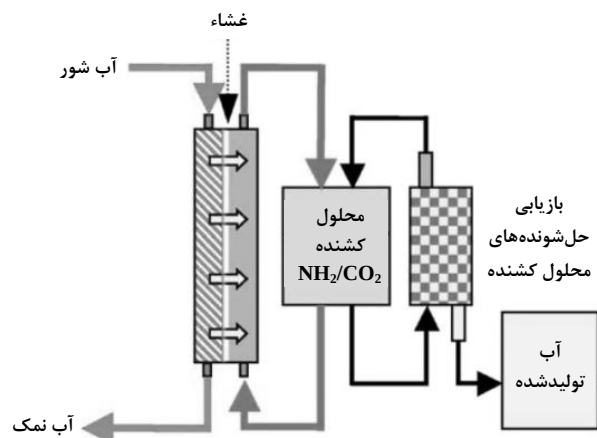
۲-۲ نمک‌زدایی از آب دریا

۲-۲-۱ اسمز مستقیم

ایده به‌کارگیری FO برای نمک‌زدایی از آب دریا و یا تولید انرژی از

1. Hydration Bags

علاوه بر این، هنگامی که نمک‌زدایی از آب دریا مورد نظر باشد، به خصوص با بازیابی پرماتنه آب، فرایند FO تنها زمانی سودمند است که محلول کُشنده بتواند فشار اسمزی زیادی ایجاد کند [۱۱].



شکل ۷. نمایی از فرایند نمک‌زدایی آب به کمک فرایند FO با محلول کُشنده آمونیاک-کربن دی‌اکسید [۵۶].

۲-۲-۲ ترکیب اسمز مستقیم با اسمز معکوس

بر پایه پژوهشی که در سال ۲۰۱۱ هور و همکاران [۵۸] انجام دادند، پربازده‌ترین فناوری نمک‌زدایی از لحاظ مصرف انرژی، فرایند اسمز معکوس معرفی شده است، ولی مطابق شکل (۸)، در سه بخش از این فرایند می‌توان از فرایند اسمز مستقیم برای افزایش بازدهی این فرایند بهره گرفت [۵۸].

از آنجاکه فرایند اسمز معکوس نیازمند فشار هیدرولیکی بیشتر از فشار اسمزی برآمده از غلظت محلول خوراک است، از طریق رقیق کردن (کاهش فشار اسمزی) آب دریا که به‌عنوان محلول خوراک به کار می‌رود، فرایند بخش (الف) می‌تواند مصرف انرژی RO را تا حد زیادی کاهش دهد [۵۹، ۶۰].

یکی از نگرانی‌های زیست‌محیطی جاری در نمک‌زدایی، اختلاف شوری و دمای آب شور تخلیه‌شده با محیط طبیعی پذیرنده این جریان تخلیه است. در نمک‌زدایی آب، چه به‌صورت غشایی و چه به روش گرمایی، به ازای تولید آب خالص‌تر، محلول خوراک غلیظ‌تری به محیط دفع می‌شود. دمای آب‌نمک غلیظ نیز که در فرایند نمک‌زدایی گرمایی باید از سامانه تخلیه شود (بخش ب)) از دمای محیط بیشتر است [۶۰].

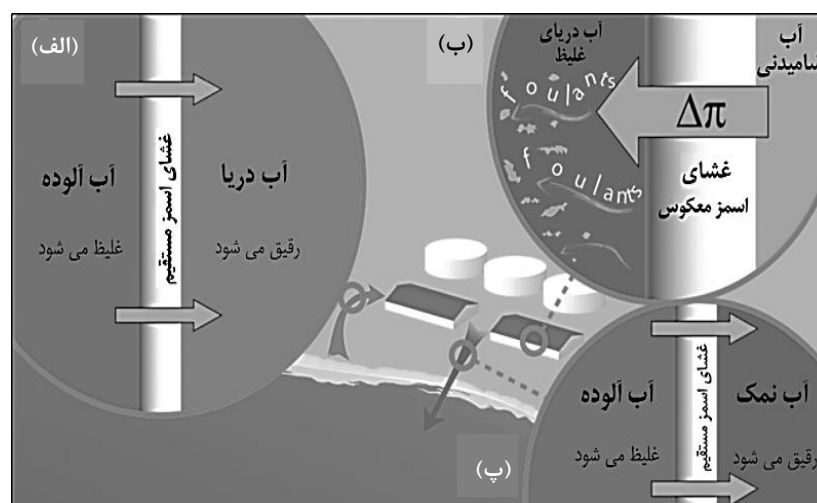
آن‌ها راه‌اندازی فرایند نمک‌زدایی ناپیوسته برای تأمین منبع آب اضطراری در قایق‌های نجات بود، و نه فرایند پیوسته‌ای برای نمک‌زدایی از آب دریا [۱۱].

به طور کلی، نمک‌زدایی از آب دریا شامل دو مرحله است: رقیق کردن اسمزی محلول کُشنده، و سپس تولید آب خالص از محلول کُشنده. تمامی فرایندهای نمک‌زدایی FO را با توجه به تفاوت در روش تولید آب خالص می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. در گروه نخست، از محلول‌های کُشنده گرم‌کافتی استفاده می‌شود. این محلول‌ها با گرما دادن به گازهای فرّاری مانند CO_2 یا SO_2 ، پس از عملیات اسمز، تجزیه می‌شوند. آب جدا شده و گازهای فرّار را می‌توان برای باز مصرف احیا کرد. در گروه دوم از نمک‌ها یا سایر ترکیباتی که توانایی انحلال در آب دارند، در محلول کُشنده استفاده می‌شود و می‌توان آب خالص را به روش‌های گوناگونی تولید کرد. مثلاً، خیدارو [۵۵] از انرژی خورشیدی برای تولید آب خالص از محلول کُشنده رقیق پس از رقیق‌سازی اسمزی استفاده کرده است [۱۹].

در پژوهش‌های آزمایشگاهی اخیر [۵۶ و ۵۷]، مشخص شده هنگامی که از یک غشای مناسب (مانند غشای FO CTA^1) و محلول کُشنده قوی (گازهای بسیار حلال آمونیاک و کربن دی‌اکسید) برای فرایند FO استفاده شود، آب دریا می‌تواند به‌صورت موثری نمک‌زدایی شود. در شکل (۷) طرحی نموداری از فرایند FO با کمک گازهای آمونیاک و کربن دی‌اکسید را مشاهده می‌کنید. محلول کُشنده از ترکیب این دو گاز با نسبت‌های معین به وجود می‌آید. در این فرایند آب را از آب دریا استخراج و محلول کُشنده را رقیق می‌کنند و سپس با گرما دادن متوسط (نزدیک 60°C)، آمونیاک و کربن دی‌اکسید را از محلول کُشنده جدا می‌کنند. جداسازی آب تولیدشده در فرایند از محلول کُشنده می‌تواند به چند روش انجام شود (مانند تقطیر ستونی یا تقطیر غشایی). محلول گاززدایی‌شده باقی‌مانده، آب خالص تولیدی است. فراورده تقطیر، یک محلول کُشنده است که مجدداً تغلیظ شده است و می‌تواند دوباره در فرایند نمک‌زدایی FO به کار گرفته شود [۵۶].

پژوهش‌های انجام‌شده در FO به‌عنوان یک فرایند نمک‌زدا، دو محدودیت بزرگ این روش را آشکار کرده است: دسترسی به غشایی با کارکرد گسترده و محلول کُشنده‌ای با قابلیت جداسازی آسان.

