شرکت مهندسی توسعه آب آسیا
ASIA WATER

وضعیت جهانی نمک‌زدایی

ارزیابی فناوری‌ها، نیروگاه‌ها و ظرفیت سایت های نمک‌زدایی کنونی

نویسندگان

Joyner Eke[a], Ahmed Yusuf[b], Adewale Giwa[b], Ahmed Sodiq[c]

a Department of Chemical and Materials Engineering, University of Kentucky, 177 F Paul Anderson Tower Lexington, KY 40506, United States
b Department of Chemical Engineering, Khalifa University of Science and Technology, P.O. Box 127788, Abu Dhabi, United Arab Emirates
c College of Science and Engineering, Hamad Bin Khalifa University, Doha, Qatar

ترجمه: دکتر رضا شاهی فر

بهار 1403

خلاصه

مقاله حاضر با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های مربوط به سایت های نمک‌زدایی فعلی، در بیش از شش دهه (از دهه 1960 تا سال 2020)، مطابق با نیازهای احتمالی آتی بشر، ارزیابی مناسبی را از گسترش جهانی نمک‌زدایی، فناوری‌های مورد استفاده و شاخص‌های اقتصادی آن، ارائه داده است. ظرفیت آب شیرین کن های نصب شده در جهان از سال 2010 تا پایان سال 2019 به طور پیوسته با نرخ حدود 7٪ در سال افزایش یافته است. اگرچه تعداد واحدهای شیرین سازی با ظرفیت بسیار بالا کم می باشند، اما این مراکز بیشترین میزان نمک زدائی را در جهان به خود اختصاص می دهند. در حالی که در گذشته نمک‌زدایی در مناطقی از جمله اروپا و آفریقا مشاهده نمی شد اما در حال حاضر شاهد افزایش قابل توجهی در توسعه نمک‌زدایی در این مناطق هستیم. از طرفی همچنان بیشترین ظرفیت و بزرگترین مالکین صنعت تولید برق، صنایع مختلف هستند و همچنان فیلتراسیون و شناورسازی با هوای محلول مهمترین روش های پیش تصفیه باقی مانده اند. حدود 57٪ از آب مورد نیاز جهت تغذیه و تامین آب مورد نیاز آب شیرین کن ها، از آب دریا تامین میگردد که قراردادهای ساخت آنها در71/7٪ از موارد با استفاده از مدل اقتصادیEPC یا روش مهندسی، تهیه و ساخت، صورت گرفته است. بررسی حاضر نشان می دهد که در واحدهای آب شیرین کن، هزینه سرمایه گذاری برای ایجاد زیر ساخت ها، سهم بیشتری در مقایسه با هزینه تولید آب دارد. داشتن درک صحیحی از روند کنونی، امکان انتخاب آگاهانه تری را برای انجام پروژه ها و تحقیقات مرتبط با نمک زدایی فراهم خواهد نمود.

1-مقدمه

از آنجایی که آب شیرین به ویژه در مناطق آسیب‌پذیر و یا دارای تنش آبی جهان، در حال حرکت به بخش‌های غیرقابل دسترس در سفره‌های زیرزمینی است، تلاش‌های تحقیقاتی برای یافتن راه‌های جدید تأمین آب آشامیدنی کارآمد و مقرون به‌صرفه، از طریق فرایند نمک‌زدایی ادامه دارد. تا چند سال قبل، نمک زدایی آب دریا به مناطق بیابانی و مناطقی که منابع آب سطحی و زیرزمینی در آنجا کمیاب بود، محدود می شد. با این حال، چالش‌های تغییر اقلیم و فعالیت‌های دائمی انسانی، اغلب جوامع ساحلی یا نزدیک به ساحل را مجبور کرد که از نمک‌زدایی آب دریا به عنوان ابزاری برای تامین آب آشامیدنی استفاده نمایند. در دو دهه اخیر، پیشرفت‌های بزرگی در ساخت تجهیزات مربوط به بازیابی انرژی و فناوری غشائی صورت گرفته است که منجر به کاهش مصرف انرژی تا حد 50٪ در فرایند نمک‌زدایی آب دریا، گردیده است [1].

از سال 1928و با شروع به کار سایت های نمک‌زدایی در بسیاری از شهرهای تحت تنش آبی در جهان ، فناوری‌های مرتبط با نمک‌زدایی شاهد پیشرفت های شگرفی بوده است. در طول دوره ساخت اولین واحد نمک زدائی به روش چند مرحله ای یا MED (سال1930) تا ایجاد اولین واحد نمک زدائی با استفاده از روش MSF (سال1957) و اولین سایت نمک زدائی به روش اسمز معکوس RO (سال1965)، تحقیقات

زیادی در زمینه صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه ها و اثرات زیست محیطی به ویژه در فناوری روش اسمز معکوس، انجام شده است. همچنین با توجه به پیشرفتهای صورت گرفته در کاهش قیمت تمام شده نمک زدایی آب دریا، این فرآیند به عنوان یک روش جایگزین برای تامین آب شهری، جذاب تر شده است. به این دلیل ظرفیت و تعداد سایت های نمک‌زدایی در سطح جهان از سال 2010 با نرخ متوسط سالانه حدود 6/8 درصد افزایش یافته است، که معادل افزایش میانگین سالانه حدود 4/6 میلیون مترمکعب ظرفیت تولید در روز است. تنها از ژانویه 2019 تا فوریه 2020، تعداد کل سایت های آب شیرین کن جدید احداث شده در سراسر جهان 155 مورد بوده که موجب افزایش 5/2 میلیون مترمکعب ظرفیت تولید آب شیرین کن ها در شبانه روز گردیده است [2].

در اوایل جولای سال 2016، مجموع ظرفیت نمک‌زدایی در جهان، برای تولید آب شیرین به 95/6 میلیون متر مکعب در روز رسید که این میزان آب شیرین در 18983 سایت نمک زدائی در سراسر جهان تولید شد [3]. مجموع ظرفیت نمک زدایی با لحاظ نمودن ظرفیت سایت های احداث شده و در حال احداث تا پایان سال 2017 و با در نظر گرفتن سایت های ساخته شده از سال 1965، در سراسر جهان 99/8 میلیون متر مکعب در شبانه روز بود که ظرفیت عملیاتی این واحد ها حدود 93 درصد ظرفیت نصب برآورد شده است [4]. تا اواسط فوریه سال 2020، ظرفیت تولید واحد های شیرین سازی احداث شده در جهان 97/2 میلیون مترمکعب و مجموع ظرفیت واحد های احداث شده 114/9میلیون مترمکعب در شبانه روز بود که این میزان در 20971 سایت نمک زدائی تولید می شد[2].

فن آوری های رایج نمک زدایی در سطوح تجاری به دو دسته نمک زدایی غشایی، عمدتاً بصورت اسمز معکوس RO [5] و نمک زدایی حرارتی که عمدتاً بصورت MED [6] و MSF[7] است تقسیم می شوند. در این راستا فناوری های نوین نمک زدایی نیز وجود دارند که در مراحل تحقیق و توسعه هستند و عمدتا شامل تقطیر غشایی MD[8]، اسمز رو به جلو FO[9]، دیونیزاسیون خازنی CDI[10]، انجماد [11] ، رطوبت زدایی رطوبت HDH[12] و نمک زدایی مبتنی بر هیدرات گازی GH[13] می باشند. بعلاوه برخی از فناوری ها مرتبط با پشتیبانی و پیش تصفیه برای افزایش کارایی سیستم نمک‌زدایی از قبیل اولترافیلتراسیون UF[14]، نانوفیلتراسیون NF [15] و فیلتراسیون یونی IF[16] وجود دارند. جدا از فناوری‌های اصلی نمک‌زدایی، در حال حاضر ترکیبی از فناوری‌ها از جمله MSF-MED[17]، MED-adsorption[18] و RO-MSF[19] وجود دارند. امروزه محققین تلاش میکنند با ترکیب نقاط قوت فناوری های مختلف، نواقص فناوری های موجود را کاهش داده و موجب افزایش کارایی سیستم نمک‌زدایی شوند.

حذف نمک از آب دریا مقدار نسبتاً بالایی انرژی مصرف می کند. انرژی الکتریکی مورد نیاز در سیستم نمک‌زدایی غشایی برای غلبه بر فشار اسمزی طبیعی آب دریا و در سیستم حرارتی برای تبخیر یا فلش بخشی از آب دریا برای تقطیر مورد نیاز است. برای مثال، فناوری نمک‌زدایی RO، تقریباً 8 تا 10 برابر بیشتر از

فناوری تصفیه سنتی آب‌های سطحی (مانند دریاچه‌ها و رودخانه‌ها) انرژی نیاز دارد [1]. انرژی مورد نیاز در سیستم نمک زدایی حرارتی حتی بیشتر از انرژی مورد نیاز در روش RO است[4] . دلیل اصلی این اختلاف در مصرف انرژی توسط فناوری های مذکور، پیشرفت سریع فناوری غشایی و اسمز معکوس است. در حال حاضر استفاده از سیستم اسمز معکوس حدود 69 درصد از ظرفیت نمک‌زدایی نصب شده در جهان را به خود اختصاص می‌دهد و بیشتر سایت های در حال احداث و جدید با در نظر گرفتن فناوری‌های نمک‌زدایی غشایی طراحی و احداث می‌شوند. 14365 واحد نمک زدائی RO موجود وجود دارد که استفاده از روشهای MSF و MED به ترتیب 17 و 7 درصد از ظرفیت کنونی آب شیرین کن های نصب شده در سراسر جهان را به خود اختصاص می دهند. در همین حال، علیرغم منابع عظیم صرف شده در این زمینه، فعالیت های تحقیقاتی انجام شده و شهرت فناوری های غشایی برای نمک زدایی، انرژی مورد نیاز برای نمک زدایی آب دریا از طریق این تکنیک ها به ویژه اسمز معکوس همچنان متفاوت و حدود 1/5-4 کیلو وات ساعت بر متر مکعب (kWh/m3) است که این میزان مصرف بسته به میزان شوری آب مورد استفاده اولیه و سایر عوامل خارجی متغیر است [20]. این محدوده هنوز به طور قابل توجهی بالاتر از مصرف انرژی فن آوری های تصفیه آب های سطحی غیر شور است.

در مقایسه با روش های نمک زدایی حرارتی، مشکل اصلی در بکار گیری سیستم اسمز معکوس، رسوب مواد در ممبران ها است. رایج ترین مکانیسم های رسوب گیری مکانیسم های کلوئیدی و ذرات، آلی، معدنی و رسوب زیستی هستند. از این رو، مراحل پیش تصفیه برای به حداکثر رساندن کارایی RO و همچنین افزایش طول عمر ممبران ها ضروری است. اغلب اوقات، بر اساس کیفیت آب اولیه مورد تغذیه، ممکن است چندین مرحله پیش تصفیه مورد نیاز باشد. MSF و MED دو فن‌آوری نمک‌زدایی حرارتی در مقیاس بزرگ هستند که این روش ها تثبیت شده و به بلوغ خود رسیده اند. بر اساس عملکرد مصرف انرژی حرارتی که به طور گسترده ای پذیرفته شده است دو روش ارزیابی شامل نرخ بازده خروجی یا GOR و ضریب عملکرد یا PR وجود دارد [21]. این عوامل بر هزینه تولید آب تأثیرگذار هستند. حداکثر راندمان عملیاتی ثبت شده در یک سایت تولید آب شیرین به روش MSF ، از لحاظ ضریب عملکردی یا PR، برابر با 8/6 کیلوگرم بر 2326 کیلوژول است که دارای 24 مرحله با دمای بالای آب نمک تولید شده به میزان°C 112است [21]، در حالی که بالاترین PR ثبت شده برای یک کارخانه MED معادل 14/6 کیلوگرم بر 2326 کیلوژول با آب نمک تولیدی °C 70 و طی 16 مرحله است. روش MSF به عنوان یک فناوری نمک زدایی بیش از 60 سال است که وجود دارد. فعالیت‌های تحقیقاتی روی این فناوری همواره بر کنترل دو عامل اصلی خوردگی و تشکیل رسوب متمرکز بوده است [22]. ایجاد رسوب بر روی تجهیزات، فرآیند انتقال حرارت را محدود می کند که منجر به مصرف انرژی بالا می شود. اگرچه برخی از تحقیقات در مورد مواد ضد رسوب [23،24] برای بهبود کارایی عملیاتی MSF گزارش شده اند، اما هر ماده ضد رسوب خود همراه با چالش های دیگری است که تأثیراتی بر کارایی کلی واحد نمک زدائی دارد. دومین چالش مرتبط با فناوری MSF، تجمع خوردگی در

قسمتهای مختلف و در طی مراحل کار است. مهمترین استراتژی کنترل خوردگی، انتخاب صحیح مواد برای سطوح تبادل حرارت، به ویژه لوله های کندانسورها است [25]. به عنوان مثال در اولین سایت نمک زدائی ساخته شده در منطقه شورای همکاری خلیج فارس از فولاد کربنی به‌عنوان ماده سازنده اواپراتورها استفاده می‌کردند، اما نتایج حاصل از تجربیات به‌دست‌آمده همراه با نتایج تحقیقات، منجر به ساخت واحدهای جدیدی با آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی شد[21].

چالش اصلی در فناوری MED مشکل ایجاد رسوب در فرایند نمک زدائی است [26]. در نتیجه، کارخانه‌های MED فعلی با حداکثر 12 مرحله ساخته شده‌اند که در دمای آب شور°C 65 کار می‌کنند. لذا مقدار کم دما موجب کاهش مراحل شده است. برای رفع این چالش‌ها در فناوری‌های نمک‌زدایی حرارتی، اکثر کارخانه‌های MSF و MED از گزینه‌های پیش تصفیه استفاده می‌کنند. در این سیستم میتوان شوری و سختی آب دریا، شامل Ca^{2+} و Mg^{2+} را با پیش تصفیه حذف کرد [27]. بطوریکه این عمل سبب جلوگیری از اتلاف حرارات ناشی از رسوبات میشود [28]. قابل ذکر است که هزینه تولید آب شیرین به شدت با هزینه سرمایه مرتبط است و به عبارتی هزینه سرمایه تاثیر بیشتری بر هزینه تولید در مقایسه با هزینه عملیاتی دارد.

