

## روش‌های تصفیه و نمک زدایی آب‌های شور

محمد صفایی<sup>۱</sup>، حسین معصوم بیگی<sup>۲</sup>

### اهداف آموزشی:

از خوانندگان انتظار می‌رود که پس از مطالعه این مقاله بتوانند:

۱. نمک زدایی را تعریف و روش‌های نمک زدایی آب را توضیح دهند.
۲. مزایا و معایب روش تقطیرغشایی و اسمز معکوس را شرح دهید.
۳. مهمترین عوامل مؤثر در انتخاب روش نمک زدایی آب را بیان نمایند.
۴. ضرورت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در فرآیندهای نمک زدایی را توضیح دهند.

### خلاصه

امروزه تأمین آب شیرین کافی یکی از نیازهای اساسی حیات انسان و صنایع مختلف است. با توجه به رشد جمعیت جهان و محدودیت ذخایر آب شیرین جهان، نمک زدایی ارزاتر و سریع تر از آب دریا، به منظور تأمین انواع مصارف آب، اهمیت روز افزونی پیدا کرده است. شیرین سازی آب شور به کمک روش‌های مختلف در سطح دنیا متناسب با کمیت و کیفیت آب مورد نیاز انجام می‌شود. عمده ترین روش‌های نمک زدایی شامل روش غشایی اسمز معکوس (RO) تقطیر چند مرحله‌ای (MED)، روش‌های حرارتی تبخیر آبی چند مرحله‌ای (MSF)، روش تقطیر با تراکم سازی بخار (VCD) و تبادل یونی (IX) می‌باشند که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند و هر کدام با توجه به شرایط منطقه ای و نیاز، بکارگیری می‌شوند. هزینه آب تولید شده یکی از مهمترین عوامل مؤثر در انتخاب روش است که وابسته به کیفیت آب ورودی، نوع فن آوری، ظرفیت کارخانه، تأمین و مصرف انرژی منجر به افزایش هزینه‌های نمک زدایی و در نتیجه بعضاً غیراقتصادی شدن روش می‌شوند. ویژگی‌های محل احداث کارخانه، هزینه انتقال آب از منبع به محل تصفیه خانه، نحوه توزیع آب تصفیه شده و دفع پسماند تولید شده، متفاوت بوده و این عوامل در انتخاب روش‌های مذکور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر بسیار تأثیر گذار می‌باشند. مطالعات انجام شده نشان داده است هزینه تولید آب طی دو فرآیند MSF و MED تقریباً یکسان، ولی به کمک اسمز معکوس نسبت به MSF کمتر است. در این مقاله تا حدودی به شرح موارد فوق و معرفی منابع تأمین انرژی ارزان و تجدید پذیر برای این فرآیندها پرداخته شده است.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه ا... (عج)، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بقیه ا... (عج)، تهران، ایران. [masoumbeigi@gmail.com](mailto:masoumbeigi@gmail.com)

## مقدمه

است. روزانه بیش از ۵۹/۹ میلیون مترمکعب آب نمک زدایی شده در ۱۴۴۵۱ سایت موجود در سرتاسر جهان تولید می شود. اکثر کشورهای منطقه خاورمیانه و حوزه خلیج فارس (همچون امارات متحده عربی، کویت و عربستان سعودی) به دلیل منابع محدود آب شیرین و البته دسترسی به انرژی ارزان قیمت، در این زمینه پیشتاز هستند. فن آوری های نمک زدایی در سال های اخیر رشد و توسعه چشم گیری داشته اند و هم اکنون، نمک زدایی از آب شور دریاها به عنوان یک روش مهم جهانی برای تأمین مصارف آب جوامع بزرگ و صنایع در آینده مطرح شده است. در ایران روزانه ۸۵/۸۹۴ متر مکعب آب نمک زدایی شده به روش اسمز معکوس، ۵۱/۲۷۰ مترمکعب به روش تقطیر چند مرحله ای MED و ۶۷/۰۶۹ متر مکعب به روش تبخیر آبی MSF تولید می شود که عمدتاً در منطقه جنوبی کشور و خلیج فارس (خصوصاً جزایر کیش و خارک) متمرکز هستند [۷]. روش های مختلف شیرین سازی آب شور موجود در سطح دنیا متفاوت بوده و ظرفیت آب شیرین و انرژی مصرفی در هر یک از روش ها متفاوت می باشد. از دیدگاه تئوری تمامی فرآیندهای شوری زدایی به حدقلی از انرژی نیاز دارند تا بتوانند آب را تصفیه نمایند. ناکارآمدی یک روش زمانی مشخص می گردد که بخواهیم انرژی یا ماده را از جایی به جای دیگر انتقال دهیم و یا از حالتی به حالت دیگر تبدیل نماییم. راندمان پایین در این مرحله به افزایش مصرف انرژی منجر می شود که موجب افزایش هزینه شوری زدایی می شود. هم اکنون در سطح دنیا از روش های مختلفی مثل روش غشایی اسمز معکوس (RO) تقطیر چند مرحله ای (MED) و روش های حرارتی تبخیر آبی (MSF) به عنوان عمده ترین فرآیندها برای شیرین سازی آب های شور استفاده می شود. در روش های حرارتی از گرم کردن آب جهت تولید بخار استفاده می گردد. در فرآیندهای غشایی با استفاده از نیروی ویژه فشاری ناخالصی های آب جدا می شوند. یکی از مهمترین مسائل مرتبط با این تکنولوژی ها، هزینه های آن می باشند که در بعضی مواقع آن را به یک روش ناکارآمد تبدیل می کنند. هزینه های این فرآیندها شامل هزینه سرمایه گذاری اولیه، هزینه راه اندازی و نیز هزینه نگهداری سیستم در طول عمر مفید دستگاه می باشند [۸].