1. Cellulose Triacetate Membrane



شکل ۸. نمایی از واحد نمک‌زدایی و سه بخشی که می‌توان در آنها از FO برای بهبود سامانه سود جست: (الف) رقیق کردن جریان ورودی (آب دریا) به منظور کاهش مصرف انرژی؛ (ب) شستشوی اسمزی غشای اسمز معکوس برای بازگرداندن کارکرد غشا؛ و (پ) رقیق کردن آب‌شور غلیظ پیش از تخلیه آن به دریا [۵۸].

هزینه‌های نگهداری و حمل‌ونقل آن کمک کند [۶۶]. اگرچه انجام عملیات اسمز روی فرآورده تولیدی (مانند کنسرو میوه و گوشت) صنایع غذایی امری مرسوم است [۶۷]، به کار بردن فرایند FO برای تغلیظ نوشیدنی‌ها و خوراکی‌های مایع تنها در ابعاد آزمایشگاهی مطالعه شده است [۶۸-۷۱]. فرایند FO از چندین برتری برای تغلیظ نوشیدنی‌ها و خوراکی‌های آبدار برخوردار است که عبارتند از: کارکرد در دما و فشار پایین که به ارتقای نگهداری خواص حسی (مانند مزه، عطر و رنگ) و مغذی (مانند ویتامین‌ها)، و توانایی گزینش‌پذیری پیرامنه و رسوب‌زدگی کمتر غشا در برابر فرایندهای فشار محور می‌انجامد [۱۱]. از این رو، فرایند FO به‌طور گسترده‌ای برای تغلیظ فرآورده‌های خوراکی آبدار به‌کار گرفته شده [۷۲-۸۸]. در این کاربردها، FO به‌عنوان فرایند حذف‌کننده آب اسمزی برای حذف آب از غذاهای آبدار عمل می‌کند.

بر پایه این پژوهش‌ها، به نظر می‌رسد فرایند FO دارای برتری‌هایی در برابر تبخیر و فرایندهای غشایی فشار محور باشد. مصرف انرژی کم، دما و فشار عملکردی پایین و غلظت زیاد فراورده‌ها از مهم‌ترین این برتری‌ها به‌شمار می‌آید. با این وجود، همانند دیگر صنایع، فقدان غشای بهینه و فرایند بازیابی کارآمد محلول کِشنده بازدارندگان اصلی FO برای تبدیل‌شدن به یک فرایند کامل در صنایع غذایی است [۱۱].

در جریان یک فرایند متداول نمک‌زدایی، رسوب‌های زیستی و شیمیایی روی سطح غشاء انباشته می‌شوند (بخش (پ)). برای از بین بردن رسوب‌ها، معمولاً از موادی شیمیایی چون عامل کی‌لیت‌ساز فلزی (مانند EDTA^۱)، پاک‌کننده‌ها (مانند SDS^۲)، آفت‌کش‌ها، اسید و باز و ترکیبات ضد رسوب بهره می‌گیرند که تخلیه این مواد به محیط باعث آشفته‌گی زیستگاه‌های آبی می‌شود [۶۱]. علاوه بر این که به‌کارگیری مواد شیمیایی برای پاک‌سازی غشای RO نیازمند خاموش کردن واحد است که به کاهش عمر غشاء نیز می‌انجامد، فرایند پاک‌سازی غشا با این روش تنها به چند مرحله در سال محدود می‌شود [۶۲]. پژوهش‌های تجربی و مدل‌سازی نشان داده که با به‌کارگیری شستشوی اسمزی می‌توان به روش‌های زدایش سریع و کارآمد رسوب‌ها دست یافت که این خود انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه شستشوی اسمزی را توجیه می‌کند [۶۳-۶۵].

۳-۲ صنایع غذایی

در صنایع غذایی، غالباً ضروری است که آب از خوراکی‌های آبدار حذف شود تا به پایداری، بهبود زمان مجاز برای نگهداری و کاهش

1. Ethylenediaminetetraacetic Acid
2. Sodium Dodecyl Sulfate

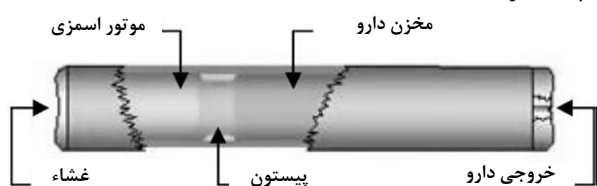
۲-۴ صنایع دارویی - تلمبه‌های اسمزی

مصرف داروها از راه دهان که در حال حاضر پذیرفته‌شده‌ترین شیوه به‌کارگیری در تجویز داروهاست، ممکن است در دستیابی به نتایج موردنظر برخی ایرادها را داشته باشد. در شرایط ویژه، طولانی شدن فرایند رهاسازی، تحویل دادن هدفمند یا دُرِ دقیقی از داروی تجویز شده، بخصوص در موارد بیماری‌های مزمن، در بدن موردنیاز است. از فواید رهاسازی کنترل‌شده داروها می‌توان به کاهش نوسانات دُر، افزایش تنظیم غلظت دارو در جریان خون، در دسترس بودن زیستی بیشتر، بهبود پذیرش بیمار و کاهش آثار جانبی اشاره کرد [۸۹].

رهاسازی کنترل یا اصلاح‌شده داروها را می‌توان با به‌کارگیری تلمبه‌های اسمزی انجام داد. اسمز به‌عنوان یک نیروی محرکه برای تلمبه کردن ثابت داروها چندین برتری با انتقال جرم دقیق ارائه می‌دهد. مثلاً، در تحویل هدفمند، تلمبه‌های اسمزی می‌توانند دارو را دقیقاً به سیال مغزی نخاعی، جایی که تمام آن جذب سلول‌های عصبی شود، برسانند [۱۱].

در شکل (۹) نمایی از اجزای اصلی یک سامانه اسمزی تحویل دارو را مشاهده می‌کنید. تلمبه اسمزی در یک محفظه استوانه‌ای از جنس آلایژ تیتانیوم با قطر ۴ میلی‌متر و طول ۴۰ میلی‌متر قرار دارد. این محفظه وظیفه محافظت از مولکول‌های دارو را در برابر آنزیم‌ها، رطوبت بدن و ترکیبات سلولی بر عهده دارد که می‌تواند دارو را پیش از رهاسازی غیرفعال کند. یک غشای پلی‌اورتان در یک سمت محفظه قرار داده شده است. این غشا نیز، مانند دیگر غشاهای نیمه‌تراوا، در برابر آب کاملاً نفوذپذیر و کم‌ویس نشسته‌ناپذیر برای یون‌هاست. موتور اسمزی (محلول‌کُشنده) بخشی دیگری از استوانه را درست پشت غشا اشغال می‌کند. محلول‌کُشنده اغلب از سدیم کلرید به همراه مواد رقیق‌کننده دارویی که به شکل قرص‌اند، تشکیل می‌شود و یک پیستون که خاصیت کشسانی دارد، محلول‌کُشنده را از دارو در محفظه جدا می‌کند. دارو ممکن است در حالت طبیعی به‌صورت محلول یا ذرات معلق و یا آبی یا بدون آب باشد. برای افزایش بازه باید مدت‌زمان سه ماه تا یک سال دارو در دمای بدن (37°C) پایدار باشد. محل خروج دارو یک روزنه کوچک است که در سمت دیگر محفظه تیتانیومی قرار دارد. این مجرا می‌تواند به‌صورت ساده، مجراهای مستقیم و یا حتی شکل‌های طراحی‌شده

پیچیده نیز باشد [۹۰].



