نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، ص. ۳۸-۲۳

Water Management in Agriculture
Vol. 3, No. 2, Autumn and Winter 2016, 23-38

چشم‌انداز نمک‌زدایی آب برای مصارف کشاورزی

قاسم زارعی[۱*] و مرتضی خان احمدی[۲]

چکیده

با رشد روزافزون جمعیت و تشدید تغییرات اقلیمی، کمبود آب به مانع اصلی کشاورزی پایدار در جهان تبدیل‌شده است. در این راستا، برآوردهای تقریبی نشان می‌دهند که در سال ۲۰۳۰ میلادی، کشور ما سالانه به حدود ۴۰ میلیارد مترمکعب آب اضافی نیازمند خواهد بود. سفره‌های آب‌شور و آب دریا، یک منبع بی‌پایان و قابل‌اعتماد آب هستند که برای استفاده در اکثر فعالیت‌های کشاورزی، نیازمند نمک‌زدایی می‌باشند. در حال حاضر کشت اکثر محصولات کشاورزی با آب نمک‌زدایی شده به دلیل هزینه‌های زیاد انرژی و سرمایه اولیه موردنیاز، سودآور نیست. هم‌اکنون مصرف انرژی در فرآیند نمک‌زدایی حدود ۵ کیلووات ساعت بر مترمکعب است که هنوز بسیار بیشتر از مقدار حداقل تئوری ۱ کیلووات ساعت بر مترمکعب است. در این مقاله؛ روش‌های مختلف در دست تحقیق برای کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی بررسی‌شده‌اند. کاربردهای موردی از سامانه‌های نمک‌زدایی آب در کشت‌های گلخانه‌ای کشور به‌صورت کمی ارائه گردیده‌اند.. روش‌های نوآورانه مبتنی بر نانوتکنولوژی و بیوتکنولوژی برای کاهش اتلاف انرژی در غشاهای اسمز معکوس، غشاهای حاوی نانولوله‌های کربنی یا پروتئین‌های استخراج‌شده از گیاهان شور دوست در این رابطه تشریح شده‌اند. ترکیب مناسب روش‌های اسمز معکوس و اسمز مستقیم بدین منظور معرفی‌شده‌اند. به بازطراحی واحدهای نمک‌زدایی برای افزایش بازیابی انرژی اشاره‌شده است و استفادهٔ درحال‌توسعه از انرژی خورشیدی در نمک‌زدایی نیز به‌عنوان یک راهکار معرفی‌شده است.

واژه‌های کلیدی: کشاورزی، نمک‌زدایی، آب دریا، انرژی، هزینه، تولید محصول.

مقدمه

کمبود آب شیرین در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در شمال آفریقا و خاورمیانه یک مشکل شناخته‌شده بوده که با کاهش تدریجی منابع آب سطحی و زیرزمینی، رشد جمعیت و تغییر اقلیم، به‌سرعت روبه تشدید است. این کمبود در حال تبدیل‌شدن به یک خطر جدی برای جوامع انسانی ساکن در مناطق کم آب است. آب شیرین علاوه بر شرب و بهداشت و صنعت، برای کشاورزی باهدف تولید غذا، ایجاد اشتغال و بهبود محیط‌زیست موردنیاز است. قسمت اعظم آب موردنیاز سالانه هر فرد به تولید غذا اختصاص دارد. به‌عنوان یک تخمین، آب مصرفی هر فرد در سال حدود ۱۰۰۰ مترمکعب است که از این مقدار کمتر از دو مترمکعب به مصرف شرب می‌رسد و بیشتر آن در کشاورزی مصرف می‌شود. درنتیجه هزینه تأمین آب شرب درصد اندکی از هزینه‌های زندگی را تشکیل می‌دهد و تغییرات آن تأثیری بر اقتصاد خانواده ندارد درحالی‌که افزایش هزینه واقعی تأمین آب کشاورزی بر اقتصاد خانواده تأثیر زیادی خواهد داشت. تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر، تأثیر محدودیت منابع آب بر کشاورزی را به چند طریق تشدید کرده است. تغییر اقلیم موجب افزایش دمای متوسط سالانه شده که به‌نوبه خود با افزایش شدت تبخیر و تعرق، نیاز آبی گیاهان را زیاد می‌کند. از طرف دیگر تغییر اقلیم عموماً با کاهش بارش در مناطق خشک همراه است و به عقیده تعداد زیادی از متخصصین، افزایش شدت و تکرار خشک‌سالی‌های اخیر در کشور ناشی از این اثرات تغییر اقلیم است. تأثیر دیگر تغییر اقلیم به هم ریختن و غیرقابل‌پیش‌بینی کردن الگوهای بارش مناطق مختلف است که منابع آب را نامطمئن می‌کند. عدم اطمینان از منابع آب کافی، امکان برنامه‌ریزی تولید کشاورزی را کاهش داده و ریسک سرمایه‌گذاری در این بخش را زیاد می‌کند(مساح و مرید، ۱۳۸۴؛ De Silva et al., 2007; Mizyed, 2008; Chung et al., 2011).

بیش از ۹۷٪ از منابع آبی جهان را آب دریاها و سایر منابع آب‌شور تشکیل می‌دهند که نمک‌زدایی کم‌هزینه درصد اندکی از آن، می‌تواند مشکل جهانی آب را برطرف کند(Shannon et al.,

[۱] دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (*نویسنده مسئول: g.zarei@aeri.ir)
[۲] دانشیار پژوهش پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. (khanahmadi@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱۱/۰۹

2008). نمک‌زدایی آب دریا یکی از راهکارهای قابل‌بررسی برای کاهش محدودیت منابع آب کشاورزی بوده و یک مزیت بزرگ آن قابل‌اطمینان بودن است. نمونه‌های موفق نمک‌زدایی آب برای کشاورزی هم‌اکنون در سطح جهان وجود دارد. به‌عنوان نمونه ده واحد شیرین‌سازی آب دریا برای کشاورزی به ظرفیت ۷۰ هزار مترمکعب در روز از سال ۱۹۸۷ در جزایر قناری مورد بهره‌برداری قرارگرفته‌اند(Veza, 2004).

راهکارهای دیگر از قبیل احداث سد، آبخوان و آبخیزداری و نیز سدهای زیرزمینی اگرچه در اولویت قرار دارند ولی نهایتاً به بارش وابسته هستند و با توجه به غیرقابل‌پیش‌بینی بودن بارش، از قابلیت اطمینان زیادی برخوردار نیستند(تردست و موسوی، ۱۳۹۰). مزیت دیگر این روش قابل تنظیم بودن کیفیت و مقدار نمک‌زدایی شده است. به‌هرحال جنبه‌های اقتصادی مهم‌ترین مانع به‌کارگیری این روش برای تأمین آب کشاورزی است. مصرف زیاد انرژی و سرمایه‌گذاری بزرگ موردنیاز، موجب می‌شود قیمت تمام‌شده آب نمک‌زدایی شده بالاتر از حد قابل توجیه برای اغلب کاربردهای کشاورزی باشد(Sobhani et al., 2012). علاوه بر این، تغییرات محیط‌زیستی ناشی از صرف مقادیر زیاد انرژی و تولید پس آب‌شور نیز از اهمیت زیادی برخوردار هستند (Greenlee et al., 2009؛ حسن اقلی و زارعی، ۱۳۹۳). در این مقاله با تخمین آب موردنیاز کشور در سال‌های آینده، چالش‌های موجود در نمک‌زدایی آب دریا به‌منظور استفاده در کشاورزی و برخی از راهکارهای تحقیق‌شده در سطح جهان برای کاهش یا رفع آن‌ها، مرور و تحلیل می‌گردند.

حجم آب شیرین اضافی موردنیاز کشور

بیلان کنونی منابع آب ایران در جدول ۱ ارائه‌شده است (Salarian, 2012). همان‌گونه که دیده می‌شود، حجم منابع آب‌های زیرزمینی در کشور هرسال بیش از ۵ میلیارد مترمکعب کاهش می‌یابد. این امر اتمام تدریجی ذخایر استراتژیک آب موردنیاز برای مصارف ضروری در خشک‌سالی‌ها را به دنبال خواهد داشت. شور شدن، افزایش انرژی موردنیاز برای استحصال و نیز نشست برگشت‌ناپذیر زمین، از چالش‌ها و عواقب جدی دیگر این کاهش هستند.

جدول ۱- بیلان سالانه آب شیرین در ایران

مورد	مقدار میلیارد مترمکعب
آب تجدیدشونده	۱۳۰
ورودی آب به سفره‌های زیرزمینی	۵۶
برداشت از منابع آب زیرزمینی	۶۱/۵
کاهش سالانه منابع آب	۵/۵

قسمتی از محصولات کشاورزی موردنیاز مردم ایران از طریق واردات تأمین می‌شوند. آب اضافی موردنیاز برای تولید این محصولات در کشور با استفاده از مفهوم آب مجازی و تجارت مجازی آب، قابل تخمین است(زارعی و جعفری، ۱۳۹۵). بر این مبنا و مطابق جدول ۲، برای تولید محصولات وارداتی مهم در داخل کشور، به حدود ۲۱ میلیارد مترمکعب آب باکیفیت مناسب برای کشاورزی نیاز است که با در نظر گرفتن جمعیت ۷۵ میلیون نفری ایران، سرانهٔ آب اضافی موردنیاز هر نفر حدود ۲۸۰ مترمکعب در سال برآورد می‌شود(Mekonnen and Hoekstra, 2010).

جدول ۲- تخمین حجم آب موردنیاز برای تولید محصولات وارداتی در داخل کشور (سال ۱۳۹۰)

محصول	واردات میلیون تن	آب مجازی مترمکعب بر تن	کل آب موردنیاز میلیون مترمکعب
ذرت	۳/۳	۷۱۰	۲۳۴۳
شکر	۱/۲	۱۹۲۹	۲۳۱۵
برنج	۱/۵	۲۶۰۰	۳۹۰۰
روغن	۱/۲۵	۵۵۰۰	۶۸۷۵
گندم و جو	۴	۱۱۶۰	۴۶۴۰
سویا	۰/۵	۲۵۰۰	۱۲۵۰
جمع	۱۱/۷۵	-	۲۱۳۲۳

از طرف دیگر در برآورد آب موردنیاز ایران در سال‌های آینده، رشد جمعیت کشور نیز باید مدنظر قرار گیرد. سازمان ملل متحد جمعیت ایران در سال‌های آینده را بر مبنای سه سناریوی؛ رشد کم، رشد متوسط و رشد زیاد، مطابق جدول ۳ تخمین زده است. بدین ترتیب جمعیت کشور تا بیست سال آینده، حداقل ده میلیون نفر افزایش خواهد یافت (United Nations, 2012).