نیاز به آب شیرین به سرعت در حال افزایش است و منابع آب شیرین موجود نمی توانند تمام نیازهای بشر را برآورده نمایند. در حال حاضر با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، دسترسی مردم به آب شیرین کمتر می شود [۱]. امروزه استفاده از آب آشامیدنی برای مصارفی همچون کشاورزی و صنعت در آینده ای نه چندان دور، بشر را دچار بحران کم آبی می کند [۲]. همزمان با افزایش جمعیت، کاهش منابع آب شیرین و افزایش خشکسالی ها، استفاده از منابع آبی غیر متداول نظیر پساب فاضلاب های تصفیه شده، آب لب شور و آب دریا به طور فزاینده ای در سرتاسر جهان مورد توجه قرار گرفته است [۳]. در بخش های جنوبی و جزایر کشور به علت وضعیت خاک، زمین، آب و هوای منطقه و کمبود جریان های سطحی دائمی و حتی نیمه دائمی، مقداری از این جریان ها به سفره های آب زیر زمینی نزدیک سواحل دریاها نفوذ کرده و منجر به آلودگی آب ها شوند [۴]. از این طریق بخشی از آب های زیر زمینی شیرین نیز از دسترس انسان خارج می شوند. به همین علت و با توجه به رشد جمعیت جهان و محدودیت ذخایر آب شیرین جهان، نمک زدایی از آب دریا، اهمیت روز افزونی پیدا کرده است. در واقع انتخاب و توسعه ی یک فرآیند نمک زدایی کارآمدتر و کم هزینه تر از روش های موجود، نیاز ضروری است [۱]. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت، پیش بینی می شود که ۶۷ درصد از جمعیت جهان در سال ۲۰۲۵ با کمبود آب مواجه شوند [۵]. در ایران نیز با توجه به نرخ بالای رشد جمعیت پیش بینی می شود در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان که بهره برداری از آب دریا به دلیل عدم دسترسی و عدم استفاده از منابع سنتی و قابل اعتماد، بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. از این رو انتخاب بهترین روش آب شیرین کنی برای کاهش هزینه ها و تأمین آب کافی، امری اجتناب ناپذیر است [۶]. طبق تعریف سازمان جهانی آب، به تمامی فرآیندهای مربوط به حذف نمک محلول از آب و تهیه آب آشامیدنی از آب شور (با TDS یا شوری ۳/۵٪ یا ۳۵۰۰۰ میلی گرم در لیتر) یا آب لب شور (با TDS ۲۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر) را نمک زدایی گویند. نمک زدایی به عنوان راه حلی جدی برای حل مشکل کم آبی در مناطق ساحلی مطرح

معکوس، تقطیر چند مرحله ای، متراکم سازی مکانیکی بخار آب و تقطیر چند مرحله ای، چگالش گرمایی بخار طرفداران فراوانی دارند [۱۱].

### اسمز معکوس RO

اسمز معکوس، به عنوان یکی از پرترفدارترین روش‌های نمک زدایی بوده که محلول‌های آبی در حضور یک غشای نیمه تراوا استفاده می‌شود. در حالی که « فشار اسمزی » در آن از خاصیت جهت حرکت عادی آب (در اثر فشار اسمزی) از محلول با غلظت پایین تر (آب مقطر) به سمت محلول با غلظت بالاتر (آب شور) است، با اعمال فشار مصنوعی بر روی آب شور، جهت این حرکت عوض شده و نتیجتاً آب شور و نمک در یک طرف غشای نیمه تراوا باقیمانده و در طرف دیگر، آب شیرین سازی شده تولید می‌شود. فشار مصنوعی تولیدی در حدود ۴۰ تا ۸۰ بار بوده و جنس غشای نیمه تراوا، معمولاً سلولز استات، پلی آمید یا پلی سلفون می‌باشد. به علت احتمال گرفتگی غشای مورد استفاده، آب خام شوری که وارد دستگاه RO می‌شود باید عاری از هرگونه مواد معلق، سختی و باکتری بوده و لذا باید فرآیند پیش تصفیه بر روی آن انجام شده باشد [۱۲]. از مزایای سیستم RO می‌توان به مواردی از قبیل اینکه در مقایسه با MSF به انرژی کمتری نیاز دارد، در واحدهای کوچک اولویت دارد، به آب ورودی کمتری نیاز دارد، بو و مزه، شوری و یونهای فلزی را از بین می‌برد، به سرمایه گذاری کمتری برای نصب نیاز دارد، عملکرد آن آسان و راه اندازی آن سریع است، ظرفیت تولید آن بالا و طراحی آن ساده و رایج است، تعمیرات و سرویس آن نیاز به خاموشی کل سیستم ندارد و از معایب این سیستم می‌توان به مواردی مانند: نیاز به فرآیند پیش تصفیه، نیاز به دو یا سه مرحله تصفیه برای رسیدن به کیفیت مطلوب، نیاز داشتن به مواد شیمیایی و جایگزین غشاها که هزینه بالایی دارد (هزینه نگهداری بالاست) را اشاره نمود [۱۳].

توسعه فرآیندهای جدید نمک زدایی در شیرین سازی آب‌های لب شور و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و راهبری و بهره‌گیری از انرژی هسته‌ای، نمک زدایی از آب را به عنوان یکی از گزینه‌های مورد توجه در مقابله با چالش‌های جهانی آب در قرن بیست و یک بدل ساخته است [۹].

### روش‌های نمک زدایی از آب‌های شور

روش‌های تصفیه متعددی برای نمک زدایی از آب دریا ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه اصلی فرآیندهای غشایی و فرآیندهای حرارتی طبقه بندی نمود. این تقسیم بندی بر مبنای سازوکارهای مورد استفاده در جداسازی جامدات محلول از آب انجام شده است. در فرآیندهای غشایی (اسمز معکوس و الکترودیالیز) برای جداسازی نمک‌های محلول و تولید آب شیرین، از نیروی محرکه الکتریکی یا مکانیکی استفاده می‌شود و در فرآیندهای حرارتی (تقطیر ناگهانی، تقطیر چند مرحله‌ای و تقطیر با تراکم بخار) از فرآیند تبخیر برای تبدیل آب به بخار استفاده شده و با میعان بخار تولیدی، آبی کم نمک تولید می‌گردد. به دلیل راندمان بالاتر فرآیندهای غشایی در مصرف انرژی، کاربرد این فرآیندها در مقایسه با فرآیندهای حرارتی، با استقبال بیشتری همراه بوده است. البته باید به این نکته نیز توجه نمود که انرژی مورد نیاز برای غلبه بر فشار اسمزی در آب‌های شور نسبتاً قابل توجه است به طوری که بر مبنای معادلات ترمودینامیکی، کمترین انرژی مصرفی در این فرآیند معادل ۰/۷ کیلو وات بر متر مکعب می‌باشد براین اساس، مدیریت مصرف انرژی و افزایش بازده سیستم‌های نمک‌زدایی از طریق کاهش حجم آب شور تولیدی و نیز انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی مرتبط با کاربرد این فرآیندها را به حداقل برساند [۱۰]. به طور کلی می‌توان روش‌های آب شیرین کنی را به دو بخش اصلی گرمایی و غشایی تقسیم نمود. در ایران و جهان روش‌هایی مانند اسمز

### تقطیر سریع چند مرحله ای MSF

کیفیت بالای آب نمک زدایی شده، مقاومت بالای این فرآیند نسبت به شرایط سخت، قابلیت ترکیب این فرآیند با دیگر فرآیندها، توانایی آن در جدا کردن عوامل بیولوژیکی و معلق، عدم نیاز به تجهیزات بالا برای نگهداری و قابل اطمینان بودن این نوع فرآیند اشاره کرد. در صورت کیفیت پایین آب اولیه (خام)، فرآیندهای تبخیری ترجیح دارند، زیرا احتیاج به فرآیند پیش تصفیه در فرآیندهای MSF، MED و MVC بسیار کمتر از سیستم RO است. از معایب آن نیز می توان به مواردی از قبیل عدم تعمیر و بازیافت این نوع فرآیند، انعطاف پذیری پایین، عملکرد و طراحی پیچیده، هزینه سرمایه گذاری و مصرف بالای انرژی و حساسیت به خوردگی را اشاره کرد. نیاز به بهره برداری و نگهداری، سیستم های MED کمی بیش از سیستم MSF است [۱۵].

