سال پنجم، شماره ۲، ۱۳۹۷، صفحات ۲۵ تا ۳۶
نشریه آب و توسعه پایدار

2019, Vol.5, No.2, Pages 25 to 36
Journal of Water and Sustainable Development

مرور تحلیلی فرآیند اسمز معکوس و فناوری‌های پیش‌تصفیه در سامانه‌های آب‌شیرین‌کن درون‌سرزمینی

مهسا شه‌عابدی[۱]، سید حسین هاشمی[۲*]، مهدی گوگل[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع طبیعی، گرایش آلودگی‌های محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. ۲- دانشیار گروه آلودگی‌های محیط‌زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. ۳- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: H_hashemi@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۰۹

چکیده

آب شیرین کمتر از ۱٪ منابع آبی جهان را تشکیل می‌دهد، برداشت بی‌رویه از این منبع و نفوذ آب دریا در مناطق تحت تنش آب به‌سرعت در حال تخلیه آن می‌باشد. روند تخلیه‌ی آب در خاورمیانه به سطح بحرانی رسیده است، زیرا سرانه‌ی آب در این منطقه بسیار پایین‌تر از میانگین سرانه‌ی جهان می‌باشد. نمک‌زدایی[۱] آب با تولید آب شیرین از آب دریا، آب‌های لب‌شور زیرزمینی، آب زهکشی و پساب حاصل از تصفیه‌ی آب، رهیافتی برای کاهش تنش آب است. طی این فرآیندها، جریان زائدی با شوری بالا به‌عنوان محصول فرعی تولید می‌شود که دفع آن هزینه‌بر است. حجم عظیمی از آب تغلیظ شده[۲] که حاوی ترکیبات باقی مانده است به محیط تخلیه می‌شود و معضلی جدی محسوب می‌شود. به‌دلیل عدم امکان دفع شورابه[۳]ی تولیدی، نمک‌زدایی درون سرزمینی با نمک‌زدایی ساحلی متفاوت است. در شیرین‌سازی آب‌های زیرزمینی، املاح محلول در آب موجب گرفتگی می‌شود و رسوب‌گذاری منجر به کاهش تولید آب با انرژی مشخصی طی این فرآیندها می‌شود. از این‌رو تکامل فرآیندهای نمک‌زدایی، این فناوری را ارزان‌تر، مطمئن‌تر و کم‌مصرف‌تر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: نمک‌زدایی، اسمز معکوس، شورابه.

Critical Review of Reverse Osmosis and Pretreatment Techniques of Inland Desalination Plants

M. Shah Abedi[1], S.H. Hashemi[2*], M. Googol[3]

1- MSc of Environmental Pollutants, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 2- Associate Professor, Environmental Science Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 3- MSc of Chemistry Engineering, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.

*(Corresponding author Email: H_hashemi@sbu.ac.ir)

Received: 19-11-2017
Accepted: 31-07-2018

Abstract

Freshwater, which accounts for less than 1% of world water resources, is rapidly decreasing due to extreme levels of withdrawals and the influence of seawater in areas under tension. This decreasing trend has reached a critical level in the Middle East since the water per capita in this area is much lower than the world average. Desalination is an approach for reducing water stress by producing freshwater from seawater, saline groundwater, drainage water, and wastewater in the coastal and inland areas. During these processes, rejected streams with high salinity as a sub-product are produced in which disposing of them is costly. A large amount of concentrated water containing the remaining compounds discharge into the environment and is potentially considered as a serious problem. Inland desalination due to the impossibility of disposing the produced brine is different from the desalination of seawater. In desalination of underground saline waters, fouling occurs with water-soluble salts and sedimentation reduces the production of water with a certain amount of energy during these processes. Therefore, the evolution of desalting technologies makes it cheaper, more reliable, and less productive.

Keywords: Desalination, Reverse osmosis, Brine.

DOI: 10.22067/jwsd.v5i2.68853

مقدمه

دسترسی به آب و غذا در کل دنیا برای بقای بشریت و اطمینان از استانداردهای مطلوب زندگی امری ضروری است (Shannon و همکاران، ۲۰۰۸). بیش از نیمی از جمعیت جهان به آب پاک دسترسی ندارند درحالی‌که نیمی دیگر با مشکل اقتصادی کمبود آب مواجه هستند (Laxman و همکاران، ۲۰۱۵). تخمین زده شده است که تا سال ۲۰۲۵ حدود ٪۵۰ از جمعیت جهان در مناطق کم‌آب زندگی خواهند کرد که این امر نشان‌دهنده اهمیت تصفیه و مدیریت آب می‌باشد (Quist-Jensen و همکاران، ۲۰۱۵). رشد جمعیت، نگرانی‌های مربوط به غذا، اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی، استفاده‌ی بی‌رویه از منابع آب شیرین و تخریب زمین در سراسر جهان جوامع علمی را مجبور به یافتن رهیافتی جایگزینی برای مدیریت منابع کنونی کرده است. در واکنش به پیشگویی ملل متحده مبنی‌بر اینکه تا اواسط قرن حاضر، ۷۲ بیلیون از مردم با مشکل کمبود آب مواجه می‌شوند، صنعت آب روی شیرین‌سازی منابع آب شور سرمایه‌گذاری کرده است (Hameeteman، ۲۰۱۳). در نقاطی که تنش آب بالا است، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند اثرات مخربی بر جریانات طبیعی، تالاب‌هایی که از طریق آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌شوند و اکوسیستم‌های مربوطه داشته باشد. همچنین در مناطق دلتایی، تخلیه‌ی آب‌هایی زیرزمینی ممکن است منجر به نشست زمین و نفوذ آب شور شود (Wada و همکاران، ۲۰۱۰). مشکل کمبود آب نه تنها در فعالیت‌های انسانی و صنعتی بلکه در تولید مواد غذایی مناسب و پایدار نیز تأثیرگذار است. نمک‌زدایی راهی برای کاهش تنش آب در مناطق درون سرزمینی و ساحلی است (Quist-Jensen و همکاران، ۲۰۱۵). تصمیم به استفاده از یک فناوری شیرین‌سازی خاص تحت تأثیر شوری آب خام[۴]، کیفیت آب تولیدی مورد نیاز و همچنین عوامل خاصی از قبیل هزینه‌ی کار، در دسترس بودن منطقه، هزینه‌ی انرژی و تقاضای محلی برای برق دارد (Elimelech و Phillip، ۲۰۱۱). نگرانی‌های قابل توجهی در مورد اثرات محیط‌زیستی ناشی از فناوری‌های شیرین‌سازی آب وجود دارد، یکی از این نگرانی‌ها روند روبه‌رشد مشکلات بالقوه‌ی محیط‌زیستی به‌دلیل افزایش تمایل به نمک‌زدایی آب است (Morillo و همکاران، ۲۰۱۴). افزایش تعداد آب‌شیرین‌کن‌ها در جهان موجب شده تا مدیریت تخلیه‌ی شورابه‌ی حاصل از این فرآیند به یک چالش محیط‌زیستی روبه‌رشد تبدیل شود (Chung و همکاران، ۲۰۱۷). فرآیندهای نمک‌زدایی یک جریان زائد یا آب دورریز[۵] بسیار شوری تولید می‌کنند که دفع آن در مناطق درون سرزمینی بسیار هزینه‌بر است (Johnson و همکاران، ۲۰۱۷؛ Chung و همکاران، ۲۰۱۷). در حال حاضر گزینه‌های مختلفی برای دفع این شورابه مانند تخلیه به آب‌های سطحی تزریق به چاه‌های عمیق و استخرهای تبخیر وجود دارد. بااین‌حال‌وجود این فرآیندها ناپایدارهستند و استفاده از آن‌ها با هزینه‌های بالا و کاربردهای کم محدود شده است (Pramani و همکاران، ۲۰۱۷). امروزه صنعت شیرین‌سازی آب توجه مسئولان آب و محیط‌زیست را به خود جلب کرده است. حفاظت از محیط‌زیست در نشست‌های مربوط به مسائل محیط‌زیستی ناشی از صنعت شیرین‌سازی و احداث تأسیسات جدید روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و برنامه‌های گسترده‌تری در راستای پایش آن انجام می‌گیرد (Baawain و همکاران، ۲۰۱۵).