شکل ۹. نمایی از سامانه اسمزی تحویل دارو شرکت DUROS® که در آن، به ترتیب، از راست به چپ: روزنه خروج دارو، دارو، پیستون، محلول‌کُشنده و غشا قرار دارند [۹۰].

زمانی که تلمبه اسمزی در تماس با یک محلول آبی و یا محیط مرطوب قرار می‌گیرد، آب از درون غشا به سمت محلول‌کُشنده نفوذ می‌کند و فشار برقرارشده ناشی از افزایش حجم محلول‌کُشنده به پیستون وارد می‌آید. این امر باعث افزایش فشار در محفظه دارو می‌شود؛ در نتیجه بخشی از دارو از روزنه خارج می‌شود. آهنگ نفوذ آب مهم‌ترین پارامتر طراحی تلمبه‌های اسمزی است، زیرا آهنگ رهاسازی دارو را تعیین می‌کند [۱۱]. تیووویس و یام پژوهشی در زمینه اصول طراحی و کارکرد تلمبه‌های اسمزی انجام داده و قواعد طراحی برای برخورداری از آهنگ رهاسازی ثابت را شرح داده‌اند [۹۱].

۲-۵ آب‌زدایی از فرآورده‌های دارویی

از آنجاکه بیشتر فرآورده‌های دارویی دارای حساسیتی زیاد نسبت به دما هستند و اندازه مولکول‌های آن‌ها بزرگ‌تر از مولکول آب است، FO می‌تواند برای آب‌زدایی آن‌ها به‌صورت آدیاباتیک و بدون کارکرد در دمای بالا فرایندی مناسب باشد. فناوری‌های موجود برای استخراج و سنتز ترکیبات دارویی، نه تنها فضای زیادی اشغال می‌کنند بلکه در مواردی باعث هدررفت حل‌شونده‌ها نیز می‌گردند. از این‌رو، فناوری FO با جذب آب و تغلیظ مواد دارویی می‌تواند برخی از این مشکلات را حل کند [۹۲ و ۹۳]. در مقایسه با روش‌های آب‌زدایی مرسوم شیمیایی (مانند استخراج) یا دمایی (مانند تبخیر، تقطیر و تبلور)، فرایند جداسازی با غشای FO ساده‌تر، سازگارتر با محیط‌زیست و دارای بازده بیشتری است.

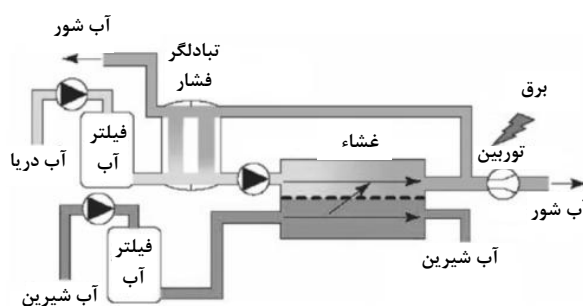
اخیراً برای غنی‌سازی محلول لیزوزوم، از غشای FO و منیزیم کلرید به‌عنوان محلول‌کُشنده استفاده شده است [۹۴]. این آزمایش نشان

ظرفیت نیرو به ابعاد فیزیکی) بالایی است [۹۸ و ۹۹]. برآوردها نشان می‌دهد که توان نهفته تولید نیرو (برق) از منابع نمکی به حدود ۲۰۰۰ TWh در سال می‌رسد [۹۵].

در چند دهه اخیر، لوئب و همکاران پژوهش‌های مداومی را در کاربرد PRO برای تولید برق انجام داده‌اند [۱۰۷-۱۰۰ و ۹۷ و ۹۶]. افزون بر آن، جلینک و ماسودا توانستند به کمک یک پایلوت PRO برق تولید کنند [۱۰۸]. مقایسه‌ای بین PRO و الکترودیالیز معکوس به‌منظور تولید برق از منابع نمکی انجام داده است [۹۸]. در دهه اخیر، بیشترین تمرکز پژوهش‌ها در زمینه PRO برای تولید برق، به یاری اتحادیه اروپا و با همکاری شرکت‌های SF Statkraft نیروژ، ICTPOL پرتغال، SINTEF نیروژ، GKSS Forschungszentrum آلمان، دانشگاه فنی هلسنکی فنلاند و باهدف اصلی توسعه غشای PRO برای دستیابی به توان تولید برق با حداقل ظرفیت 4 W/m^2 انجام شده است [۹۵]. افزون بر موارد نام‌برده، باید توجه داشت که PRO می‌تواند به‌صورت هیبریدی با فرایندهای RO یا تقطیر غشایی نیز به‌منظور افزایش بهره‌وری سامانه به کار گرفته شود [۱۱۱-۱۰۹ و ۱۷].

۷-۲ جبران آب هدررفته در برج‌های خنک‌کننده

برج‌های خنک‌کننده تبخیری، به میزان زیادی آب باکیفیت برای جایگزینی با آبی نیاز دارند که به علت تبخیر، ماندگی و تخلیه از دست می‌دهند. برای جبران این آب به کمک فرایند اسمزی دو راه وجود دارد: پیاده‌سازی آن به‌عنوان یک فرایند نمک‌زدایی کامل (یک فرایند دومرحله‌ای) که آبی با مواد جامد کمتر محلول (TDS) تولید می‌کند، و یا به‌صورت یک فرایند تک‌مرحله‌ای اسمز مستقیم که نمای آن، در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنید [۱۱۲].



شکل ۱۰. نمای ساده‌ای از یک نمونه نیروگاه تولید برق PRO [۹۵].

داد که لیزوزوم رقیق می‌تواند بدون تغییر خواص طبیعی، غنی شود. به‌علاوه، رسوب پروتئینی کمتری در سطح غشا، تشکیل شد که علت آن، جریان داشتن پروتئین خوراک در سمت آب‌دوست غشاء، بدون به کار بردن فشار هیدرولیکی در هنگام فرایند غنی‌سازی است. از آنجاکه آب‌زدایی آدیاباتیک یا بدون در نظر گرفتن دما، یکی از بخش‌های عملیاتی مهم در فرایند تولید داروهاست، دور از انتظار نیست که در آینده‌ای نزدیک FO نقش مهمی در این صنعت بازی کند [۱۶].

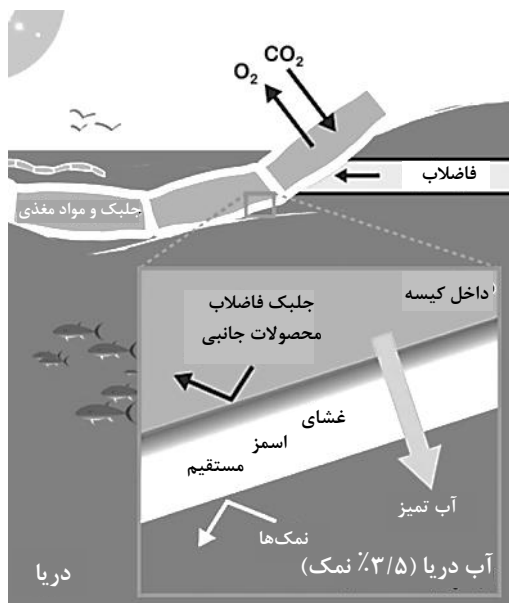
۶-۲ تولید برق به کمک فرایند اسمز

زمانی که دو جریان با پتانسیل شیمیایی ناهمسان یا شوری متفاوت برقرار باشند، می‌توان از آن‌ها انرژی تجدیدپذیر استخراج کرد. با در نظر گرفتن این‌که از شوری آب دریا می‌توان فشار اسمزی در حدود 2.7 MPa ایجاد کرد و فشار اسمزی آب رودخانه کمابیش ناچیز است، می‌توان بخش عمده‌ای از فشار 2.7 MPa را برای تولید برق به کار گرفت. PRO یکی از روش‌هایی است که با آن می‌توان این برق را تولید کرد [۱۱].