### تقطیر غشایی MD

یکی از روش های تولید آب از محلول آب نمک استفاده از تقطیر غشایی است. تقطیر غشایی نوعی از فرآیندهای جداسازی غشایی می باشد که صرفاً یک تماس دهنده برای دو فاز محسوب می شود و از اختلاط دو فاز با یکدیگر جلوگیری می نماید. در این روش اختلاف فشار بخار در دو سمت غشا بدلیل وجود اختلاف دما است [۱۴]. از مزایای تقطیر غشایی می توان به ساختار فرآیندی متراکم، قابلیت عملیاتی شدن در دماهای پایین (بین ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد) که حتی توسط منابع گرمایی مازاد و حتی گرمای خورشیدی قابل دسترسی است، ساختار غشایی بسیار ساده و متنوع تر نسبت به اسمز معکوس مصرف کم انرژی، عدم نیاز به کار در فشار بالا اشاره نمود [۱۰]. پیچیدگی فرآیندهای غشایی، حجم زیاد فاضلاب شور تولیدی در طول بهره برداری، حساسیت بالای غشاها و گرفتگی آنها و انعطاف پذیری کم آنها در برابر تغییرات کیفی آب و درجه حرارت از جمله معایب فرآیندهای غشایی است [۱۲]. در روش اسمز معکوس جنس و ساختار غشا در عملیات جداسازی نقش مهمی دارد در حالی که در روش تقطیر غشایی این اهمیت کمتر است لذا می توان از غشاهایی با قیمت های پایین تر نیز استفاده کرد که این در اقتصاد کلی فرآیند موثر خواهد بود. از آنجا که اندازه حفرات در غشای مورد استفاده در

یک روش حرارتی برای نمک زدایی از آب شور دریا بوده که در آن ده مرحله (یا بیشتر) تقطیر در فشارها و دماهای مختلف انجام می پذیرد. با کاهش دمای آب در ورود به مرحله بعد، فشار نیز کاهش می یابد تا به کاهش نقطه جوش و تبخیر سریع کمک کند. در این روش به آب شور ورودی، مواد ضد گرفتگی و ضد رسوب اضافه می شود. سالانه حداقل یک بار اسیدشویی جهت رفع رسوبات ایجاد شده در تأسیسات نمک زدایی MSF نیاز است. معمولاً تأسیسات نمک زدایی با این روش، در کنار تأسیسات نیروگاهی برق ایجاد می شوند تا از گرمای اضافی تولید شده در فرآیند تولید برق جهت تأمین حرارت مورد نیاز نمک زدایی استفاده شود. روش MSF در بین روش های حرارتی، بیشتر از همه متداول است [۱۴]. از مزایای این سیستم این است که برای آب با کیفیت پایین مناسب می باشد و نیاز کمتری به پیش تصفیه دارد، برای رسیدن به کیفیت بالای آب خروجی با فرآیند تک مرحله ای مطلوب تر است، عمر بهره برداری طولانی تر دارد، تبخیر ناگهانی به جای جوشیدن از پوسته شدن و خوردگی سطح جلوگیری می کند و به تعمیرات و هزینه نگهداری کمتری نیاز است. سیستم های MSF به نگهداری و تعمیرات کمتری نیاز دارند. از معایب این سیستم می توان به مقدار انرژی کل و خصوصاً به انرژی گرمایی نیاز بیشتری است، در واحدهای کوچک مقرون بصره نیست، میزان مصرف آب به دلیل فرآیند سرد کردن بالاست، هزینه سرمایه گذاری بالایی نیاز دارد، بازیافت آب در این روش کمتر است، نرخ راه اندازی آن کند و به مکان وسیعی نیاز دارد [۱۲].

### تقطیر چند مرحله ای MED

یکی از روش های گرمایی برای شیرین سازی آب، تقطیر چند مرحله ای است. در مرحله اول این روش تنها بخشی از آب شور ورودی به سلول تبخیر شده و بقیه آب وارد مرحله دوم می شود که این مرحله فشار کمتری نسبت به مرحله قبلی دارد و بوسیله بخار ایجاد شده در مرحله اول، گرما داده میشود تا با این عمل دمای بخار کاهش یافته و به مایع تبدیل شود که این چرخه چندین مرحله ادامه می یابد [۱۱]. از مزایای این روش می توان به کاهش هزینه های نگهداری با استفاده از انرژی گرمایی اضافی،

قابل توجهی در مصرف مواد شیمیایی مورد نیاز برای احیا می‌شود. رزین‌های کاتیونی قوی قادر به جذب کلیه کاتیون‌های موجود در آب می‌شود ولی نوع ضعیف قادر به جذب کاتیون‌های هستند که ب قلیائیت آب مرتبط است [۱۶].

### تقطیر بخار متراکم (VCD)

سیستم های VCD با متراکم کردن بخار بر روی یک سطح انتقال گرما (لوله) عمل می‌کنند که این سطح انتقال گرما طوری ساخته می‌شود که توانایی انتقال گرمای بخار به آب شور و طرف دیگر سطوح را داشته باشد تا منجر به ایجاد بخار می‌شود. متراکم کننده ها نیاز به انرژی دارند. کمپرسورها باعث کاهش فشار بر روی آب شور تغذیه کننده سیستم می‌شوند در نتیجه دمای جوش پایین می‌آید تا انرژی مصرفی نیز کاهش یابد. از محاسن این روش کیفیت بالای آب تولیدی، ساده و قابل اطمینان بودن آن، هزینه سرمایه گذاری معقول و راحتی قابلیت نقل و انتقال تجهیزات متعلق به این سیستم می‌باشد. از معایب این روش می‌توان به مشکل آماده‌سازی و راه اندازی این روش در ابتدای کار و مقرون به صرفه نبودن مقیاس های بزرگ آن از لحاظ اقتصادی با حداکثر باز یافت کمتر از ۵ درصد انرژی گرمایی در این روش اشاره نمود [۱۷].