جدول ۳- پیش‌بینی جمعیت ایران در سال‌های مختلف بر اساس سه سناریوی متفاوت برحسب میلیون نفر

سال	سناریو		
	رشد زیاد	رشد متوسط	رشد کم
۲۰۱۰	۷۴/۵	۷۴/۵	۷۴/۵
۲۰۲۰	۸۶/۵	۸۴	۸۱
۲۰۳۰	۹۷	۹۱	۸۵

سرانهٔ آب در اختیار هر نفر در حال حاضر در کشور تقریباً ۱۲۸۸ مترمکعب بوده و با احتساب ۲۸۰ مترمکعب آب مجازی وارداتی، کل آب سرانهٔ موردنیاز برای حفظ شرایط فعلی کشور، حدود ۱۵۷۰ مترمکعب برآورد می‌گردد. این مقدار به شاخص میانگین جهانی، یعنی ۱۲۸۰ مترمکعب در سال نزدیک است(Hoekstra and Chapagain, 2007). بدین ترتیب افزایش ده‌میلیون‌نفری جمعیت به معنی نیاز به حدود ۱۶ میلیارد مترمکعب آب اضافی است. با کمک تخمین‌های فوق، می‌توان آب شیرین اضافی موردنیاز ایران در بیست سال آینده را مطابق جدول ۴ برآورد نمود.

جدول ٤- برآورد آب شیرین اضافی موردنیاز کشور در بیست سال آینده

آب موردنیاز برای	حجم آب میلیارد مترمکعب در سال
جلوگیری از کاهش بیشتر منابع آب زیرزمینی	۵/۵
تولید مواد غذائی وارداتی در داخل کشور	۲۱/۳
افزایش جمعیت در بیست سال آینده	۱۵/۷
جمع	۴۲/۵

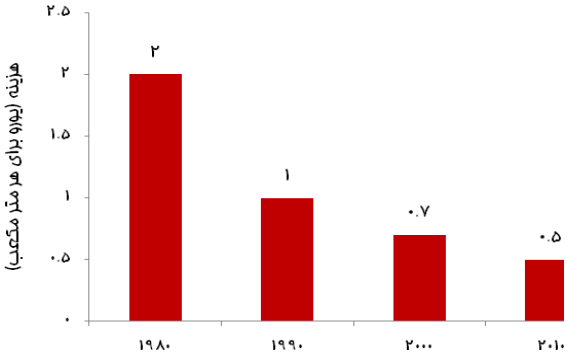
چالش‌های نمک‌زدایی آب برای کشاورزی

بر اساس جدول ۴، در سال‌های آینده ایران به حدود ۴۲/۵ میلیارد مترمکعب آب شیرین اضافی نیاز خواهد داشت که قسمتی از آن باید با کاهش سرانهٔ مصرف آب از طریق افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی، توسعه کشت گیاهان شور دوست (شور ورزی) و نیز استحصال بیشتر بارش‌ها (توسعه کشت‌های دیم، استفاده بیشتر از آب سبز و ...) جبران شده و قسمت دیگر از طریق تولید آب نمک‌زدایی شده، تأمین شود. تنها منابع پایدار برای تولید آب شیرین، دریاها هستند و به نظر می‌رسد نمک‌زدایی از آب دریا برای این منظور اجتناب‌ناپذیر است. این ایده غیرقابل‌باور نیست زیرا بر اساس آماری که در قسمت‌های بعدی این مقاله ارائه می‌شوند، در حال حاضر سالانه در جهان بیش از ۳۰ میلیارد مترمکعب آب شیرین از طریق نمک‌زدایی آب دریا تولید می‌گردد و این تولید عمدتاً در چند کشور، متمرکز است. به‌هرحال، هزینه‌های تولید (Karagiannis and Soldatos, 2008) و ملاحظات محیط‌زیستی (Lattemann and Hopner, 2008)، دو چالش عمده در نمک‌زدایی از آب دریا برای استفاده در کشاورزی هستند.

هزینه‌های نمک‌زدایی آب

آب شیرین تولیدی در جهان در حال حاضر عمدتاً به مصرف شرب و بهداشت می‌رسد و همان‌طور که قبلاً گفته شد، به دلیل مصرف سرانهٔ کم، هزینه‌های آن قابل‌تحمل است. لیکن با توجه به سرانه زیاد مصرف آب کشاورزی، هزینه‌های تولید محدودکننده‌ترین عامل محسوب شده و کاهش این هزینه بزرگ‌ترین چالش فراروی استفاده از آب نمک‌زدایی شده در کشاورزی است. هزینهٔ سرمایه-گذاری اولیه و هزینه‌های جاری (عمدتاً انرژی)، دو جزء اصلی هزینه‌های نمک‌زدایی آب‌ها هستند(رفیعی‌راد و عرب، ۱۳۸۸). به‌عنوان‌مثال، درروش اسمز معکوس، هزینهٔ انرژی ۴۴٪ و هزینهٔ سرمایهٔ اولیه ۳۷٪ از هزینه‌های تولید را در برمی‌گیرند(Cooley et al., 2006). کاهش این دو جزء برای توجیه‌پذیر شدن نمک‌زدایی آب دریا به‌منظور مصرف در بخش کشاورزی، ضرورت دارد. پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان برای کاهش این هزینه‌ها در جریان است که در قسمت‌های بعدی مقاله مرور می‌گردند.

هزینهٔ تمام‌شده آب استحصالی در هر سامانه نمک زدایی آب تابع عوامل متعددی است. قیمت تجهیزات و وسایل موردنیاز موجود در بازار، هزینه مصرف انرژی و کیفیت آب ورودی، از اصلی‌ترین آن‌ها هستند. لازم به ذکر است که با پیشرفت‌های صورت گرفته درزمینه این فناوری‌ها، گام‌های مؤثری نیز در جهت ارزان‌تر سازی این عملیات برداشته‌شده است. به‌طورکلی قیمت تمام‌شده نمک زدایی آب از گذشته تاکنون به دلیل رشد سریع فنّاوری بسیار کاهش‌یافته و این روند تغییرات کاملاً امیدبخش بوده است به‌طوری‌که در طول دو دههٔ اخیر، بهای تولید آب شیرین حدود ۶۰٪ کاهش داشته است. در شکل ۱ روند کاهش قیمت تمام‌شده یک مترمکعب آب استحصالی از روش اسمز معکوس آورده شده است. در حال حاضر قیمت تمام‌شده یک مترمکعب آب شیرین‌سازی شده در دنیا به کمتر از ۰/۵ یورو (به روش اسمز معکوس) کاهش‌یافته است(زارعی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱- هزینه‌های نمک‌زدایی یک مترمکعب آب در آب سامانه‌های صنعتی با روش اسمز معکوس

ملاحظات محیط‌زیستی

نمک‌زدایی حجم‌های بسیار بزرگ آب موردنیاز کشاورزی از جنبه‌های مختلف بر محیط‌زیست تأثیرگذار خواهد بود (Lattemann and Hopner, 2008). یک جنبه مهم ملاحظات مربوط به انرژی است. در حال حاضر روش اصلی نمک‌زدایی، فرایند اسمز معکوس است که به ازای هر مترمکعب آب شیرین تولیدی حدود ۵ کیلووات ساعت الکتریسیته نیاز دارد. بدین ترتیب برای تولید مقدار آب شیرین مندرج در جدول ۴، به حدود ۳۰ هزار مگاوات توان الکتریکی نیاز است که معادل نصف کل تولید الکتریسیته فعلی کشور است. تأمین این مقدار الکتریسیته با استفاده از سوخت‌های فسیلی به تولید و انتشار مقادیر زیاد گاز دی‌اکسید کربن می‌انجامد که می‌تواند اثرات گلخانه‌ای را تشدید کند. خوشبختانه محصول تولیدی از آب شیرین شده، تقریباً تمام دی‌اکسید کربن آزادشده را تثبیت می‌کند. به ازای تولید هر کیلووات ساعت الکتریسیته حدود ۰/۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به محیط‌زیست وارد می‌گردد(Carbon-Trust, 2011).

از طرف دیگر، از هر مترمکعب آب شیرین در شرایط فعلی در ایران، حدود دو کیلوگرم ماده خشک تولید می‌شود که با تثبیت تقریباً ۳ کیلوگرم دی‌اکسید کربن همراه است. درهرصورت جایگزینی انرژی‌های تجدید پذیر بجای سوخت‌های فسیلی در این فرآیند، آن‌ها به فرآیند تثبیت‌کننده کربن و دوستدار محیط‌زیست تبدیل خواهد نمود. لازم به ذکر است که انرژی لازم برای انتقال آب شیرین شده به مناطق مرتفع و دور از سواحل دریا در برآورد فوق منظور نشده و بدیهی است که با تمرکز به فعالیت‌های کشاورزی در دشت‌های اطراف سواحل کشور، به این انرژی اضافی نیازی نخواهد بود.

یکی دیگر از چالش‌های محیط‌زیستی نمک‌زدایی آب‌های شور، ورود پس آب‌شور باقی‌مانده به محیط‌زیست است. این چالش در مورد نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور که در مناطق دور از دریا انجام می‌شود، یک مشکل جدی است ولی در مورد واحدهایی نمک‌زدایی از آب دریا درصورتی‌که تمهیدات لازم برای اختلاط مناسب پس آب‌شور برگشتی با آب دریا صورت گیرد، قابل‌رفع به نظر می‌رسد(خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۱). اخیراً و در مقیاس آزمایشگاهی، نمک کلرید سدیم موجود در پس آب‌شور از طریق تماس با جریان‌های گازی حاوی دی‌اکسید کربن و آمونیاک، به بیکربنات سدیم و کلرید آمونیم تبدیل‌شده که ترکیب اول رسوب شده و از جریان آب جدا می‌شود(El Naas et al., 2010). با این روش می‌توان شوری پس آب‌شور را کاهش داد ولی اقتصادی بودن این روش به‌ویژه در مقیاس بزرگ، نیازمند بررسی‌های تکمیلی است.