نمایی از تولید برق به‌وسیله PRO را در شکل (۱۰) مشاهده می‌کنید. نخست، آب شیرین به درون غشای PRO (غشایی مانند غشای نیمه‌تراوای FO) تلمبه می‌شود. آب شیرین در یک سمت غشاء جریان می‌یابد و از درون غشا به بخش پرفشار، جایی که آب دریا قرار دارد، نفوذ می‌کند. سپس جریان آب دریا که رقیق و پرفشار است خود به دو جریان تقسیم می‌شود: فشار یک جریان در توربین کاهش می‌یابد تا برق تولید شود و جریان دوم از درون یک تبادله‌گر فشاری عبور می‌کند تا به افزایش فشار آب دریای ورودی به سامانه کمک کند. دو بخش مهم یک واحد PRO، غشا و تبادله‌گر فشاری هستند. لوئب و همکاران دو سامانه با جریان پایدار، که در روش افزایش فشار محلول کِشنده ورودی باهم فرق داشتند، پیشنهاد کردند: افزایش فشار از طریق تلمبه (مانند شکل (۱۰)) و افزایش فشار محلول کِشنده به کمک نفوذ با به‌کارگیری دست‌کم دو مخزن برای تحمل فشار بخش پذیرنده جزء نفوذکننده [۹۷ و ۹۶]. تولید برق با روش PRO از آب دریا ویژگی‌های خاصی دارد که انجام آن را قابل قبول می‌کند: آب دریا یک منبع بزرگ و بکر، باقابلیت تجدیدپذیری، کاربرد با حداقل آثار ویرانگر زیست‌محیطی و در مقایسه با سایر منابع نهفته انرژی اقیانوس، دارای چگالی (نسبت

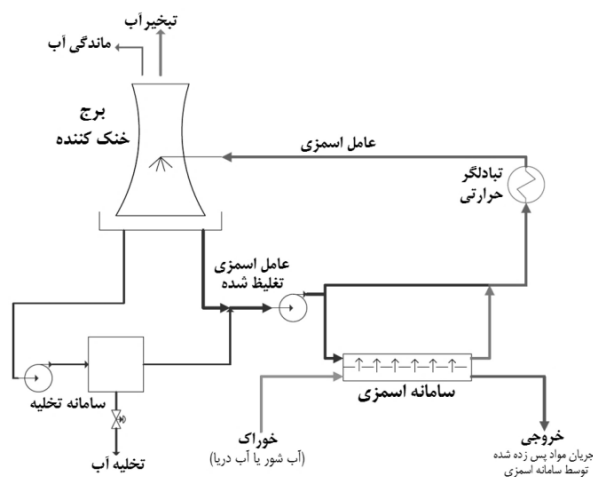
این برنامه، می‌تواند چندین محدودیت روش‌های مرسوم کاشت جلبک دریایی را با راه‌حلی برآورده، کم‌مصرف و با آثار زیست‌محیطی ناچیز، از میان بردارد [۱۱۶-۱۱۳].

مطابق شکل (۱۲)، فرایند امگا از یک محفظه (کیسه) تشکیل شده است که به‌وسیله فاضلاب شهری غنی از مواد مغذی پر می‌شود و در آن دانه‌های جلبک دریایی قرار دارد که این دانه‌ها به‌مرور رشد و لپیدها را فرآوری می‌کنند. کیسه‌ها در یک محیط مرطوب با شوری فراوان، معمولاً آب اقیانوس، قرار داده می‌شوند که در آن آب، زیربنای مناسبی را از نظر شناوری و ظرفیت گرمایی لازم برای تنظیم دما فراهم می‌کند و امواج عمل اختلاط را انجام می‌دهند. امگا از آب دریا به‌عنوان یک محلول کِشنده استفاده می‌کند و غشای موجود در محفظه اجازه عبور نور خورشید و تبادل CO_2/O_2 به‌منظور انجام عملیات فتوسنتز جلبک‌های دریایی را می‌دهد. لایه پشتیبان غشا نیز مانع از دست رفتن ترکیبات فاضلاب می‌شود یا میزان آن را کاهش می‌دهد [۱۱۷ و ۱۱۸].



شکل ۱۲. نمای از سامانه امگا [۵۸].

یکی از چالش‌های اساسی بر سر راه در فرآوری ریزجلبک‌های دریایی، آب‌گیری کارآمد از جلبک‌های دریایی آماده برداشت است زیرا غلظت آن‌ها در محیط کشت بسیار کم است [۱۱۹]. در امگا، این فرایند به‌وسیله غشای FO به کمک اختلاف فشار اسمزی برقرار شده



شکل ۱۱. به‌کارگیری فرایند اسمز مستقیم برای جبران آب از دست‌رفته در برج خنک‌کننده [۱۱۲].

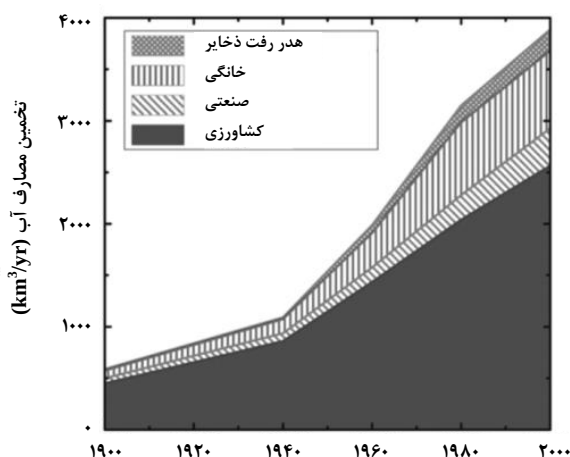
در این فرایند، از آب دریا یا آب شور به‌عنوان محلول خوراک استفاده می‌شود. بخشی از محلول کِشنده یا عامل اسمز رقیق‌شده در فرایند اسمز مستقیم پس از تبادل گرما در یک مبدل حرارتی، به برج خنک‌کننده وارد و پس از انجام فرایند بخشی از این آب که تبخیر، تخلیه و یا دچار ماندگی نشده دوباره به‌صورت تغلیظ شده به‌منظور بازمصرف به‌عنوان محلول کِشنده به سمت فرایند اسمز هدایت می‌شود. در واقع، محلول کِشنده جدید ترکیب سه جریان محلول کِشنده قبلی، جریان محلول پایین برج و جریان محلول خروجی از سامانه تخلیه برج است. هزینه عملیاتی و مصرف انرژی این فرایند نسبت به فرایند اسمز معکوس که برای برج‌های خنک‌کننده استفاده می‌شود، کمتر است [۱۱۲].