### سایر روش های نمک زدایی

تعداد دیگری از فرآیندهای نمک زدایی آب امروزه گسترش پیدا کرده اند که در سطح تجاری نسبت به فرآیندهای MSF، MED و RO موفقیت‌هایی را بدست آورده اند و در آینده ممکن است به دلیل پیشرفت این نوع فرآیندها و همچنین عملکرد مناسب آن‌ها گسترش یابند. مهمترین این روش‌ها عبارتند از انجماد و تبخیر به وسیله انرژی خورشیدی [۱۶]. در بحث انجماد، اولین بار یک فیزیکی‌دان دانمارکی به نام توماس گزارش داد که آب ناشی از ذوب یخ آب دریا شیرین تر است. ادعای این فرآیند انجماد و سپس ذوب سازی این است که قادر به حذف و برداشت آب از محلول نمکی با استفاده از منجمد شدن و کریستال شدن آب است و در حالت ایده آل یخ تولید شده بایستی عاری از نمک باشد. آب شیرین را می‌توان با انجماد تقریبی آب دریا و در نهایت ذوب یخ و

تقطیر غشایی نسبت به اسمز معکوس بزرگتر هستند، مسائل گرفتگی غشاء نیز کمتر خواهد بود. روش تقطیر پتانسیل بسیار خوبی برای تولید آب با درصد خلوص بالا از آب دریا و پساب‌ها را دارد و از آنجا که دمای عملیاتی در این روش بالا نمی‌باشد می‌تواند در صنایع غذایی و یا شیمیایی روشی کارآمد برای تغلیظ محلول‌ها بکار رود [۱۴].

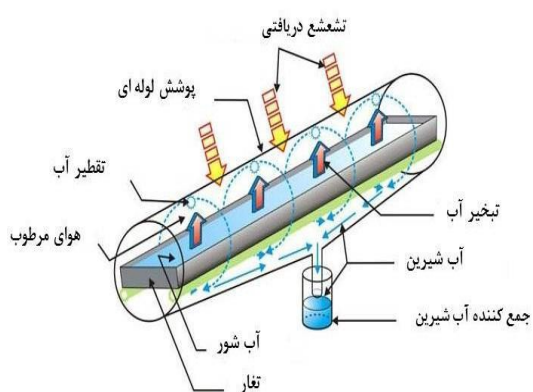
### الکترو دیالیز ED

روش برای نمک زدایی از آب دریا با استفاده از غشای عبوردهنده یون می‌باشد. در این روش پس از الکترولیز شدن آب شور و حرکت یون‌های تشکیل دهنده نمک به سمت آند و کاتد (که در پشت غشاها قرار دارند)، آب نمک‌زدایی شده در فاصله بین دو غشا باقی می‌ماند. برای استفاده از این روش، شوری حداقل (جهت حفظ رسانایی محلول و مصرف منطقی میزان انرژی الکتریکی) باید برابر ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر باشد و میکروارگانیسم‌ها در این روش قابل حذف نیستند [۱۲].

### تبادل یونی IX

در این روش نمک زدایی که یکی از رایج ترین سختی‌گیرها و حذف کننده املاح و کاتیون ها و آنیون‌های آب می‌باشد با استفاده از رزین‌های تبادل یونی، کاتیون‌های آب مثل کلسیم و منیزیم با یون سدیم و یا گروه های  $H^+$  و  $OH^-$  جایگزین می‌گردد. یون‌های هیدروژن و هیدروکسید جایگزین شده نیز پس از ترکیب با یکدیگر، به ملکول آب تبدیل می‌شوند استفاده از این روش در استحصال آب شیرین مصرفی صنایع بیشتر معمول است. رزین‌های تازه دارای یون سدیم به شکل فعال می‌باشند. بر اساس نوع واکنش جانشینی و گروه عامل تعویض متصل به پایه پلیمری رزین، رزین‌های تبادل یونی به گروه‌های مختلف رزین‌های آنیونی قوی و ضعیف و کاتیونی قوی و ضعیف تقسیم می‌شوند این رزین‌ها بایستی بطور متناوب احیاء گردند تا از رسوب املاح آب در آن‌ها جلوگیری گردد. این کار با عبور دادن آب نمک، از رزین صورت می‌گیرد. بطور کلی رزین‌های قوی در یک محدوده وسیع pH و رزین‌های ضعیف در یک محدوده کمتر pH در تصفیه آب عمل می‌نمایند. البته استفاده از رزین‌های ضعیف، منجر به صرفه جویی

آب درون ظرف می شود. بخار آب به علت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و چگالی موجود بین سطح آب و شیشه به سمت بالا حرکت کرده، بدین ترتیب جریان سیال داخل آب شیرین کن برقرار می شود. بخار آب بالا رفته به شیشه سرد برخورد و تقطیر می شود. آب شیرین تولیدی توسط مکانیزمی جمع آوری شده و به داخل محفظه‌ی مورد نظر تعبیه شده جهت ذخیره سازی آب شیرین راه پیدا می کند. شکل زیر نمایی شماتیک از نحوه عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی لوله ای را نشان می دهد [۱۹].



شکل ۱: آب شیرین کن خورشیدی لوله ای

### مقایسه هزینه‌های نمک‌زدایی از لحاظ مصرف انرژی

فاکتورهای مختلفی در هزینه آب تولید شده به روش نمک‌زدایی مؤثر هستند. این فاکتورها عبارتند از: کیفیت آب ورودی، نوع تکنولوژی، ظرفیت کارخانه، دسترسی انرژی و ویژگی‌های محل احداث کارخانه. هزینه انتقال آب از منبع به کارخانه نمک‌زدایی، توزیع آب تصفیه شده و خارج کردن پسماند از فاکتورهای مهم دیگر می باشند.

### کیفیت آب ورودی

کیفیت آب ورودی نقش مهمی در هزینه نمک‌زدایی دارد. جدول ۱ هزینه تأمین آب شیرین از منابع آب‌های مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می کنید نمک‌زدایی آب‌هایی با غلظت TDS پایین (آب لب شور) در مقایسه با غلظت TDS بالا (آب دریا) به انرژی کمتری نیاز دارند، در نتیجه هزینه نمک‌زدایی کاهش می یابد. علاوه بر این پایین بودن TD بالاترین نرخ تبدیل را فراهم می کند و همچنین مصرف مواد شیمیایی کمتر می شود.