سابقه نمک‌زدایی آب دریا

نمک‌زدایی به فرایندهای گوناگونی اطلاق می‌گردد که برای حذف نمک از آب‌های دارای کیفیت‌های مختلف و نامناسب، طراحی‌شده‌اند(قاسمی و دانش، ۱۳۹۱). در جدول ۵ نمونه‌هایی از شوری منابع آب‌های سطحی جهان ارائه‌شده است(Cooley et al., 2006). همچنین در جدول ۶، سهم هر یک از انواع آب‌های شور از ظرفیت نمک‌زدایی نصب‌شده تا سال ۲۰۰۵ ارائه‌شده‌اند(Cooley et al., 2006).

جدول ۵- نمونه‌هایی از شوری آب‌های جهان

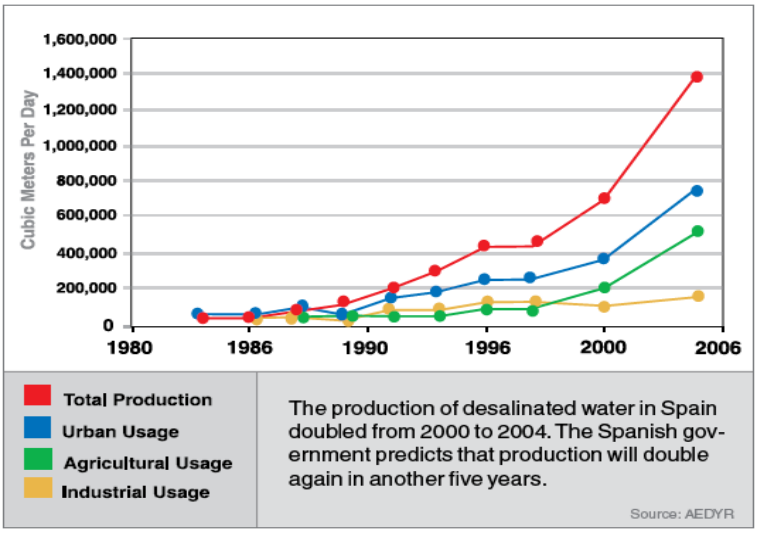
منبع/ نوع آب	غلظت تقریبی نمک گرم در لیتر
آب‌های لب‌شور	۳- ۰/۵
دریای شمال	۲۱
خلیج مکزیک	۳۳- ۲۳
اقیانوس اطلس	۳۵
اقیانوس آرام	۳۸
خلیج‌فارس	۴۵
بحرالمیّت	۳۰۰

جدول ٦- سهم هر یک از انواع آب‌های شور از ظرفیت نمک‌زدایی نصب‌شده تا سال ۲۰۰۵

منبع آب	سهم درصد
آب دریا	۵۶
آب‌های لب‌شور	۲۴
رودخانه‌ها	۹
فاضلاب‌ها	۶
آب خالص	۵
آب‌نمک	۱<

جداسازی نمک از آب، سابقه طولانی دارد و در ابتدا هدف از آن دست‌یابی به نمک بوده است. سپس این ایده برای تأمین آب در کشتی‌ها و دیگر مواردی که آب‌شور در دسترس بوده ولی آب شیرین وجود نداشت، مورداستفاده قرار گرفت(قنادی، ۱۳۸۴). در سال ۱۷۹۰ توماس جفرسون پیشنهادی برای فروش یک روش تقطیر قابل‌استفاده برای نمک‌زدایی دریافت کرد. در سال ۱۸۵۲ یک دستگاه در این رابطه در انگلیس ثبت اختراع گردید. اولین بار در سال ۱۹۲۸ در جزیرهٔ کوراکو، واحدهای نمک‌زدایی نصب و شروع به کارکردند و در سال ۱۹۳۸ یک واحد بزرگ نمک‌زدایی در عربستان سعودی احداث شد. تحقیقات در جریان جنگ جهانی دوم برای دست‌یابی به راه‌های تأمین آب برای سربازان آغاز گردید و بعد از جنگ نیز ادامه یافت. طی دههٔ ۱۹۶۰ میلادی در امریکا، پشتیبانی زیادی از ایده ایجاد واحدهای بزرگ نمک‌زدایی از آب‌های شور به عمل آمد و این کار مهم‌ترین پیشرفت علمی برای کاهش فقر برشمرده شد. اولین واحدهای مدرن نمک‌زدایی در همین دهه، در کویت احداث گردیدند. در سال ۱۹۷۷ آمریکا اعتباری بالغبر ۱۴۴ میلیون دلار برای تحقیقات نمک‌زدایی از آب‌ها تخصیص داد و در کشورهای خلیج‌فارس و ژاپن نیز از این پژوهش‌ها پشتیبانی مالی به عمل آمد. در سال ۱۹۸۲ امریکا تمام بودجه‌های تحقیقات غیرنظامی ازجمله نمک‌زدایی آب‌ها را حذف نمود و این وضعیت ۱۴ سال ادامه یافت. در سال ۱۹۹۶ کنگره آمریکا مبلغ ۳۰ میلیون دلار برای تحقیقات شش‌ساله نمک‌زدایی آب‌ها و ۲۵ میلیون دلار برای اجرائی نمودن نتایج این تحقیقات، تصویب نمود. نقشهٔ راه نمک‌زدایی و خالص‌سازی آب در سال ۲۰۰۴ در آمریکا ارائه شد. هم‌اکنون تحقیقات در این زمینه ادامه دارد و تنها در آمریکا در سال‌های ابتدائی قرن ۲۱، نزدیک به دو میلیارد دلار برای تحقیقات پایه و توسعه‌ای زمینه‌های مختلف مرتبط با نمک‌زدایی از آب‌های شور هزینه شده است. سایر دولت‌ها و همچنین بخش‌های خصوصی نیز در این زمینه فعال هستند (Cooley et al., 2006).

احداث واحدهای نمک‌زدایی نیز با سرعت زیاد در حال گسترش بوده و ظرفیت نصب‌شده در سی سال اخیر، رشد شتابانی داشته است به‌طوری‌که ظرفیت تولید آب شیرین برحسب میلیون مترمکعب در روز از کمتر از ۵ در سال ۱۹۸۱ به ۲۵ در سال ۲۰۰۱ و ۶۵ در سال ۲۰۱۱ رسیده و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۱۶ به حدود ۱۰۰ بالغ گردد که حدود ۴۰ درصد آن در منطقه خلیج‌فارس استقرار خواهد داشت(Elimelech and Phillip, 2011؛ Shatat et al., 2013). به‌عنوان‌مثال؛ کشور اسپانیا با دارا بودن بیش از ۷۰۰ واحد آب‌شیرین‌کن، روزانه در حدود ۱/۶ میلیون مترمکعب آب شیرین می‌کند. این مقدار آب شیرین شده برای تأمین آب روزانه تقریباً ۸ میلیون نفر کافی است. روند استفاده از آب‌شیرین‌کن‌ها در این کشور طی حدود دو دهه در بخش‌های مختلف مصرف و نیز کل مصارف، در شکل ۲ ارائه‌شده است (AEDYR, 2008). آب شیرین حاصل از نمک‌زدایی در حال حاضر برای مصارف شرب، بهداشت و صنعت مورداستفاده قرار می‌گیرد به‌طوری‌که بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در ۱۵۰ کشور جهان، هم‌اکنون از آب سالم و باکیفیت تولیدشده در بیش از ۱۵۰۰۰ واحد نمک‌زدایی از آب‌های شور، بهره‌مند هستند.



شکل ۲- روند استفاده از سامانه‌های نمک‌زدایی در اسپانیا در طی دو دهه (۲۰۰٤-۱۹۸۳) در بخش‌های مختلف

روش‌های مختلف نمک‌زدایی

روش‌های مختلفی برای نمک‌زدایی توسعه‌یافته‌اند که به‌طورکلی به سه دسته حرارتی، غشائی و روش‌های متفرقه تقسیم می‌شوند (قاسمی و دانش، ۱۳۹۱). دسته اول بر مبنای استفاده از حرارت برای تقطیر آب قرار دارد و مهم‌ترین روش‌های این دسته شامل تقطیر چندقسمتی (MED)، تقطیر چندمرحله‌ای فلاش (MSF) و تبخیر همراه با فشرده‌سازی بخار (VC)، هستند. روش‌های غشائی نیز شامل اسمز معکوس، اسمز مستقیم، الکترو دیالیز و تقطیر غشائی هستند(Greenlee et al., 2009). تبادل یونی و تولید یخ نیز روش‌های متفرقه هستند. اولین واحدهای بزرگ بر مبنای تبخیر و تقطیر آب بوده‌اند که تنها در مناطق دارای انرژی ارزان‌قیمت توسعه‌یافته‌اند. از دهه ۱۹۷۰ تعداد واحدهای نصب‌شده مبتنی بر اسمز معکوس افزایش یافت. این واحدها، آب عاری از میکروارگانیزم و اکثر آلودگی‌های آلی تولید کرده و عموماً به سرمایهٔ اولیه و انرژی کمتری احتیاج دارند ولی میزان نمک آب شیرین تولیدی توسط آن‌ها بیشتر بوده و ممکن است به ۵۰۰ قسمت در میلیون (PPM) بالغ گردد درحالی‌که درصد نمک واحدهای حرارتی کمتر از PPM ۲۵ است (میرباقری و شمس، ۱۳۸۷). در سال ۲۰۰۶ حدود ۴۶٪ از واحدهای نمک‌زدایی از روش اسمز معکوس استفاده کرده و تنها فرآیند قابل‌ملاحظه دیگر فلاش چندمرحله‌ای است که دلیل موفقیت آن تبخیر آب به طریق درَخش است که از رسوب‌گذاری بر سطوح انتقال حرارت تا حد زیادی کاسته است (Cooley et al., 2006).

روش‌های کاهش مصرف انرژی در نمک‌زدایی

مقدار مرسوم مصرف انرژی برای تولید هر مترمکعب آب شیرین در واحدهای بزرگ اسمز معکوس بین ۳ تا ۷ و به‌طور متوسط ۵ کیلووات ساعت است(Shaffer et al., 2012). درحالی‌که حداقل تئوریک این مقدار که برای یک نمک‌زدایی برگشت‌پذیر آب دریا به کمک روابط ترمودینامیکی محاسبه‌شده، حدود ۱/۰۶ کیلووات ساعت است. دستیابی به این عدد به دلیل محدود بودن اندازه دستگاه و برگشت‌ناپذیر بودن شرایط عملیاتی، امکان‌پذیر نبوده ولی با استفاده از غشاهای با تراوش پذیری بیشتر، این عدد را می‌توان تا ۱/۶ کاهش داد. کمترین مقدار عملی گزارش‌شده ۱/۸ کیلووات ساعت است که در یک پایلوت با بهره‌گیری از یک غشاء با تراوش پذیری زیاد برای ۵۰٪ بازیابی به‌دست‌آمده است(Elimelech and Phillip, 2011). اخیراً با بهره‌گیری از سیستم بازیاب، انرژی مصرفی در مواردی به ۲ تا ۲/۳ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب آب شیرین تولیدی، کاهش‌یافته است(Dawoud and Mulla, 2012).