روش های جدید نمک زدایی آب دریا به دلیل تقاضای جهانی برای تولید آب پاک و مقرون به صرفه و سرعت انجام پروژه های تحقیقاتی، به طور مستمر در حال بررسی و به روز رسانی است. در مقاله حاضر، استفاده از انرژی های تجدیدپذیر برای نمک زدایی آب دریا و کاهش هزینه انرژی و چشم انداز استفاده از انرژی خورشیدی برای تامین برق در روش های RO و MD توسط احمد و همکارانش بررسی شده است. [29] با این حال، پراکنش جهانی سیستم های نمک زدایی و میزان کمی انرژی خورشیدی مورد نیاز حاصل از نیروگاه خورشیدی در این مقاله مشاهده نمیگردد. مطالعه دیگری توسط لی و همکارانش در مورد استفاده از آب نمک حاصل از نمک زدائی با استفاده از روش اسمز معکوس انجام شده است [30]. اما در این مقاله توسعه جهانی سایت های نمک زدایی RO و محاسبه صرفه جویی ناشی از استفاده مجدد از آب نمک، مورد مطالعه قرار نگرفته است. اگر چه در مقاله منتشر شده توسط جونز و همکاران[3] به اطلاعات ارائه نشده در مقاله لی و همکارانش به توسعه واحدهای نمک زدایی RO اشاره شده، اما تمرکز زیادی بر روی آب نمک و برخی از عوامل مانند فناوری های صنعتی رایج، فناوری های آتی و شاخص های اقتصادی فعلی صورت نگرفته است. سایر مطالعات در مورد نمک زدایی [31-33] عمدتا بر روی هر یک از فناوری ها بصورت انفرادی متمرکز شده و کمتر به بررسی گسترش جهانی آب شیرین کن ها، فناوری های صنعتی و شاخص های اقتصادی پرداخته شده است. در حالی که پرداختن به این عوامل مهم توسعه از نظر محققان فن پنهان مانده است، اطلاعات فعلی نمیتواند انتظارات آتی صنعت نمک زدایی را به اندازه کافی پیش بینی و تامین نماید.

تحقیقات انجام گرفته در زمینه فنآوری های نمک زدایی غشایی بیشتر بر روی کاهش مصرف انرژی از طریق بهینه سازی فرآیند، استفاده از مواد جدید برای نمک‌زدایی، مکان‌یابی مناسب برای ایجاد سایت آب شیرین کن و مجموعه‌ای از استراتژی‌های کاهش هزینه، متمرکز بوده است. البته مقیاس این مطالعات اغلب در شرایط

اجرائی و عملیاتی نبوده و در حد محدود و آزمایشگاهی انجام گرفته است. با این حال، تجزیه و تحلیل جامعی بر روی عوامل مهم تاثیر گذار که بصورت مستقیم یا غیرمستقیم بر روی هزینه انرژی در مقیاس های عملیاتی، تاثیر دارند، ضرورت دارد. ارزیابی وسیعی در خصوص عوامل مهم نمک زدایی در نیروگاه های نصب شده و در حال ساخت در سراسر جهان انجام شده که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. این ارزیابی، داده های موجود در زمینه توسعه جهانی نمک زدائی، تکنولوژی های صنعتی و شاخص های اقتصادی را، به منظور ارائه پیش بینی دقیق از انتظارات آینده و از طریق بررسیهای آماری مورد تحلیل قرارداده است. آمارهای مربوط به سایت های نمک زدایی و ابزارهای پیش‌بینی مدل سازی بسیار مهم هستند زیرا این ابزارها به سیاست‌گذاران و محققان کمک می‌کنند تا شاخص های کلیدی نمک‌زدایی را درک نمایند. شاخص هایی مانند ظرفیت تولید، محل کارخانه، منبع آب تغذیه سایت، تکنولوژی، نیاز به انرژی، هزینه ها، کارایی فرایندهای عملیاتی از جمله موارد مهمی هستند نیازمند بررسی دقیق می باشند. درک مناسب از روندهای کنونی و شاخص‌ها موثر به سیاست‌گذاران و محققان کمک می نماید که برای توسعه امکانات و زمینه های تحقیقاتی آینده، حداکثر تمرکز را داشته باشند[34]. ارزیابی آماری و مدل‌سازی، میتواند برآیندی مناسبی از جنبه‌های فنی، اقتصادی، زیست محیطی، اجتماعی و روند تنظیم مقررات را جهت برنامه ریزی آتی و بهبود فرآیندها، بصورت یکپارچه ارائه دهد. این ارزیابی دید مناسبی از وضعیت را به مدیران، اپراتورها و محققان ارائه داده و به آنها کمک می کند تا از تجربیات ناشی از موفقیت ها و شکست ها استفاده نمایند. بکارگیری اطلاعات آماری به استفاده کنندگان این امکان را میدهد که از حجم وسیعی از داده های مربوط به سایت های مختلف برای اتخاذ تصمیمات خود استفاده نمایند. بررسی دلایل روندها و اتفاقات مهم، می توانند در حل مشکلاتی از قبیل عملیات اجرائی کارآمدتر، بکار گیری بهینه منابع، مکان یابی مطلوب و انتخاب مناسب ترین فناوری و بر اساس ملاحظات فنی و اقتصادی و تأثیرات محیطی، مفید و موثر باشند.

2-روش کار

اطلاعات مربوط به سایت های نمک‌زدایی، از جمله مکان آن شامل کشور، منطقه، استان، نوع موقعیت مکانی شامل مناطق زمینی و دور از ساحل، فراساحلی یا سیار، ظرفیت نمک زدائی، نوع فناوری، تامین کننده غشاء، نوع غشاء، نوع و تامین کننده پیش تصفیه، نوع آب مورد استفاده اولیه یا آب مورد تغذیه ، شرکت مشاور، مدل تصفیه و نوع صنعت به کار گرفته شده، تامین کننده تجهیزات کارخانه نمک زدائی، مدل خرید تجهیزات ، قیمت آب، مالک/مشتری و بازیابی انرژی در 20971 پروژه آب شیرین کن نصب شده و یا در حال ساخت در 181 کشور در سراسر جهان، تماما از بانک اطلاعات جهانی آب Desaldata بدست آمد.[35]

مراکز نمک زدایی عمدتا در سه منطقه اصلی (بخش آسیایی اقیانوس آرام، منطقه اروپا، خاورمیانه و آفریقا و آمریکا یا EMEA) و هشت منطقه فرعی (آسیای جنوبی، اروپای شرقی/آسیای مرکزی، خاورمیانه/ شمال آفریقا، جنوب صحرای آفریقا، آمریکای لاتین/کارائیب، آسیای شرقی/ اقیانوس آرام، اروپای غربی و آمریکای شمالی) واقع شده اند. این مراکز شامل سایت های مستقر در مناطق خشکی، مناطق دریایی و آب شیرین کن

های سیار و متحرک در ابعاد کوچک، متوسط، بزرگ و اندازه های فوق العاده بزرگ هستند. امروزه ده روش اصلی از انواع فناوری در سایت های نمک زدائی به کار گرفته شده است، از جمله RO، MSF، MED، الکترودیالیز (ED)، NF (نانو فیلتراسیون)، NF و حذف سولفات ((NF(SO4))، برگشت الکترودیالیز (EDR)، بخار فشرده سازی (VC) به عنوان طراحی حرارتی، اسمز رو به جلو (FO) و تقطیر غشایی (MD) برای نمک زدایی وجود دارد. همچنین آبگیری از چندین منبع تغذیه، از جمله آب لب شور یا آب داخلی (TDS 3000 ppm - کمتر از 20000 ppm)، آب دریا (TDS 20000 ppm – 50000 ppm)، آب رودخانه یا آب با غلظت شوری کم (TDS 500 ppm - کمتر از3000 ppm)، پساب و آب لوله کشی (TDS < 500 ppm) و آب نمک یا شورابه (TDS > 50000 ppm) صورت میگیرد. زمان ساخت این آب شیرین کن ها از سال 1944 تا 2020 بوده است. در عین حال، تجزیه و تحلیل داده ها تنها بر اساس 16876 سایت انجام شده است.

با توجه به حجم بالا، داده های موجود با استفاده از نرم افزار Python 2.7 تجزیه و تحلیل آماری شدند. برای مشاهده وضعیت فعلی نمک‌زدایی در سطح جهان تجزیه و تحلیل آماری با بررسی داده های مربوط به توسعه سایت های نمک زدایی در دنیا، فن آوری های صنعتی رایج و شاخص های اقتصادی در شرایط کنونی انجام شد. کد نرم افزار پایتون بصورت زیر بود.

پانداها را به صورت PD وارد کنید

تمام داده ها با توجه به ویژگی های آنها در df ذخیره شود

df = pd. read_excel ("داده های نمک زدایی و تجزیه و تحلیل.xlsx"، sheet name = "داده ها")

ویژگی ها همه متغیرهای مهم مانند کشور ، منطقه، تاریخ آنلاین، نوع سایت و غیره را نشان می دهد.

نام داده ها= df.groupby ('ویژگی 1'، 'ویژگی 2'، 'ویژگی 3')

['ظرفیت (m3/d)'].sum

شاخص ها را درچارچوب داده مرتب می کند

نام_داده = نام_داده. reset_index

داده های استخراج شده را در فایل CSV پنهان می کند

data_industry.to_csv('data_industry.csv')

چاپ (نام_داده)

پاندا به صورت pd. وارد شده و در بصورت فایل دیتا پایتون وارد شده است. این فایل توسط pd خوانده شده عمل نموده و در فضای کاری پایتون ذخیره می شود. روندها با استفاده از group-by (ویژگی 1، ویژگی 2، ...) capacity ، sum صفر استخراج می شوند. سپس، داده های استخراج شده برای تحلیل و تجسم بهتر به عنوان فایل های CSV صادر می شوند. توسعه فعالیتهای نمک زدایی در مناطق مختلف جهان، با در نظر گرفتن ظرفیت این مراکز و با ارزیابی روند رو به رشد آن در آفریقا و اروپا، نمک زدایی برای صنایع در کشورهای و مناطق مختلف، ظرفیت آب شیرین کن های متعلق به سازمان های دولتی، وام دهندگان عمده برای پروژه های نمک زدایی در سراسر جهان، مدل های تدارکات و پشتیبانی پروژه های نمک زدایی و مشارکت آنها در توسعه ظرفیت آب شیرین کن ها و مشارکت تامین کنندگان عمده در احداث و تجهیز آب شیرین کن و تولید کنندگان ممبران، مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به تجزیه و تحلیل روند نوع آب مصرفی جهت تغذیه سایت های نمک زدایی، فناوری های عمده به کار رفته در این مراکز برای تصفیه منبع آب اولیه، ظرفیت مشارکت تامین کنندگان عمده غشاهای پیش تصفیه MF/UF (برای RO) ، ظرفیت روش‌های ضدعفونی و تامین کنندگان اصلی واحدهای پیش تصفیه (برای RO) ، مشارکت فناوری‌های نوظهور نمک‌زدایی صنعتی، دستگاه‌های بازیافت انرژی و ممبران‌های بکار رفته در کارخانه‌های نمک‌زدایی فعلی، نوع چینش و سازماندهی ممبران ها که برای نمک‌زدایی (آب لب شور، آب شور، آب رودخانه، آب دریا و فاضلاب) استفاده میشوند، در شرایط کنونی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص های اقتصادی بر حسب قیمت فعلی آب شیرین تولیدی در سایت های با مقیاس کوچک، متوسط، بزرگ و مقیاس خیلی بزرگ محاسبه شدند. کارخانه یا سایت های آب شیرین کن بر اساس ظرفیت خود به صورت کوچک یا کمتر از1000 مترمکعب، سایت های متوسط با ظرفیت بین 1000-10000 مترمکعب ، سایت های بزرگ با ظرفیت بین 10000-50000 متر مکعب و سایت های نمک زدائی خیلی بزرگ با ظرفیت نمک زدائی و تولید آب شیرین به میزان بیشتر از 50000 متر مکعب در شبانه روز طبقه بندی می شوند. تجزیه و تحلیل حساسیت اقتصادی در خصوص بررسی تأثیر نوع فناوری بر مصرف انرژی خاص و در محل مشخص بر اساس هزینه خاص تولید آب در شرایط مشخص با استفاده از برنامه Desaldata انجام شد. بدون در نظر گرفتن تجزیه و تحلیل انجام شده در این مطالعه، در صورتی که حتی داده های مورد نیاز در دسترس باشند امکان ارزیابی موارد زیر وجود نخواهد داشت:

- ظرفیت های تجمعی آب شیرین تولیدی در سراسر جهان.
- افزایش سال به سال ظرفیت های تجمعی آب شیرن تولیدی تا کنون
- ظرفیت های تجمعی بر اساس کاربرد آب تولیدی در بخش های مختلف و در بخش صنعتی.
- کمک های سازمان های دولتی به ایجاد ظرفیت نمک زدایی در سراسر جهان؛
- وام دهندگان عمده پروژه های نمک زدایی؛

- مدل های تدارکات عمده و فرعی؛

- تامین کنندگان و مشاوران کارخانه های آب شیرین کن عمده و جزئی؛

- هزینه تولید آب شیرین کن بر اساس اندازه سایت، منابع آب مورد تغذیه و فناوری؛

- فن آوری های عمده به کار گرفته شده در سراسر مناطق و بر اساس اندازه کارخانه؛

- روش های اصلی ضد عفونی و پیش تصفیه؛

- دستگاه ها و غشاهای اصلی و فرعی بازیافت انرژی در سایت های آب شیرین کن در جهان؛

- تاثیر مکان و نوع فناوری مورد استفاده در هزینه نمک‌زدایی، در مقایسه با سایر هزینه ها.