تبدیل آن به مایع بدست آورد. فرآیند انجماد شامل سه دسته اصلی انجماد مستقیم، انجماد غیر مستقیم و انجماد خلاء می باشد. در انجماد به روش تماس مستقیم برای درست کردن کریستال و پایین آوردن دمای محلول از مواد سرد کننده مثل بوتان، فرئون و گازهای CFC استفاده می‌کنند در این روش ماده منجمد کننده از طریق یک نازل به داخل آب شور پخش می شود این مواد در فشار پایین تبخیر می شوند و بدین طریق دمای آب پایین آمده و کریستال‌های یخ درست می شوند. در روش تماس غیرمستقیم انرژی حرارتی جهت انجماد از میان دیواره‌های مبدل حرارتی عبور کرده و از طریق انتقال حرارت به آب شور باعث تشکیل کریستال‌های یخ می‌شوند. در انجماد به روش خلاء، خلاء به عنوان ماده سرد کننده عمل می‌کند. در این روش از ایجاد شرایط خلاء جهت تبخیر شدید و ناگهانی آب و در نتیجه سرد شدن توده آب و انجماد آن استفاده می‌شود. بخارهای حاصل به عنوان یک ماده سرد کننده برای کاهش دمای محلول و تشکیل کریستال‌های یخ استفاده می‌شوند. از محاسن این نوع آب شیرین‌کن‌ها می‌توان مقدار انرژی مورد نیاز که در مقایسه با روش‌های تقطیر پایین می‌باشد و از طرفی به دلیل اینکه انجماد در دمای پایین صورت می‌گیرد مشکلاتی مثل خوردگی و لایه گذاری را کاهش می‌دهد و از طرفی از معایب این نوع فرآیندها می‌توان به بالا بودن سرمایه گذاری اولیه و ماندن طعم و بو که در آب می‌گذارد اشاره کرد [۱۸]. فرآیند آب شیرین کن خورشیدی شبیه به یک قسمت از چرخه هیدرولوژی طبیعی می‌باشد که در آن آب دریا توسط نور خورشید گرم شده و تولید بخار می‌کند و سپس این بخار آب در یک سطح سرد متراکم شده و بر اثر جمع شدن این سطح متراکم تولید آب می‌کند [۱۶]. یک نوع از آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، آب شیرین کن خورشیدی لوله‌ای است. در این نوع انتقال جرم و حرارت در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی، ناشی از جابجایی طبیعی داخل محفظه به علت نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و چگالی ایجاد شده در سیال می‌باشد. در یک آب شیرین کن خورشیدی ابتدا تشعشع خورشید جذب کف ظرف حاوی آب شور شده و متعاقب آن، آب درون آن شروع به گرم شدن می‌کند. حرارت دریافتی باعث تبخیر

محیط وارد نکنند. در پسماندها، تمامی نمک‌های جدا شده از آب شور اولیه به همراه مواد دیگری که اغلب زیان بخش است وجود دارد. دفع شور آب غلیظ از فاکتورهای مهم اقتصادی است و همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل ویژگی‌های محل کارخانه، ویژگی‌های زمین شناسی، شرایط خاک، نزدیکی به محل دفع پسماند، موافقت عمومی و نوع روش دفع پسماند، می باشد. بر اساس این محدودیت‌ها هزینه دفع پسماند غلیظ در محدوده ۵ تا ۳۳ درصد هزینه آب تولید شده است. روش‌هایی از قبیل برگشت آب شور به داخل جریان ورودی یا به انشعاب فرعی دیگر، توزیع در سطح آب تزریق به چاه‌های عمیق، استفاده از برکه‌های تبخیر، استفاده از مکانیزم تبخیر به منظور تبدیل پسماند مایع به پسماند جامد، از جمله روش‌هایی است که به منظور دفع شور آب غلیظ در کارخانه‌های نمک زدایی استفاده می شود. در صورتی که هزینه‌های مربوط به حمل و نقل شور آب، تصفیه نهایی و ساخت کانال خروجی قابل ملاحظه باشد، توزیع شور آب در سطح آب یک راه حل متعارف و مقرون به صرفه است. به هر حال هزینه‌های دفع پسماند کارخانه‌های نمک‌زدایی داخلی (کارخانه‌هایی که از ساحل فاصله دارند) معمولاً بیشتر از کارخانه‌های ساحلی است؛ زیرا کارخانه‌های داخلی نمی توانند پسماند را در سطح آب دفع کنند، به جز در شرایطی که بتوانند پسماند را با کیفیت قابل قبولی تصفیه کرد [۸].

تکنولوژی‌های مختلفی به منظور نمک زدایی وجود دارد، اما از بین آن‌ها روش‌های MED، MSF و RO رایج هستند. در سراسر دنیا اغلب از این روش‌ها به منظور نمک‌زدایی آب دریا استفاده می شود (نمودار ۱ و جدول ۳) [۲۰].

با توجه به این که فرآیندهای نمک زدایی به منظور تأمین انرژی از منابع مختلف استفاده می کنند و بازده انرژی آن‌ها متفاوت است؛ بنابراین انجام مقایسه بین آن‌ها کار ساده ای نیست. از طرفی همانطور که قبلاً ذکر شد فاکتورهای مختلفی بر هزینه نمک زدایی موثر هستند؛ از این رو به منظور مقایسه صحیح بین سه نوع تکنولوژی مختلف RO، MSF و MED ضروری است که شرایط آن‌ها یکسان باشد. هزینه‌های نمک زدایی براساس داده‌هایی در سال ۲۰۰۳ توسط آزمایشگاه‌های ملی سندیا در جدول ۲ ذکر شده است.

تصفیه مقدماتی آب‌های سطحی از جمله آب‌های جزر و مدی به دلیل وجود آلودگی بیشتر در مقایسه با آب‌های لب شور زیرزمینی هزینه بیشتری در بر دارد.

جدول ۱: مقایسه هزینه تامین آب شیرین از منابع آبی

#### مختلف [۸]

منبع تامین آب	هزینه تولید (دلار بر متر مکعب)
شیرین سازی آب دریا	۰/۰۷۳ - ۱/۶۲۱
شیرین سازی آب شور چاه‌ها	۰/۳۶۵ - ۰/۶۴۹
تصفیه آب‌های فاضلاب شهری	۰/۲۹۲ - ۰/۴۷۳

#### ظرفیت کارخانه

ظرفیت کارخانه از فاکتورهای مهم در طراحی می باشد. این فاکتور بر قسمت‌هایی از قبیل: اندازه واحدهای تصفیه، میزان پمپاژ، مخزن ذخیره آب و سیستم توزیع آب اثر می گذارد. کارخانه‌هایی با ظرفیت بالا به سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری در مقایسه با کارخانه‌های ظرفیت پایین نیاز دارند ولی به دلیل اقتصاد مقیاس (Economy of Scale) افزایش تولید به منظور سرشکن کردن هزینه سربار، هزینه تولید برای کارخانه‌های با ظرفیت بالا کمتر می شود.