۲-۸ غشاء در دریا: تولید سوخت از پسماند

سوخت‌های زیستی یکی از نویدبخش‌ترین منابع پایدار انرژی به شمار می‌روند. مرکز تحقیقاتی ایمز^۱ وابسته به ناسا روی پروژه طراحی و ساخت سامانه‌ای برای ممکن کردن فرآوری سوخت‌های زیستی از جلبک دریایی تحقیق می‌کند. این مرکز، فرایندی را ارائه کرده که در آن از FO به‌عنوان اهرمی برای بهینه کردن رشد و برداشت ریزجلبک‌های دریایی و به‌طور هم‌زمان تصفیه فاضلاب استفاده کرده است. این سامانه را امگا^۲ (OMEGA) نامیده‌اند.

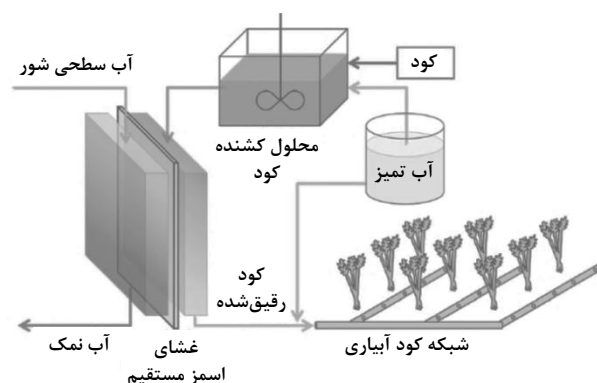
1. NASA's Ames Research Center

2. Offshore Membrane Enclosure for Growing Algae



شکل ۱۳. برآورد آب مصرف شده در سده گذشته [۱۲۴].

هنگام کاربرد فرایند FO (شکل (۱۴))، یک محلول غلیظ حاوی کود به عنوان محلول کِشنده و آب شور به عنوان محلول خوراک به کار گرفته می شود. آب از درون غشا عبور و محلول کود را رقیق می کند. در صورت نیاز، این محلول می تواند با آب خالص مخلوط شود تا به غلظت مورد نظر برسد. محلول کود و آب از راه سامانه آبیاری به زمین کشاورزی منتقل می شوند که به این فرایند «کودآبیاری»^۱ گفته می شود [۱۲۹].



شکل ۱۴. نمایی از کاربرد اسمز مستقیم در فرایند کودآبیاری [۵۸].

با این احوال، هنوز چالش هایی برای به کارگیری این فناوری وجود دارد. آب شور تغلیظ شده باید به صورت مناسب مصرف یا دفع شود. مصرف منابع آب شور باید به دقت مدیریت شود تا مشکلات مربوط به ازدیاد برداشت پیش نیاید. از سوی دیگر، محلول کِشنده نیز

با آب دریا، که دارای شوری فراوانی است، انجام می شود [۱۱۸]. در طول دوره ۱۰ تا ۲۰ روزه، بیشتر از ۷۵٪ آب با فرایند اسمز دفع می شود [۱۱۷] که این عمل سهم بسزایی در کاهش هزینه آبیاری دارد [۱۲۰]. زمانی که جلبک های دریایی آماده برداشت شوند، محلول آبی از داخل کیسه ها به بخش های فرایندی به منظور آبیاری بیشتر تلمبه می شود و کیسه ها آماده پر شدن مجدد با فاضلاب می شوند.

با وجود همه فوایدی که سامانه امگا دارد، چندین چالش برای پژوهش های آینده باقی می ماند. اگرچه رسوب گرفتگی زیستی لایه فعال غشا در امگا ناچیز و یا برگشت پذیر است، ولی مقابله با رسوب گرفتگی لایه پشتیبان، که در تماس پیاپی با آب دریاست، فرایندی دشواری به شمار می آید. از سوی دیگر، در خلال چرخه رشد، فیلم های زیستی جلبک های دریایی موجود در محفظه امگا می توانند آهنگ از دست دادن آب را کاهش دهند. افزون بر این دو مورد، غشاء و ابعاد اجزای محفظه باید در برابر برخورد امواج و دمای سرد مقاوم باشند [۱۲۱-۱۲۳].

۲-۹ صنایع کشاورزی

تولید غذا نیازمند مقدار فراوانی آب است. حدود ۷۰٪ مصرف جهانی آب وابسته به صنایع کشاورزی است (شکل (۱۳)) [۱۲۴]. تولید موفقیت آمیز غذا در آینده نیازمند پیشرفتی پایدار در فناوری های آبیاری و مدیریت آب، از جمله افزایش آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی است. فرایند FO از جمله فرایندهایی به شمار می آید که می تواند با صرف هزینه کم و انرژی پایین به این هدف کمک کند [۱۲۶ و ۱۲۵].

چنانچه میزان شوری آب بالاتر از حد تحمل گیاه باشد، می تواند موجب کاهش یا توقف رشد گیاه شود یا کیفیت فرآورده را کاهش دهد [۱۲۸ و ۱۲۷]. از سوی دیگر، آبرسانی به برخی مناطق که شوری آب برایشان مشکل می آفریند، می تواند بسیار پرهزینه باشد. از این رو، FO می تواند آب شور موجود در منطقه را با آب نمک زدایی شده جایگزین کند و این امکان را فراهم می آورد که از انرژی و آب نمک زدایی شده در محل دیگری استفاده شود. این امر با استفاده از کاربرد ابتکاری مخلوط کود تغلیظ شده و آب استخراج شده از منابع آب شور امکان پذیر است [۵۴].

1. Fertigation

- World Congress, Perth, Western Australia., (2011).
- [10] <http://www.statkraft.com/energy-sources/osmotic-power>, (2016).
- [11] Cath, T. Y., Childress, A. E., Elimelech, M., "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments". *Journal of Membrane Science*. 281(1-2):70-87, (2006).
- [12] McGinnis, R. L., Elimelech, M., "Global challenges in energy and water supply: The promise of engineered osmosis". *Environmental Science & Technology*. 42(23):8625-8629, (2008).
- [13] Cornelissen, E. R., Harmsen, D., Korte, K. F., Ruiken, C. J., Qin, J. J., Oo, H., Wessels, L. P., "Membrane fouling and process performance of forward osmosis membranes on activated sludge". *Journal of Membrane Science*. 319:158-168, (2008).
- [14] Matsuura, T., "Synthetic membranes and membrane separation process". CRC Press, Boca Raton, London. 1st Ed., 471, (1994).
- [15] Achilli, A. C., Cath, T. Y., Marchand, E. A., Childress, A. E., "The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to MBR processes". *Desalination*. 239:10-21, (2009).
- [16] Chung, T. S., Zhang, S., Wang, K. Y., Su, J., Ling, M. M. "Forward osmosis processes: Yesterday, today and tomorrow". *Desalination*. 287:78-81, (2012).
- [17] Skilhagen, S. E., Dugstad, J. E., Aaberg, R. J., "Osmotic power-power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients". *Desalination*. 220:476-482, (2008).
- [18] Gerstandt, K., Peinemann, K. V., Skilhagen, S. E., Thorsen, T., Holt, T., "Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant". *Desalination*. 224:64-70, (2008).
- [19] Zhao, S., Zou, L., Tang, C. Y., Mulcahy, D., "Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges". *Journal of Membrane Science*. 396:1-21, (2012).
- [20] Votta, F., Barnett, S. M., Anderson, D.K., "Concentration of industrial waste by direct osmosis: completion report". Providence, RI., (1974).
- [21] Anderson, D. K., "Concentration of dilute industrial wastes by direct osmosis". University of Rhode Island, USA, Providence, Master of Science, (1977).
- [22] Osmotek, Inc., "Landfill leachate treatment". <http://www.rimnetics.com/osmotek.htm>, (2003).
- [23] York, R. J., Thiel, R. S., Beaudry, E. G., "Full-scale experience of direct osmosis concentration applied to leachate management", in: *Proceedings of the Seventh International Waste Management and Landfill Symposium (Sardinia '99)*. S Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy., (1999).
- [24] Beaudry, E. G., Herron, J., "Direct osmosis for concentrating wastewater". *Proceedings of the 27th International Conference on Environmental Systems Lake Tahoe*, (1997).