اگرچه داده های مختلفی در زمینه هر یک از موارد ذکر شده وجود دارد اما با توجه به داده های بسیار زیاد، ارزیابی کلیه آنها بدون انجام این مطالعه امکان پذیر نبود. در این مطالعه در مجموع، داده های جداگانه مربوط به 20971 پروژه، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

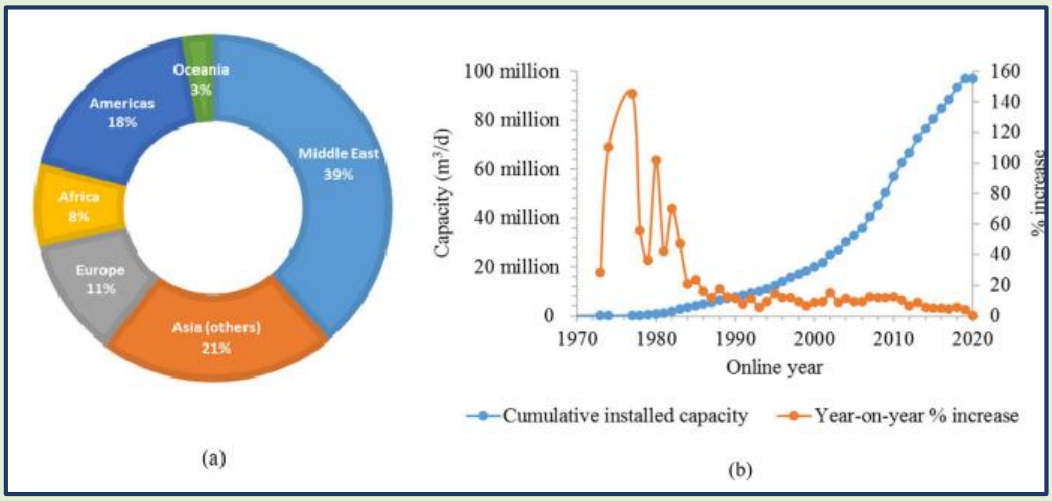
3- نتایج و بحث

3-1-پراکنش جهانی آب شیرین کن ها

3-1-1- ظرفیت آب شیرین کن ها بر اساس منطقه

تقریباً در حال حاضر حدود 16876 واحد آب شیرین کن در جهان در حال فعالیت هستند. 270 واحد شیرین سازی در حال ساخت و 3825 واحد نیز غیر فعال هستند. همچنین تعداد واحدهای نمک زدائی که به روش اسمز معکوس در حال فعالیت می باشند 14360 واحد است که نشان می دهد حدود 85٪ واحدهای آب شیرین کن به این روش کار می کنند. از 270 واحد سایت نمک زدائی در حال ساخت 247 واحد با استفاده از سیستم اسمز معکوس یا RO در حال راه اندازی هستند که حدود 91٪ واحدهای در حال ساخت را به خود اختصاص داده اند. همانطوری که در شکل 1(a) نشان داده شده است در تمامی قاره ها، بزرگترین واحدهای نمک زدایی در منطقه آسیای میانه و زیر منطقه آن قرار دارند که 39٪ از ظرفیت نمک زدائی جهان را شامل میگردند. با توجه به محدودیت وجود آب شیرین در این منطقه، مشاهده این آمار چندان تعجب آور نمی باشد. بعلاوه استقرار سایت های نمک زدائی صرف نظر از منبع تامین آب اولیه اعم از منابع آب لب شور ، آب شور دریا، آبهای زیر زمینی و غیرو از نظر اقتصادی نیازمند سرمایه گذاری زیادی می باشند که با توجه به حضور کشورهایی با درآمد سرانه بالا، امکان سرمایه گذاری در این منطقه وجود دارد. ظرفیت تولید واحدهای شیرین سازی در برخی از مناطق اروپا و آمریکا، به دلیل وجود قوانین سخت گیرانه حفاظت از محیط زیست در حد کشورهای خاورمیانه نیست. این قوانین به دلیل پیامدهای زیست محیطی (از جمله دفع پساب و انتشار گازهای گلخانه ای و برخی از سایر موارد) در ارتباط با واحدهای نمک زدائی در مقیاس بزرگ وضع شده اند.

به طور کلی، روند افزایشی تولید واحدهای آب شیرین کن های در حال کار جهان، از 27/242 میلیون متر مکعب در سال 1969 به 97/2 میلیون متر مکعب در شبانه روز در سال 2020، رسیده است (شکل 1b). در حالی که Bennett [36] در سال 2013 افزایش ظرفیت کل آب شیرین کن های جهان را 97/5 میلیون متر مکعب تا قبل از سال 2015 پیش بینی کرده بود. همچنین افزایش ظرفیت نصب شده در مقایسه با سال قبل با میانگین 75٪ در دهه 1970، همواره مثبت بوده و به طور متوسط در دهه گذشته حدود 7٪ بوده است. کاربرد مواد شیمیایی با درجه سمیت پائین تر و منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین ایجاد سیستم بازیافت مجدد آب با راندمان بالاتر می تواند منجر به افزایش بیشتر ظرفیت نمک زدایی جهانی شود. آب شیرین کن های مستقر در خشکی بیشترین میزان نمک زدایی و شیرین سازی را در جهان به خود اختصاص میدهند (جدول شماره 1). تولید این واحدهای در خشکی بالغ بر 69/1 میلیون متر مکعب در شبانه روز بوده و حدود 54/2 میلیون مترمکعب آن در منطقه EMEA (شامل اروپا، خاورمیانه، آفریقا و آمریکا) تولید میگردد. ظرفیت نمک زدایی و تولید آب شیرین در مناطق فراساحلی (آبهای آزاد) عمدتا مربوط به قاره آمریکا می شود که میزان آن به بیش از 1/4میلیون متر مکعب در شبانه روز میرسد. در حالیکه ظرفیت جهانی تولید در این محدوده 2 میلیون مترمکعب در شبانه روز می باشد. همچنین تعدادی واحد آب شیرین کن سیار نیز در جهان وجود دارند که ظرفیت تولید آنها بیش از 67000 متر مکعب در شبانه روز می باشد.



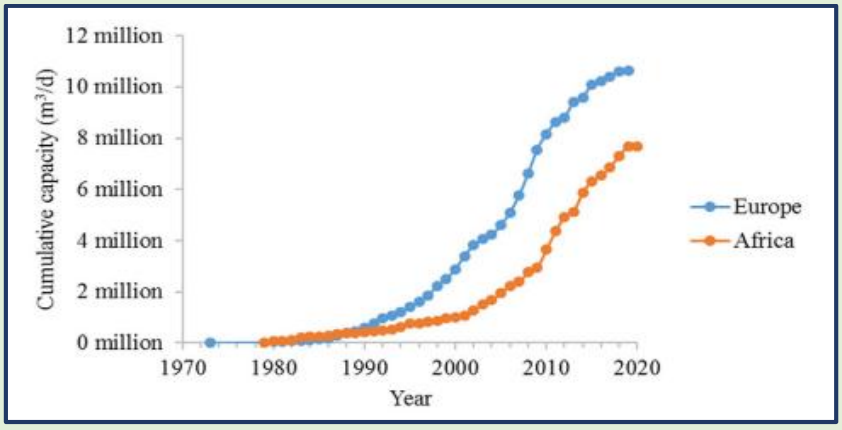
شکل شماره 1- a) ظرفیت آب شیرین کن ها در بخش های مختلف جهان بر مبنای 97 میلیون مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز. b) ظرفیت اب شیرین کن ها بر اساس ظرفیت تجمعی نصب شده و روند افزایش سالانه.

امروزه نمک زدایی به سرعت در حال تبدیل شدن به یک روش مرسوم برای تولید آب در سطح جهانی؛ اروپا و آفریقا شده است در حالی که در گذشته در این مناطق واقعاً از نمک زدایی استقبال نمی کردند. اما به تدریج مفهوم نمک زدایی کاملاً پذیرفته شده و ظرفیت نصب و تولید آن در سالهای اخیر افزایش یافت(شکل 2). بر این اساس افزایش زیادی در تولید آب شیرین حاصل از نمک زدائی در اروپا مشاهده میگردد که از میزان 604274 مترمکعب در شبانه روز در سال 1990 به ظرفیت بیش از 10/6 میلیون متر مکعب تولید در شبانه روز در سال 2019 رسیده و افزایشی بیش از 1600٪ داشته است.

منطقه	آبهای دور و آزاد متر مکعب در روز	مستقر در خشکی مترمکعب در روز	واحدهای سیار متر مکعب در روز
امریکا	1،471،064	14،848،898	108،941
قسمت آسیایی اقیانوس آرام	40،872	20،00،470	2546
EMEA شامل اروپا، خاورمیانه، آفریقا و آمریکا	1،031،025	54،271،137	179،911
مجموع	2،036،362	69،134،152	67،321

جدول شماره 1-سهم آب شیرین کن های مستقر در خشکی، دریا و سیار در تولیدات جهانی آب

افزایش ظرفیت نمک زدایی در آفریقا نیز از 425455 مترمکعب تولید در شبانه روز در سال 1990 به ظرفیت بیش از 7/6 میلیون متر مکعب در سال 2020 رسیده است که افزایشی بیش از 1700٪ داشته است. اگرچه تعداد زیادی از منابع آب شیرین در هر دو منطقه وجود دارد، اما نمک زدایی هنوز یک گزینه مناسب برای تامین آب شیرین است و این اعداد چندان تکان دهنده نیستند، زیرا با توجه به نرخ رشد ثابت جمعیت در این مناطق (به ویژه در آفریقا) همواره تقاضای آب در حال افزایش می باشد. بزرگترین واحد آب شیرین کن در آفریقا، جنوب صحرای آفریقا و اروپا به ترتیب آب شیرین کن Magtaa در الجزایر با 500 هزار مترمکعب تولید در شبانه روز، ، آب شیرین کن در حال ساخت Dangote در نیجریه با بیش از 110 هزار مترمکعب تولید آب شیرین و واحد شیرین سازی Torrevieja در کشور اسپانیا با 240 هزار مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز، می باشند. علاوه بر این نوآوری‌های ارائه شده در فناوری نمک‌زدایی در سالهای اخیر موجب آن گردیده است که در مقایسه با سایر روشهای تصفیه آب از نظر اقتصادی رقابتی تر باشند[36].



شکل شماره 2- روند افزایش ظرفیت تجمعی آب شیرین کن ها در افریقا و اروپا

از سال 2010 تا پایان سال 2019 ظرفیت واحدهای آب شیرین کن به طور پیوسته و با نرخ متوسط سالانه حدود 7٪ افزایش داشته است که این افزایش معادل متوسط رشد بیش از 4/6 میلیون مترمکعب در هر شبانه روز در هر سال است [36]. آب حاصل از آب شیرین کن ها عمدتاً به عنوان آب آشامیدنی در شهرها استفاده می شود. ظرفیت تجمعی واحدهای شیرین سازی که در حال حاضر در خدمت اهداف شهری هستند حدود

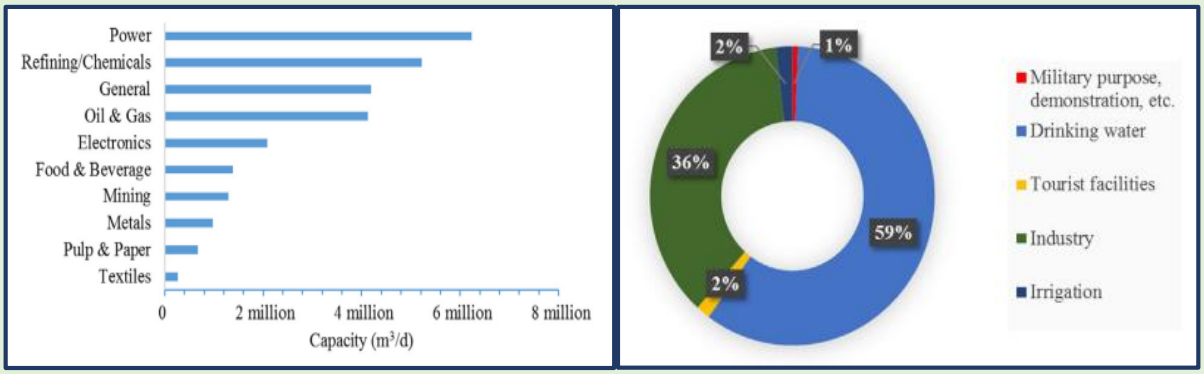
57/3 میلیون مترمکعب در شبانه روز است که حدود 59٪ از ظرفیت تولیدات جهانی را به خود اختصاص داده است (شکل 3(a)) که حدود 61٪ از این میزان در واحدهای شیرین سازی خاورمیانه و شمال آفریقا تولید می شوند. در حال حاضر و در سطح جهان، بزرگترین واحدهای شیرین سازی از نظر ظرفیت نصب شده واحدهای نمک زدائی Shoaiba 3 و Jubai هستند که با هدف تولید آب آشامیدنی شهری ایجاد شده اند. بزرگترین واحدهای نمک زدائی در حال ساخت واحدهای IWP Taweelah و Umm al Quwain IWP هستند. بسیاری از صنایع نیز از فرایند نمک‌زدایی در بازیافت پساب تولید شده در فرآیندهای صنعتی خود استفاده میکنند. مجموع ظرفیت نمک‌زدایی در خدمت اهداف صنعتی حدود 35/3 میلیون مترمکعب در شبانه روز است که حدود 36/3٪ از ظرفیت نصب شده جهانی در این زمینه است. در عین حال، بمنظور تخلیه پساب مقررات سختگیرانه تری برای دستیابی به استانداردها وجود دارد. شوری آب شیرین شده قابل استفاده برای استفاده مجدد از آب صنعتی باید کمتر از ppm10 باشد.

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، صنعت برق بزرگترین مالک آب شیرین کن ها جهت تصفیه فاضلاب صنعتی با ظرفیت6/2 میلیون مترمکعب در شبانه روز است و دلیل آن استفاده از آب برای خنک کردن واحد تولید برق می باشد. آب خنک کننده برگشتی به عنوان آب ورودی آب شیرین کن برای تصفیه مورد استفاده قرار میگیرد. طی سالهای گذشته اندازه واحدهای تولید برق افزایش یافته و در نتیجه خروجی آب حاصل از خنک سازی نیز افزایش یافته است، که این موضوع منجر به نیاز به واحدهای نمک زدایی با ظرفیت بیشتر شده است. بعد از نیروگاههای برق صنایع شیمیایی با ظرفیت 5/2 میلیون متر مکعب در شبانه روز و نفت و گاز 4/1 میلیون مترمکعب مصرف در شبانه روز و در رتبه های دوم و سوم قرار دارند. افزایش فعالیتهای بالا و پائین دستی در صنعت نفت و گاز منجر به افزایش مصرف آب و افزایش ظرفیت واحدهای شیرین سازی شده است. این صنایع بدلیل نیاز به تصفیه آب تولید شده که حاوی مقدار زیادی مواد آلاینده هیدروکربنی و نمک است، از واحدهای آب شیرین کن استفاده می نمایند[36]. سایر صنایعی که از نمک زدایی به عنوان وسیله ای برای تصفیه پساب های خود استفاده می کنند، صنایع الکترونیک، صنایع غذایی و آشامیدنی، معدن، فلزات، و صنایع خمیر و کاغذ هستند.