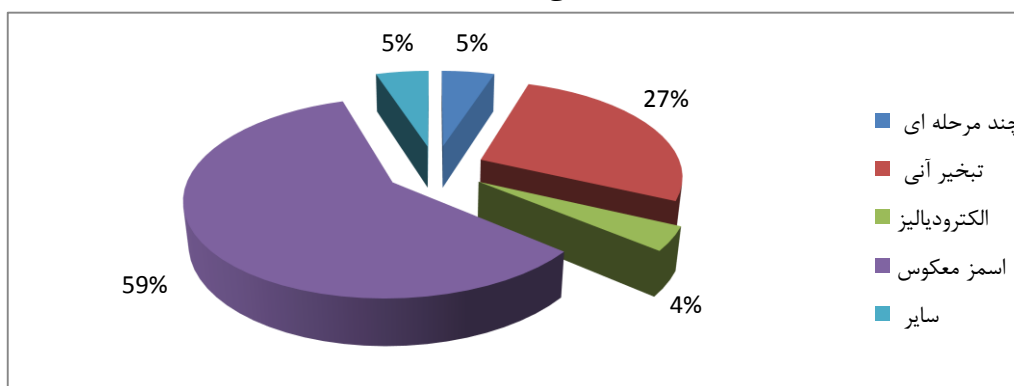
#### خصوصیات سایت

خصوصیات سایت یکی از عوامل مؤثر بر هزینه تولید است. در دسترس بودن زمین کافی و خصوصیات آن هزینه تولید را تعیین می کند. به عنوان مثال، اگر موقعیت کارخانه به منبع آب و محل تخلیه شور آب غلیظ نزدیک باشد؛ در نتیجه هزینه پمپاژ و هزینه‌های نصب لوله به طور قابل ملاحظه ای کم می شود. همچنین اگر کارخانه حالت گسترش یافته یک تصفیه خانه آب باشد، هزینه‌های مربوط به ساخت دریچه مکش آب، تصفیه مقدماتی و دفع شور آب غلیظ، در مقایسه با ساخت یک کارخانه جدید کاهش می یابد.

#### دفع زه آب آب شیرین کن‌ها

چگونگی تخلیه آب شور پسماند از مسائل مهم در برنامه نمک زدایی به شمار می رود. طراح باید سیستم را طوری طراحی کند که تخلیه مواد پسماند در آب خسارتی به

نمودار ۱- درصد تولید آب نمک زدایی شده دنیا از فرآیندهای مختلف در سال ۲۰۱۱



جدول شماره ۲: مقایسه هزینه‌های نمک زدایی آب دریا در هر فرآیند

پارامتر	MSF	MED	RO
ظرفیت تولید ( متر مکعب در روز)	۲۰۵۰۰۰	۲۰۵۰۰۰	۲۰۵۰۰۰
غلظت TDS آب دریا ppm	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۴۵۰۰
توان مورد نیاز ( مگا وات)	۳۴	۲۸	۴۲
هزینه سرمایه گذاری کارخانه نمک زدایی ( میلیون دلار)	۱۸۰	۱۹۵	۱۷۰
هزینه انرژی حرارتی (میلیون دلار)	۱۰۵	۱۰۵	۰
هزینه توان الکتریکی (میلیون دلار)	۹۲	۷۶	۱۱۴
هزینه عملیات و نگهداری (میلیون دلار)	۲۵	۲۲	۶۰
هزینه کل (میلیون دلار)	۴۰۲	۳۹۸	۳۴۴
مقدار تولید خالص (میلیون متر مکعب)	۷۷۰	۷۷۰	۷۷۰
هزینه تولید آب (میلیون دلار)	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۴۵۰

جدول شماره ۳: استفاده از آب شیرین کن‌ها (درصد) و فرآیند نمک زدایی در جهان در سال ۲۰۱۱

آسیای میانه	آمریکای شمالی	اروپا	آسیا	آفریقا	جزایر کارائیب	آمریکای جنوبی
۴۹/۱	۱۶/۲	۱۳/۳	۱۱/۲	۵/۱	۳/۵	۰/۸



نمونه خوب استراتژی مهندسی در حال گسترش باشد. سیستم‌های انرژی خورشیدی، فن آوری‌های جدیدی هستند که برای تأمین گرما، آب گرم، الکتریسیته و حتی سرمایش منازل مسکونی، مراکز تجاری و صنعتی بکار می‌روند. از آنجا که باد به دلیل گرادیان فشار به وجود آمده از تابش غیر یکنواخت خورشید به سطح زمین به وجود می‌آید، می‌توان از انرژی تولید شده توسط توربین‌های بادی یا آسیاب‌های بادی در تولید الکتریسیته و شیرین‌سازی آب با روش‌های اسمز معکوس یا تراکم‌سازی بخار استفاده کرد. نیاز انرژی هر یک از سیستم‌های آب شیرین‌کن به دو منبع اصلی انرژی الکتریکی و گرمایی تقسیم می‌شود در شکل یک، نمونه‌ای از تلفیق انرژی خورشیدی با واحد آب شیرین‌کن ارائه شده است. در رابطه با انرژی حاصل از توربین‌های بادی نیز می‌توان از انرژی الکتریکی حاصله جهت استفاده در سیستم آب شیرین‌کن بهره برد. با توجه به این مطالب می‌توان انرژی مورد نیاز برای واحدهای آب شیرین‌کن را به سهولت از انرژی تولید شده توسط این منابع تجدید پذیر تأمین نمود که چگونگی تلفیق و فناوری‌های مربوط به آن بایستی طراحی گردد. همچنین با توجه به مطالب مذکور، نیاز انرژی هر یک از سیستم‌های آب شیرین‌کن به دو منبع اصلی انرژی الکتریکی و گرمایی تقسیم می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌ای از تلفیق انرژی خورشیدی با واحد آب شیرین‌کن ارائه شده است. در رابطه با انرژی حاصل از توربین‌های بادی نیز می‌توان از انرژی الکتریکی حاصله جهت استفاده از سیستم آب شیرین‌کن بهره برد [۲۲].