بررسی اجمالی نمک‌زدایی

امروزه تعداد بی‌شماری آب‌شیرین‌کن در جهان مشغول به فعالیت هستند که حدود ۵۰٪ از آن‌ها سیستم‌های اسمزمعکوس[۶] (RO) می‌باشند. خاورمیانه با ۲/۹٪ از جمعیت جهان، تقریباً ۵۰ ٪ از ظرفیت تولید جهانی را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان پیشرو در نمک‌زدایی آب دریا در مقیاس‌های بزرگ حرکت می‌کند (Sauvet-Goichon، ۲۰۰۷). عربستان سعودی درحال حاضر با ظرفیت تولید حدود ۲۶٪ از ظرفیت تولید جهانی پیشتاز در نمک‌زدایی و ایالات متحده‌ی آمریکا با ۱۷٪ در رتبه‌ی بعدی قرار دارند (Johnsonو Gleick، ۲۰۰۸). با این‌وجود آمار مربوط به ظرفیت تولید، یک آمار کلی هستند. در عربستان سعودی نمک‌زدایی حرارتی یک فرآیند انتخابی معمول است و بیشتر تأسیسات، سامانه‌های نمک‌زدای ساحلی هستند. در ایالات متحده‌ی آمریکا ۶۹٪ تأسیسات نمک‌زدایی آب از اسمز معکوس استفاده می‌کنند و فقط ۷٪ از تأسیسات، آب دریا را به‌کار می‌گیرند (Greenlee و همکاران، ۲۰۰۹؛ Wolff، ۲۰۰۶). علاوه‌برآن ایالات متحده‌ی آمریکا ۴/۵٪ از جمعیت جهان را تشکیل می‌دهد درحالی‌که عربستان سعودی فقط ۰/۴٪ از جمعیت جهان را به خود اختصاص می‌دهد. بااین‌وجود فقط ۵۰٪ از ظرفیت تولید آب‌شیرین‌کن‌ها را می‌توان به فرآیندهای حرارتی نسبت داد. چنین تفاوت‌هایی نشان‌دهنده‌ی قابلیت بالای نمک‌زدایی برای کشورهایی با منابع و نیازهای آبی مختلف است. فرآیندهای غشایی شامل اسمز معکوس (RO)، الکترودیالیز (ED)، نانوفیلتراسیون (NF) و فرآیندهای تقطیری شامل فشرده سازی بخار (VC)، تقطیر سریع چند مرحله‌ای (MSF) و تقطیر چند مرحله‌ای (MED) می‌باشند. آمار نشان می‌دهد که فرآیندهای غشایی و تقطیری سهم مساوی در ظرفیت تولید دارند. از بین فرآیندهای غشایی، RO و در فرآیندهای تقطیری، MSF غالب هستند. سیستم غشایی اسمز معکوس ۸۰٪ از تأسیسات جهان را به خود اختصاص می‌دهد و

فرآیندهای حرارتی تنها شامل ۲۰٪ از این آمار می‌شوند (Frenkel، ۲۰۰۰). اگرچه فرآیندهای غشایی و تقطیر سهم برابری در ظرفیت تولید نمک‌زدایی جهان دارند، اما RO به‌عنوان پیشرو در تأسیسات شیرین‌سازی آینده ظاهر شده است. کشورهای ثروتمند خاورمیانه قادرهستند هزینه‌ی فرآیند تقطیر را تأمین کنند اما RO می‌تواند آب شیرین را (از آب دریا) با ۱/۵ تا ۱/۳ هزینه‌ی تقطیر تولید کند. لازم به ذکر است هزینه‌ی شیرین‌سازی آب لب‌شور[۷] پایین‌تر از آب شور دریا خواهد بود (Miller، ۲۰۰۳). در جدول (۱) انواع فناوری‌های نمک‌زدایی و مزایا و محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها ارائه شده است (Subramani و jacangelo، ۲۰۱۴).

جدول ۱- مقایسه‌ی فناوری‌های نمک‌زدایی برای تصفیه‌ی شورابه‌ی حاصل از RO

فناوری	نوع آب خام	پارامتر کیفی آب مورد نظر جهت حذف	مصرف انرژی	مقیاس	مزایا	محدودیت‌ها
RO (همراه با استفاده از مواد شیمیایی‌جهت سختی‌زدایی)	شورابه حاصل از نمک‌زدایی آب لب‌شور توسط RO (با میزان بازیافت ۷۵-۸۵٪)	یون‌های مربوط به سختی	اطلاعات موجود نیست	مقیاس وسیع	فناوری برقرار میزان بالای حذف یون‌های سختی	تولید بالای لجن زائد و مشکلات مرتبط با نگهداری لجن هزینه بالای عملیاتی مرتبط با مواد شیمیایی افزودنی
الکترودیالیز (ED) و الکترودیالیز معکوس (EDR)		یون‌های مربوط به سختی TDS	۳/۹ $kW\,h/m^3$ برای تصفیه آب با TDS ۷۰۰۰ mg/l ۷-۸ $kW\,h/m^3$ برای تصفیه شورابه حاصل از RO پس از نمک‌زدایی آب لب‌شور		موثر برای شورابه‌ها با میزان سیلیس بالا حدود بالاتر برای شاخص اشباع کربنات کلسیم (۳<) و رسوب گچ در مقایسه با RO	هزینه انرژی همراه با بالا رفتن TDS افزایش می‌یابد گرفتگی آلی غشا می‌تواند ایجاد مشکل کرده و نیاز به پیش‌تصفیه بیشتر باشد
تقطیر چند مرحله‌ای (MED) و فشرده‌سازی بخار (VC)		TDS	۷-۲۵ $kW\,h/m^3$		مصرف میزان انرژی پایین‌تر در مقایسه با فرآیندهای حرارتی معمول	هزینه سرمایه‌گذاری بالا
اسمز رو به جلو (FO)	شورابه حاصل از RO طی فرآیند تصفیه آب	TDS	۰/۲۶ $kW\,h/m^3$ تا ۰/۸ $kW\,h/m^3$ (فرآیند غشایی به تنهایی). با بازیافت محلول کشش مصرف انرژی مشابه یا بالاتر از RO خواهد بود	مقیاس پایلوت	با دسترس‌پذیری به حرارت، کارایی انرژی نسبت به RO بالاتر خواهد بود	محدودیت برای استفاده در مقیاس‌های بزرگ
تقطیر غشایی (MD)	شورابه حاصل از واحدهای نمک‌زدایی حرارتی	TDS	۱۳/۲ $kW\,h/m^3$. با در نظر گرفتن اتلاف گرما تقریباً ۱۰/۳ $kW\,h/m^3$		سطوح بالاتر TDS آب نیاز به اعمال فشار نیست	محدودیت برای استفاده در مقیاس‌های وسیع

مطالعات زیادی در مورد تحلیل فرآیندهای نمک‌زدایی و فناوری‌های پیش‌تصفیه جهت بهبود بازیافت آب طی فرآیندهای نمک‌زدایی انجام گرفته است. Turek و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی جنبه‌های افزایش بازیافت آب به دو روش اسمز معکوس (RO) و الکترودیالیز (ED) احتمال رسوب‌گذاری غشا و روش‌های ممکن برای افزایش بازیافت آب را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که استفاده از ضد رسوب‌ها باعث بالا رفتن بازیافت آب و افزایش کارایی فرآیند شیرین‌سازی می‌شود. تغییر در عملکرد ماژول غشا به‌صورت قابل‌توجهی بازیافت آب را با کاهش رسوب بالا می‌برد. استفاده از سیستم‌های یکپارچه برای نمک‌زدایی جهت غلبه بر فشار اسمزی در سیستم‌های اسمز معکوس باعث کاهش اثرات محیط‌زیستی و افزایش کلی بازیافت آب می‌شود و تولید محصولات جانبی با ارزش مانند نمک‌های تبخیری را به همراه می آورد. همچنین استفاده از این سیستم‌ها