صنعت نساجی از مقدار زیادی آب برای فعالیت های خود استفاده می کند. اکثر شرکت های نساجی عمدتاً به دلیل محدودیت های قوانین در مورد استفاده از آب های زیرزمینی به راحتی به منابع آب دسترسی ندارند[37] . شکل 3 نشان می‌دهد که نمک‌زدایی تنها روش مورد استفاده برای تصفیه آب برای منسوجات نیست. بطوریکه در حال حاضر ظرفیت نمک زدایی این صنعت فقط حدود 263 هزار متر مکعب در شبانه روز است. استفاده از روش نمک زدایی غشایی برای تصفیه فاضلاب نساجی، در مقایسه با سایر روش های شیمیایی و بیولوژیکی مرسوم برای تصفیه فاضلاب این صنایع گران تر می باشد و بدین دلیل در این صنعت نمک زدایی ترجیح داده نمی شود. هزینه بالای نمک زدایی در این صنعت عمدتا به دلیل مشکلات ناشی از رسوب گذاری

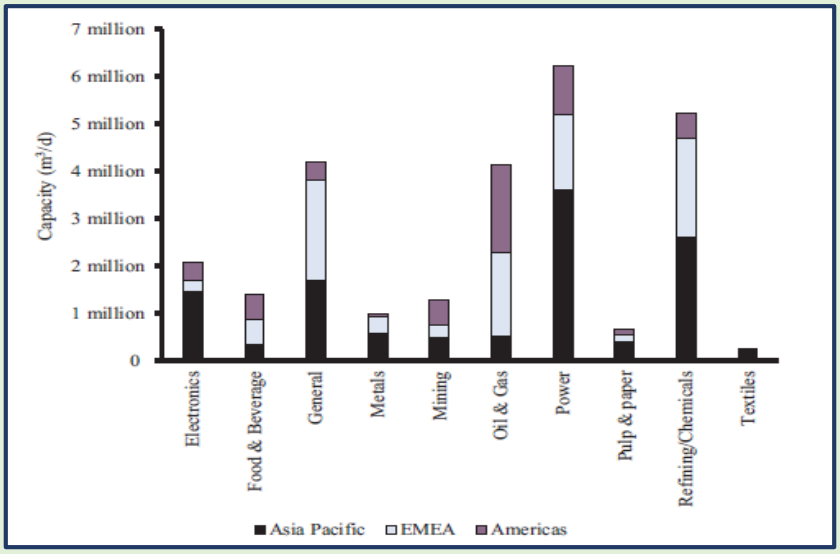
و پوشش سطوح توسط مواد و هزینه بالای تعمیر و نگهداری است. تغذیه مستقیم از پساب های خروجی نساجی، می تواند منجر به رسوب گذار و پوشش برگشت ناپذیر سطوح ممبران ها شود.

رسوب گذاری سبب افزایش هزینه نگهداری ماژول ها و کاهش طول عمر آنها خواهد شد [38]. بسیاری از آلاینده های موجود در پساب های نساجی حاوی رسوبات سخت و دائمی مانند مواد آلی از جمله رنگ ها، روغن ها، چربی ها، مواد تکمیل کننده، نگهدارنده ها، مواد شیمیایی کمکی و غیره هستند. همچنین میزان متوسطی از نمک در حمام‌های قلیایی جهت شستشو و تمیز کاری و حمام های خنثی‌سازی وجود دارد [39]. اگرچه در این نوع پساب میتوان مواد با وزن مولکولی بالا را با استفاده از پیش تصفیه UF تصفیه و حذف کرد، اما این پساب ها با استفغاده از NF یا RO نمک زدایی می شوند، که این فناوری های غشایی نیز با مشکل افزایش قطبی شدن مواجه هستند که منجر به افزایش مقدار مصرف انرژی برای نمک زدایی با خلوص مطلوب و کاهش جریان آب تولیدی میشوند[40]. علاوه بر این، کیفیت پساب های نساجی بسته به منبع پساب و منسوجات تولیدی در هر گروه، بسیار متفاوت است. به عنوان مثال فعل و انفعالات ما بین رنگ-غشاء ، بسیار پیچیده و پیش بینی آن دشوار است. اکثر مطالعات در مورد UF/NF یا UF/RO و نمک زدایی پساب های نساجی در مقیاس آزمایشگاهی و تحقیقاتی هستند. آب شیرین کن ها به غیر از صنایع، برای اهداف نظامی، آبیاری، و غیره نیز مورد استفاده قرار میگیرند (شکل3) .



شکل شماره 3- (سمت راست) ظرفیت های نمک زدایی از نظرمالکیت و (سمت چپ) بر اساس کاربرد و بخش های صنعتی در سراسر جهان

در بین صنایع، صنایع برق در آسیا و اقیانوسیه بیشترین ظرفیت نمک زدایی را داشته و تقریباً ظرفیت آنها 3/6 میلیون متر مکعب تولید و مصرف آب شیرین در شبانه روز است(شکل 4) که بالاترین میزان در بین تمام صنایع در جهان است. بزرگترین واحد آب شیرین کن صنعت برق جهان در چین و در سایت نمک زدایی Tianjin SDIC در پکن با تولید 200 هزار متر مکعب آب شیرین در شبانه روز قرار دارد که آب تولیدی در صنعت برق مورد استفاده قرار میگیرد. شهرنشینی و افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای سیستم های نمک زدایی در منطقه شده است. منطقه آسیا و اقیانوسیه دارای بزرگترین ظرفیت نمک زدایی در صنایع پالایشگاهی با 2/6 میلیون مترمکعب و صنایع الکترونیک با ظرفیت 1/46 میلیون متر مکعب تولید آب شیرین در شبانه روز است. در صنایع نفت و گاز، بیشترین ظرفیت واحدهای نمک زدایی در قاره آمریکا با ظرفیتهای

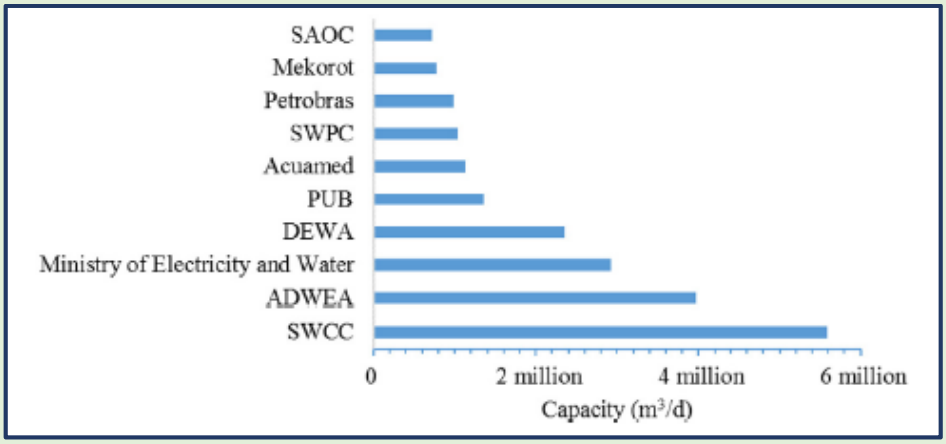


شکل شماره 4- ظرفیت سایت های نمک زدائی مربوط به صنایع بر حسب منطقه

نصب شده 1/86 میلیون و در منطقه EMEA (منطقه اروپا، خاورمیانه و آفریقا و آمریکا) با ظرفیت های نصب شده 1/75 میلیون متر مکعب در شبانه روز وجود دارد. در همین حال، صرف نظر از منطقه، صنایع نساجی در مقایسه با سایر صنایع دارای کوچکترین واحدهای نمک زدائی می باشد.

3-1-2-سازمان های دولتی و مدل های تدارکاتی برای پروژه های نمک زدایی

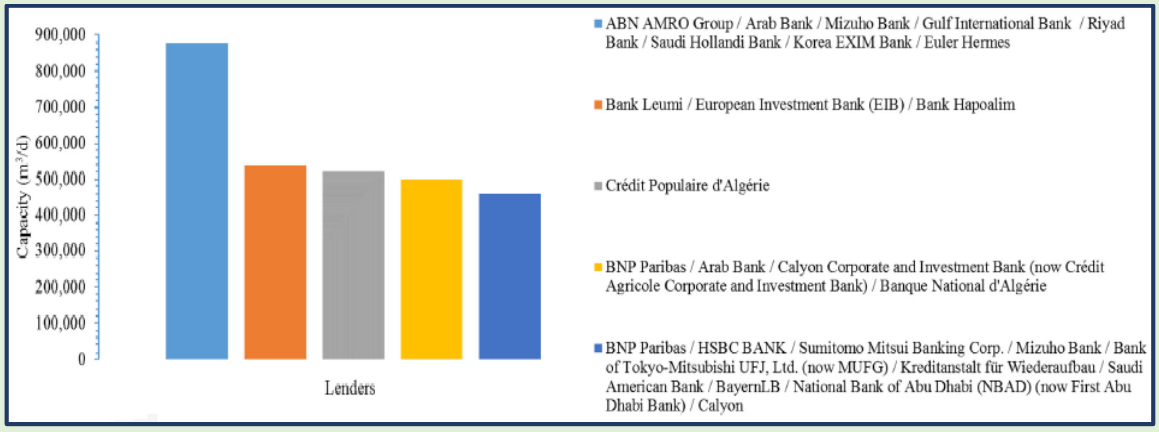
سازمان‌های دولتی زیادی در سرتاسر جهان پروژه‌های نمک‌زدایی را به عنوان یک برنامه جذاب اقتصادی و یک منبع آب تمیز و ارزان، به ویژه برای مصرف در برنامه های شهری را مدیریت می نمایند. بر اساس داده های موجود، سازمان نیمه دولتی همکاریهای حفاظت از آب شور در کشور عربستان سعودی، مالک بزرگترین است میزان نمک‌زدایی در سراسر جهان با تولید بیش از 5/5 میلیون مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز است (شکل 5).



شکل شماره 5- آب شیرین کن های با ظرفیت بالا و با مالکیت دولتی

پس از این آب شیرین کن عربستانی، مراکز شیرین سازی آب و برق ابوظبی (ADWEA، سازمان انرژی) با ظرفیت نصب شده 3/9 و وزارت آب و برق در کشور کویت با ظرفیت نصب شده بیش از میلیون 2/9 میلیون متر مکعب تولید آب شیرین در شبانه روز قرار دارند. اداره برق و آب دبی (DEWA) در امارات متحده عربی با ظرفیت 2/3 و هیئت خدمات عمومی (PUB) در سنگاپور نیز با ظرفیت 1/3 میلیون مترمکعب نصب شده و در حال کار می باشند. همچنین هیئت خدمات عمومی سنگاپور، انرژی مورد نیاز خود را برای نمک زدایی از انرژی های تجدید پذیر تامین می نماید. اغلب شرکت های دولتی که بزرگترین ظرفیت های شیرین ازی را در اختیار دارند، در منطقه خاورمیانه قرار داشته و شرکت های تولید برق می باشند. شرکت Acuamed در کشور اسپانیا 1/1 میلیون مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز و شرکت مشارکت آب عربستان (SWPC) دارای ظرفیت 1 میلیون مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز هستند. شرکت Petrobras در کشور برزیل دارای ظرفیت بیش از 998 هزار متر مکعب آب شیرین در شبانه روز می باشد. شرکت های دیگری که مالک نمک زدایی در مقیاس بزرگ هستند ظرفیت های Mekorot در اسرائیل و شرکت SAOC در صنعت آب و برق کشور عمان هستند. قابل ذکر است که ظرفیت های واقعی ذکر شده ممکن است کمتر از ظرفیت ذکر شده باشد، اما این بررسی بر اساس داده های در دسترس صورت گرفته است. همچنین برخی از داده های ارائه شده در GWI، توسط صاحبان کارخانه های آب شیرین کن ارائه نشده اند.

بانک‌های خاورمیانه بیشترین میزان حمایت را از سایت های نمک‌زدایی دارند که مسئولیت ظرفیت تولید بالایی از نمک زدائی را در منطقه بر عهده دارند. این در حالی است که بدلیل نیازهای بالای مالی پروژه، این گونه از پروژه ها عمدتا با حمایت مالی کنسرسیومی از بانک ها اجرا شده و یک بانک به تنهایی قادر به حمایت از آنها نمی باشد(شکل 6).



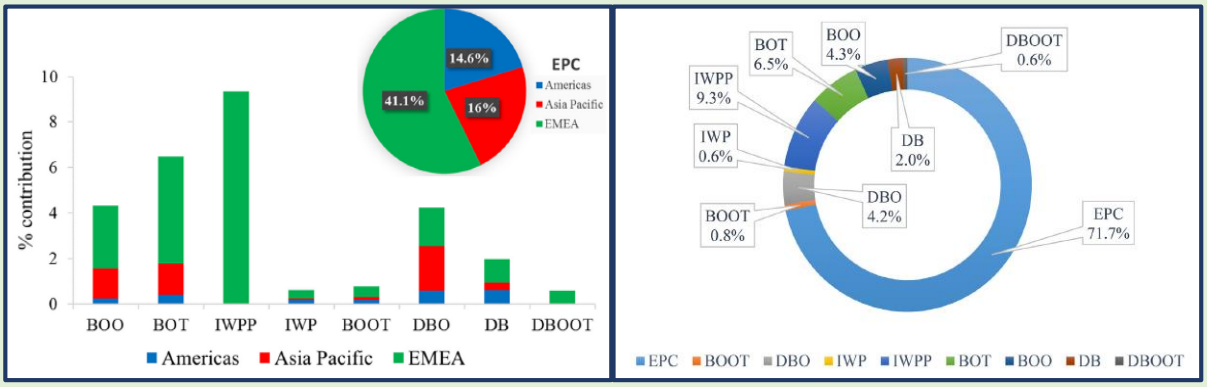
شکل شماره 6- وام دهندگان اصلی به مراکز نمک زدائی بزرگ دنیا

همانگونه که ملاحظه میگردد، حمایت از احداث سایت های نمک زدایی با ظرفیت بالا را کنسرسیومی مرکب از بانک‌های مختلف که عمدتاً در خاورمیانه قرار دارند بر عهده داشته اند. بانک های مستقر در آسیا ، به ویژه درکشورهای ژاپن و کره از تامین کنندگان اصلی منابع مالی ایجاد مراکز نمک زدایی هستند که تا حدود 25٪

تامین کنندگان این منابع مالی می باشند(شکل 6). همچنین بانک های اروپایی و بانک های شمال آفریقا پروژه های نمک زدایی را تامین مالی می کنند. در سطح جهانی، بانک‌های خاورمیانه، آسیا و شمال آفریقا بزرگ‌ترین بانک‌ها تامین کننده منابع مالی پروژه های نمک زدایی هستند. زیرا در این مناطق کمبود آب هنوز یک مشکل اساسی به شمار رفته و در سالهای اخیر در بسیاری از این مناطق جمعیت افزایش زیادی داشته است. در سالهای اخیر، پیشرفت در فناوریهای به کار گیری شده در فعالیتهای نمک زدائی، منجر به کاهش ردپای زیست محیطی فعالیتهای این صنعت گردیده [41] و به عنوان مزیتی توسط صاحبان کارخانه فعالیت نمک زدایی مطرح و آن را به عنوان یک سرمایه گذاری پایدار با سودآوری مناسب معرفی می نماید.