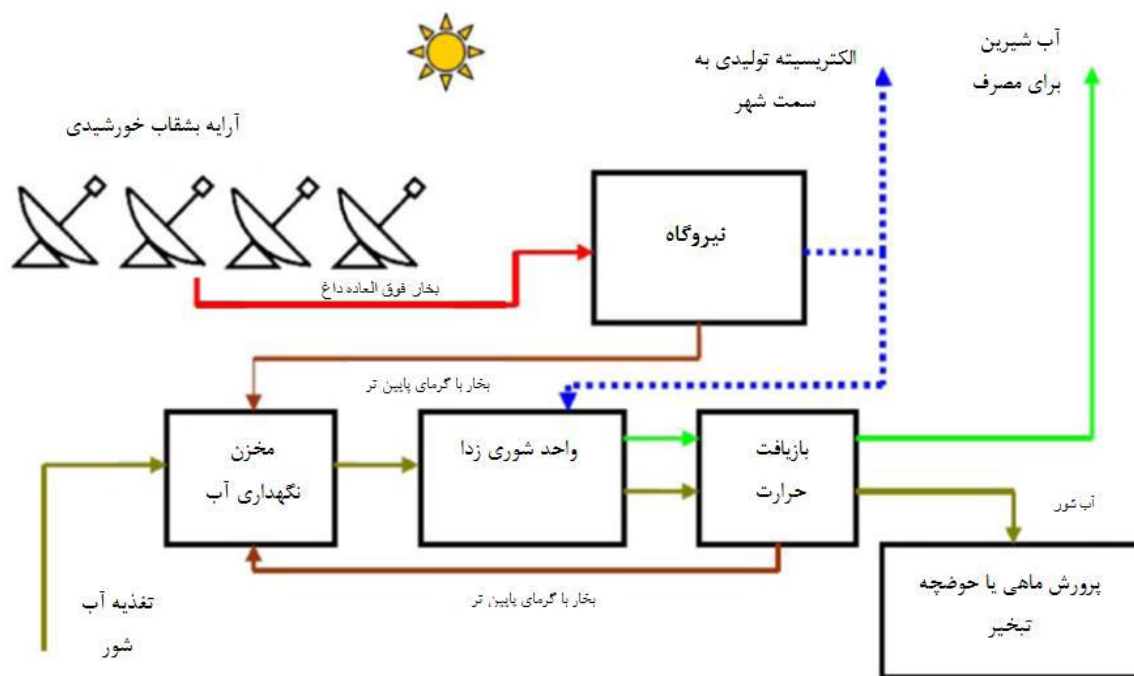
بسیاری از راه حل اصلی برای نمک زدایی با استفاده از فرآیندهای غشایی و انرژی‌های تجدید پذیر پیشنهاد شده است. اغلب استفاده از سیستم اسمز معکوس را به عنوان یکی از کارآمدترین از لحاظ مصرف انرژی می‌دانند و برخی از این برنامه‌ها برای جوامع کوچکی نیازمند پیشنهاد شده است. اگرچه ممکن است این سیستم در مقیاس‌های بزرگ نیز کارایی لازم را داشته باشد. از طرفی در مکان‌هایی که این منابع انرژی تجدید پذیر نظیر باد و خورشید وجود دارند، می‌توان این نوع سیستم‌ها را پیشنهاد داد به شرطی که این نوع سیستم‌ها به درستی طراحی و نصب گردند.

با توجه به جدول شماره ۲ نتیجه گیری می‌شود:

- ✓ به دلیل یکسان بودن شرایط (کیفیت آب، ظرفیت تولید، ویژگی‌های محل) تقریباً هزینه تولید آب در این فرآیندها یکسان است.
- ✓ هزینه عملیات و نگهداری در فرآیندهای حرارتی MED, MSF برابر و حدود ۶ درصد هزینه کل می‌باشد.
- ✓ هزینه عملیات و نگهداری در فرآیند RO به دلیل انسداد غشاء و در نتیجه تعویض آن‌ها حدود ۳ برابر روش‌های MED, MSF است.
- ✓ انرژی مورد نیاز برای فرآیندهای حرارتی عملاً مستقل از غلظت نمک است و در فرآیندهای غشایی رابطه مستقیم با غلظت نمک دارد.
- ✓ فرآیندهای MED از لحاظ مصرف انرژی کم مصرف هستند.
- ✓ فرآیندهای حرارتی MSF با اینکه از لحاظ طراحی کامل می‌باشند اما بیشترین انرژی را مصرف می‌کنند [۸].

### بررسی روش‌های استحصال انرژی از منابع تجدید پذیر

کاهش در میزان مصرف انرژی علاوه بر کاهش هزینه‌های نمک زدایی، موجب کاهش نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی به منظور تأمین منبع انرژی برای نیروگاه‌های نمک زدایی از آب دریا می‌شود. بدین منظور روش‌های به حداقل رساندن انرژی مصرفی و یا جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر جهان و همچنین بکارگیری روش‌های طراحی و بهره برداری جدید و کارآمد به منظور کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای امری ضروری است [۲۱]. بدون شک، نمک زدایی از آب توسط منابع انرژی تجدید پذیر در نواحی از جهان که در آن‌ها نور خورشید و یا باد قابل استفاده و در دسترس است بسیار مناسب می‌باشد. آب شیرین‌کن‌های غشایی همراه با انرژی‌های تجدید پذیر (قابل برگشت) در زمان حال که منابع آب شیرین و سوخت رو به اتمام می‌باشد بسیار مناسب است [۱۶]. کاربردهای بالقوه آب شیرین‌کن غشایی همراه با انرژی‌های تجدید پذیر (قابل برگشت) برای صنایع و کشورهای در حال رشد ممکن است یک



شکل ۲- نمای کاربرد انرژی خورشیدی در نمک زدایی

فاکتورهای مختلفی بر هزینه تولید اثر می گذارد، اما کیفیت آب ورودی، ظرفیت کارخانه و خصوصیات محل، از فاکتورهای مهم هستند. براساس نتایج مطالعات انجام شده در خصوص بررسی روش های مقایسه ای مصرف انرژی در روش های نمک زدایی، می توان نتیجه گرفت که هزینه تولید آب در دو فرآیند MSF و MED یکسان است و هزینه تولید آب در روش اسمز معکوس نسبت به فرآیندهای حرارتی، کمتر است. فرآیندهای حرارتی به دلیل دفع زه آب با دمای بالا اثر مخربی بر محیط زیست وارد می کنند. به منظور کاهش هزینه تولید آب، بهتر است فرآیندهای حرارتی با نیروگاه های برق ترکیب شوند. در کل هزینه های نمک زدایی از آب به دلیل مصرف انرژی نسبت به سایر سیستم های تصفیه بالاتر است، بنابراین با توجه به اینکه میزان مصرف انرژی از طریق تغییرات ساختاری، پیشرفت های فنی در سطح جهان کاهش یافته است و از طرفی شوک افزایش بهای نفت و ترس از به اتمام رسیدن این منبع، موجب شده بکار گیری انرژی های تجدید پذیر بیشتر مورد توجه قرار گیرد چون این منابع آلاینده بسیار جزئی تولید می نمایند و در شرایط خاص مثل مکان های دور از مراکز شهری و یا مکان هایی که منابع این انرژی ها فراوان هستند، مورد استفاده قرار می گیرند.