احتمال رسوب‌گذاری را به حداقل می‌رساند. Azadi-Aghdam و همکاران (۲۰۱۶) از یک فرآیند سه مرحله‌ای برای از بین بردن مواد تشکیل‌دهنده‌ی رسوب در محلول‌های شور حاصل از نانو فیلتراسیون استفاده کردند. آن‌ها در مرحله‌ی اول این آزمایش برای حذف بازدارنده‌های رسوب فسفات از طریق رسوب‌گذاری همراه با هیدروکسید آهن کمک گرفتند. در مرحله‌ی دوم برای افزایش رسوب کربنات معدنی pH را بالا بردند و در مرحله‌ی سوم از کریستال‌های دانه‌ای باریت برای رسوب باریوم سولفات استفاده کردند. این فرآیند سه مرحله‌ای باعث بهبود میزان بازیابی محلول شور به همان میزان آب اولیه شد. همچنین آن‌ها به یک بازیافت کلی ۹۷ درصدی آب دست یافتند. Khanzada و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای با هدف مقایسه‌ی کارایی غشاهای RO با چند گزینه‌ی پیش‌تصفیه با بازیافت‌های متفاوت آب و میزان کل جامدات محلول (TDS) مختلف در مقیاس پایلوت انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که UF و FO به‌عنوان پیش‌تصفیه با گرفتگی پایین برای جلوگیری از تمیز کردن مداوم غشا موثرهستند همچنین مشخص شد که غشای FO همراه با $MgCl_2$ و غشای UF همراه با غشای Filmtec، ۹۸ درصد نمک را رد می‌کنند. اما UFبه‌دلیل فشار بالای موجود دچار گرفتگی زیاد می‌شود. Corral و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه‌ای درباره‌ی امکان استفاده‌ی طولانی‌مدت از سیستم اسمز معکوس برای مدیریت نمک در پروژه‌ی آب آریزونای مرکزی در مقیاس پایلوت انجام دادند. در این مطالعه فرآیندهای پیش‌تصفیه شامل میکروفیلتراسیون (MF) و فیلتر شنی آهسته (SSF) بر اساس عملکردشان طی دوره‌ای یک‌ساله با هم مقایسه شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد عملکرد اسمز معکوس به کمک MF در طولانی‌مدت بهبود می‌یابد. اگرچه از نظر هزینه هر دو پیش‌تصفیه مشابه می‌باشند اما بر اساس کیفیت آب تصفیه شده و پایداری عملیات اسمز معکوس پیش‌تصفیه‌ی MF ترجیح داده شد.

مشکلات ناشی از آب خام در فرآیند شیرین‌سازی

جدا از تمایز بین کیفیت آب‌های مختلف، تجزیه و تحلیل دقیق آب برای تنظیم پیش‌تصفیه و پارامترهای عملی لازم است. ترکیب متفاوت آب خام و مقدار نمک تنها پارامتر مهم برای نمک‌زدایی غشایی نیست. با کمک پارامترهای کلیدی مختلف کیفیت آب مشخص شده و تجزیه و تحلیل دقیق این مشخصات برای طراحی پیش تصفیه‌ی مناسب امری ضروری است (Fritzmann و همکاران، ۲۰۰۷).

۱- شوری

شوری مشخصه‌ای بدون واحد و مهم در آب‌های طبیعی و صنعتی است که به‌عنوان میزان نمک حل‌شده در حجم مشخصی از محلول در نظر گرفته می‌شود. در دنیا آب طبیعی بدون نمک وجود ندارد اما آب‌هایی که نمک نسبتاً کمی دارند آب متعارف محسوب می‌شوند. در جدول (۲) طبقه‌بندی آب‌های شور ارائه شده است (رازقی، ۱۳۹۱).

مقدمه‌ای برنمک‌زدایی توسط RO

اسمز معکوس، از جمله روش‌های نوین تصفیه و نمک زدایی آب محسوب می‌شود. اسمز معکوس یک فرایند فیزیکی است که از پدیده‌ی اسمز یعنی تفاوت فشار اسمزی بین آب شور و آب خالص برای حذف نمک‌ها از آب استفاده می‌کند. در این فرآیند جریان آب خام به دو جریان آب محصول و جریان آب تغلیظ‌شده تقسیم می‌شود. آب خام توسط پمپ به داخل محفظه‌ای که دارای غشای نیمه‌تراوا است رانده می‌شود، به‌این‌ترتیب آب تقریباً خالص در یک طرف غشا و آب تغلیظ‌شده از ناخالصی‌ها در طرف دیگر قرار خواهد گرفت. RO برای حذف کل جامدات محلول تا غلظت‌های TDS بالاتر از mg/l ۴۵۰۰۰ موثر است که می‌تواند برای نمک‌زدایی آب دریا و آب‌های لب‌شور به‌کار گرفته شود (Nicolaisen، ۲۰۰۳). سیستم اسمز معکوس قادر به حذف ۹۹٪ املاح محلول، ترکیبات آلی محلول و بیش از ۹۸٪ مواد کلوئیدی و پارامترهای بیولوژیکی موجود در آب می‌باشد. باتوجه‌به قابلیت بالای سیستم‌های اسمز معکوس در مقایسه با سایر روش‌ها امروزه از این سیستم‌ها به‌طور گسترده در تصفیه‌ی آب مورد نیاز صنایع مختلف از جمله نفت، گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود (Shumway، ۱۹۹۹).

جدول ۲- طبقه‌بندی آب‌ها از نظر شوری

طبقه‌بندی	کل جامدات محلول (میلی‌گرم در لیتر)
آب متعارف	۰-۱۰۰۰
آب لب‌شور	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
آب‌شور	بیش از ۱۰۰۰۰
پساب شور	بیش از ۱۰۰۰۰۰

۲- گرفتگی[۸]

رسوباتی که باعث گرفتگی غشا می‌شوند به دو دسته‌ی کلی رسوبات سخت و ترکیبات بی‌شکل نرم تقسیم‌بندی می‌شوند (Jamaly و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طورکلی منابع ایجاد گرفتگی شامل چهار دسته می‌باشند: رسوب، سیلت، باکتری‌ها و مواد آلی. کنترل گرفتگی شامل پیش‌تصفیه‌ی آب خام جهت ایجاد حداقل گرفتگی و همچنین تمیز کردن مرتب آن است (Baker، ۲۰۰۴).

۳- گرفتگی زیستی[۹]

رشد باکتری‌ها روی سطح غشا است. قابلیت ایجاد گرفتگی زیستی در غشا تابعی از جنس غشا است. غشاهای استات سلولزی یک ماده‌ی غذایی مناسب برای باکتری‌ها هستند و ظرف چند هفته با حمله‌ی باکتری‌ها نابود می‌شوند اما غشاهای مرکب لایه‌نازک[۱۰]، کاملاً مقاوم هستند. تصفیه‌ی مرتب چنین غشاهایی با باکتری‌کش‌ها معمولاً از گرفتگی زیستی جلوگیری می‌نماید (Baker، ۲۰۰۴).

۴- گرفتگی مواد آلی[۱۱]

گرفتگی آلی در نتیجه‌ی وجود موادی مثل روغن و گریس روی سطح غشا اتفاق می‌افتد. این نوع گرفتگی به‌صورت تصادفی در سیستم‌های آب آشامیدنی شهری نیز می‌تواند ایجاد شود اما بیشتر در کاربری‌های صنعتی که در آن از اسمز معکوس برای تصفیه‌ی جریان آب استفاده می‌شود (Baker، ۲۰۰۴).

۵-رسوب[۱۲]

رسوب به‌دلیل نمک‌های فلزی محلول در آب خام روی سطح غشا ایجاد می‌شود. همچنان که آب نمک‌زدایی شده برداشته می‌شود به غلظت یون‌ها در آب خام افزوده می‌شود تا اینکه حلالیت بیش از حد شود، آنگاه نمک روی سطح غشا رسوب می‌کند. تمایل آب خام به تشکیل رسوب می‌تواند با تجزیه و تحلیل آب خام و محاسبه‌ی فاکتور تغلیظ[۱۳] مورد انتظار در شورابه محاسبه شود. نسبت نرخ جریان آب تولیدی به نرخ جریان آب خام، نرخ بازیافت[۱۴] نامیده می‌شود که از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Baker،۲۰۰۴).

(۱) نرخ جریان خام/ نرخ جریان تولیدی =نرخ بازیافت

با فرض اینکه همه‌ی یون‌ها در شورابه باقی می‌ماند، فاکتور تغلیظ با رابطه (۲) به‌دست‌خواهد آمد.