علاوه بر انرژی مصرفی واحد اسمز معکوس، برای هر مترمکعب آب شیرین تولیدی حدود ۰/۲ الی ۰/۴ کیلووات ساعت برای پیش‌تصفیه آب دریا موردنیاز بوده و همچنین جهت کاهش غلظت یون‌های کلر و بُر به کمتر از حد استاندارد برای آبیاری محصولات کشاورزی حساس، نیازمند اسمز معکوس ثانویه است که ۰/۵ کیلووات ساعت انرژی اضافی مصرف می‌کند(Shaffer et al., 2012).

با نزدیک شدن مصرف انرژی فرآیندهای اسمز معکوس به حداقل تئوری، بهبود بیشتر تراوش پذیری غشاء در کاهش مصرف انرژی نقشی نداشته ولی سرمایهٔ اولیه را کاهش می‌دهد. غشاهای کامپوزیت لایهٔ نازک، ضریب تراوش حدود ۱/۲۶ لیتر بر ساعت بر بار دارند و ۹۹/۶٪ از نمک را پس می‌زنند. گرفتگی و رشد میکروب‌ها بر سطح غشاء از عوامل بازدارندهٔ استفاده کامل از قابلیت‌های آن‌ها است. فنّاوری‌های جدیدی در دست توسعه هستند که به کمک آن‌ها، تراوش پذیری غشاها چندین برابر افزایش می‌یابد. البته افزایش فلاکس (شدت‌جریان) تراوش، مشکلات افزایش پلاریزاسیون غلظت و گرفتگی را به دنبال دارد که از رسیدن به فلاکس تراوش حداکثر جلوگیری می‌کند. برای کاهش این اثرات منفی، به طراحی جدید مدول‌های اسمز معکوس نیاز است؛ مانند سایر فرآیندهای جداسازی، در اسمز معکوس نیز می‌توان با افزایش تعداد مراحل جداسازی، فرآیند را به حالت برگشت‌پذیر نزدیک‌تر نموده و اتلاف انرژی را کاهش داد. مثلاً با استفاده از دو مدول بجای یک مدول، می‌توان مصرف انرژی را به ۱/۲۸ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب آب شیرین، کاهش داد. به‌هرحال این روش به دلیل افزایش سرمایهٔ اولیه، به کاهش هزینه‌های تولید نمی‌انجامد(Elimelech and Phillip, 2011).

نصب واحدهای نمک‌زدایی در کنار نیروگاه‌ها

نصب واحدهای نمک‌زدایی در کنار نیروگاه‌ها موجب می‌شود بتوان از انرژی اتلافی (برگشتی) نیروگاه‌ها استفاده نمود و همچنین از انرژی در مواقع غیر پیک مصرف، استفاده کرد و تا حدی از اثرات محیط‌زیستی هر دو این واحدها کاست. گرم کردن آب‌شور با انرژی حرارتی کم‌ارزش اتلافی از نیروگاه‌ها، باعث افزایش فلاکس عبور آن از غشاء می‌شود و درنتیجه مصرف انرژی الکتریکی پرارزش موردنیاز برای ایجاد فشار دو طرف غشاء را کاهش می‌دهد(Shannon et al., 2008).

اسمز مستقیم

اسمز مستقیم نیز یک فرایند غشائی بوده و از این لحاظ، مشابه اسمز معکوس است. در روش اسمز معکوس در یک سمت غشاء، آب‌شور و در سمت دیگر آن، آب خالص قرار دارد و برای انتقال آب از آب‌شور به آب خالص که در جهت خلاف فشار اسمزی است، از فشار هیدرولیکی استفاده می‌شود. در روش اسمز مستقیم در یک سمت آب‌شور و در سمت دیگر محلول غلیظی حاصل از انحلال یک ترکیب ویژه در آب قرار دارد که اصطلاحاً محلول کشش نامیده می‌شود. فشار اسمزی محلول کشش بیش از آب‌شور بوده و بنابراین آب از سمت آب‌شور بدون نیاز به فشار هیدرولیکی به سمت این محلول تراوش می‌یابد. این محلول پس از رقیق شدن وارد دستگاه دیگری شده و آب خالص از آن جداشده و محلول غلیظ باقی‌مانده به مدول اسمز مستقیم بازگشت داده می‌شود. در روش اسمز معکوس، محدودیت‌های مکانیکی پمپ‌ها و سایر تجهیزات، ایجاد فشارهای هیدرولیکی زیاد را غیراقتصادی می‌کند و درنتیجه درصد بازیابی آب دریا در روش اسمز معکوس از ۵۰٪ فراتر نمی‌رود. در اسمز مستقیم می‌توان به فشارهای اسمزی بالاتر دست‌یافته و درصد بازیابی را افزایش داد. در اسمز مستقیم تأثیر پلاریزاسیون غلظت بر فلاکس تراوش و نیز احتمال گرفتگی غشاء به دلیل اندک بودن فشار هیدرولیکی، کمتر از اسمز معکوس است(Cath et al., 2006). این ویژگی یکی از مزیت‌های بزرگ اسمز مستقیم محسوب می‌شود.

ترکیب حل شونده مورداستفاده در تولید محلول کشش باید دارای وزن مولکولی کم و حلالیت زیاد در آب باشد تا بتوان به فشارهای اسمزی زیاد ضروری برای فلاکس تراوش بالا و درصد بازیابی زیاد دست‌یافت. این ترکیب همچنین باید برای سلامتی بی‌خطر باشد. از همه مهم‌تر این‌که باید به‌راحتی بتوان آب خالص را از آن جداسازی نمود. یکی از این ترکیبات، مخلوط دی‌اکسید کربن و آمونیاک است. بیکربنات آمونیم با غلظت زیاد در آب حل‌شده و فشار اسمزی زیادی ایجاد می‌کند. این ترکیب با گرم کردن تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، به‌راحتی به دی‌اکسید کربن و آمونیاک تجزیه‌شده و به روش تقطیر در دمای کم، از آب جدا می‌شود(McCutcheon et al., 2005). نتایج آزمایشگاهی تولید آب شیرین از آب دریا به کمک این سیستم، حاکی از دستیابی به فلاکس تراوش ۲۵ لیتر بر ساعت آب شیرین با غلظت نمک کمتر از ۵٪ آب دریا است (Cath et al., 2006).

ازلحاظ تئوری فلاکس تراوش می‌تواند به‌مراتب بیش از این مقدار باشد ولی پدیده پلاریزاسیون غلظت در داخل قسمت متخلخل غشاء مانع این امر می‌گردد(McCutcheon et al., 2006). بر اساس شبیه‌سازی انجام‌گرفته به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز سامانه‌های پالایشی هایسیس[2]، مجموع انرژی الکتریکی و حرارتی موردنیاز برای تولید یک مترمکعب آب شیرین در اسمز مستقیم با استفاده از این محلول کشش، معادل ۰/۸۴ کیلووات ساعت است درحالی‌که در اسمز معکوس حدود ۳ و در روش‌های تقطیری، بیش

[2] HYSYS v3.2

از ۳/۲ کیلووات ساعت است(McGinnis and Elimelech, 2007).

مخلوطی از کودهای شیمیائی نیز به‌عنوان حل شونده در تولید محلول کشش، استفاده می‌شوند. مزیت این ترکیبات عدم نیاز به جداسازی و استفاده مجدد است زیرا محلول کودی رقیق‌شده حاصل از فرآیند به‌طور مستقیم می‌تواند برای آبیاری مورداستفاده قرار گیرد. به دلیل این‌که مصرف کودهای شیمیائی در مزارع محدود است، استفاده از آن‌ها در تولید محلول کشش نمی‌تواند به تولید مقادیر زیاد آب شیرین منجر گردد(Phuntsho et al., 2012). اخیراً استفاده از انواع هیدروژل‌های پلیمری به‌عنوان محلول کشش، موردتوجه قرارگرفته است. افزودن ذرات کربن به داخل هیدرو ژل، ظرفیت آب‌پذیری و فلاکس اسمز مستقیم را افزایش داده است. از این روش برای نمک‌زدایی آب‌شور حاوی ۲ گرم کلرید سدیم در لیتر، استفاده‌شده است(Li et al., 2013; Li et al., 2011a). با افزودن ذرات کربنی با خاصیت جذب نور می‌توان انرژی خورشیدی را بجای حرارت برای جداسازی آب جذب‌شده در هیدرو ژل بکار گرفت(Li et al., 2011b).

با کمک ذرات هیدرو ژل ۳۵٪ از شوری آب حاوی ده گرم کلرید سدیم در لیتر در یک مرحله حذف‌شده و ادعاشده با افزایش تعداد مراحل می‌توان از آب دریا آب شیرین استحصال نمود(Hopfner et al., 2010). پلی مریزاسیون نرمال ایزوپروپیل اکریل آمید در حضور پلی سدیم اکریلات یا پلی وینیل الکل به تولید یک هیدرو ژل انجامیده است که در فرآیند اسمز مستقیم، در دمای اتاق آب جذب کرده و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، تمام آب جذب‌شده را از دست می‌دهد. ترکیب برای نمک‌زدایی به‌صورت چرخه‌ای از فرآیندهای سرد کردن و گرم کردن قابل‌استفاده است(Cai et al., 2013). نانو ذرات مغناطیسی نیز به دلیل قابلیت جداسازی به کمک میدان مغناطیسی، به‌عنوان ترکیبات مناسب برای تولید محلول کشش موردتوجه قرارگرفته‌اند(Chekli et al., 2012). برای استفاده کامل از قابلیت‌های روش اسمز مستقیم، تحقیقات برای تولید غشاءهای باکیفیت‌تر، محلول‌های کشش مناسب‌تر و سامانه‌های پربازده‌تر برای بازیابی محلول کشش، موردنیاز هستند(Qin et al., 2012).