باید به صورت مناسب اختیار شود تا کم هزینه، محلول در آب، گزینش پذیری بالا و دارای نیروی محرکه مناسب برای فرایند اسمز باشد [۱۳۰].

۳. نتیجه گیری کلی

با توجه به کاربردهای پرمایه فرایند اسمز مستقیم و مزایای آن، این فناوری می تواند در آینده نزدیک در صنایع مختلف به کار گرفته شود. با این وجود، به دلیل چالش های یادشده در هر یک از کاربردها، ورود آن به بازار نیازمند انجام پژوهش های بیشتر است. چالش های بنیادی فرایند اسمز مستقیم به منظور رسیدن به بازدهی اقتصادی مناسب در برابر فناوری های موجود، عبارت است از ساخت غشای مناسب، دستیابی به محلول کشنده با فشار اسمزی بالا و بهینه سازی شرایط فرایندی. بنابراین، پژوهش های آینده باید در زمینه رفع چالش های موجود در اسمز مستقیم و به کارگیری فرایند در ابعاد بزرگ تر و معرفی کاربردهای دیگر متمرکز شود.

مراجع

- [1] Nicoll, P. G., "Forward osmosis as a pre-treatment to reverse osmosis". *The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse*. 13:318, (2013).
- [2] Cohen, D., Ross, C., "Mixing moves osmosis technology forward". *Chemical Processing magazine*. 67:29-32, (2004).
- [3] Thorsen, T., Holt, T., "The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis". *Journal of Membrane Science*. 335(1-2):103-110, (2009).
- [4] Sharif, A., "Secondary oil recovery". *US Patent*. 7:942,205, (2001).
- [5] Hickenbottom, K. L., Hancock, N. T., Hutchings, N. R., Appleton, E. W., Beaudry, E. G., Xua, P., Cath, T. Y., "Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations". *Desalination*. 312:60-66, (2013).
- [6] Beaudry, E. G., Lampi, K. A., "Membrane technology for direct osmosis concentration of fruit juices". *Food Technology*. 44(6):121, (1990).
- [7] Nicoll, P., "Thermal desalination". *European Patent*. EP2498135, (2013).
- [8] Nicoll, P., Thompson, N., Gray, V., "Forward osmosis applied to evaporative cooling make-up water". *Cooling Technology Institute, Houston, USA*. 19, (2012).
- [9] Thompson, N., Nicoll, P., "Forward osmosis desalination: a commercial reality". *Proceedings IDA*

- [25] Cath, T. Y., Adams, D., Childress, A. E., "Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space: II. combined direct osmosis, osmotic distillation, and membrane distillation for treatment of metabolic wastewater". *Journal of Membrane Science*. 257(1-2):111-119, (2005).
- [26] Cath, T. Y., Gormly, S., Beaudry, E. G., Flynn, M. T., Adams, V. D., Childress, A. E., "Membrane contactor processes for wastewater reclamation in space: Part I. direct osmotic concentration as pretreatment for reverse osmosis". *Journal of Membrane Science*. 257(1-2):85-98, (2005).
- [27] Holloway, R. W., Cath, T. Y., Dennett, K. E., Childress, A. E., "Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate". *Water research*. 41(17):4005-4014, (2005).
- [28] Wieland, P. O., "Design for human presence in space: an introduction to environmental control and life support systems": NASA George C. Marshall Space Flight Center, Alabama, (1994).
- [29] Beaudry, E. G., Herron, J., Peterson, S. W., "Direct osmosis concentration of waste water: Final report". Osmotek Inc, Corvallis, OR., (1999).
- [30] Biogas Works. "Nutrient utilization and anaerobic digestion". <http://www.biogasworks.com/Index/Nutrient%20Utilization%20&%20ADhtml>, (2000).
- [31] Holloway, R. W., Childress, A. E., Dennett, K. E., Cath, T. Y., "Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate". *Water Research*. 41(17):4005-4014, (2007).
- [32] Hydration Technologies Inc., "Hydration bags—technology overview". <http://www.hydrationtech.com/merchantmv?Screen=CTGY&StoreCode=MHTI&CategoryCode=TECH-FO>, (2016).
- [33] HTI, "Military/X Pack". <http://www.hydrationtech.com>, (2005).
- [34] <http://www.survival-supply.com/days-people-emergency-water-supply-water-filtration-pi-5376html>, (2016).
- [35] Cohen, D., "Mixing moves osmosis technology forward". *Chemical Processing magazine*, <http://www.chemicalprocessing.com/articles/2004/346html>, (2004).
- [36] Kravath, R. E., Davis, J. A., "Desalination of seawater by direct osmosis". *Desalination*. 16:151-155, (1975).
- [37] Loeb, S., "Production of energy from concentrated brines by pressureretarded osmosis. I. Preliminary technical and economic correlations". *Journal of Membrane Science*. 1:49, (1976).
- [38] Lee, K. L., Baker, R. W., Lonsdale, H. K., "Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis". *Journal of Membrane Science*. 8(2):141-171, (1981).
- [39] Kessler, J. O., Moody, C. D., "Drinking water from seawater by forward osmosis". *Desalination*. 18:297-306, (1976).
- [40] Pattle, R. E., "Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile". *Nature*. 452.174:660, (1954).
- [41] Norman, R. S., "Water salination: a source of energy". *Science*. 186:350-352, (1974).
- [42] Levenspiel, O., de Nevers, N., "The osmotic pump: in principle, but probably not in practice, fresh water can be extracted from our oceans for no expenditure of energy". *Science*. 183:157-160, (1974).
- [43] Loeb, S., Norman, R. S., "Osmotic power plants". *Science*. 189:654-655, (1975).
- [44] Batchelder, G.W., "Process for the demineralization of water". US Patent. 3,171,799, (1965).
- [45] Frank, B. S., "Desalination of sea water". US Patent. 3,670,897, (1972).
- [46] Glew, D. N., "Process for liquid recovery and solution concentration". US Patent. 3,216,930, (1965).
- [47] Hough, W. T., "Process for extracting solvent from a solution". US Patent. 3,532,621, (1970).
- [48] Hough, W. T., "Solvent extraction into a comestible solute". US Patent. 3,702,820, (1972).
- [49] Lampi, K., Beaudry, E. G., Herron, J., "Forward osmosis pressurized device and process for generating potable water". US Patent. 6,849,184, (2005).
- [50] McGinnis, R. L., "Osmotic desalination process (1)". US Patent. 6,391,205B1, (2002).
- [51] McGinnis, R. L., "Osmotic desalination process (2)". US Patent; Pending PCT/US02/02740, (2002).
- [52] Stache, K., "Apparatus for transforming sea water, brackish water, polluted water or the like into a nutritious drink by means of osmosis". US Patent. 4,879,030, (1989).
- [53] Yaeli, J., "Method and apparatus for processing liquid solutions of suspensions particularly useful in the desalination of saline water". US Patent. 5,098,575, (1992).
- [54] Moody, C. D., Kessler, J. O., "Forward osmosis extractors". *Desalination*. 18:283-295, (1976).
- [55] Khaydarov, R. A., Khaydarov, R. R., "Solar powered direct osmosis desalination". *Desalination*. 217:225-232, (2007).
- [56] McCutcheon, J. R., McGinnis, R. L., Elimelech, M., "A novel ammonia—carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process". *Desalination*. 174(1):1-11, (2005).
- [57] McCutcheon, J. R., McGinnis, R. L., Elimelech, M., "Desalination by ammonia—carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance". *Journal of Membrane Science*. 278(1-2):114-123, (2006).
- [58] Hoover, L. A., Phillip, W. A., Tiraferri, A., Yip, N. Y., Elimelech, M., "Forward with osmosis: emerging applications for greater sustainability". *Environmental Science & Technology*. 45(23):9824-9830, (2011).
- [59] Cath, T. Y., Hancock, N. T., Lundin, C. D., Hoppe-Jones, C., Drewes, J. E., "A multi-barrier osmotic dilution process for simultaneous desalination and purification of impaired water". *Journal of Membrane Science*. 362:417-426, (2010).