(۲) (نرخ بازیافت-۱)/ ۱=تغلیظ فاکتور

۵-۱- انواع رسوب

غلظت نمک‌ها در شورابه می‌تواند بالاتر از حد انحلال‌پذیری باشد. معمول‌ترین شکل نمک‌های رسوب‌کننده (Baker،۲۰۰۴) و ویژگی‌های آن‌ها (Antony و همکاران، ۲۰۱۱) در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- انواع رسوبات در شورابه و ویژگی آن‌ها

نوع رسوب	ویژگی‌ها
کلسیم‌کربنات	یک رسوب قلیایی است که در اثر شکست یون‌های بی‌کربنات تشکیل می‌شود و از معمول‌ترین نوع رسوبات است. میزان رسوب‌گذاری در درجه‌ی اول بسته به سختی کلسیم و قلیاییت بی‌کربنات آب دارد. غلظت بی‌کربنات با افزایش pH و دما بالا می‌رود. کلسیم‌کربنات رسوب متداول در همه‌ی آب‌ها است و تمایل به تشکیل آن قابل پیش‌بینی و کنترل‌پذیر است.
کلسیم‌سولفات	در میان رسوبات غیر قلیایی کلسیم‌سولفات معمول‌ترین رسوب است. از آنجا که پاک‌سازی رسوب سولفات در واحدهای تصفیه‌ی آب نسبتاً مشکل‌تر از رسوبات قلیایی است، بهترین اقدام برای کنترل رسوب کلسیم‌سولفات این است که سیستم اسمز معکوس در پایین‌تر از حد اشباع (در دمای محیط‌زیست که معمول‌ترین شکل این رسوبات است) این ترکیب قرار بگیرد.
کلسیم‌فسفات	رسوب کلسیم‌فسفات یک معضل بزرگ در تصفیه است. اکثر رسوبات کلسیم‌فسفات بی‌شکل هستند. برخلاف رسوب کلسیم‌کربنات هیچ بازدارنده‌ی مناسبی برای کاهش رسوب کلسیم‌فسفات در سطح غشا وجود ندارد، بااین‌حال برخی محققان با تنظیم pH به کنترل موثر رسوب دست یافته‌اند. به‌طور کلی تنظیم pH تأثیر بیشتری در کاهش این رسوب دارد.
ترکیبات سیلیسی	شکل رسوبی مهم برای اسمز معکوس رسوب سیلیس است. به‌دلیل میزان بالای سیلیس در پوسته‌ی زمین، این ماده به‌صورت محلول در آب‌های طبیعی هم وجود دارد و به دو فرم بی‌شکل و بلورین دیده می‌شود. تشکیل رسوب سیلیس در محلول به غلظت آن و pH محلول بستگی دارد. فرم اصلی سیلیس متاسیلیک اسید (H_2Sio_3) است که یک اسید ضعیف است و درpH خنثی جدا نشده باقی می‌ماند. pHهای بالاتر از خنثی باعث جدا شدن اسیدسیلیک و تشکیل آنیون‌های سیلیسی می‌شود که در نهایت منجر به واکنش با یون‌های فلزی مثل کلسیم، آهن، منگنز و آلومینیوم می‌شود. سیلیس به‌عنوان یک رسوب معمول و همواره همراه با آلومینیوم در نظر گرفته می‌شود. ته‌نشست‌های آلومینیوم سیلیکات یافت شده روی سطح غشا به شکل سیلت، رس و دیگر ترکیبات دیده می‌شود. با کنترل غلظت آهن و آلومینیوم زیر سطح ۰/۰۵ mg/l می‌توان از تشکیل رسوب سیلیس جلوگیری کرد.
باریوم‌سولفات	به‌ندرت به‌عنوان ته‌نشست در واحدهای اسمز معکوس دیده می‌شود و به کمک بازدارنده می‌توان از تشکیل آن جلوگیری به‌عمل آورد. پیدایش زودهنگام باریوم‌سولفات در سیستم‌های غشایی می‌تواند مشکل‌ساز باشد.
استرانسیوم سولفات و کلسیم‌فلوراید	به‌ندرت به‌عنوان ته‌نشست در واحدهای اسمز معکوس دیده می‌شود و به کمک بازدارنده می‌توان از تشکیل آن‌ها جلوگیری کرد. در غلظت مشخص می‌توانند باعث تشکیل رسوب‌های به‌هم‌چسبیده شوند که این لایه‌ها چالش برانگیز هستند و برای پاک‌سازی غشا نیاز به روش‌های پیچیده می‌باشد.

۶- شاخص تراکم سیلت[15]

سیلت با تجمع انواع ذرات معلقی که روی غشا تجمع یافته‌اند، تشکیل می‌شود. منابع معمول سیلت شامل کلوییدهای آلی، محصولات خوردگی آهن، هیدروکسید آهن ته‌نشین شده، جلبک‌ها وذرات ریز می‌باشند. (SDI) یا شاخص تراکم سیلت آب خام شاخصی است که احتمال ایجاد رسوب توسط یک آب خام مشخص را بررسی می‌کند و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Baker، ۲۰۰۴):

$$SDI = 100(1 - Ti/Tf)/Tt \quad (۳)$$

Ti= زمان مورد نیاز برای عبور ۵۰۰ میلی‌لیتر آب خام از فیلتر ۰/۴۵ میکرومتری در فشار ۳۰ psig

Tf= زمان مورد نیاز برای عبور ۵۰۰ میلی‌لیتر از نمونه بعد از اتمام آزمایش (معمولاً ۱۵ دقیقه)

Tt= کل زمان انجام آزمایش

SDI کمتر از ۱ نشانگر این است که سیستم اسمز معکوس می‌تواند چندین سال بدون گرفتگی کلوییدی به کار خود ادامه دهد. SDI کمتر از ۳ نشان می‌دهد سیستم تا چند ماه بدون تمیز کردن می‌تواند کار کند. SDI بین ۳ تا ۵ نشان می‌دهد که گرفتگی ذره‌ای یک مشکل معمول است و نیاز به تمیز کردن مرتب غشا می‌باشد. SDI بالاتر از ۵ غیرقابل‌قبول است و پیش‌تصفیه[16] بیشتر آب خام ضروری است (Rachman و همکاران، ۲۰۱۳).

۷- وجود دیگر یون‌ها و املاح

برای محلولی که حاوی ترکیباتی مثل کلسیم‌فسفات و کلسیم‌کربنات است، وجود مقادیر کم از یک نمک حلالیت موثر نمک دیگر را افزایش می‌دهد (اثر کلسیم‌سولفات روی کلسیم‌کربنات قوی‌تر است) (Sheikholeslami، ۲۰۰۳). یون‌های سخت دو ظرفیتی مثل سدیم و منیزیم (Sheikholeslami و همکاران، ۲۰۰۲) و باریم و منگنز (Sahachaiyunta و همکاران، ۲۰۰۲) تمایل به کاتالیز سریع پلیمرازیسیون سیلیس دارند و ته‌نشست ژل سیلیس را روی غشا تسریع می‌بخشند اگرچه هیچ کلسیم و منیزیمی در ته‌نشست یافت نمی‌شود (Braun و همکاران، ۲۰۱۰؛ Semiat و همکاران، ۲۰۰۳).

لازم به ذکر است یون آهن، ته‌نشست سیلیس را تشدید می‌کند (Freeman و Majerle، ۱۹۹۵)، به‌گونه‌ای که شکل ته‌نشست سیلیس تغییر می‌یابد (Sahachaiyunta و همکاران، ۲۰۰۲).

فناوری‌های پیش‌تصفیه برای شیرین‌سازی

پیش‌تصفیه‌ی کاربردی می‌تواند باعث افزایش طول عمر غشا، بهبود عملکرد، تولید آب باکیفیت‌تر و حداقل پاک‌سازی شیمیایی سیستم شود. مطالعات نشان داده است که گرفتگی زیستی یکی از شکل‌های شدید گرفتگی موثر بر عملکرد غشا است که به‌دلیل رشد باکتری‌ها روی سطح داخلی غشا تشکیل می‌شود. بنابراین کارایی یک فرآیند نمک‌زدایی با افزایش فشار اسمزی و افزایش مصرف انرژی کلی کم خواهد شد. یکی از مهمترین اقدامات، انتخاب یک فناوری مناسب برای پیش‌تصفیه است (Jamaly و همکاران، ۲۰۱۴).

۱- فناوری‌های متعارف

درک کامل کیفیت آب خام و مشخصات آن و نوع منبع آب (آب‌های سطحی، شورابه، آب دریا، آب شور صنعتی) برای انتخاب فناوری پیش‌تصفیه ضروری است. برای مثال آب‌های سطحی در مقایسه با آب چاه به‌دلیل اثر جذب و فیلتراسیون روی منابع آب زیرزمینی، کدورت، شاخص تراکم سیلت و مواد آلی طبیعی بالاتری دارند. به‌این‌ترتیب آب چاه حاوی سیلیس بیشتری نسبت به آب‌های سطحی است. ذرات بزرگ اولیه که امکان پمپ شدن از چاه دارند به کمک صافی‌های مش[17] و آشغال‌گیرهای رفت‌وبرگشتی[18] از آب خام حذف می‌شوند. آشغال‌گیرهای رفت‌وبرگشتی برای آب‌های سطحی که غلظت بالایی از بقایای زیستی دارند، کارآمدترهستند. فرآیند پیش‌تصفیه متعارف ممکن است شامل همه یا برخی از مراحل حذف ذرات بزرگ با صافی درشت، کلرزنی، شفاف‌سازی با انعقاد و شناورسازی، حذف سختی به کمک آهک، فیلتراسیون، کاهش قلیاییت با کنترل pH، مهار رسوب، حذف کلر آزاد با سدیم بی‌سولفات یا کربن فعال، اشعه‌ی ماورای‌بنفش و حذف ذرات معلق با فیلتراسیون کارتریج باشد (Jamaly و همکاران، ۲۰۱۴).