تلفیق اسمز مستقیم و اسمز معکوس

در اسمز مستقیم با انتخاب محلول کشش مناسب، به‌راحتی می‌توان فشارهای اسمزی بزرگی ایجاد نمود که قادر به استخراج آب از آب‌های بسیار شور است. به دلیل این ویژگی، استفاده از اسمز مستقیم برای نمک‌زدایی آب‌های بسیار شور از قبیل پساب خروجی از واحدهای اسمز معکوس استفاده می‌شود. اخیراً با کمک یک سیستم مبتنی بر اسمز مستقیم، یک پساب با شوری ۷۳ گرم در لیتر به یک پساب با شوری ۲۰۰ گرم بر لیتر و آب شیرین با شوری کمتر از ۰/۵ گرم در لیتر تفکیک‌شده است. هزینه این روش ۳۵٪ کمتر از روش‌های حرارتی برآورد شده است(Oasys, 2012). به دلیل این ویژگی، اخیراً استفاده تلفیقی از اسمز معکوس و اسمز مستقیم موردتوجهٔ جدی متخصصان قرارگرفته است(Choi et al., 2009; Shaffer et al., 2012).

تلفیق اسمز معکوس با اسمز مستقیم به‌صورت دیگری در مورد جداسازی آب از محلول‌هایی که اعمال فشار بر آن‌ها باعث گرفتگی شدید غشاهای اسمز معکوس می‌گردد نیز کاربرد دارد. در این حالت ابتدا جداسازی با کمک اسمز مستقیم انجام‌گرفته و محلول کشش رقیق‌شده برای استفاده مجدد بروش اسمز معکوس تغلیظ می‌شود. همچنین درصورتی‌که ترکیبات محلول کشش به داخل آب شیرین تولیدی در اسمز معکوس وارد گردند، با استفاده از اسمز معکوس می‌توان آن‌ها را جداسازی نمود. اساس بررسی‌های تئوری ترکیب این دو فرایند اسمزی برای آب دریا و یا آب‌های لب‌شور، به دستیابی به درصدهای جداسازی بیشتر و فلاکس تراوش بالاتر منجر می‌گردد (Choi et al., 2010).

تقطیر غشائی

در این روش از اختلاف فشار بخارآب در دو سمت یک غشاء هیدروفوب به‌عنوان عامل محرک جداسازی استفاده می‌گردد. آب‌شور تا دمای معین گرم شده و در مجاورت غشاء قرار داده می‌شود. در سمت دیگر غشاء آب خالص با دمای کمتر و یا یک جریان گاز حامل و یا خلأ وجود دارد. آب مایع از غشاء هیدروفوب عبور نکرده و تنها بخارآب از آن عبور می‌کند که در سمت دیگر غشاء در داخل جریان خالص خنک (کندانس) شده و یا به همراه جریان گاز حامل و یا توسط خلأ از کنار غشاء دور می‌شود. مزیت این روش همانند اسمز مستقیم در استفاده از حرارت کم‌ارزش صنایع و یا استفاده از انرژی حرارتی خورشید قرار دارد. به همین دلیل ازنظر محیط‌زیستی، بر اسمز معکوس برتری داشته و درصورتی‌که مالیات بر تولید دی‌اکسید کربن نیز اعمال شود، هزینه‌های تولید آب شیرین به کمک این روش ممکن است از اسمز معکوس کمتر باشد(Kesieme et al., 2013).

مزایای دیگر این روش شامل گرفتگی کمتر(Pangarkar et al., 2011) ، جداسازی کامل نمک‌ها (Lawson and Lloyd, 1997) و عدم نیاز به فشار زیاد و تجهیزات مقاوم در مقابل فشار،

است. دامنهٔ دمای کار این فرآیند بین ۳۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد است(El-Bourawi et al., 2006).

در مقایسه با روش اسمز معکوس که طی بیش از ۴۰ سال پژوهش به‌تدریج تکمیل‌شده است(Greenlee et al., 2009)، پژوهش‌های کمتری در مورد تقطیر غشائی انجام‌گرفته است(Pangarkar et al., 2011). همچنین اکثر پژوهش‌های انجام‌گرفته در رابطه با تقطیر غشائی، در مقیاس آزمایشگاهی بوده و پژوهش‌های لازم در مقیاس بزرگ و نیز در مبانی ترمودینامیکی (انتقال جرم و حرارت)، توسعه غشاهای جدید و بهینه‌سازی مصرف انرژی در جریان هستند(Alkhudhiri et al., 2012).

استفاده از غشاهای حاوی الیاف نانو کربن

خواص انتقال آب در نانولوله‌های کربنی با منافذ انتقال آب در سامانه‌های بیولوژیکی مشابهت زیادی داشته و این امر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است(Lee et al., 2011). سرعت اندازه‌گیری شده جریان در این لوله‌ها بین ده تا صد هزار برابر مقدار پیشگوئی شده توسط معادله هوگان- پویزولی است(Majumder et al., 2005). به‌طورکلی خواص ترمودینامیکی و انتقالی آب داخل نانولوله‌ها نسبت به آب در وضعیت معمولی متفاوت است. امکان متصل کردن گروه‌های عاملی بر سطح این نانولوله‌ها وجود داشته و به کمک آن می‌توان خواص مطلوبی از قبیل پیشگیری از گرفتگی هیدروفیل و هیدروفوب، میکروب‌کشی و دفع یون‌ها را در آن‌ها ایجاد نمود(Kar et al., 2012). رشد میکرواورگانیزم‌ها بر سطح غشاء که گرفتگی بیولوژیکی نامیده می‌شود، باعث ایجاد یک‌لایهٔ ساکن در مجاورت غشاء شده و درنتیجه افزایش پلاریزاسیون غلظت را در پی دارد. برای جلوگیری از عبور یون‌ها، لازم است قطر نانولوله از ۰/۷ نانومتر کمتر باشد که دستیابی به آن با فنّاوری‌های فعلی مشکل است. به‌هرحال در صورت دخالت نیروهای الکترواستاتیک، می‌توان از نانولوله‌های با قطر بزرگ‌تر استفاده کرد.

اگر جهت استقرار نانولوله‌ها در غشاء بجای عمود بر سطح بودن، به‌صورت تصادفی باشد، ضریب جداسازی به بیش از ۹۹٪ افزایش می‌یابد(Ahn et al., 2012). درهرصورت ضریب تراوش غشاهای دارای نانولوله‌های تصادفی تنها ۱/۵ برابر غشاهای مرسوم اسمز معکوس است درحالی‌که در مورد غشاهای با نانولوله‌های موازی ۵ برابر است (Ratto et al., 2011). در این خصوص، مقادیر بزرگ‌تری نیز گزارش‌شده‌اند(Choi et al., 2006). در حال حاضر ساخت غشاهای حاوی بیش از ۱۰۱۲ نانولوله در هر سانتیمتر مربع که همگی در راستای عمود بر سطح غشاء قرارگرفته و پس از ساخت دهانه تمام آن‌ها گشوده شده و در صورت نیاز گروه‌های عاملی بر دهانه آن‌ها نصب گردیده باشند، یک چالش فنی است(Kar et al., 2012 ؛Ahn et al., 2012).

نوآوری‌هایی در این رابطه انجام‌گرفته و بر مبنای ثبت اختراع-های انجام‌شده، روش‌هایی برای ساخت غشاهای حاوی نانولوله-های کربنی توسعه‌یافته‌اند که مشابه روش‌های ساخت غشاهای مرسوم هستند. به‌هرحال قیمت تمام‌شده غشاهای مورد بحث بیشتر است و می‌تواند مزیت اقتصادی آن‌ها را زیر سؤال ببرد (Lee et al., 2011).

استفاده از غشاهای مبتنی بر پروتئین‌های انتقال آب

اولین غشاهای اسمز معکوس نزدیک ۵۰ سال قبل از جنس استان سلولز ساخته شدند. ساختار غشاهای سنتزی به‌طور مداوم بهبودیافته به‌طوری‌که مصرف انرژی غشاهای کنونی برای نمک‌زدایی آب دریا کمتر از ۲۰٪ انرژی مصرفی غشاهای اولیه است. به‌هرحال این انرژی هم‌اکنون نیز دو برابر حداقل میزان تئوری است (Tang et al., 2013). در سال ۲۰۰۶ ایده الگو گرفتن از ساختار غشاهای بیولوژیکی برای تولید غشاهای صنعتی پیشنهاد گردید (Bowen, 2006) و در سال بعد استفاده از آکواپوری[3] در ساخت یک غشاء بیولوژیکی و افزایش ۸۰۰ برابری تراوش پذیری ناشی از آن، گزارش شد (Elimelech and Phillip, 2011).

آکواپورین‌ها پروتئین‌های ایجادکننده حفره در سلول‌های زنده هستند که در غلظت‌های مناسب، منافذی پدید می‌آورند که تنها آب قادر به عبور از آن‌ها بوده و یون‌ها را پس می‌زنند. وزن مولکولی آن‌ها بین ۲۴ تا ۳۰ کیلو دالتون است و یکی از آن‌ها برای اولین بار از غشای گلبول‌های قرمز جدا شد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی، هر مولکول آکواپورین در هر ثانیه قادر به عبور دادن ۱۰۸ الی ۱۰۹ مولکول آب می‌باشد که حداقل ده برابر سرعت عبور یون‌ها از کانال‌های بیولوژیکی است(Jensen and Mouritsen, 2006).

بررسی‌های انجام‌گرفته نشان داده که ضریب تراوش آب از غشاهای وزیکول حاوی آکواپورین حدود ۱۶۷ میکرومتر بر ثانیه بر اتمسفر است که این ضریب برای غشاهای تجاری اسمز معکوس و اسمز مستقیم به ترتیب حدود ۲ و ۰/۲ است(Kumar et al., 2007). این ارقام نشان می‌دهند که در صورت به‌کارگیری غشاهای حاوی آکواپورین، بهبود قابل‌توجه در فرایند نمک‌زدایی به روش‌های اسمزی به وقوع خواهد پیوست. تاکنون آکواپورین‌های

[3] Aquaporin

نوترکیب تنها در مقیاس آزمایشگاهی تولیدشده‌اند. کوشش‌های زیادی برای تولید اقتصادی این پروتئین‌ها در جریان بوده و به‌موازات این امر، جنبه‌های مختلف ساخت غشاهای تجاری حاوی آکواپورین در دست پژوهش است و تجاری شدن استفاده از این غشاها به‌ویژه برای اسمز مستقیم که به غشاهای مقاوم به فشار نیاز ندارد، در آینده نزدیک امکان‌پذیر به نظر می‌رسد. غشاهای اولیه‌ای که ساخته می‌شوند، ترکیبی از غشاهای پلیمری معمولی و آکواپورین‌ها بوده و بنابراین ضریب تراوش آن‌ها به نسبت آکواپورین در غشاء، بستگی خواهد داشت. برای نزدیک شدن به ضریب تراوش ذاتی وزیکول‌ها به تکنیک‌های ویژه‌ای نیاز خواهد بود که زمان بیشتری برای توسعه آن‌ها لازم است(Tang et al., 2013). هزینهٔ زیاد تولید و پایداری کم این غشاها، از نکات منفی است که باید برطرف گردند (Lee et al., 2011).