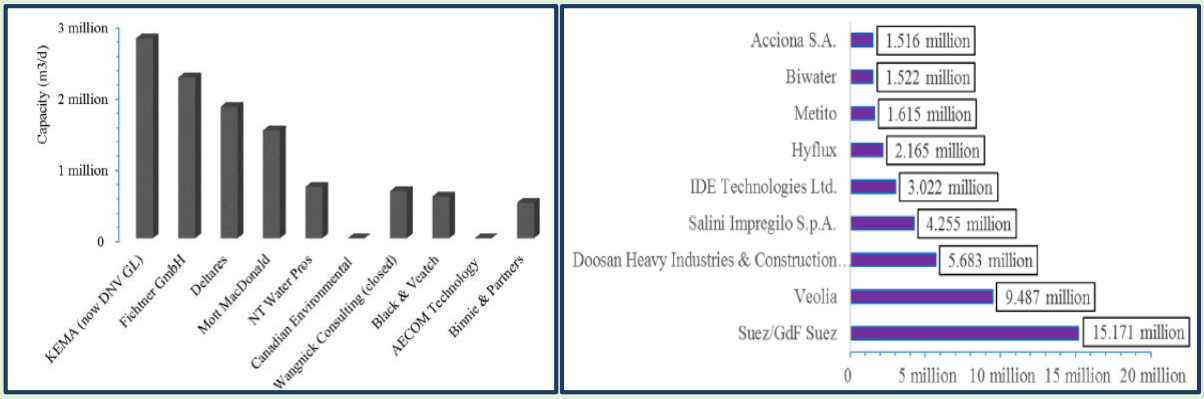
پروژه های بزرگ نمک زدایی سرمایه بر هستند، بنابراین در ساخت و راه اندازی این گونه پروژه های بزرگ سهامداران کلیدی معمولاً سازمان های دولتی و یا شرکتهای بزرگ هستند[42]. سازمان های دولتی معمولا آب را از منبع اصلی دریافت و شیرین میکنند در حالی که شرکت های خصوصی عمدتا مسئول ارائه بخشی از فعالیتها از قبیل خدمات مهندسی، ساخت و ساز و خدمات در فاز توسعه هستند. در واقع این گونه از مشارکت ها موجب کاهش هزینه های سرمایه گذاری و افزایش کارائی در کل سیستم و فرایندها میگردد. در برخی موارد، سازمان های دولتی اقدام به راه اندازی آب شیرین کن ها می نمایند و یا بر اساس قراردادهای بلند مدت به شرکت های خصوصی اجازه می دهند که این گونه سایت ها را مالک شده و راه اندازی کنند. قراردادهای بلند مدت منجر به کاهش هزینه و تولید آب به میزان ثابت و تضمین هزینه های سرمایه ای میشود که در طول مدت مشارکت بازپرداخت خواهند شد. چندین مدل مختلف از این نوع همکاریها در ایجاد سایت های نمک زدائی وجود دارد. اما همانطور که در شکل 7 (الف) نشان داده شده است مدل EPC یا مهندسی، تدارکات و ساخت و ساز، حدود 71/7٪ از کل قراردادهای مشارکتی واحدهای آب شیرین کن های جهان را به خود اختصاص داده است. از این میزان 41/1٪ از قراردادها در منطقه EMEA بوده است که نشان می دهد این منطقه بیشترین ظرفیت نصب شده آب شیرین کن ها را در جهان بر اساس مدل EPC داشته است. (شکل 7 ب) . در مدل EPC، مالکیت عمومی بصورت نیمه دولتی حفظ می شود اما شرکت ارائه دهنده خدمات بصورت خصوصی مدیریت شده و عمل می نماید[42]. در این میان شرکت خصوصی مسئول کلیه ریسک های عملیاتی نیز می باشد. روش مستقل تولید کننده آب و برق (IWPP) دومین مدل رایج مشارکت است که در احداث و راه اندازی حدود 9/3٪ از پروژه های نمک زدائی در جهان نقش داشته است. در این مدل شرکت ها خروجی یا تولید خود را به سازمان های دولتی می فروشند. تمام ظرفیت های ایجاد شده مطابق این مدل در منطقه EMEA قرار دارند (شکل 7 ب). مدل مذکور بسیار پیچیده است و طرفین قرارداد چند شرکت می باشند. لذا برای رسیدن به موفقیت نیاز به هماهنگی بالایی دارند. در این مدل، یک قرارداد واحد بین نهاد دولتی و شرکت خصوصی (معمولاً یک سازمان بزرگ یا مجموعه ای از چندین سازمان بخش خصوصی) منعقد میگردد. هدف از این نوع مشارکت حصول اطمینان از دسترسی مطمئن به آب و برق است که توسط شرکت خصوصی تامین خواهد گردید و معمولا برای یک دوره 30 ساله پیش بینی میگردد.

تامین منابع مالی، مهندسی طراحی، احداث و ایجاد ساختار و مدیریت آن معمولا مسئولیت این شرکت خصوصی است[43]. اگر شرکت خصوصی تولیده آب باشد مدل تولید مستقل تنها برای آب یا IWP خواهد بود که استفاده از آن تنها کمتر از 1 درصد از ظرفیت واحدهای نمک‌زدایی جهان را به خود اختصاص میدهد.



شکل شماره 7- (الف سمت راست) مدل های مشارکت مختلف در ساخت آب شیرین کن ها ، (ب سمت چپ) مدلهای مشارکت در مناطق مختلف جهان

مدل Build-Own-Transfer (BOT) سومین مدل رایج در جهان است که حدود 6/5٪از ظرفیت آب شیرین کن های جهان را شامل میگردد. به موجب آن سازمان دولتی زمان مشخصی را برای ساخت، مالکیت و انتقال در قرارداد فیمابین مشخص می نماید. در طول دوره اگر شرکت خصوصی اجازه راه اندازی سایت را پیدا کند، مدل مشارکت یا مدل مالی تبدیل به Build-Own-Operate-Transfer (BOOT) شده و شرکت خصوصی ضمن جمع آوری درآمدها، نسبت به مدیریت زیرساخت ها و نگهداری آن اقدام می نماید و در پایان زمان تعیین شده همه چیز به سازمان دولتی منتقل می شود [44]. استفاده از این روش تنها در کمتر از 1٪ ظرفیت جهانی نمک زدایی جهان نقش دارد. مدل طراحی،ساخت و اداره یا DBO نیز حدود 4/2 درصد از ظرفیت نمک زدائی را در مدل های مشارکتی استفاده شده ، به خود اختصاص داده است. استفاده از این مدل، مراحل تدارکات و خرید را ساده کرده و سبب کاهش هزینه ها میگردد. این مدل اولین راه حل برای واحدهای صنعتی است که علاقه مند به انجام سریع پروژه ها می باشند[45]. استفاده از مدل DBO در منطقه آسیایی اقیانوس آرام بیشترین ظرفیت را داشته و از4/2٪ سهم یاد شده حدود1/9٪ از این مدل مشارکتی به این منطقه اختصاص دارد. پروژه های نمک زدائی لزوما مجبور به استفاده از مدل های مشارکتی از قبیل BOO، DB، BOOT، IWP و DBOOT نیستند و این روش ها در مجموع در کمتر از 10٪ ظرفیت پروژه های آب شیرین کن ها در جهان مورد استفاده قرار گرفته است. اگر چه این روش از مشارکت ها و مدل‌های مالی مزایای خود را دارند اما دارای محدودیت‌هایی از جمله نبود چارچوب قانونی مناسب، تخریب زیرساخت ها در صورت نیمه کاره ماندن کار به هر دلیل و فقدان سوابق طولانی مدت در زمینه مشارکت بین بخش دولتی و خصوصی می باشند.



شکل شماره 8- (الف) تامین کنندگان و (ب) مشاوران، و مشارکت آنها در آب شیرین کن های جهان

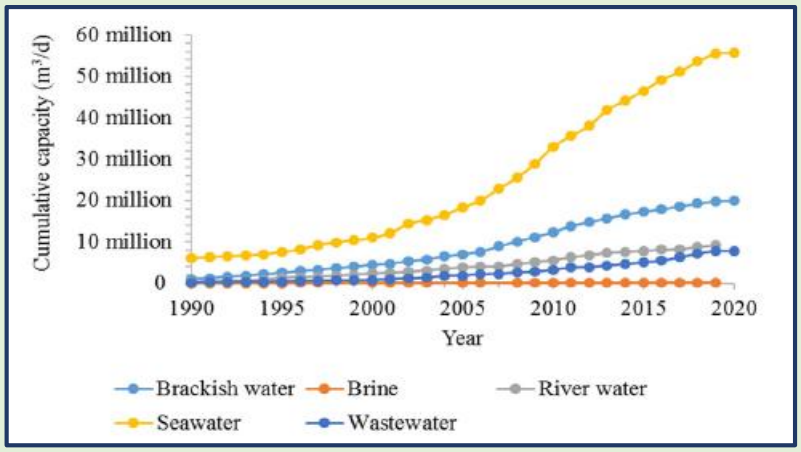
در حاضر شرکت هایی از قبیل GdF Suez ، Veolia، Doosan، Salini Impregilo، Hyflux ، IDE Technologies و Metito وجود دارند که که خدمات طراحی مهندسی، ساخت و ساز و خدمات بهره برداری را برای سایت های نمک زدایی در مقیاس بزرگ ارائه میدهند. GDF Suez (ENGIE)، Veolia و Doosan به ایجاد بزرگترین سایت های آب شیرین کن در سراسر جهان کمک کردند که ظرفیتی بیش از 30 میلیون متر مکعب تولید آب شیرین در شبانه روز را به خود اختصاص می دهند. GDF Suez در ساخت بزرگترین آب شیرین کن به ظرفیت 15/1 میلیون مترمکعب در شبانه روز و پس از آن Veolia با ظرفیت 9/4 میلیون مترمکعب و Doosan با ظرفیت 5/6 میلیون متر مکعب در شبانه روز مشارکت داشته اند (شکل 8 الف). Salini Impregilo S.P. A و IDE در احداث ظرفیت آب شیرین کن روزانه حدود 4/2 میلیون متر مکعب و 3 میلیون مترمکعب در شبانه روز مشارکت نموده اند. Hyflux, Metito, Biwater, Acciona, Sacyr Vallehermoso, Sacyr Vallehermoso و Ferrovial از دیگر شرکت های هستند که در فعالیتهای نمک‌زدایی مشارکت دارند. هزینه های بالا و نیاز به سرمایه گذاری هنگفت از عوامل محدود کننده برای ایجاد واحدهای نمک زدائی با ظرفیت بالا در سرتاسر جهان هستند[46]. مباحث فنی این واحدها توسط شرکتهای مشاور مدیریت میشوند. شکل 8 (ب) شرکت های مشاور فنی را بر اساس ظرفیت تاسیسات و زیر ساخت ها نشان میدهد. KEMA ، با سهم مشارکت 2/8 میلیون مترمکعب ظرفیت در روز و به دنبال آن Fichtner GmbH و Deltares، با حدود 2/25 میلیون متر مکعب و 1/8 میلیون متر مکعب در شبانه روز بازیگر اصلی شرکتهای مشاوره در این صنعت هستند. مقادیر اعلام شده در این گزارش بر اساس داده های موجود است.

3-2- فن آوریهای رایج نمک زدائی صنعتی

3-2-1-آب مورد استفاده جهت نمک زدائی

استفاده از آب دریا به عنوان آب اولیه جهت برداشت و نمک زدائی نشان میدهد که دریا هنوز به عنوان منبع اصلی مورد استفاده برای آب شیرین کن ها به حساب می آید. استفاده از آب لب شور به عنوان منبع تغذیه

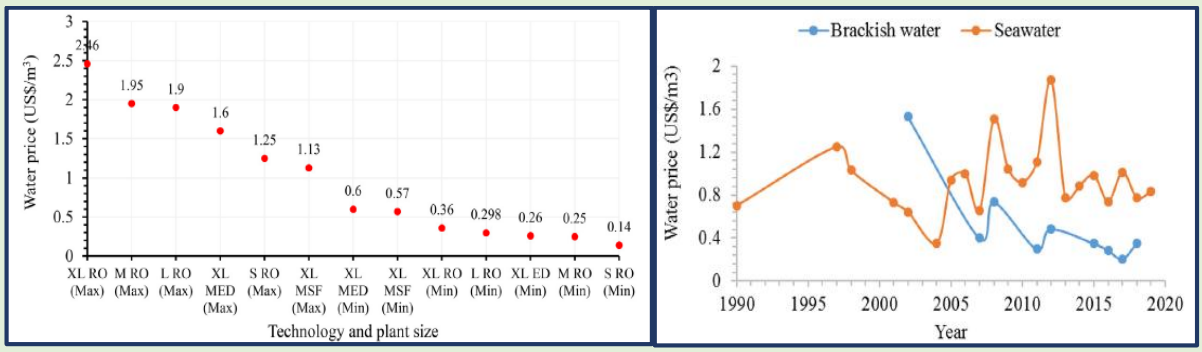
آب واحدهای نمک زدائی و بدنبال آن رودخانه ها از دیگر منابع اصلی مورد استفاده برای شیرین سازی می باشند. استفاده از فاضلاب به عنوان چهارمین منبع آب مورد استفاده برای شیرین سازی است که پساب حاصل از آن کمترین میزان شوری را دارد. استفاده از آب رودخانه ها و فاضلاب به ندرت برای نمک زدائی در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار میگیرند اما برخی از واحدهای شیرین سازی بزرگ با استفاده از این منابع به عنوان آب مورد تغذیه وجود دارند. به عنوان مثال، بزرگترین واحد شیرین سازی که آب رودخانه با شوری کمتر از 3000 ppm را مورد استفاده قرار میدهد (3 گرم در لیتر) واحد Kaohsiung Kao-Tan Park در کشور تایوان است که 300 هزار مترمکعب تولید آب شیرین در شبانه روز دارد. Sant Joan Despí در کشور اسپانیا با تولید 206064 متر مکعب در روز و Glades Road water در ایالات متحده آمریکا با تولید 151400 متر مکعب در روز از واحدهای شیرین سازی آب با استفاده از رودخانه های شور یا RWRO هستند که فناوری اصلی بکار گرفته شده در آنها RO و NF بوده که تولیدات آنها عمدتاً برای مصارف شهری مورد استفاده قرار میگیرند. همچنین آب تصفیه و شیرین سازی شده به روش اسمز معکوس و با منبع تغذیه فاضلاب WWRO عمدتا برای مصارف آبیاری و صنعتی مورد استفاده قرار میگیرد.