۱-۱- کلرزنی[19]

کلرزنی اولیه فرآیند اضافه کردن کلر به آب خام پس از غربالگری و قبل از مخلوط کردن ناگهانی[20] است. کلرزنی در شروع پیش‌تصفیه به‌دلیل بالارفتن زمان تماس کلر با آب امکان واکنش کلر با مواد آلی آب و تشکیل مواد سرطان‌زایی چون تری‌هالومتان‌ها را فراهم می‌سازد. امروزه کلرزنی فقط در جایی‌که امکان تشکیل تری‌هالومتان نباشد، استفاده می‌شود (Friedler و همکاران، ۲۰۰۸).

۱-۲- شناورسازی با استفاده از هوای محلول[21] **(DAF)/زلال‌سازی**

در فرآیند DAF، منعقدکننده‌هایی که روی شن و ماسه و یا دیگر فیلترهای رسانه‌ای حضور دارند سبب حذف ذرات معلق می‌شوند. پخش حباب‌های هوا باعث افزایش زمان تماس منعقد کننده‌ها و در نتیجه حذف جلبک‌ها و مواد آلی طبیعی می‌شود (Cleveland و همکاران، ۲۰۰۲). محققان از DAF به‌عنوان پیش‌تصفیه‌ی فناوری UF در آب‌های سطحی استفاده و مشاهده کردند که میزان جریان شار، ۷۰٪ افزایش و هزینه‌ها کاهش می‌یابد (Braghetta و همکاران، ۱۹۹۷؛ Braghetta وDiGiano ، ۱۹۹۸).

۱-۳- ازن زنی[22]

یکی دیگر از روش‌های پیش‌تصفیه‌ی شیمیایی ازن زنی است (Carrère و همکاران، ۲۰۱۰) که غلظت نمک را افزایش نمی‌دهد و در مقایسه با سایر روش‌های پیش‌تصفیه ی شیمیایی هیچ باقی‌مانده‌ی شیمیایی ندارد. به‌علاوه پاتوژن‌ها را ضد عفونی

می‌کند (Kianmehr و همکاران، ۲۰۰۹؛ Weemaes و همکاران، ۲۰۰۰). ازن اکسیدکننده‌ای قوی است که به رادیکال تجزیه می‌شود و با ترکیبات آلی واکنش می‌دهد (Kameswari و همکاران، ۲۰۱۱).

۱-۴- انعقاد[۲۳] و لخته سازی[۲۴]

فناوری‌های مرسوم (انعقاد، لخته‌سازی، گندزدایی، تنظیم pH، مهار رسوب و فیلتراسیون با پوشش دانه‌ای) همراه با RO می‌توانند به‌عنوان پیش‌تصفیه استفاده شوند (Jamaly و همکاران، ۲۰۱۴). انعقاد بعضی از آلاینده‌ها را حذف و لخته‌های کوچکی ایجاد می‌کند که موجب پر شدن منافذ غشا می‌شوند، منعقد کننده‌های جدید با افزایش اندازه‌ی لخته‌ها ناخالصی‌های بیشتری را به دام انداخته، گرفتگی را کاهش داده و به آسانی از روی غشا شسته می‌شوند بنابراین انتظار می‌رود که هزینه‌های تصفیه را کاهش دهند (Tran و همکاران، ۲۰۱۱).

۱-۵- مهارکننده‌های رسوب[۲۵]

بیشترین رهیافت مورد استفاده جهت پیشگیری از ایجاد رسوب در سیستم‌های غشایی ضد رسوب‌ها هستند. اکثر آن‌ها ترکیبی از پلی‌کربوکسیلیک اسید و ارگانوفسفات‌ها می‌باشند. یکی از مشکلاتی که تمامی بازدارنده‌ها[۲۶] ایجاد می‌کنند تمایل آن‌ها به تولید مواد مغذی و در نتیجه ایجاد گرفتگی زیستی است. ضد رسوب‌ها با مکانیسم‌های مختلفی عمل می‌کنند اما معمول‌ترین مکانیسم کاهش نرخ هسته‌گذاری و زمان‌های القا طولانی‌تر است. در استفاده از ضد رسوب‌ها ترکیب آب خام اهمیت دارد چون برخی افزودنی‌های دیگر مانند منعقد کننده‌ها می‌توانند اثر بازدارنده‌ها را تضعیف و حتی خنثی کنند (Vrouwenvelder و همکاران، ۲۰۱۰).

۲- فناوری‌های نامتعارف

نانوفیلتراسیون شکل درشت‌تر RO است و برای حذف یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی مثل فلزات سنگین استفاده می‌شود. NF یک فرآیند مخصوص انتخابی است و برای جداسازی جایگزین مناسب UF می‌باشد.باشد NF اقدامات جداسازی همچون معدن‌زدایی، حذف رنگ و شیرین‌سازی که از نظر اقتصادی به‌صرفه نیستند را می‌تواند انجام دهد (Kim، ۲۰۱۱). در جدول (۴) انواع فناوری‌های پیش‌تصفیه و مشخصات هر کدام آمده است (Humplik و همکاران، ۲۰۱۱؛ Busch و همکاران، ۲۰۰۹؛ Pearce، ۲۰۰۸).

غشاهای RO یون‌هایی مثل سدیم و کلراید در سطح مولکولی را جدا می‌کنند و اندازه‌ی منفذ آن‌ها در حد چند آنگستروم است. غشاهای غیرمتخلخل هم برای فیلتراسیون گاز، تراوایی بخار و تبخیر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Jamaly و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول۴- مشخصات فناوری‌های پیش‌تصفیه‌ی نامتعارف

نوع پیش‌تصفیه نامتعارف	اندازه منافذ	قابلیت حذف
میکروفیلتراسیون (MF)	۱۰۰-۵۰۰۰ nm	حذف ذرات معلق مثل سلول‌های خونی و امولسیون شیرابه
اولترافیلتراسیون (UF)	۱۰-۱۰۰ nm	حذف مولکول‌های بزرگ مانند آلبومین و پپسین
نانوفیلتراسیون (NF)	۲۱ nm	حذف مولکول‌های ریز مانند نمک‌های محلول

فناوری‌های متعارف به مقدار ماده‌ی شیمیایی، نیروی انسانی و هزینه‌ی عملی بیشتر نیازمند هستند و آب تولیدی کیفیت پایین‌تری نسبت به فناوری‌های نامتعارف خواهد داشت (Dukes و von Gottberg، ۲۰۰۶؛ Bates، ۱۹۹۹). مقایسه‌ی این دو نوع فناوری در جداول (۵) و (۶) آمده است (Choi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Pearce، ۲۰۰۸؛ Glueckstern و Priel، ۲۰۰۳؛ Adham و همکاران، ۱۹۹۶).