نمک‌زدایی با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی

سوخت‌های فسیلی منابع پایداری برای تأمین انرژی نبوده و به‌تدریج در حال اتمام هستند درصورتی‌که نمک‌زدایی یک فرایند دائمی خواهد بود؛ بنابراین به‌موازات جستجو برای راه‌های کاهش مصرف انرژی، قسمتی از پژوهش‌ها بر جایگزینی انرژی‌های تجدید پذیر بجای سوخت‌های فسیلی در فرایندهای نمک‌زدایی متمرکز گردیده‌اند(Ahmad and Schmid, 2001; Chaibi, 2003; Chaibi and Jilar, 2005; Lindblom, 2005; Qiblawey and Banat, 2008; Al-Karaghouli et al., 2009). از میان انواع انرژی‌های تجدید پذیر، سوخت‌های بیولوژیک کمترین شانس را برای استفاده در نمک‌زدایی آب برای مصارف کشاورزی دارند زیرا اولویت کشاورزی در مناطقی که نیازمند آب نمک‌زدایی شده برای این منظور هستند، تولید غذا بوده و نمی‌توانند محصولات تولیدشده را به سوخت‌های بیولوژیک تبدیل کنند. از طرف دیگر در این مناطق که در کمربند خشک جهان قرار دارند، تعداد روزهای آفتابی سال فراوان بوده و شدت تابش نور خورشید نیز زیاد است؛ بنابراین مناسب‌ترین انرژی تجدید پذیر برای نمک‌زدایی آب در این مناطق، انرژی خورشیدی است که پاک، بی‌خطر برای محیط‌زیست، فراوان، پایان‌ناپذیر و رایگان بوده و هزینه‌های استحصال آن در سال‌های اخیر به‌سرعت کاهش‌یافته است به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۶۰، یک‌سوم از کل الکتریسیته جهان از انرژی خورشیدی تأمین گردد(Philibert, 2011).

خوشبختانه در سال‌های اخیر، پژوهشگران در سراسر جهان به‌ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا در رابطه با نمک‌زدایی آب با استفاده از انرژی خورشیدی پژوهش‌های زیادی انجام داده‌اند(Shatat et al., 2013). استفاده از انرژی خورشیدی برای نمک‌زدایی از زمان‌های قدیم و به‌ویژه پس از تولید تجاری شیشه مسطح وجود داشته است. ساده‌ترین واحدهای نمک‌زدایی خورشیدی، گلخانه‌های تقطیری هستند که یکی از نخستین نمونه از آن‌ها در سال ۱۸۷۲ در مساحت ۴۵۰۰ مترمربع در شیلی راه‌اندازی شد و به مدت ۴۰ سال با ظرفیت ۲۰ مترمکعب در روز بکار خود ادامه داد. مهم‌ترین مشکل این واحدها نیازمند بودن به سطح و سرمایهٔ اولیهٔ زیاد و آسیب‌پذیری در مقابل باد است. تا سال ۲۰۰۴ تعداد صد واحد کوچک نمک‌زدایی با ظرفیت کمتر از ۵۰ مترمکعب در روز و با استفاده از انرژی خورشید و یا باد، ساخته‌شده‌اند. دو واحد بزرگ به ترتیب به ظرفیت ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ مترمکعب در روز از سال ۱۹۹۲ در لیبی شروع بکار کرده‌اند که اولی از انرژی فتوولتائیک و دومی از انرژی باد برای نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور به روش اسمز معکوس، استفاده می‌کرد.

به دلیل هزینه زیادتر و نبود منع قانونی برای استفاده از سوخت‌های فسیلی، هنوز در مقیاس بزرگ انرژی‌های تجدید پذیر جایگزین سوخت‌های فسیلی نشده‌اند و اغلب مطالعات انجام‌شده برای نمک‌زدایی به کمک انرژی خورشیدی باهدف طراحی واحدهای کوچک برای مناطق دورافتاده انجام‌گرفته است ولی نتایج حاصل برای واحدهای بزرگ‌تر نیز می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. مهم‌ترین چالش‌ها در این رابطه، بهره‌وری کم، راندمان حرارتی کم و نیز سطح زیاد موردنیاز است. از طرف دیگر مزیت بزرگ نور خورشید رایگان بودن آن است(Qiblawey and Banat, 2008).

انرژی خورشیدی را می‌توان به‌وسیله سلول‌های فتوولتائیک به الکتریسیته تبدیل کرده و در اسمز معکوس مصرف کرد. اولین واحد بزرگ از این نوع با ظرفیت روزانه ۳۰۰۰۰ مترمکعب در روز قرار است در آینده نزدیک در عربستان سعودی نصب گردد(Shatat et al., 2013). تولید الکتریسیته از انرژی خورشیدی به روش حرارتی برخلاف سلول‌های فتوولتائیک، با افزایش ظرفیت واحد، ارزان‌تر می‌شود و نیازی به سرمایه‌گذاری برای ذخیره الکتریسیته ندارد (Philibert, 2011).

انرژی خورشیدی را می‌توان با کمک کلکتورهای مختلف جمع‌آوری نمود و حرارت حاصل را در اسمز مستقیم و نیز روش‌های نمک‌زدایی حرارتی که مبتنی بر تقطیر آب عمل می‌کنند، مورداستفاده قرارداد. برای حالت اخیر، انواع طرح‌ها و ساختارهای فیزیکی ارائه‌شده‌اند. در ساده‌ترین ساختار جمع‌آوری انرژی خورشیدی و نمک‌زدایی به‌صورت توأم در یک دستگاه شامل یک

ظرف آب‌شور که با یک ماده شفاف پوشانده شده انجام می‌گیرد. به دلیل بازده کمتر از ۴ لیتر بر مترمربع بر روز، این روش تنها برای تولید مقادیر کم آب شیرین دارای توجیه است(Shatat et al., 2013).

در سایر روش‌ها، کلکتور و واحد نمک‌زدایی از یکدیگر مجزا هستند. یکی از این ساختارها تلفیق گلخانه و سامانهٔ نمک‌زدایی است که در آن انرژی حرارتی به دام افتاده در گلخانه برای نمک‌زدایی آب‌شور مورداستفاده قرارگرفته و آب نمک‌زدایی شدهٔ حاصل، در گلخانه مصرف می‌شود(Qiblawey and Banat, 2008). این درواقع یکی از نمونه‌های استفاده از آب حاصل از نمک‌زدایی برای کشاورزی است. در حال حاضر تلفیق سلول‌های فتوولتائیک و اسمز معکوس ۴۰ درصد از واحدهای نمک‌زدایی به کمک انرژی خورشیدی را به خود اختصاص داده است و بقیه مربوط به روش‌های حرارتی است(Shatat et al., 2013).

باوجود مزیت‌های نسبی انرژی خورشیدی، هزینه‌های استفاده از این انرژی زیاد بوده و در حال حاضر قابلیت رقابت با سوخت‌های فسیلی را ندارد. بر اساس برآورد انجام‌گرفته در سال ۲۰۰۸، هزینه تولید آب شیرین با کمک سوخت‌های فسیلی کمتر از یک دلار در هر مترمکعب بوده و در مورد انرژی‌های خورشیدی بیش از ۵ دلار بر مترمکعب بوده است(Karagiannis and Soldatos, 2008). به‌هرحال سوخت‌های فسیلی باگذشت زمان کمیاب‌تر و گران‌تر خواهند شد درحالی‌که هزینه‌های استحصال انرژی خورشیدی با توجه به روند تحقیقات و توسعه در رابطه با جنبه‌های مختلف کاربرد آن، به‌سرعت در حال کاهش است(Banat and Jwaied, 2008).