- [60] Bamaga, O. A., Yokochi, A., Zabara, B., Babaqi, A. S., "Hybrid FO/RO desalination system: preliminary assessment of osmotic energy recovery and designs of new fo membrane module configuration". *Desalination*. 268:163–169, (2011).
- [61] Lattemann, S., Hopner, T., "Environmental impact and impact assessment of seawater desalination". *Desalination*. 220:1–15, (2008).
- [62] Fritzmann, C., Lowenberg, J., Wintgens, T., Melin, T., "State-of-the-art of reverse osmosis desalination". *Desalination*. 216(1-3):1-76, (2007).
- [63] Sagiv, A., Semiat, R., "Backwash of RO spiral wound membranes". *Desalination*. 179:1-9, (2005).
- [64] Qin, J. J., Oo, M. H., Kekre, K. A., Liberman, B., "Development of novel backwash cleaning technique for reverse osmosis in reclamation of secondary effluent". *Journal of Membrane Science*. 346:8–14, (2010).
- [65] Ramon, G., Agnon, Y., Dosoretz, C., "Dynamics of an osmotic backwash cycle". *Journal of Membrane Science*. 364:157–166, (2010).
- [66] Petrotos, K. B., Lazarides, H. N., "Osmotic concentration of liquid foods". *Journal of Food Engineering*. 49(2–3):201-206, (2001).
- [67] Rosa, M. D., Giroux, F., "Osmotic treatment (OT) and problems related to the solution management". *Journal of Food Engineering*. 49:223–236, (2001).
- [68] Wrostad, R. E., McDaniel, M. R., Durst, R. W., Micheals, N., Lampi, K., Beaudry, E.G., "Composition and sensory characterization of red raspberry juice concentrated by direct-osmosis or evaporation". *Journal of Food Science*. 58:633–637, (1993).
- [69] Jiao, B., Cassano, A., Drioli, E., "Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: a review". *Journal of Food Engineering*. 63:303–324, (2004).
- [70] Dova, M. I., Petrotos, K. B., Lazarides, H. N., "On the direct osmotic concentration of liquid foods. Part I. Impact of process parameters on process performance". *Journal of Food Engineering*. 78:422-430, (2007).
- [71] Dova, M. I., Petrotos, K. B., Lazarides, H. N., "On the direct osmotic concentration of liquid foods. Part II. development of a generalized model". *Journal of Food Engineering*. 78:431-437, (2007).
- [72] Petrotos, K. B., Quantick, P., Petropakis, H., "A study of the direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane – module configuration. I. the effect of certain basic process parameters on the process performance". *Journal of Membrane Science*. 150(1):99-110, (1998).
- [73] Petrotos, K. B., Quantick, P. C., Petropakis, H., "Direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane – module configuration. II. The effect of using clarified tomato juice on the process performance". *Journal of Membrane Science*. 160(2):171-177, (1999).
- [74] Torringa, E., Esveld, E., Scheewe, I., Van den Berg, R., Bartels, P., "Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms". *Journal of Food Engineering*. 49:185–191, (2001).
- [75] Garcia-Castello, E. M., McCutcheon, J. R., Elimelech, M., "Performance evaluation of sucrose concentration using forward osmosis". *Journal of Membrane Science*. 338 (1–2):61-66, (2009).
- [76] Garcia-Castello, E. M., McCutcheon, J. R., "Dewatering press liquor derived from orange production by forward osmosis". *Journal of Membrane Science*. 372:97-101, (2011).
- [77] Nayak, C. A., Valluri, S. S., Rastogi, N. K., "Effect of high or low molecular weight of components of feed on transmembrane flux during forward osmosis". *Journal of Food Engineering*. 106:48-52, (2011).
- [78] Babu, B. R., Rastogi, N. K., Raghavarao, K. S. M. S., "Effect of process parameters on transmembrane flux during direct osmosis". *Journal of Membrane Science*. 280:185-194, (2006).
- [79] Park, K. J., Bin, A., Reis Brod, F. P., Brandini Park, T. H., K., "Osmotic dehydration kinetics of pear d'anjou (pyrus communis l.)". *Journal of Food Engineering*. 52:293-298, (2002).
- [80] Uddin, M. B., Ainsworth, P., Ibanoglu, S., "Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology". *Journal of Food Engineering*. 65:473–477, (2004).
- [81] El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Barbosa, J. J. L., Xidieh Murr, F. E., "Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (carica papaya l.)". *Journal of Food Engineering*. 75:267–274, (2006).
- [82] Garcia, M., Diaz, R., Martínez, Y., Casariego, A., "Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic dehydration of papaya". *Food Research International*. 43:1656–1660, (2010).
- [83] Eren, I., Kaymak-Ertekin, F., "Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology". *Journal of Food Engineering*. 79:344–352, (2007).
- [84] Petrotos, K. B., Tsiadi, A. V., Poirazis, E., Papadopoulos, D., Petropakis, H., Gkoutosidis, P., "A description of a flat geometry direct osmotic concentrator to concentrate tomato juice at ambient temperature and low pressure". *Journal of Food Engineering*. 97:235–242, (2010).
- [85] Khoyi, M. R., Hesari, J., "Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution". *Journal of Food Engineering*. 78:1355–1360, (2007).
- [86] Changrue, V., Orsat, V., Raghavan, G. S. V., Lyew, D., "Effect of osmotic dehydration on the dielectric properties of carrots and strawberries". *Journal of Food Engineering*. 88:280–286, (2008).
- [87] Lombard, G. E., Oliveira, J. C., Fito, P., Andres, A., "Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying". *Journal of Food Engineering*. 85:277-284, (2008).