جدول۵- مقایسه‌ی هزینه‌ی آب با فناوری UF و پیش‌تصفیه‌ی متعارف برای m^3/d در واحدهای اسمز معکوس

روش فیلتراسیون	UF $/m^3	متعارف $/m^3
هزینه سرمایه‌گذاری	۰/۲۳	۰/۲۲
هزینه ثابت نگهداری و عملیاتی	۰/۰۹	۰/۰۷
هزینه انرژی	۰/۱۶	۰/۱۶
هزینه مواد شیمیایی	۰/۰۳	۰/۰۵
کل هزینه متغیر عملیاتی	۰/۲۰	۰/۲۲
هزینه کل	۰/۵۲	۰/۵۱

جدول۶- مقایسه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌ی آب تولیدی، مصرف انرژی و محدوده‌ی شوری سیستم‌های پیش‌تصفیه

پیش‌تصفیه	محدوده شوری (ppm)	هزینه سرمایه‌گذاری	مصرف انرژی	هزینه تولید آب
MF و UF	۱۵۰۰-۳۵۰۰۰	هزینه‌ی ثابت بالاتر، ۱/۹۲ $Cent/m^3$ همراه با هزینه‌های مواد شیمیایی کمتر (۰/۰۲ و ۲/۱۲ $Cent/m^3$)	احتمالاً به‌دلیل هزینه‌های کمتر جایگزینی غشا و مصرف انرژی کمتر هزینه‌های عملیاتی و نگهداری MF کمتر از UF است. هزینه‌ی تقریبی واحد برای UF و MF در واحدهایی با ظرفیت ۱ MGD به‌ترتیب حدود ۰/۲۰$/gal۱۰۰۰ و ۰/۴۳$/gal۱۰۰۰ می‌باشد.	حدود ۴۰$/$m^2$ و نیاز به سطح کلی ۲۴۰۰۰ m^2 و طول عمر غشای ۷ ساله
سیستم‌های متعارف	۱۵۰۰-۳۵۰۰۰	۲۲/۱۳($Cent/m^3$)	۱۶/۰۶($Cent/m^3$)	

مدیریت پساب شور و تأثیر محیط‌زیستی

پساب شور نمک‌زدایی در بردارنده‌ی نمک‌های حذف شده از آب ورودی برای تولید آب محصول، مواد شیمیایی اضافه شده در طی فرآیند و محصولات جانبی خورنده است. میزان این پساب که مقدار زیادی را شامل می‌شود بسته به فرآیند مورد استفاده متغیر می‌باشد. تخلیه‌ی این پساب‌ها براساس دستورالعمل‌های مناسب محیط‌زیستی بخش مهمی از مطالعات امکان‌سنجی و راهبری تاسیسات نمک‌زدایی است. در تأسیساتی که نمک‌زدایی آن‌ها در شهرها و به دور از دریاها واقع شده باشند مشکلات نسبت به نمک‌زدایی ساحلی بیشتر است و باید به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط جریان پساب آن‌ها توجه شود. در این تأسیسات پساب به روش رقیق‌سازی، تزریق به منابع آب شور از طریق چاه‌ها، تبخیر یا انتقال توسط خط لوله به نقاط دیگر و یا شبکه‌ی جمع‌آوری فاضلاب دفع می‌شود. در نظر گرفتن مکان مناسب جهت تخلیه‌ی پساب باید در مطالعه‌ی امکان‌سنجی تأسیسات نمک‌زدایی با دقت بررسی شود. زیرا هزینه تخلیه‌ی پساب بالا بوده و بر توجیه اقتصادی پروژه‌ی نمک‌زدایی تأثیر گذار است (رازقی، ۱۳۹۱).

نیاز به انرژی و هزینه‌ی نمک‌زدایی با RO

۱- هزینه‌های نمک‌زدایی سیستم RO

با افزایش تعداد آب‌شیرین‌کن‌ها کاهش کلی در هزینه‌ی تولید آب با RO به‌دست آمده است. در سال‌های اخیر با افزایش هزینه‌ی انرژی و ساخت‌وساز یک روند افزایش قیمت وجود داشته است. هزینه‌ی تصفیه‌ی نمک‌زدایی تابعی از متغیرهای بزرگی است که به‌دلیل ماهیت محرمانه‌ی این هزینه‌ها نمی‌توان به‌صورت دقیق و مطمئن به آن‌ها پرداخت (Burn و همکاران، ۲۰۱۵).

۲- هزینه‌های انرژی اسمز معکوس

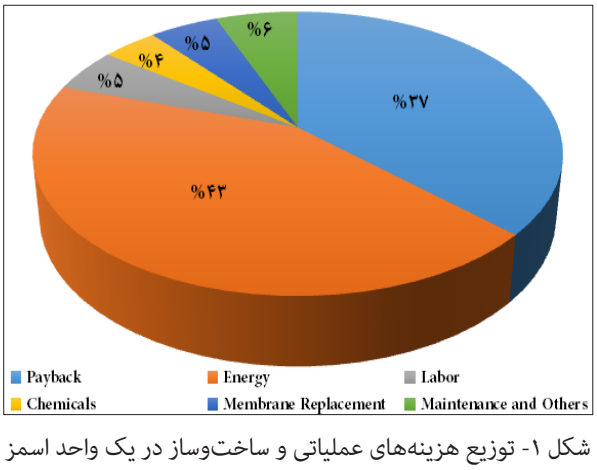
بیشترین هزینه‌ی نمک‌زدایی مربوط به انرژی است که بیش از ۳۰٪ الی ۵۰٪ هزینه‌های عملیاتی را شامل می‌شود (Cabassud و Wirth، ۲۰۰۳). RO بسته به نوع بازیافت انرژی به‌کار گرفته شده بین ۲/۲ kwh/m^3 تا ۲/۸ kwh/m^3 انرژی مصرف می‌کند. با به‌کار گرفتن توربین‌های بازیابی انرژی در آب تغلیظ شده، مصرف انرژی تا حد ۲/۸ kwh/m^3 پایین خواهد آمد و استفاده از مبدل‌های فشار مصرف انرژی را تا ۲/۲ kwh/m^3 کاهش خواهد داد (Service، ۲۰۰۶). پیشرفت مداوم در توسعه‌ی غشا و بهبود مولفه انرژی این میزان مصرف را تا ۱/۵۸ kwh/m^3 کاهش خواهد داد. بنابراین هزینه شیرین‌سازی آب وابسته به هزینه‌ی انرژی است (Burn و همکاران، ۲۰۱۵).

۳-هزینه‌های‌عملیاتی

پیش‌تصفیه برای اکثر سیستم‌های RO نصب شده در جهان لازم است. املاح غیرمعدنی، کلوییدی، ذرات، ترکیبات آلی و میکروارگانیسم‌های موجود در آب خام، کارایی و طول عمر غشا را پایین می‌آورند. حذف این موارد هزینه‌ی تصفیه را افزایش می‌دهد (Tran و همکاران، ۲۰۱۱). هزینه‌ی نمک‌زدایی بسته به اندازه و نوع دستگاه نمک‌زدا، منبع و کیفیت آب خام، پیش‌تصفیه، تنظیم خودکار و کنترل موقعیت سیستم، شرایط محل، شرایط کار، هزینه‌های انرژی و طول عمر سیستم متفاوت است. هرچه ظرفیت سیستم بیشتر باشد، هزینه‌ی هر واحد آب بسته به اقتصاد مقیاس کمتر است. هزینه‌های عملیاتی شیرین‌سازی را می‌توان به‌صورت مصرف، پیش‌تصفیه، تصفیه، بازمعدنی‌سازی، پمپاژ آب تولیدی، پس از تصفیه، دفع شورابه، مصرف انرژی و کارهای ساخت و ساز دسته‌بندی کرد (Albaina Urcelay، ۲۰۰۷).

۴- هزینه‌های ساخت و نصب

هزینه‌های مربوط به یک سیستم شیرین‌سازی به دو صورت بیان می‌شود: ۱- هزینه‌ی سرمایه و ۲- کل هزینه‌های عملیاتی سالانه آب در واحد نصب شده یا ظرفیت فرآیند. جدول (۷) هزینه‌های عملیاتی و ساخت و ساز برای RO، MED و EDR را نشان می‌دهد. توزیع این هزینه‌ها از طریق عملکردهای متفاوت یک سیستم اسمز معکوس را در شکل (۱) ارائه شده است (Burn و همکاران، ۲۰۱۵). انرژی و هزینه‌های استهلاک بازگشت هزینه‌های سرمایه‌گذاری سه چهارم از هزینه‌های کل را شامل می‌شود (Reddy و Ghaffour، ۲۰۰۷). هزینه‌ی نمک‌زدایی آب لب‌شور (BW) به‌دلیل فشار اسمزی پایین‌تر و در نتیجه فشارهای عملیاتی پایین‌تر و بازده بالاتر به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر از هزینه‌ی نمک‌زدایی آب دریا است (Burn و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۱- توزیع هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز در یک واحد اسمز معکوس (Burn و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۷- هزینه‌های عملیاتی و ساخت‌وساز RO، MED و EDR (Burn و همکاران، ۲۰۱۵)

پارامتر	RO آب دریا	RO شورابه	MED	EDR
هزینه‌سرمایه‌گذاری (AU$/m3/day آب تولیدی)	۲۱۳۰-۳۳۳۰	۸۰۰-۲۴۰۰	۳۳۳۰-۵۲۰۰	۷۶۰-۴۳۳۰
هزینه عملیاتی (AU$/m3/day آب تولیدی)	۲/۵۲-۲/۹۳	۰/۸۷-۲/۰۰	با هدررفت گرما: ۰/۷۳-۱/۲۷ بدون هدررفت گرما: ۲/۴۰-۳۷۳۴	۱/۳۳-۳/۷۳