می توان یک سری راه حل های مناسب برای استفاده همزمان از دستگاه های آب شیرین کن که با روش غشایی کار می کنند را با استفاده از انرژی های تجدید پذیر ارائه داد. طراحی سیستم اسمز معکوس و تقطیر غشایی MD با استفاده از انرژی خورشیدی و باد، و یا استفاده از آن ها به صورت همزمان (هیبریدی) و انرژی حاصل از موج و فشارهای هیدروستاتیکی نیز از این نوع روش ها می باشند [۲۱].

### نتیجه گیری

با توجه به مطالب فوق می توان برای مقابله با پیامدهای ناشی از خشکسالی های پی در پی و همچنین سایر عواملی همچون تغییر اقلیم که ما را با بحران آب مواجه نموده، می توان از شیرین کردن آب های شور و لب شور به عنوان راهکاری مناسب استفاده کرد ولی هزینه سرمایه گذاری در فرآیندهای نمک زدایی بسیار زیاد است و انرژی زیادی در این فرآیندها مصرف می شود و به طبع آن هزینه تولید آب افزایش می یابد. هزینه سرمایه گذاری و هزینه عملیات و نگهداری کاملاً به یکدیگر وابسته است، به طوری که افزایش یکی منجر به کاهش دیگری خواهد شد.

## سوالات آموزشی:

۱. نمک زدایی را تعریف و روش‌های نمک زدایی از آب را به صورت مختصر توضیح دهید؟
۲. مزایا و مشکلات سیستم‌های حرارتی و غشایی را توضیح و با یکدیگر مقایسه کنید؟
۳. مهمترین عوامل موثر در انتخاب روش نمک زدایی آب را بیان نمایید؟
۴. ضرورت استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر در فرآیندهای نمک زدایی را توضیح دهید؟

## منابع

- مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۳۹.
- ۱۱- اسماعیلی ا، باغبان اصغری نژاد ه، زرغامی م. مقایسه روش‌های نمک زدایی آب‌های شور به روش تصفیه پساب با یکدیگر مقایسه کنید؟ مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۱۹.
- 12-Yang K.L, Ying T.Y, Yiacoumi S, Tsouris C, Vittoratos E.S. Electrosorption of ions from aqueous solutions by carbon aerogel: An electrical double-layer model. *J. Langmuir*. 2001;17:p1961-9.
- ۱۳- لاریمه ن، آیتی ب. بررسی و انتخاب بهترین روش شوری زدایی بر پایه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در استان بوشهر. چکیده مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۳۴.
- ۱۴- ادریس فالچی م، مظفری ا. مدلسازی تفتیر غشایی با لایه هوا (AGMD) برای تولید آب شیرین از آب‌های شور. چکیده مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۱۵.
- 15-Adibfar A. Technical-Economic Comparison of MED, MSF & RO, and select the Optimized Desalination Technologies, the abstracts of International Workshop and Conference on Desalination of Brackish Seawater and Wastewater Treatment. 19-21 June, 2012 Tehran- Iran, pb82.
- 16-Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubkhanah, Jong-Mihn Wie, Advances in seawater desalination technologies, *Desalination* 221 (2008) 47-69.
- 17-WHO (World Health Organization). Desalination for Safe Water Supply (Guidline for the Health and Enviromental Aspects Applicable to Desalination). Translated by: Mahvi A, Mazloomi S. 2009: p 30,108.
- ۱- عرب ف. نمک زدایی آب: حال و آینده. مجله ی آب و محیط زیست، ۱۳۸۴، ۶۴: ۲۰-۱۱.
- ۲- عمیدپور م، ضامن م، سوفاری م. بهینه سازی مصرف انرژی در آب شیرین کن خورشیدی. ششمین همایش ملی انرژی در ایران، ۱۳۸۴، تهران.
- 3-Benko K.L, Drewes J.E. Produced water in the Western United States: geographical distribution, occurrence, and composition. *J Environmental Engine Sci*. 2008; 25:pp 239-246
- ۴- تقوی م. آب و آب رسانی در جزیره قشم. ماهنامه ی قشم. ۱۳۸۳، ۱۰۴: ۱۸-۱۵.
- 5-WHO (2011). Guidelines for Drinking-water Fourthedition. [http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf).
- 6-Mezher T, Abbase. Z, Khaled A. Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *J. Desalination*. 2011; 266: p 263-273.
- ۷- غریبی ح، ر، علی ق. ا. دستاوردهای نوین در کاهش اثرات زیست محیطی فیزیکی شیمیایی- پروژه‌های نمک زدایی از آب دریا. چکیده مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۴۲.
- ۸- منتظری م، بناکار ا، قبادیان ب، همتیان ر. بررسی فاکتورهای مختلف بر هزینه نمک زدایی. چکیده مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص: ۲۹.
- ۹- فنادی م. آب شیرین کن‌های شهری و روستایی ایران و کیفیت آب استحصال شده ی آن‌ها. مجله ی آب و محیط زیست، ۱۳۸۴؛ ۶۴: ۱۰-۳.
- ۱۰- قاسمی ع، اشرف زاده م. ح. پیش بینی و مدیریت اثرات زیست محیطی فرآیندهای نمک زدایی با رویکرد پویایی سیستم. چکیده

Conference on Desalination of Brackish, Seawater and Wastewater Treatment, 19-21 June, 2012 Tehran- Iran.

21- Charcosset C, A review of membrane processes and renewable energies for desalination, *J desalination* 2009; 245: p 214-231.

۲۲- عبدلی ر، پهلوانی م. روش‌های حداقل سازی مصرف انرژی در واحدهای نمک زدایی به روش اسمز معکوس، مقالات اولین کارگاه بین المللی و همایش تخصصی نمک زدایی آب‌های شور، لب شور و تصفیه پساب، ایران، خرداد ۱۳۹۱، تهران، ص:۳۵.

۱۸- ناصری س، یونسیان م، محوی ا.ح، محمدی م. ع. بررسی فرآیند انجماد غیر مستقیم در نمک زدایی از آب شور در خلیج فارس. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران. ۱۳۹۰؛ ۴(۳): ص: ۳۶۳-۳۷۴.

19-Ahsan. A, Fukuhara. T. Mass and Heat Transfer Model of Tubular Solar Still. *Solar Energy*. 2010. 84: p 1147-1156.

20-Hussain A. Comparison Of Pakistan And Saudi Arabia In Desalination Field, the abstracts of International International Workshop and