شکل شماره 9- سهم منابع مختلف آب مورد استفاده جهت شیرین سازی از سال 1990

بین سال های 1990 تا 2020، ظرفیت تجمعی آب شیرین کن هایی که از آب دریا به عنوان منبع تغذیه خود استفاده می نمایند حدود 813 درصد افزایش داشته است (شکل 9). انتخاب آب مورد استفاده جهت تغذیه آب شیرین کن عمدتا به کل مواد جامد محلول TDS و شوری آن بستگی دارد. در طول سه دهه گذشته، شوری آب دریا که برای نمک زدایی استفاده می شود بین 3000 تا 20000 ppm (30-20 گرم در لیتر) است و میزان شوری آبهای لب شور زیر 20 گرم در لیتر می باشد. 57٪ منبع تغذیه کل آب شیرین کن های جهان از آب شور دریا، 20٪ از آبهای لب شور و 23٪ باقیمانده از سایر منابع تامین میگردند [47]. شکل 9 میزان استفاده از منابع آبی مختلف را بر اساس ظرفیت آب شیرین کن های جهان نشان میدهد. با توجه به مصارف آب تصفیه شده رودخانه ها و بویژه فاضلاب عملیات انجام شده برای تصفیه آنها بمنظور تغییر ظاهری و قابل مصرف نمودن آن برای مصارف آبیاری و صنعتی است در حالی که تصفیه آب شور دریا با

TDS بیش از 50000 برای نمک زدائی و به نوعی افزایش کارائی و بازیابی آب است. امروزه استفاده از روشهای RO، MED و FO به عنوان فناوری های اصلی نمک زدایی آب شور دریا مورد استفاده قرار میگیرند.



شکل شماره 10- قیمت آب تولیدی در جهان با استفاده از منبع آب دریا و آب لب شور (شکل سمت راست)

قیمت آب تولیدی در جهان بر اساس روش نمک زدائی و ابعاد واحدها (شکل سمت چپ)

در این میان، آب دریا و آب لب شور بزرگترین منابع مورد استفاده برای نمک زدائی و شیرین سازی هستند، زیرا منابع آب دریاها و اقیانوسها و همچنین آبهای داخلی به مقدار قابل توجهی برای برداشت در دسترس می باشند. لذا اغلب واحدهای شیرین سازی متکی به این منابع بویژه آب دریا هستند، زیرا این منابع میتوانند مقادیر بالای آب مورد نیاز واحد مورد نظر را پشتیبانی نمایند. آب مورد استفاده برای نمک‌زدایی همچنین به منابع آب موجود در یک منطقه یا کشور نیز بستگی دارد. آب دریا به دلیل غلظت نسبتا بالای نمک در آن سطوح انرژی بالاتری برای جداسازی نمک نیاز دارد. بنابراین، نمک زدایی آب دریا نسبت به نمک‌زدایی آب لب شور، گران‌تر خواهد بود. روند هزینه های تولید آب شیرین با استفاده از آب دریا و آب شور، از سال 1990 تا 2019 در شکل شماره 10 نشان داده شده است. در این گراف میانگین مقادیر هزینه ها برای پروژه های مختلف در هر سال محاسبه و گزارش شده است. در این میان میانگین هزینه های نمک زدائی در واحدهای مختلف، متفاوت و در نوسان بوده است. طبق گزارشات، میانگین بالاترین قیمت تمام شده برای شیرین سازی آب دریا برابر با 1/87 دلار برای تولید هر مترمکعب آب در سال 2012 بوده و کمترین قیمت تمام شده 0/35 دلار برای تولید هر متر مکعب آب بوده که در سال 2004 گزارش شده است. البته این قیمت ها احتمالا وابستگی زیادی به میزان شوری آب مورد استفاده برای شیرین سازی داشته است. بر اساس اطلاعات مربوط به دوره 2002-2007 میانگین حداکثر قیمت تولید آب شیرین با تغذیه از آب لب شور از 1/53 دلار به 0/4 دلار به ازای هر متر مکعب کاهش یافته است. پس از این دوره میانگین هزینه تمام شده افزایش یافته و مجددا همراه با کاهش بوده و در سال 2018 به 0/35 دلار در هر متر مکعب تولید رسیده است.

از سال 1990 تا به امروز، حداقل قیمت آب تولیدی در جهان برای واحدهای آب شیرین کن RO در مقایسه با واحدهای MSF و MED سطح جهان گزارش شده است (شکل 10). به عبارتی حداقل قیمت تولید واحدهای خیلی بزرگ، بزرگ، متوسط و کوچک با استفاده از فناوری RO در مقایسه با واحدهای MSF و

MED با ظرفیت مشابه پائین تر می باشند. طبق آنالیز قیمت های جهانی، حداقل قیمت در واحدهای کوچک با استفاده از سیستم اسمز معکوس، حدود 0/36 ، برای واحدهای متوسط 0/298، در واحدهای بزرگ 0/25 و در واحدهای خیلی بزرگ 0/14 دلار برای مترمکعب می باشد. در حالیکه این حداقل قیمت در واحدهای MSF حدود 0/57و واحدهای MED 0/6 دلار برای هر متر مکعب می باشد. داده های مربوط به واحدهای کوچکتر MSF و MED در گزارشات وجود نداشت و به همین دلیل قابل تجزیه و تحلیل نبودند.

نکته جالب اینجا است که بالاترین قیمت آب تولیدی در دنیا نیز متعلق به آب تولیدی در یک سیستم خیلی بزرگ RO است و این نشان دهنده این واقعیت است که قیمت تولید آب به روش اسمز معکوس دارای طیف وسیع و گسترده تری در مقایسه با روشهای MSF و MED است. بالاترین قیمت تولیدی آب با استفاده از روش اسمز معکوس به قیمت 2/46 دلار برای هر متر مکعب با استفاده از فناوری سیستم اسمز معکوس، با استفاده از منبع تغذیه آب دریا و برای یک واحد شیرین سازی خیلی بزرگ در واحد Tugun (ساحل طلایی) در کشور استرالیا می باشد. این در حالی است که حداقل قیمت جهانی تولید آب شیرین با استفاده از همین فناوری و در مقیاس کوچک 0/14 دلار به ازای هر متر مکعب گزارش شده است که در کشور رومانی قرار دارد (جدول 2).

مقیاس و سیستم واحد نمک زدائی		بالاترین قیمت	سال	ظرفیت متر مکعب در روز منبع تغذیه مکان واحد نمک زدائی	حداقل قیمت	سال	مشخصات واحد نمک زدائی
خیلی بزرگ	RO	2/46	2009	133 هزار / آب دریا Tugun استرالیا	0/36	2013	318500/ آب لب شور Tuaspring سنگاپور
بزرگ	RO	1/9	2011	30 هزار/ آب دریا/ Paphos قبرس	0/298	2011	22500 / آب لب شور زاهدان، ایران
متوسط	RO	1/95	2017	4315 / آب دریا San Andress کلمبیا	0/25	2016	1850/ آب لب شور Salwa قطر
کوچک	RO	1/25	1997	600/ آب دریا/ Bahamas	0/14	2017	940 / آب لب شور رومانیا، رومانی
خیلی بزرگ	MSF	1/13	2011	459146/ آب دریا Shuweihat امارات	0/57	2009	880 هزار/ آب دریا Shoaiba عربستان
	MED	1/6	2012	54552/ آب دریا Yanbu عربستان	0/6	2010	454200/ آب دریا Al Fujairah امارات
	ED	---	---	---	0/26	2008	200 هزار/ آب لب شور Abera اسپانیا

جدول شماره 2- قیمت های جهانی حداقل و حداکثر بر اساس فناوری بکار گرفته شده

حداکثر قیمت جهانی آب در واحدهای با مقیاس خیلی بزرگ با استفاده از روش MSF معادل 1/3 دلار به ازای هر متر مکعب و در واحدهای MED برابر با 1/3 دلار به ازای هر متر مکعب بوده است (شکل 10). این

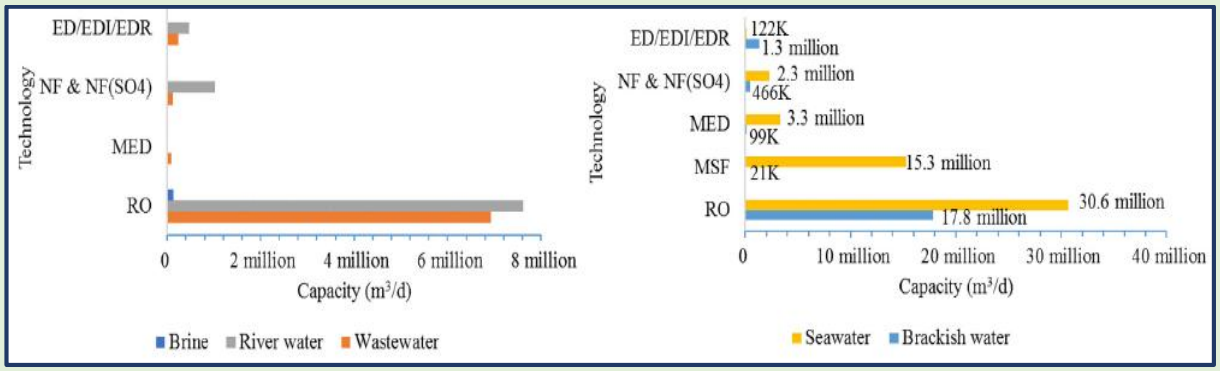
قیمت ها کمتر از مقادیر حداکثر قیمت جهانی گزارش شده برای نمک زدائی به روش RO است که برای واحدهای خیلی بزرگ 2/46، واحدهای بزرگ 0/9 و واحدهای متوسط 1/95 دلار به ازای تولید هر متر مکعب آب می باشد. بر اساس تجزیه و تحلیل های انجام گرفته، ظرفیت واحد شیرین سازی تاثیری بر قیمت تمام شده تولید آب ندارد. این تجزیه و تحلیل همچنین نشان میدهد که بر اساس حداقل و حداکثر میزان قیمت های جهانی گزارش شده تولید آب در واحدهای بزرگ قیمت تولید آب به روش MSF ارزان تر از روش MED است. واحدهای نمک زدائی که در آنها این مقادیر گزارش شده اند در جدول شماره 2 نشان داده شده است. تفاوت در قیمت های تمام شده میتواند بدلیل پیشرفت های حاصله در تکنولوژیهای بکار گرفته شده در نقاط خاصی از جهان باشد که سبب کاهش رسوب گذاری، خوردگی و هزینه انرژی مصرفی شده است (ضرورت رسیدن به درجه حرارت بالا در روش MSF). پائین ترین قیمت جهانی تولید آب در واحدهایی با مقیاس خیلی بزرگ و در مقایسه با روشهای RO، MSF و MED در بکارگیری روش ED مشاهده شده است که برابر با 0/26 دلار به ازای تولید هر متر مکعب آب شیرین بوده است. این واحد نمک زدائی، در زمینه شیرین سازی آب لب شور در Abrera کشور اسپانیا فعالیت داشه و ظرفیت تولید آن 200 هزار مترمکعب در شبانه روز است.

در هر حال این بررسی در مورد قیمت آب تولیدی در 107 واحد شیرین سازی صورت گرفته و شامل تمامی واحد ها نیست. بعلاوه برخی از داده های تقریبا غیر منطقی نیز در داده ها وجود دارند. قیمت بسیار پائین نمک زدائی و تولید آب شیرین در یک آب شیرین کن خیلی بزرگ به نام Changi NEWater با استفاده از روش اسمز معکوس در کشور سنگاپور، 0/21 دلار به ازای تولید هر متر مکعب آب گزارش شده است که روزانه 228 هزار متر مکعب آب تولید می نماید. دلیل قیمت بسیار پائین این واحد استفاده از فاضلاب برای تولید آب قابل مصرف می باشد. همچنین قیمت خیلی بالای 5/17 دلار به ازای تولید هر متر مکعب آب در آب شیرین کن خیلی بزرگ Victorian در کشور استرالیا گزارش شده است که نسبت به تولید 447 هزار متر مکعب آب در شبانه روز با استفاده از آب دریا اقدام می نماید. دلیل قیمت بالای تولید در این واحد، هزینه سرمایه گذاری بالا در این کشور است. بنابراین، جدای از فناوری به کار رفته در احداث هر واحد نمک زدائی، هزینه های تولید به عوامل دیگری از جمله هزینه احداث زیرساخت ها و هزینه های سرمایه ای، محل ساخت واحد نمک زدائی، کیفیت منبع آب مورد استفاده و آب نهایی تولید شده، منبع یا منابع انرژی و قیمت های آنها، ماهیت و شرایط آبگیری و خروج پساب، الزامات کنترلی و نظارتی و برخی از عوامل دیگر بستگی دارد.