چالش‌های فنی و آینده فرآیند اسمز معکوس

رفع کمبود آب نیاز به منابع نامتعارف جدیدی همچون نمک‌زدایی دارد. پیش‌بینی می‌شود در مناطق خشک و مناطقی که تحت تنش آبی قرار دارند، نمک‌زدایی بدون در نظر گرفتن نگرانی‌های مرتبط با اقتصاد، محیط‌زیست و مشکلات سیاسی-اجتماعی یک فناوری مهم خواهد شد (Abdurazzak، ۱۹۹۹). استفاده از غشاهای RO در تصفیه با چالش‌های منحصربه‌فردی همراه است. رسوب کلسیم فسفات در صورت رسیدن به حد اشباع اتفاق خواهد افتاد و پساب دارای مقدار کربن آلی بسیار بیشتری نسبت به جریان خام است. از آنجایی‌که سیستم‌های RO برای تصفیه توسعه یافته است گرفتگی غشایی و طرح پیش‌تصفیه اهمیت زیادی دارد. توسعه‌ی ابزارهای بازیابی انرژی و نمک‌زدایی ترکیبی/نیروگاه‌ها باعث پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در بازیافت انرژی شده است. توسعه‌ی تحقیقات و فناوری بیشتر در زمینه‌ی بهبود انرژی و طراحی سیستم باعث افزایش بیشتر بازیافت انرژی و کاهش هزینه خواهد شد (Yoon و همکاران، ۲۰۰۵). نیاز به RO آب‌های شور داخلی در آینده افزایش خواهد یافت و محدودیت‌های اصلی برای کاربرد بیشتر RO درون سرزمینی، هزینه و قابلیت فنی دفع آب تغلیظ خواهد بود. Rahardianto و همکاران (۲۰۰۷) تحقیقاتی در مورد گزینه‌های جدید برای تصفیه‌ی شورابه‌ی زائد انجام دادند و آزمایشات آن‌ها نشان داد افزایش بیشتر بازیافت RO امکان‌پذیر می‌باشد. بهینه‌سازی دوز ضد رسوب، مواد شیمیایی افزودنی و کنترل pH برای بهبود هزینه‌ی تصفیه‌ی آب تغلیظ ضروری است. استانداردهای کیفی سختگیرانه‌تر باعث بهینه‌سازی و توسعه فناوری RO خواهد شد. فناوری آینده ممکن است روی دیگر ناخالصی‌های نوظهور، از جمله محصولات جانبی ضدعفونی، مواد دارویی وترکیبات غشایی نامطلوب تمرکز کند. ازآنجایی‌که استفاده از نمک‌زدایی روبه‌رشد است، تأثیر واحدهای آب‌شیرین‌کن بر آب‌های محلی باید ارزیابی شده و اثرات منفی به حداقل برسند. برای کاهش هزینه‌ها استفاده از پیش‌تصفیه‌ی غشایی جایگزین مناسب‌تری برای پیش‌تصفیه‌های معمول است (Greenlee و همکاران، ۲۰۰۹).

جمع‌بندی

نمک‌زدایی غشایی به کمک RO در سال‌های گذشته به‌سرعت رشد کرده تا انتخاب اولیه برای تأسیسات جدید شیرین‌سازی آب شود. فناوری غشایی پیشرفته باعث افزایش قابل‌توجه تولید و صرفه‌جویی در هزینه می‌شود در حالی‌که اصول عملیاتی پایه برای همه‌ی کاربری‌های RO یکسان است و کاربری‌های جداگانه بر اساس کیفیت آب خام گسترش پیدا کرده است. به‌خصوص دو نوع اصلی آب خام، آب دریا و آب‌های لب‌شور، هرکدام ویژگی‌های مشخص مربوط به خود را دارند که نیاز به تنظیم پارامتر و طراحی سیستم ویژه می‌باشد. بازیابی در RO دریایی عمدتاً با افزایش فشار اسمزی و گرفتگی مواد آلی محدود می‌شود. طراحی سیستم معمولا متشکل از فیلتراسیون و مواد شیمیایی و RO یک مرحله‌ای است. ترکیبات مشکل‌ساز مانند بور نیاز به طراحی پیچیده‌تری دارند. سیستم‌های غشایی RO آب‌های لب‌شور متشکل از دو مرحله RO است و مشکل مهم این سیستم شامل رسوب نمک و مدیریت شورابه است. درحالی‌که سیستم‌های اسمز معکوس آب‌های دریایی و آب‌های لب‌شور برای استفاده در واحدهای بزرگ تجاری، به اندازه‌ی کافی توسعه یافته‌اند چندین چالش مهم در زمینه‌ی RO باقی می‌ماند. پیشرفت‌های بیشتر در زمینه‌ی فناوری غشایی، کاربرد انرژی و تصفیه‌ی آب تغلیظ به استفاده‌ی وسیع‌تر از RO برای جوامع روستایی و کاربری درون‌سرزمینی کمک می‌کند.

پی‌نوشت

1- Desalination
2- Concentrated Water
3- Brine
4- Feed Water
5- Reject Water
6- Reverse Osmosis
7- Brackish
8- Fouling
9- Bio Fouling

۱۰- غشاهای مرکب لایه نازک یا TFC غشاهای نیمه‌تراوا هستند که عمدتاً در سیستم‌های شیرین‌سازی آب استفاده می‌شوند. غشای TFC می‌تواند به‌عنوان یک غربال مولکولی ساخته شده در قالب یک لایه از دو یا چند ماده‌ی لایه‌بندی شده در نظر گرفته شوند.

11- Organo Fouling

12- Scale

13- Concentration Factor

14- Recovery Rate

15- Silt Index Density

16- Pretreatment

17- Mesh Strainers

18- Traveling Screens

19- Chlorination

20- Flash Mixing

21- Dissolved Air Floatation

22- Ozonation

23- Coagulation

24- Flocculation

25- Scale Inhibitors

26- Antiscalants

منابع

رازقی، ن.، منصوری، ر. ۱۳۹۱. نمک‌زدایی از آب‌های شور و لب‌شور (علم و صنعت). انتشارات مولفان. دانشگاه علم و صنعت. تهران.

Abdurazzak M. 1999. Editor Status of water resources development and management in the ESCWA region. Proceedings of the Expert Group Meeting on Assessment of Economic and Social Developments in the ESCWA Region During the Last 25 years and Priorities for the Next Decade, 2000-2009.

Adham S.S., Jacangelo J.G. and Laine J.M. 1996. Characteristics and costs of MF and UF plants. American Water Works Association Journal, 88(5): 22-31.

Azadi-ghdam M., Zraick F., Simon J., Farrell J. and Snyder S.A. 2016. A novel brine precipitation process for higher water recovery. Desalination, 385: 69-74.

Albaina Urcelay A. 2007. Tecnologías sostenibles sobre la gestión del agua: la desalación, estudio del caso en la zona costera del Mediterráneo.

Antony A., Low J.H., Gray S., Childress A.E., Le-Clech P. and Leslie G. 2011. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review. Journal of membrane science, 383(1): 1-16.

Baawain M., Choudri B. S., Ahmed M. and Purnama A. 2015. Recent progress in desalination, environmental and marine outfall systems. Springer International Publishing.

Baker R.W. 2004. Overview of membrane science and technology. Membrane technology and applications, 3: 1-14.

Bates W.T. 1999. Capillary UF as RO pretreatment. In PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WATER CONFERENCE,60:165-170

Braghetta A., Jacangelo J., Chellam S., Hotaling M., Utne B., Jacangelo J. G. and Utne B. A. 1997. Impact of Dissolved Air Flotation Pretreatment on the Performance of Hollow-Fiber Direct Flow Microfiltraiton. Journal AWWA, 89(10): 90-101.

Braghetta A., DiGiano FA. and Ball WP. 1998. NOM accumulation at NF membrane surface: impact of chemistry and shear. Journal of environmental engineering, 124(11): 1087-1098.

Braun G., Hater W., Zum Kolk C., Dupoiron C., Harrer T. and Götz T. 2010. Investigations of silica scaling on reverse osmosis membranes. Desalination., 250(3): 982-984.

Burn S., Hoang M., Zarzo D., Olewniak F., Campos E., Bolto B. and Barron O. 2015. Desalination techniques—a review of the opportunities for desalination in agriculture. Desalination, 364: 2-16.

Busch M., Chu R., Kolbe U., Meng Q. and Li S. 2009. Ultrafiltration pretreatment to reverse osmosis for seawater desalination—three years field experience in the Wangtan Datang power plant. Desalination and water treatment, 10(1-3): 1-20.