- [88] Ozdemir, M., Ozen, B. F., Dock, L. L., Floros, J. D., "Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology". *LWT-Food Science and Technology*. 41:2044–2050, (2008).
- [89] Bhatt, P. P., "Osmotic drug delivery systems for poorly soluble drugs". PharmaVentures Ltd, Oxford, UK, http://www.shirelabs.com/news/11_30_04.pdf.26-29, (2004).
- [90] Wright, J. C., Johnson, R. M., Yum, S. I., "DUROS® osmotic pharmaceutical systems for parenteral & site-directed therapy". *Drug Delivery Technology*. 3:64-73, (2003).
- [91] Theeuwes, F., Yum, S. I., "Principles of the design and operation of generic osmotic pumps for the delivery of semisolid or liquid drug formulations". *Annual Biomedicine Engineering*. 4:343–353, (1976).
- [92] Whu, J. A., Baltzis, B. C., Sirkar, K. K., "Nanofiltration studies of large organic microsolute in methanol solutions". *Journal of Membrane Science*. 170:159–172, (2000).
- [93] Luthra, S. S., Yang, C., Freitas do Santos, L. M., White, L. S., Livingston, A. G., "Phase transfer catalyst separation and re-use by solvent resistance nanofiltration membranes". *Chemical Communications*. 1468–1469, (2001).
- [94] Yang, Q., Wang, K. Y., Chung, T. S., "A novel dual-layer forward osmosis membrane for protein enrichment and concentration". *Separation and Purification Technology*. 69:269–274, (2009).
- [95] Aaberg, R. J., "Osmotic power—a new and powerful renewable energy source". *ReFocus*. 4:48–50, (2003).
- [96] Loeb, S., Honda, R., Reali, M., "Comparative mechanical efficiency of several plant configurations using a pressure-retarded osmosis energy converter". *Journal of Membrane Science*. 51:323–335, (1990).
- [97] Loeb, S., "Energy production at the dead sea by pressure-retarded osmosis: challenge or chimera". *Desalination*. 120:247–262, (1998).
- [98] Wick, G. L., "Energy from salinity gradients". *Energy*. 3(1):95-100, (1978).
- [99] The Congressional Research Service SPRD. "Energy from the ocean, a report prepared for the subcommittee on advanced energy technologies and energy conservation research, development, and demonstration of the committee on science and technology", U.S. House of Representatives. Ninety-fifth Congress, Second Session, (2002).
- [100] Loeb, S., "Osmotic power plants". *Science*. 189:350-360, (1974).
- [101] Loeb, S., Hassen, F. V., Shahaf, D., "Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis. II. Experimental results and projected energy costs". *Journal of Membrane Science*. 1:249-269, (1976).
- [102] Mehta, G. D., Loeb, S., "Internal polarization in the porous substructure of a semi-permeable membrane under pressure-retarded osmosis". *Journal of Membrane Science*. 4:261, (1978).
- [103] Mehta, G. D., Loeb, S., "Performance of permasep B-9 and B-10 membranes in various osmotic regions and at high osmotic pressures". *Journal of Membrane Science*. 4:335–349, (1979).
- [104] Loeb, S., "Pressure-retarded osmosis revisited: the prospects for osmotic power at the dead sea". *Proceedings of the Euromembrane '95 Conference*, University of Bath, UK.2:3-11, (1995).
- [105] Loeb, S., Titelman, L., Korngold, E., Freiman, J., "Effect of porous support fabric on osmosis through a loeb-sourirajan type asymmetric membrane". *Journal of Membrane Science*. 129:243–249, (1997).
- [106] Loeb, S., "One hundred and thirty benign and renewable megawatts from Great Salt Lake The possibilities of hydroelectric power by pressureretarded osmosis". *Desalination*. 141:85–91, (2001).
- [107] Loeb, S., "Large-scale power production by pressure-retarded osmosis using river water and sea water passing through spiral modules". *Desalination*. 143:115–122, (2002).
- [108] Jellinek, H. H. G., Masuda, H., "Osmo-power: theory and performance of an osmo-power pilot plant". *Ocean Engineering*. 8:103–128, (1981).
- [109] GMVP Md/pro, "Hybrid desalination demonstration plant". Available Online: <http://www.globalmvp.org>, (accessed on 2015).
- [110] Saito, K., Irie, M., Zaitzu, S., Sakai, H., Hayashi, H., Tanioka, A., "Power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concentrated brine from swro system and treated sewage as pure water". *Desalination Water Treatment*. 41:114–121, (2012).
- [111] Achilli, A., Prante, J. L., Hancock, N. T., Maxwell, E. B., Childress, A. E., "Experimental results from RO-PRO: A next generation system for low-energy desalination". *Environmental Science & Technology*. 48:6437–6443, (2014).
- [112] Nicoll, P. G., Thompson, N. A., Bedford, M. R., "Manipulated osmosis applied to evaporative cooling make-up water – revolutionary technology". *World Congress/Perth Convention and Exhibition Centre (PCEC)*, Perth, Western Australia, IDAWC/PER11-199, (2011).
- [113] Aaronson, S., Dubinsky, Z., "Mass-production of microalgae". *Experientia*. 38:36–40, (1982).
- [114] Miao, X. L., Wu, Q. Y., "Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil". *Bioresource Technology*. 97(6):841–846, (2006).
- [115] Pienkos, P. T., Darzins, A., "The promise and challenges of microalgal derived biofuels". *Bioprod Biorefin*. 3:431-440, (2009).
- [116] Wiley, P. E., Campbell, J. E., McKuin, B., "Production of biodiesel and biogas from algae: A review of process train options". *Water Environ Res*. 83:326–338, (2011).
- [117] Trent, J., "International workshop on offshore algae cultivation". Lolland, Denmark.1, (2009).

- [118] Trent, J. D., Sherwin, J. G., Delzeit, L. D., Flynn, M. T., Embaye, T. N., "Algae bioreactor using submerged enclosures with semi-permeable membranes". US Patent. 0216203, (2010).
- [119] Decker, J., "Blooming biofuel: How algae could provide the solution". Renewable Energy World Magazine. June 22, (2009).
- [120] Algae Systems LLC OMEGA. <http://algaesystemscom/technology/omega/>, (2016).
- [121] Howell, K., "NASA bags algae, wastewater in bid for aviation fuel". The New York Times, May 12th., (2009).
- [122] Nasa-Navy, "OMEGA: A strategic planning discussion". NASA-NAVY: Norfolk, VA, March 25, (2010).
- [123] Zou, S., Gu, Y. S., Xiao, D. Z., Tang, C. Y. Y., "The role of physical and chemical parameters on forward osmosis membrane fouling during algae separation". Journal of Membrane Science. 366:356–362, (2011).
- [124] Food & Agricul Organization of the United Nations (FAO), Database, Availble Online: http://www.fao.org/nr/water_use/index.stm(accessed on 2016).
- [125] Tilman, D., "Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices". Proceedings of the National Academy of Sciences. 96:5995–6000, (1999).
- [126] Falkenmark, M., Rockstrom, J., Karlberg, L., "Present and future water requirements for feeding humanity". Food Security. 1:59–69, (2009).
- [127] Maas, E. V., Hoffman, G. J., "Crop salt tolerance—current assessment". Journal of the Irrigation and Drainage Division. 103:115–134, (1977).
- [128] Flowers, T. J., "Improving crop salt tolerance". Journal of Experimental Botany. 55:307–319, (2004).
- [129] Bar-Yosef, B., Advances in fertigation. Advances in Agronomy. 65:1-77, (1999).
- [130] Achilli, A., Cath, T. Y., Childress, A. E., "Selection of inorganic based draw solutions for forward osmosis applications". Journal of Membrane Science. 364:233–241, (2010).