2-2-3-تکنولوژی های رایج مورد استفاده در شیرین سازی

از تمام روش های نمک زدایی به کار گرفته شده برای شیرین سازی آب از منابع مختلف اعم از دریا، آب لب شور، رودخانه ها و غیرو استفاده از فناوری RO از اصلی ترین فن آوریهای بکار گرفته شده در این صنعت است و بیانگر این واقعیت است که در حال حاضر روش اسمز معکوس به خوبی توسعه یافته است. شکل 11سهم روشهای مختلف شیرین سازی را با استفاده از منابع مختلف آبی نشان میدهد. مقدار زیادی از آب

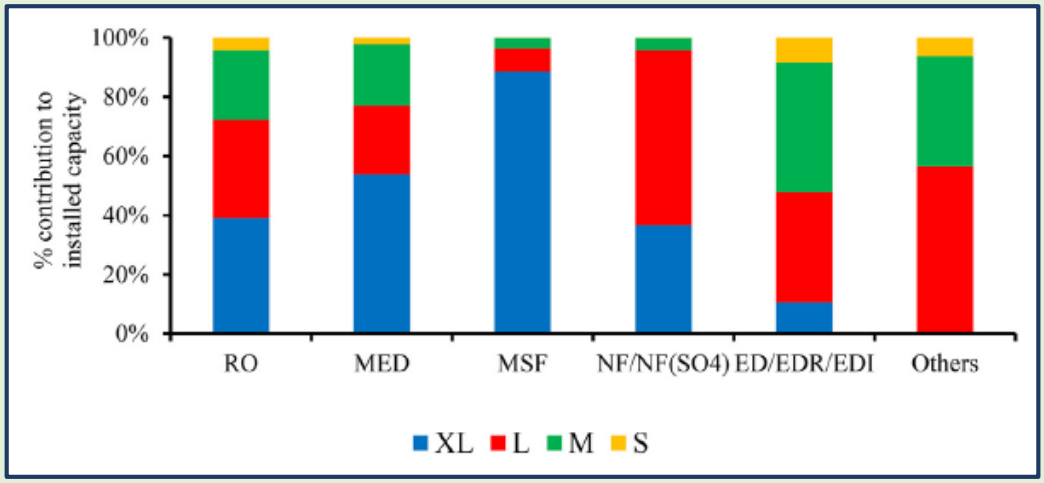
شیرین تولید شده در جهان با استفاده از روش RO نمک زدائی شده و این روش با تولید روزانه 30/6 میلیون متر مکعب آب شیرین با استفاده از آب دریا و 17/8 میلیون متر مکعب تولید روزانه با استفاده از آبهای لب شور(جمعا 48/4 میلیون متر مکعب در شبانه روز) غالب ترین روش شیرین سازی آب در جهان می باشد. روش MSF تکنولوژی رایج دیگری است که پس از اسمز معکوس در رتبه دوم قرار دارد. آب دریا همچنین از منابع اصلی آب مورد استفاده در آب شیرین کن هایی با فناوریMSF است که ظرفیتی معادل 15/3 میلیون متر مکعب تولید در شبانه روز را به خود اختصاص داده است. حدود 3/3 میلیون متر مکعب تولید در شبانه روز با استفاده از روشMED و همچنین حدود 2/3 میلیون متر مکعب تولید آب شیرین با استفاده از روش NF & NF (SO4) صورت می گیرد. در عین حال روشهای ED/EDI/EDR با منبع تغذیه از آب دریا ، تولید حدود 122 هزار متر مکعب آب شیرین در شبانه روز را بر عهده دارند. زیرا روش ED هنوز به عنوان یک روش بالغ و جا افتاده برای نمک زدائی به حساب نمی آید. دلیل اصلی استفاده از روش RO برای شیرین سازی آب دریا یا آبهای لب شور میزان انرژی کم مورد نیاز در این تکنولوژی در مقایسه با انرژی مصرفی در سایر روش ها است، بطوریکه در روش RO انرژی مصرفی برای شیرین سازی آب دریا معادل3-4 کیلو وات ساعت بر متر مکعب (kWh/m3) و شیرین سازی آب لب شور 2/5 تا 0/5 کیلو وات ساعت بر متر مکعب است که این مقادیر پائین تر از انرژی مورد نیاز در سایر روشهای نمک زدائی است. بطوریکه انرژی مورد نیاز برای تولید هر متر مکعب آب شیرین در روشMSF معادل 16-10 و در روش MED حدود 9-5/5 کیلووات ساعت بر متر مکعب است. بنابراین در صورت یکسان بودن سایر عوامل، قیمت تولید آب شیرین به روش RO از روشهای MSF و MED ارزان تر خواهد بود.



شکل شماره 11-(سمت راست)فن آوری های اصلی به کار رفته در واحدهای نمک زدایی برای تصفیه منابع مختلف آب . (سمت چپ) منابع آب نمک زدایی شامل آب دریا و آب شور و رودخانه ها

یکی دیگر از ویژگی های جذاب استفاده از روش RO ، امکان مدیریت و نمک زدائی مجدد آب با شوری بسیار بالا و به عبارتی غلیظ یا همان شورابه واحدهای شیرین سازی است که در حال حاضر ظرفیتی حدود 129336 متر مکعب در شبانه روز را به خود اختصاص داده است، بطوریکه این میزان بسیار بالاتر از سایر روشها یا روشهای ترکیبی مورد استفاده برای نمک زدائی آبهای با شوری بالا می باشد (شکل 11). با این حال اگرچه به نظر میرسد استفاده از سیستم RO دارای مزیت های اقتصادی در مقایسه با سایر روشها دارد، اما محدویت

ناشی از رسوبگذاری بر روی ممبران ها به عنوان یک چالش بزرگ به حساب می آید. در منطقه خاورمیانه هنوز اعتقاد زیادی به استفاده از روش حرارتی و تقطیر وجود دارد، بطوریکه نیمی از تولیدات آب شیرین این منطقه با استفاده از این روش تولید میگردد. دلیل اصلی این موضوع صرفا رسوبگذاری بر روی سیستم ممبران در روش RO است که ناشی از شوری بسیار بالا در دریای سرخ و خلیج فارس است. هزینه جایگزین نمودن ممبران ها بویژه در نمک زدائی آبهایی با شوری بالا و بازیافت آب از شورابه حاصل از فعالیت آب شیرین کن ، تاثیر بسیار در بالا رفتن هزینه عملیاتی در سیستم اسمز معکوس دارد [47]. اما اخیرا واحدهای نمک زدائی که در حال حاضر در منطقه در حال احداث هستند عمدتا به استفاده از سیستم RO روی آورده اند که دلیل اصلی آن دستیابی به پیشرفتهایی در زمینه پاکسازی ممبران ها می باشد.



شکل شماره 11 (ج)- سهم واحدهای نصب شده بر حسب فناوری مورد استفاده

همان گونه که انتظار می رود بیشترین مقدار نمک زدائی و تولید آب شیرین در جهان توسط واحدهای نمک زدائی با مقیاس خیلی بزرگ و با استفاده از روشهای غالبRO، MSF و MED انجام میگیرد (شکل 11). واحدهای نمک زدائی نصب شده در جهان در مقیاس خیلی بزرگ حدود 39٪ ظرفیت تولید آب شیرین را به خود اختصاص داده اند، در حالی که این ظرفیت برای واحدهای بزرگ 33٪، واحدهای متوسط 24٪ و برای واحدهای کوچک تنها 4٪ می باشد. همچنین حدود 89٪ واحدهای MSF و حدود 54٪ واحدهای MED را واحدهای نمک زدائی خیلی بزرگ تشکیل می دهند. دلیل اصلی این موضوع این است که در اغلب این واحدهای نمک زدائی منبع اصلی تغذیه یا آب اولیه دریافتی از دریا می باشد و لذا اغلب در مقیاس بزرگی ساخته شده اند تا هزینه های مربوط به سرمایه گذاریهای کلان با تولید آب زیاد توجیه داشته و مستهلک گردد. اما واحدهای نمک زدائی احداث شده با استفاده از روش NF بیشتر در مقیاس بزرگ و با استفاده از روش ED عمدتا در ابعاد متوسط بوده اند. واحدهای نمک زدائی بزرگ مبتنی بر روش NF حدود 59٪ و واحدهای نمک زدائی متوسط مبتنی بر روش ED حدود 44٪ از ظرفیت نصب شده آب شیرین کن های جهان را به خود اختصاص می دهند که دلیل این امر، استفاده این واحدها از آب لب شور برای شیرین سازی است و لذا با استفاده از این منبع اولیه تهیه آب نیازی به فشار اسمزی بالا در روش NF و نیازهای به انرژی

الکتریکی بالا در روش ED نداشته و نهایتا صرفه جویی لازم در هزینه ها بعمل می آید. بنابراین، لازم است آب مورد استفاده در سیستم RO قبلا در واحدهای پیش تصفیه، از مواد معلق عاری شود تا از رسوبگذاری در غشاء جلوگیری بعمل آمده و از مشکلات مربوط به آن که سبب افزایش هزینه ها میگردد جلوگیری بعمل آید. از روشهای پیش تصفیه مورد استفاده متداول در سیستمهای اسمز معکوس استفاده از UF یا Ultra Filtration ، شناور سازی با هوای محلول ((Dissolved Air Flotation (DAF) ، لایه فیلتراسیون MF و فیلتراسیون دو لایه ((Dual Media Filter (DMF) است(جدول 3).

سیستم	ظرفیت متر مکعب/ روز	سیستم پیش تصفیه
UF	**10،178،509**	**به صورت مستقل یا همراه با لخته سازی انعقادی، DAF، DMF، MF، جلوگیری از رسوب، فیلتراسیون شنی تک مرحله ای،اسیدی شدن، ته نشینی، یا ضد عفونی**
DAF	**5،265،871**	**به صورت مستقل یا همراه با لخته سازی انعقادی، DMF، UF، MF، فیلتراسیون چند لایه (MMF)، یا فیلتر شنی تک مرحله ای.**
DMF	**5،265،368**	**به صورت مستقل یا همراه با انعقاد-لخته سازی، ته نشینی، DAF، UF، MF، یا فیلتراسیون شنی دو مرحله ای، اسیدی کردن، یا مهار ضد پوسته پوسته شدن**
MF	**2،634،964**	**به صورت مستقل یا همراه با لخته سازی، DAF، DMF، مهار ضد رسوب، فیلتراسیون شنی تک مرحله ای، اسیدی شدن،ته نشینی یا گندزدایی**
فیلتراسیون شنی	**1،046،195**	**به صورت تک مرحله ای یا دو مرحله ای مستقل یا همراه با لخته سازی، مهار ضد جرم گیری، ته نشینی، اسیدی کردن، DMF، UF، MF، MMF، یا ضد عفونی.**

جدول شماره 3- روشهای پیش تصفیه در سیستمهای اسمز معکوس کنونی و ظرفیت تجمعی این روشها

با استفاده از روشهای فیلتراسیون فوق به عنوان پیش تصفیه، استفاده از سیستم RO ظرفیت و سهم بیشتری از نمک زدائی را در مقایسه با سایر سیستمها دارد. امروز ممبران های UF Seaguard کاربرد بیشتری دارند. ورقهای تخت سرامیک جایگزین GE Zeeweed، HydraCap60 UF و Seaflex UF نیز وجود دارند. برخی دیگر از غشاها شامل ماژول های dizzer XL ، غشاهای UF ZW1000، غشاهای سرامیکی UF جایگزین مدلهای Memcor CMF-S وKristal 672 UF شده اند. در واقع سیستم شناورسازی با هوای محلول (DAF) برای حذف رسوبات زیستی شامل ذرات معلق و جلبک ها می باشد. واحدهای پیش تصفیه DAF ، عمدتا توسط شرکتهای Pentair X-flow، Hyflux و Suez ایجاد می شوند. در حال حاضر اغلب روش های بکار گرفته شده در پیش تصفیه جهت نمک زدائی، ترکیبی از چند فناوری هستند و معمولا کمتر از یک فناوری جهت دستیابی به این هدف استفاده میشود(جدول شماره 3). استفاده از روشهای ترکیبی بویژه زمانی که آب مورد استفاده حاوی مقدار زیادی از ذرات معلق از جمله گل و لای، جلبک و جامدات ریز می باشد، مورد نیاز است. در اطلاعات حاضر داده های مربوط به پیش تصفیه در روش هایMSF و MED موجود نیستند، بنابراین در تجزیه و تحلیل نقشی نداشته اند. بعلاوه داده های موجود در خصوص پیش تصفیه

سیستم اسمز معکوس نیز کامل نمی باشد. همچنین تکنولوژیهای بکار گرفته شده در قسمت پیش تصفیه واحدهای نمک زدائی خیلی بزرگ و بزرگ در خاورمیانه و شمال افریقا در این داده ها وجود ندارند.

علاوه بر فیلتراسیون غشایی، DMF یکی از فناوری های مهم پیش تصفیه قبل از طی مراحل نمک زدایی می باشد [48-50]. در واقع، DMF به عنوان وسیع ترین فن آوری پیش تصفیه است که بطور سنتی در نمک زدایی آب دریا مورد استفاده قرار میگیرد و عموما ذرات فیلترهای آن بستری طبیعی دارند [49]. زمان معرفی DMF و سایر فن آوری های پیش تصفیه برای استفاده در سیستم RO، در جدول 4 نشان داده شده است. ماسه و زغال سنگ آنتراسیت دو گرانول اصلی هستند که صورت سنتی در فیلتراسیون پیش تصفیه بصورت انفرادی و یا دو لایه مورد استفاده قرار میگیرند. پس از جدا سازی آشغالها از آب ورودی از دریا (که پیش تصفیه اولیه را تشکیل می دهد) و پس از طی مراحل انعقاد و لخته سازی، DMF یا فیلتر دو لایه (معمولا DMF تک مرحله ای و مرکب از آنتراسیت و ماسه است) مراحل فیلتر کارتریج به طور سنتی جهت کاهش رسوبات و کدورت به عنوان پیش تصفیه مورد استفاده قرار میگیرند[50]. قبل از DMF، نمک های آهن برای انعقاد و لخته سازی ذرات کلوئیدی و مواد آلی محلول در آب اولیه، به سیستم اضافه می شوند. همچنین تزریق اسید سولفوریک برای تامین pH مناسب و بهبود عملکرد انعقاد صورت میگیرد.