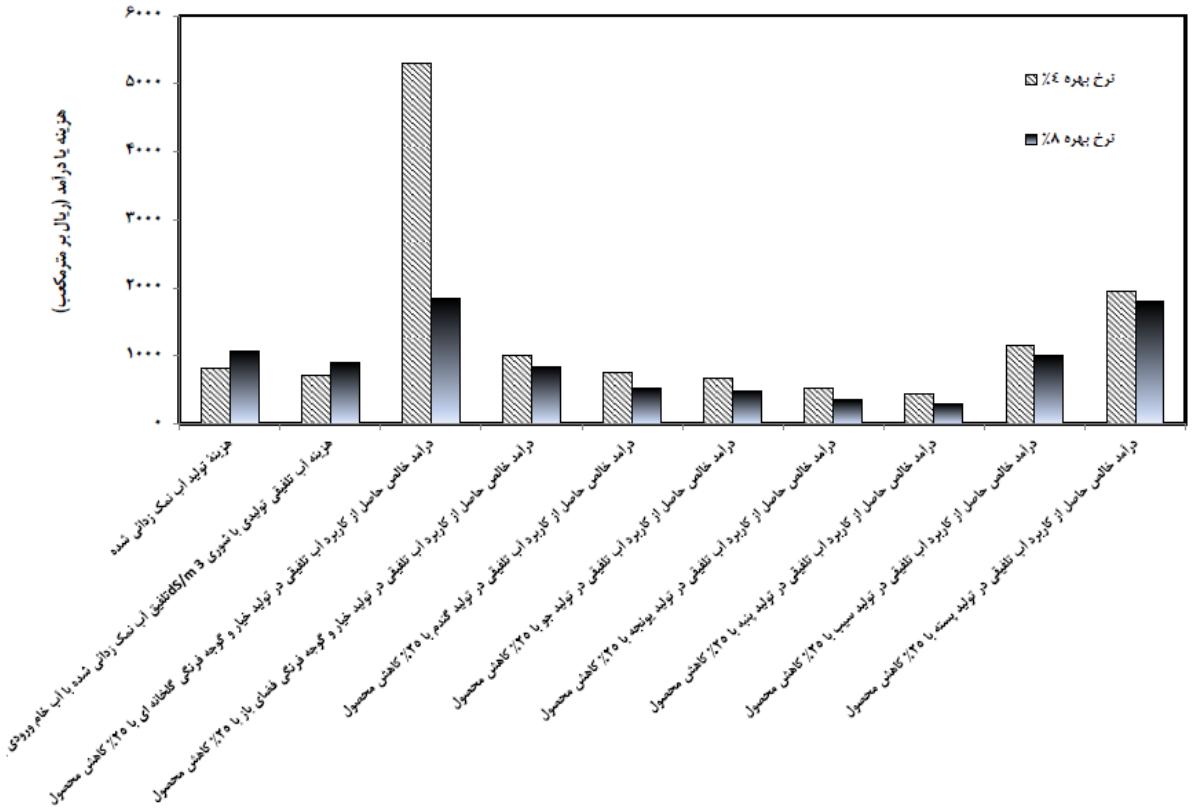
نمک‌زدایی برای مصارف کشاورزی

برای تولید محصولات کشاورزی، نه‌تنها نیازی به کیفیت آب آبیاری در حد کیفیت آب شرب نیست، بلکه چنین آبی می‌تواند باعث تخریب ساختمان خاک نیز بشود، زیرا بسیاری از نمک‌های محلول در خاک را حل کرده و ساختمان خاک را تخریب می‌نماید. ازاین‌رو می‌توان آب خروجی از دستگاه نمک‌زدایی را با نسبت‌های متفاوت با آب خام ورودی به دستگاه تلفیق کرده و آبی باکیفیت متناسب با نوع کشت به دست آورد. این امر می‌تواند باعث کاهش چشم‌گیر در هزینه تولید آب شیرین به‌منظور کشاورزی در مقایسه با هزینه تولید آب شیرین برای شرب گردد(Al-Salaymeh and Zurigat, 2006).

در مطالعه‌ای موردی که توسط شرکت مهندسی مشاور طوس آب برای استان خراسان جنوبی در سال ۱۳۸۸ انجام گرفت، با استعلام هزینه‌های مربوط به پمپاژ آب از یک چاه با عمق ۵۰ متر، هزینه‌های خرید، نصب و راه‌اندازی یک دستگاه نمک‌زدایی، هزینه-های تولید و فروش محصولات زراعی، باغی و گلخانه‌ای منطقه، هزینهٔ آب نمک‌زدایی شده برای مصارف کشاورزی محاسبه شد(تقدیسی حیدریان و رشید زاده، ۱۳۸۹). خلاصهٔ ویژگی‌های فنی سامانهٔ نمک‌زدایی به‌کاررفته در این مطالعه، در جدول ۷ ارائه‌شده‌اند. همچنین هزینه‌های مربوط به نمک‌زدایی آب‌شور در حالت‌های مختلف و نیز درآمد خالص حاصل از تولید انواع محصولات کشاورزی با آب نمک‌زدایی شده، در شکل ۳ مقایسه شده‌اند.

جدول ۷- مشخصات دستگاه نمک‌زدایی آب بررسی‌شده در استان خراسان جنوبی

ویژگی‌های فنی سامانهٔ نمک‌زدایی	
نوع دستگاه	RO - 1296
ظرفیت نمک‌زدایی آب	۱۵ Lit/s
کیفیت آب ورودی	۱۵ dS/m
کیفیت آب خروجی	۰/۴ dS/m
کیفیت پساب	۳۰ dS/m
میزان مصرف انرژی	۰/۴۶۳ kwh/m^3
راندمان کارکرد سامانه	٪۵۰



شکل ۳- هزینه‌های مربوط به نمک‌زدایی آب‌شور و درآمد خالص تولید انواع محصولات کشاورزی با آب نمک‌زدایی شده

همان‌گونه که از شکل ۳ ملاحظه می‌شود، استفاده از دستگاه نمک‌زدایی آب مذکور در اولویت اول و با توجه به میزان درآمد به ازای واحد حجم آب مصرفی محصولات گلخانه‌ای با عنایت به حجم کمتر مصرف آب در این واحدها، به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است. بعد از محصولات گلخانه‌ای، استفاده از این دستگاه‌ها برای تأمین آب باکیفیت مناسب جهت باغات پسته که دارای ارزش‌افزودهٔ بالائی هستند نیز تا حدودی صرفهٔ اقتصادی دارد. همچنین استفاده از آب تلفیقی به‌دست‌آمده در تولید خیار و گوجه‌فرنگی در فضای باز و نیز سیب‌درختی ازنظر توجیه اقتصادی، سربه‌سر است. لیکن، این رویکرد برای سایر محصولات زراعی چندان اقتصادی به نظر نمی‌رسد. لازم به توضیح است که کاربرد این روش برای برخی مناطق کشور که دارای منابع آب‌شور و سطح سفره آب بالائی هستند (نظیر طبس) و یا سواحل جنوبی ایران، می‌تواند به‌عنوان یک طرح پژوهشی مفید موردتوجه قرار گیرد به‌ویژه در شرایطی که امکان استفاده از انرژی خورشیدی در این مناطق برای کارکرد دستگاه‌های نمک‌زدایی آب، موردتوجه قرار گیرد. ازجمله مسائل قابل‌توجه در استفاده از این دستگاه‌ها، پساب حاصله از آن‌ها است که می‌بایست به لحاظ مسائل محیط‌زیستی موردتوجه جدی قرارگرفته و راهکاری مناسب و عملی از طرف محققان برای دفع آن‌ها بررسی و پیشنهاد شوند (حسن اقلی و زارعی، ۱۳۹۳).

نتیجه‌گیری

تأثیر کم‌آبی بر جنبه‌های مختلف زندگی در بسیاری از کشورها ازجمله کشور ما، در حال افزایش بوده و دستیابی به منابع پایدار آب ضرورت تام دارد. برای کشور ما به دلیل دارا بودن سواحل طولانی و منابع تجدید ناپذیر انرژی، نمک‌زدایی آب دریا یک منبع پایدار به نظر می‌رسد. استفاده از این روش در حال حاضر برای تولید آب مورداستفاده در شرب و صنعت مقرون‌به‌صرفه گردیده است. پژوهش‌های در حال انجام، کاهش بیشتر در هزینه‌ها و توجیه‌پذیر شدن تدریجی این روش برای تأمین آب مورد مصرف در تولید برخی از محصولات کشاورزی دارای ارزش‌افزودهٔ بالا ازجمله محصولات گلخانه‌ای را نوید می‌دهد.

مراجع

تردست، ع.، و موسوی، م. ۱۳۹۰. مدیریت جامع منابع آب در نواحی خشک و کم آب کشور (مطالعه موردی: دشت جنوب غرب تهران). چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۱۴-۱۳ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

تقدیسی حیدریان، س.ر.، و رشید زاده، ف. ۱۳۸۹. بررسی اقتصادی شوری‌زدایی آب کشاورزی با استفاده از دستگاه‌های آب شیرین‌کن با تأکید بر حوضه آبریز کشف‌رود. مجله آب و محیط‌زیست، ۷۷: ۲۹-۳۴.

حسن اقلی، ع.ر.، و زارعی، ق. ۱۳۹۳. بررسی روش‌های کاربردی دفع پساب حاصل از دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن مورداستفاده در کشت‌های گلخانه‌ای. گزارش پژوهشی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، شماره ۸۷/۶۵۸.

خاشعی سیوکی، ع.، والیزاده اردلان، ر.، و شجاعی سیوکی، ح. ۱۳۹۱. راهکارهای مدیریتی دفع پسماند شور ناشی از صنعت شیرین‌سازی آب در کشاورزی (منطقه موردمطالعه: بجستان). مجموعه مقالات سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، ۲۱-۲۰ شهریور، ساری.

رفیعی‌راد، س.، و عرب، د. ۱۳۸۸. نیازهای انرژی، منابع و مصرف انرژی برای شیرین کردن آب. سومین همایش ملی آب و فاضلاب.

زارعی، ق.، و جعفری، ع.م. ۱۳۹۵. نقش واردات و صادرات محصولات مهم زراعی و باغی در تجارت مجازی آب و ردپای آب در کشاورزی ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵

.زارعی، ق.، حسن‌اقلی، ع.ر.، و یارقلی، ب. ۱۳۹۱. آب شیرین‌کن‌ها و چشم‌انداز استفاده از آن‌ها در بخش کشاورزی. گزارش فنی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۲۳ صفحه.

قاسمی، س.ع.، و دانش، ش. ۱۳۹۱. کاربرد روش تحلیل سلسه مراتبی در تعیین گزینه بهینه نمک‌زدایی از آب‌های لب‌شور. نشریه آب‌وخاک(علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۴):۱۰۰۹-۹۹۹.

قنادی، م. ۱۳۸۴. آب‌شیرین‌کن‌های شهری و روستایی ایران و کیفیت آب استحصال‌شدهٔ آن‌ها. نشریه آب و محیط‌زیست، شماره ۶۴.

مساح، ع.ر.، و مرید، س. ۱۳۸۴. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید محصولات کشاورزی(مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود اصفهان)، مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱(۱):۴۷-۴۰.

میرباقری، س.ا.، و شمس، ا. ۱۳۸۷. امکان‌سنجی استفاده از فناوری اسمز معکوس در تصفیه آب‌های لب‌شور جهت تأمین آب شرب شهری در کشور. چهارمین کنگره مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۸۷.

Ahmad, G.E., and Schmid, J. 2001. Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems. ISES 2001 Solar World Congress, 1031-1038.

Ahn, C.H., Baek, Y., Lee, C., Kim, S.O., Kim, S., Lee, S., Kim, S.H., Bae, S.S., Park, J., and Yoon, J. 2012. Carbon nanotube-based membranes: Fabrication and application to desalination. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 18(5): 1551-1559.

Al-Karaghouli, A., Renne, D., and Kazmerski, L.L. 2009. Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13:2397-2407.

Alkhudhiri, A., Darwish, N., and Hilal, N. 2012. Membrane distillation: A comprehensive review. Desalination, 287:2-18.

Al-Salaymeh, A., and Zurigat, Y. 2006. A Comprehensive Study of Greenhouse for Agriculture and Water Desalination for Jordan Valley and Red-Dead Sea Region. The 2nd International Conf. on Water Resources & Arid Environment.

Banat, F., and Jwaied, N. 2008. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. Desalination, 220: 566-573.

Bowen, W.R. 2006. Biomimetic separations – learning from the early development of biological membranes. Desalination, 199(1-3): 225-227.