Cabassud C. and Wirth D. 2003. Membrane distillation for water desalination: how to chose an appropriate membrane? Desalination, 157(1): 307-14.

Carrère H., Dumas C., Battimelli A., Batstone D.J., Delgenès J.P., Steyer J.P. and Ferrer I. 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: a review. Journal of hazardous materials, 183(1-3): 1-15.

Choi H., Park J., Tak T. and Kwon Y.N. 2012. Surface

Hameeteman E. 2013. Future Water (In) security: Facts, Figures, and Predictions. Global Water Institute, Brussels, Belgium.

Humplik T., Lee J., O'hern S.C., Fellman B.A., Baig M. A., Hassan S.F. and Wang, E.N. 2011. Nanostructured materials for water desalination. Nanotechnology, 22(29): 292001.

Jamaly S., Darwish N., Ahmed I. and Hasan S. 2014. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. Desalination, 354: 30-38.

Johnson D.B., and Gleick G.H. 2008. The World's Water 2006-2007: The Biennial Report on Freshwater Resources. Environmental Practice, 10(3): 129.

Johnson DW. and Muppavarapu N. 2017. Shipley HJ. AERATION WASTE HEAT FOR MEMBRANE EVAPORATION OF DESALINATION BRINE CONCENTRATE. Journal of Membrane Science.

Kameswari K.S.B., Kalyanaraman C. and Thanasekaran K. 2011. Effect of ozonation and ultrasonication pretreatment processes on co-digestion of tannery solid wastes. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(3): 517-525.

Khanzada N.K., Khan S.J. and Davies P.A. 2017. Performance evaluation of reverse osmosis (RO) pre-treatment technologies for in-land brackish water treatment. Desalination, 406: 44-50.

Kianmehr P., Parker W. and Seto P. 2009. Characterization of ozone impacts on WAS properties and digestibility. Proceedings of the Water Environment Federation, 2009(12): 3923-3935.

Kim D.H. 2011. A review of desalting process techniques and economic analysis of the recovery of salts from retentates. Desalination, 270(1): 1-8.

Laxman K., Myint M.T. Z., Al Abri M., Sathe P., Dobretsov S. and Dutta, J. 2015. Desalination and disinfection of inland brackish ground water in a capacitive deionization cell using nanoporous activated carbon cloth electrodes. Desalination, 362: 126-132.

Miller J.E. 2003. Review of water resources and desalination technologies. Sandia national labs unlimited release report SAND-2003-0800.

Morillo J., Usero J., Rosado D., El Bakouri H., Riaza A. modification of seawater reverse osmosis (SWRO) membrane using methyl methacrylate-hydroxy poly (oxyethylene) methacrylate (MMA-HPOEM) comb-polymer and its performance. Desalination, 291: 1-7.

Chung H.W., Nayar K.G., Swaminathan J. and Chehayeb K.M. 2017. Thermodynamic analysis of brine management methods: Zero-discharge desalination and salinity-gradient power production. Desalination, 404: 291-303.

Cleveland C., Hugaboom D., Raczko B. and Moughamian W. 2002. DAF pretreatment for ultrafiltration: cost and water quality implications. In Proceedings of the 2002 Biannual AMTA Conference.

Corral A.F., Yenal U., Strickle R., Yan D., Holler E., Hill C. and Arnold R. G. 2014. Comparison of slow sand filtration and microfiltration as pretreatments for inland desalination via reverse osmosis. Desalination, 334(1): 1-9.

Dukes S. and von Gottberg A. 2006. Membrane bioreactors for RO pretreatment. Proceedings of the Water Environment Federation, 2006(6): 6121-6132.

Elimelech M. and Phillip W.A. 2011. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. science, 333(6043): 712-717.

Freeman S.D and Majerle R.J. Silica fouling revisited. Desalination. 1995. Elsevier, 103(1-2): 113-115.

Frenkel V. 2000. Desalination methods, technology, and economics, Kennedy/Jenks Consultants.

Friedler E, Katz I. anf Dosoretz C.G. 2008. Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination. Desalination, 222(1-3): 38-49.

Fritzmann C., Löwenberg J., Wintgens T. and Melin T. 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination, 216(1-3): 1-76.

Glueckstern P. and Priel M. 2003. Comparative cost of UF vs conventional pretreatment for SWRO systems. International Desalination and Water Reuse Quarterly, 13(1): 34-9.

Greenlee L.F., Lawler D.F., Freeman B.D., Marrot B. and Moulin P. 2009. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. Water research, 43(9): 2317-2348.

nology for water purification in the coming decades. Nature, 452(7185): 301-310.

Sheikholeslami R., Al-Mutaz I., Tan S. and Tan S. 2002. Some aspects of silica polymerization and fouling and its pretreatment by sodium aluminate, lime and soda ash. Desalination, 150(1): 85-92.

Sheikholeslami R. 2003. Mixed salts—scaling limits and propensity. Desalination, 154(2): 117-127.

Shumway SA. 1999. The work exchanger for SWRO energy recovery. INTERNATIONAL DESALINATION AND WATER REUSE QUARTERLY, 8: 27-33.

Subramani A. and Jacangelo JG. 2014. Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: a review. Separation and Purification Technology, 122: 472-489.

Tran T., Hoang M., Duong T. and Bolto B. 2011. Improving pollutant removal and membrane performance via pre-treatment with a specific formulation of polysilicato-iron. Desalination and Water Treatment, 34(1-3): 106-111.

Turek M., Mitko K., Piotrowski K., Dydo P., Laskowska E. and Jakóbik-Kolon A. 2017. Prospects for high water recovery membrane desalination. Desalination, 401: 180-189.

Vrouwenvelder J.S., Beyer F., Dahmani K., Hasan N., Galjaard G., Kruithof J.C. and Van Loosdrecht M.C.M. 2010. Phosphate limitation to control biofouling. water research, 44(11): 3454-3466.

Wada Y., van Beek L.P., van Kempen C.M., Reckman J.W., Vasak S. and Bierkens M.F. 2010. Global depletion of groundwater resources. Geophysical research letters, 37(20), L20402.

Weemaes M., Grootaerd H., Simoens F. and Verstraete W. 2000. Anaerobic digestion of ozonized biosolids. Water Research, 34(8): 2330-2336.

Wolff G. 2006. The Economics of Desalination. Pacific Institute.

Yoon J., Amy G. and Yoon Y. 2005. Transport of target anions, chromate (Cr(VI)), arsenate (As(V)), and perchlorate (ClO4−), through RO, NF, and UF membranes. Water Science and Technology, 51(6-7): 327-334.

and Bernaola F. J. 2014. Comparative study of brine management technologies for desalination plants. Desalination, 336: 32-49.

Nicolaisen B. 2003. Developments in membrane technology for water treatment. Desalination, 153(1-3): 355-60.

Pearce G. 2008. UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs. Desalination, 222(1-3): 66-73.

Pramanik B.K., Shu L. and Jegatheesan V. 2017. A review of the management and treatment of brine solutions. Environmental Science: Water Research & Technology, 2017(3): 625-658.

Quist-Jensen C., Macedonio F. and Drioli E. 2015. Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse. Desalination, 364: 17-32.

Rachman R., Ghaffour N., Wali F. and Amy GL. 2013. Assessment of silt density index (SDI) as fouling propensity parameter in reverse osmosis (RO) desalination systems. Desalination and Water Treatment, 51(4-6): 1091-1103.

Rahardianto A., Gao J., Gabelich C.J., Williams M.D. and Cohen Y. 2007. High recovery membrane desalting of low-salinity brackish water: integration of accelerated precipitation softening with membrane RO. Journal of Membrane Science, 289(1-2): 123-137.

Reddy K. and Ghaffour N. 2007. Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies. Desalination, 205(1-3): 340-353.

Sahachaiyunta P., Koo T. and Sheikholeslami R. 2002. Effect of several inorganic species on silica fouling in RO membranes. Desalination, 144(1-3): 373-378.

Sauvet-Goichon B. 2007. Ashkelon desalination plant—a successful challenge. Desalination, 203(1): 75-81.

Semiat R., Sutzkover I. and Hasson D. 2003. Scaling of RO membranes from silica supersaturated solutions. Desalination, 157(1-3): 169-191.

Service, R.F. 2006. Desalination freshens up. Science (New York, NY), 313(5790), 1088.

Shannon M.A., Bohn P.W., Elimelech M., Georgiadis JG., Mariñas BJ. and Mayes AM. 2008. Science and tech-