Cai, Y., Shen, W., Loo, S.L., Krantz, W.B., Wang, R., Fane, A.G., and Hu, X. 2013. Towards temperature driven forward osmosis desalination using Semi-IPN hydrogels as reversible draw agents. Water research, 47(11): 3773-3781.

Carbon-Trust 2011. Greenhouse gas conversions.<http://www.carbontrust.com/media/18223/ctl153_conversion_factors.pdf>.

Cath, T.Y., Childress, A.E., Elimelech, M. 2006. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. Journal of Membrane Science, 281:70-87.

Chaibi, M.T. 2003. Greenhouse systems with integrated water desalination for arid areas based on solar energy. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, pp 50.

Chaibi, M.T., and Jilar, T. 2005. Effects of a solar desalination module integrated in a greenhouse roof on light transmission and crop growth. Biosystems Engineering, 90(3): 319-330.

Chekli, L., Phuntsho, S., Shon, H.K., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., and Chanan, A. 2012. A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications. Desalination and Water Treatment, 43(1-3): 167-184.

Choi, J., Kim, H., Lee, S., Hwang, T., Oh, H., Yang, D.R., and Kim, J.H. 2010. Theoretical investigation of hybrid desalination system combining reverse osmosis and forward osmosis. Desalination and Water Treatment, 15(1-3):114-120.

Choi, J.H., Jegal J., and Kim, W.N. 2006. Fabrication and characterization of multi-walled carbon nanotubes/polymer blend membranes. Journal of Membrane Science, 284(1):406-415.

Choi, Y.J., Choi, J.S., Oh, H.J., Lee, S., Yang, D.R., and Kim, J.H. 2009. Toward a combined system of forward osmosis and reverse osmosis for seawater desalination. Desalination, 249:239-247.

Chung, S.O., Rodriguez, J.A., Weathehead, E.K., and Knox, J.W. 2011. Climate change impact on water for irrigating paddy rice in South Korea. Irrigation and Drainage, 60: 263-273.

Cooley, H., Gleick, P.H., and Wolff, G. 2006. Desalination, with a grain of salt-a California perspective, Pacific institute for studies in development, environment, and security, Hyward, CA.

Dawoud, M.A., and Mulla, M.A. 2012. Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf Case Study. International journal of environment and sustainability, 1(3):22-37.

De Silva, C.S., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., and Rodriguez-Diaz, J.A. 2007. Predicting the impacts of climate change-A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. Agricultural Water Management, 93:19-29.

El Naas, M.H., Al Marzouqi, A.H., and Chaalal, O. 2010. A combined approach for the management of desalination reject brine and capture of CO_2. Desalination, 241:70-74.

El-Bourawi, M., Ding, Z., Ma, R., and Khayet, M. 2006. A framework for better understanding membrane distillation separation process. Journal of Membrane Science, 285(1):4-29.

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

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: 2317-2348.

Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water resources management, 21(1):35-48.

Hopfner, j., Kelin, C., and Wilhelm, M. 2010. A novel approach for the desalination of seawater by means of reusable Poly(Acrylic Acid) Hydrogels and mechanical force. Macromolecular Rapid Communications, 31(15):1337-1342.

Jensen, M., and Mouritsen, O.G. 2006. Single-channel water permeabilities of Escherichia coli Aquaporins AqpZ and GlpF. Biophysical journal, 90(7):2270-2284.

Kar, S., Bindal, R., and Tewari, P. 2012. Carbon nanotube membranes for desalination and water purification: Challenges and opportunities. Nano Today, 7(5):385-389.

Karagiannis, I.C., and Soldatos, P.G. 2008. Water desalination cost literature: review and assessment. Desalination, 223(1):448-456.

Kesieme, U.K., Milne, N., Aral, H., Cheng, C.Y., and Duke, M. 2013. Economic analysis of desalination technologies in the context of carbon pricing, and opportunities for membrane distillation. Desalination, 323:66-74.

Kumar, M., Grzelakowski, M., Zilles, J., Clark M., and Meier, W. 2007. Highly permeable polymeric membranes based on the incorporation of the functional water channel protein Aquaporin Z. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(52):20719-20724.

Lattemann, S., and Hopner, T. 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. Desalination, 220:1-15.

Lawson, K.W., and Lloyd, D.R. 1997. Membrane distillation. Journal of Membrane Science, 124(1):1-25.

Lee, K.P., Arnot T.C., and Mattia, D. 2011. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-development to date and future potential. Journal of Membrane Science, 370(1):1-22.

Li, D., Zhang, X., Yao, J., Simon, G. P., & Wang, H. 2011a. Stimuli-responsive polymer

hydrogels as a new class of draw agent for forward osmosis desalination. Chemical Communications, 47(6):1710-1712.

Li, D., Zhang, V., Yao, J., Simon, G.P., and Wang, H. 2011b. Composite polymer hydrogels as draw agents in forward osmosis and solar dewatering. Soft Matter, 7:10048-10056.

Li, D., Zhang, X., Simon, G.P. and Wang, H. 2013. Forward osmosis desalination using polymer hydrogels as a draw agent: influence of draw agent, feed solution and membrane on process performance. Water research, 47(1):209-215.

Lindblom, J. 2005. Solar thermal technologies for seawater desalination: State of the art. Renewable Energy Systems, Lulea University of Technology, Sweden. pp 17.

Majumder, M., Chopra, N., Andrews, R., and Hinds, B.J. 2005. Nanoscale hydrodynamics: Enhanced flow in carbon nanotubes. Nature, 438:44-44.

McCutcheon, J.R., McGinnis R.L., and Elimelech, M. 2005. A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. Desalination, 74:1-11.

McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., and Elimelech, M. 2006. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. Journal of Membrane Science, 278(1):114-123.

McGinnis, R.L., and Elimelech, M. 2007. Energy requirements of ammonia–carbon dioxide forward osmosis desalination. Desalination, 207:370-382.

Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. 2010. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water, University of Twente, Enshede, 42 page.

Mizyed, N. 2008. Impacts of climate change on water resources availability and agricultural water demand in the West Bank. Water Resources Management, 23(10):2015-2029.

Oasys, B. 2012. Produced water case studies in the Marcellus Shale and Permian Basin. <http://oasyswater.com/case-study>.

Pangarkar, B.L., Sane M.G., and Guddad, M. 2011. Reverse osmosis and membrane distillation for desalination of groundwater: A review. ISRN Materials Science, 2011.

Philibert, C. 2011. Solar energy perspectives. Internaltional Energy Agancy Paris, 234page.

Phuntsho, S., Shon, H.K., Majeed, T., El Saliby, I., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Hong, S., and Lee, S. 2012. Blended fertilizers as draw solutions for fertilizer-drawn forward osmosis desalination. Environmental science & technology, 46(8):4567-4575.

Qiblawey, H.M., and Banat, F. 2008. Solar thermal desalination technologies. Desalination, 220(1):633-644.

Qin, J., Lay, W.C.L., and Kekre, K.A. 2012. Recent developments and future challenges of forward osmosis for desalination: A review. Desalination and Water Treatment, 39(1-3):123-136.

Ratto, T.V., Holt J.K., and Szmodis, A.W. 2011. Membranes with embedded nanotubes for selective permeability. United States patent US 7,993,524. 2011 Aug 9.

Salarian, M. 2012. Water resources in Iran. <http://www.parsiab.com/modules.php?name=News&file=article-seo&sid=5>. (Apr.16, 2013).

Shaffer, D.L., Yip, N.Y., Gilron, J., and Elimelech, M. 2012. Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: Improved product water quality for potentially less energy. Journal of Membrane Science, 415-416:1-8.

Shannon, M.A., Bohn, P.W., Elimelech, M., Georgiadis, J.G., Marinas, B.J., and Mayes, A.M. 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. Nature, 452(7185):301-310.

Shatat, M., Worall, M., and Riffat, S. 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. Sustainable Cities and Society, 9:67-80.

Sobhani, R., Abahusayn, M., Gabelich, C.J., and Rosso, D. 2012. Energy footprint analysis of brackish groundwater desalination with zero liquid discharge in inland areas of the Arabian Peninsula. Desalination, 291:106-116.

Spanish Desalination and Water Reuse Association (AEDYR). 2008. Spanish Innovation contributes to Advancing Desalination to Bring Sustainable Clean Water to Millions. Madrid, Spain.

Tang, C., Zhao, Y., Wang, R., Hélix-Nielsen, C., and Fane, A. 2013. Desalination by biomimetic aquaporin membranes: Review of status and prospects. Desalination, 308:34-40.

United Nations 2012. World population prospects: The 2012 revision. http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm.

Veza, J.M. 2004. Water desalination and waste water reuse for agriculture in Spain. Proc., FAO Expert Consultation on Water Desalination for Agricultural Applications, FAO, Rome, Italy.

Water Management in Agriculture
Vol. 3, No. 2, Autumn and Winter 2016, 23-38

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۳، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، ص. ۳۸-۲۳

Prospects of Water Desalination for Agricultural Use

Gh. Zarei [1*] and M. Khanahmadi [2]

Abstract

Population growth along with climate change will cause the water scarcity to become the main bottleneck of sustainable agriculture in the world. So as a rough estimation, by 2030 nearly 40 billion cubic meters more water is needed annually in our country. Saline groundwater and seawater are abundant and reliable water resources which need to be desalinated for use in most agricultural activities. Cultivation of most agricultural products is currently not feasible with desalinated seawater due to high energy and capital costs. Current seawater desalination energy consumption rate is 5 kwh/m^3 which stand far above minimum theoretical limit namely 1 kwh/m^3. Application of desalinated water in greenhouses cultivation is being investigated. Various routes which are being investigated to reduce the costs are dealt in this paper: Innovative nanotechnology and biotechnology methods are under development for abatement of energy loss in reverse osmosis membranes. Membranes containing carbon nanotubes or proteins extracted from salinity tolerant plants are fabricated in this regard. Appropriate combination of reversed osmosis (RO) with forward osmosis (FO) is under investigation. At the same time, design of desalination plants is improved to enhance energy recovery. Utilization of solar energy in desalination is also emerging.

Keywords: desalination, seawater, agriculture, energy, cost, crop production.

[1] Associate Professor of Agricaltural Engineering Research Institute, Agricaltural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. (*Corresponding author: Email: g.zarei@aeri.ir)
[2] Associate Professor of Agriculture Biotechnology Research Institute of Iran, Agricaltural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. Email: khanahmadi@yahoo.com
Received: Oct 27, 2016
Accepted: Jan 29, 2016