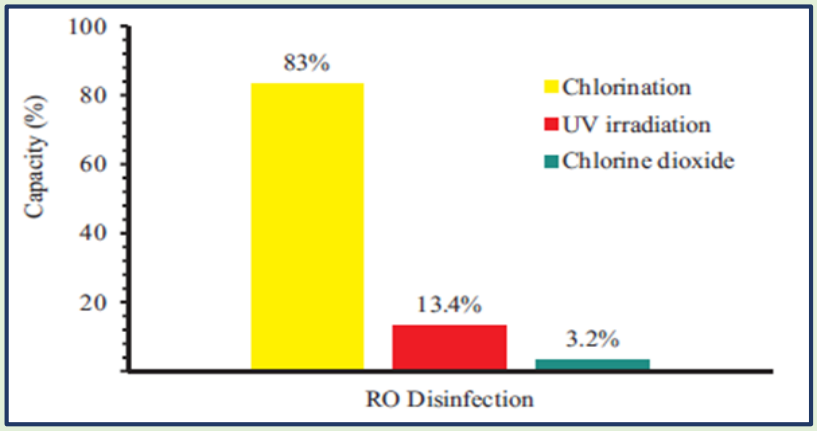
روشهای پیش تصفیه رایج در سیستم اسمز معکوس	سال معرفی	مرجع
DMF	1979	51
Electrocoagulation	1987	52
MF	اواسط دهه 2000	53
UF	اواسط دهه 2000	54
Thin film nanocomposite membranes	در حال ارائه	55
Fiber media filtration	در حال ارائه	56
Fiber media filtration	در حال ارائه	56
Ceramic membranes	در حال ارائه	56

جدول شماره 4- جدول معرفی روشهای پیش تصفیه

آب مورد تغذیه RO با ضد عفونی کردن، پیش تصفیه می شود. کلرزنی روش غالب ضد عفونی، در واحدهای نمک دائی است (شکل 12). این موضوع به دلیل مقرون به صرفه بودن و کارایی کلر می باشد. GWI داده های مربوط به مواد و روشهای ضد عفونی مورد استفاده در بسیاری واحدهای نمک زدایی ها را ارائه نداده است، اما با توجه به داده های محدود ارائه شده، کلرزنی به عنوان یک روش ضد عفونی در 83/4٪ از واحدهای آب شیرین کن مورد استفاده قرار میگیرد که مقداری بالغ بر4/6 میلیون مترمکعب را شامل میگردد. استفاده از دی اکسید کلر و تابش اشعه ماوراء بنفش از سایر روش های رایج ضد عفونی در واحدهای نمک زدائی است.

به غیر از روشـــهای RO ، MSF وMED، ســـایر فناوری ها از جمله MD، فن آوری های EDR، FO ، نمک زدائی به روش انجماد(FR) و تکنولوژیهای ترکیبی در واحدهای نمک‌زدایی مورد اســـتفاده دارند. برای

درک صحیح، سهم این فناوریها در واحدهای نصب شده در جدول شماره 5 نشان داده است. فناوریهای نوظهور در خصوص نمک زدائی در کمتر از 1٪ ظرفیت تولید نقش دارند اما پتانسیل بالای برای بکارگیری آنها در فرایندهای با تولید پساب یا شورابه صفر وجود دارد. بکارگیری و هیبرید نمودن این تکنولوژیها امکان افزایش بازیافت آب (تصفیه مجدد شورابه در سیستم) و کاهش مصرف انرژی را فراهم می نماید. EDR در حال حاضر در واحدهایی که از آب لب شور و آب دریا برای تغذیه استفاده می کنند کاربرد دارد که ظرفیت آنها به ترتیب 16320 مترمکعب و 1892 مترمکعب در روز می باشد. واحدهای شیرین سازی EDR آب لب شور عمدتا در ایالات متحده آمریکا واقع شده اند در حالی که بزرگترین واحد EDR از آب دریا در سنگاپور واقع شده است. مورد استفاده این روش عمدتا برای شیرین سازی آب لب شور است و دلیل آن دسترسی راحت تر به آبهای داخلی لب شور با سطح شوری کمتر است که نیاز به برق مصرفی کمتری در مقایسه با شیرین سازی آب دریا دارد. در هر حال به نظر می رسد سیستم EDR پتانسیل بیشتری برای شیرین سازی آبهای لب شور و رودخانه ها در مقایسه با آب دریا دارد.



شکل شماره 12- روشهای اصلی ضدعفونی کردن در سیستمهای اسمز معکوس

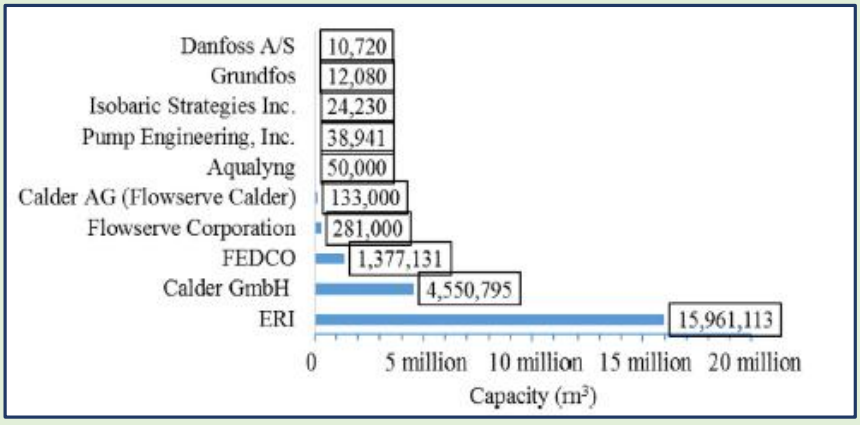
MD یک فناوری رو به توسعه در فرایند نمک‌زدایی است که ترکیبی از روشهای تقطیر و اسمزی بوده و در حال حاضر منبع اصلی تغذیه آن آب دریا می باشد. در حال حاضر ظرفیت تجمعی این واحد ها تنها 2560 متر مکعب در شبانه روز است و این واحدها در کشورهای سنگاپور و مالدیوز قرار دارند. که میتوان به سایت های نمک زدائی Singapore's Jurong Island با ظرفیت نصب شده 2400 و Senoko با ظرفیت نصب شده 50 متر مکعب در شبانه روز در کشور سنگاپور 'Kunfunadhoo Island Maldivesبا ظرفیت 100 متر مکعب و Gulhi با ظرفیت 10 متر مکعب در روز در کشور مالدیوز اشاره نمود. در میان فناوریهای موجود روش FO برای تصفیه شورابه و یا پساب مناسب است و در حال حاضر به دلیل استفاده از آن برای بازیافت شورابه حاصل از دیگر روشهای نمک‌زدایی، در حال گسترش است[57] . بزرگترین واحد نمک زدایی با استفاده از روش FO با ظرفیت 2800 متر مکعب تولید در شبانه روز در کشور چین قرار دارد. واحدهای FO در کشورهای عمان، هند و امارات متحده عربی نیز توسعه یافته اند.

آب مورد تغذیه	ظرفیت تجمعی بر حسب مترمکعب در شبانه روز				
	MD	FO	EDR	Hybrid	FR
آب لب شور	0	0	16320	16320	0
پساب	0	2014	9485	4900	5938
آب رودخانه	0	0	25430	0	0
آب دریا	2560	150	1892	0	0
شورابه	0	3600	0	0	0

جدول شماره 5-ظرفیت تجمعی آب شیرین کن ها بر حسب متر مکعب تولید در شبانه روز و بر اساس روشهای در حال ظهور و منبع تغذیه واحد

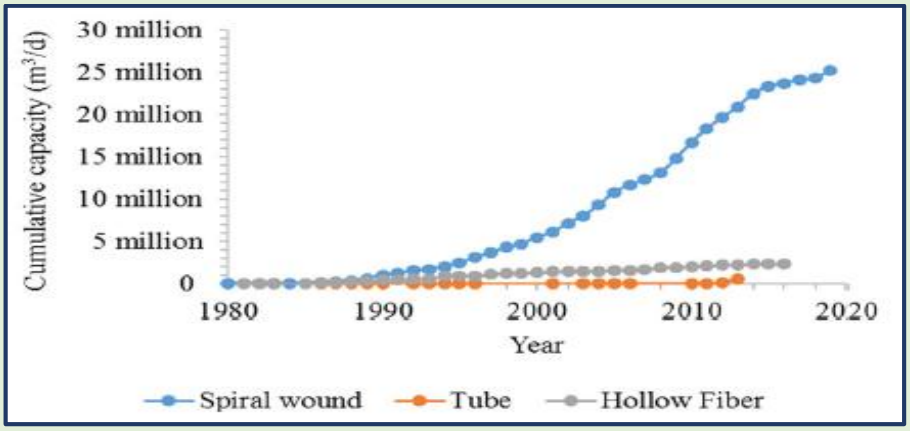
3-2-3- تجهیزات بازیافت انرژی ERD و غشاهای رایج مورد استفاده

انتظار می‌رود که فناوری‌های نوظهور مکمل تجهیزات دستگاه های بازیافت انرژی در آب شیرین کن های معمولی باشند. این دستگاه ها برای بازیافت و استفاده از انرژی فشار سیالات، مانند فشار موجود در جریان شورابه در سیستم نصب میگردند. تامین کنندگان تجهیزات بازیافت انرژی در فرایند نمک زدائی و ظرفیت تجمعی نصب شده آنها در شکل 13 نشان داده شده است. مبدل های فشار متداول ترین دستگاه های بازیابی انرژی و به دنبال آن شارژ کنندهای توربو هستند. سایر دستگاه های رایج بازیافت انرژی نصب شده در فرایند نمک زدایی شامل توربین Pelton، مبدل های کاری و توربین Francis است. کم استفاده ترین تجهیزات بازیافت انرژی در بین تجهیزات عمومی موجود، نوع بادی آن است. دستگاههای بازیافت انرژی شامل تجهیزات تبادل فشار، توربو شارژرها و توربین پلتون هستند که توسط شرکت Energy Recovery Inc عرضه می شوند. شرکت ERI و همکارانش در حال حاضر تلاش میکنند که به بالاترین ظرفیت نمک زدائی در جهان دست یابند. این تجهیزات در واحدهای نمک دائی با ظرفیت ترکیبی (نصب شده) بیش از 15/9 میلیون متر مکعب در روز استفاده می شوند، در حالی که بر اساس داده های GWI، دستگاه های بازیافت انرژی در 344 واحد نمک زدائی در این بررسی در نظر گرفته شده است (شکل شماره 13).



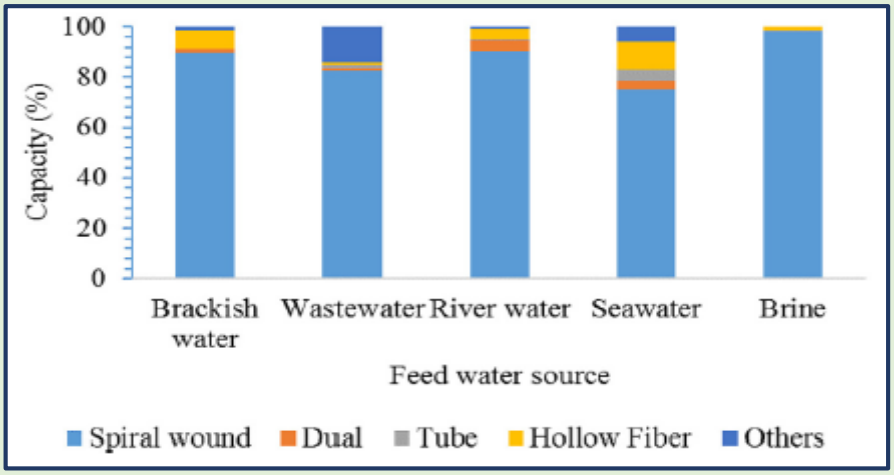
شکل شماره 13- تامین کنندگان دستگاه های بازیافت انرژی در واحدهای آب شیرین کن و سهم فعلی آنها در نمک زدایی

کیفیت دستگاههای بازیافت انرژی به نوع غشا مورد استفاده در فرآیند نمک زدایی بستگی دارد. متداول ترین ممبران های مورد استفاده شامل نوع مارپیچ ، فیبر توخالی، مارپیچ با دو لایه متفاوت / فیبر توخالی، مارپیچ با دو لایه متفاوت /مسطح و نوع لوله ای می باشند. غشاهای مارپیچ حدود 87٪ ، غشاهایی از نوع فیبر توخالی حدود 10٪ و انواع غشاهای دیگر حدود 3٪ از انواع غشاهای مورد استفاده در آب شیرین کن ها را به خود اختصاص می دهند. در حال حاضر بکارگیری ممبران های مارپیچی با سرعت بیشتری در حال گسترش است بطوریکه در دهه گذشته حدود 50٪ از ظرفیت نصب شده را به خود اختصاص داده است. در هر حال اطلاعات مربوط به 7741 واحد نمک زدائی در داده های GWI ارائه شده است. متداول ترین انواع غشاء (ممبران) بکار رفته در فن آوری های نمک زدایی را در طی پانزده سال در شکل 14 نشان داده شده است. اما انتظار می‌رود ظرفیت‌های واقعی بالاتر از ظرفیت‌های نشان‌داده‌شده در این نمودار باشد.



شکل شماره 14- انواع ممبران های بکار رفته در واحدهای آب شیرین کن و سهم آنها در نمک زدائی

جای تعجب نیست که ممبران های مارپیچی بیشترین استفاده را دارند، زیرا این ممبران ها در کلیه واحدها که از آبهای متفاوتی از جمله آب دریا، آب لب شور، آب رودخانه، شورابه و پساب تغذیه میکنند کاربرد دارد. طراحی و پیکربندی ممبران های مارپیچ طوری است که این غشاها در مقایسه با غشاهای دیگر، امکان نمک زدائی را با استفاده از تمامی منابع تغذیه ای را دارند (شکل 15). پس از ممبران های مارپیچ، نوع غشاهای فیبر توخالی و پس از آن غشاهای دولایه یا همان دو گانه است. بنابراین انواع غشاهای مارپیچ و فیبر توخالی هنوز هم نسبت به سایر غشاها ترجیح داده می شوند. دلیل ارجحیت غشاهای SWM مارپیچ، وجود سطح زیاد و فعال ممبرانها، دوام و مقاومت آنها در برابر فشار و عمر بالای آنها می باشد. غشاهای عرضه شده توسط Toray Industries, Inc. بیشترین سهم در ممبران های عرضه و نصب شده در جهان را دارند. ممبران های عرضه شده توسط Toray Industries و شرکای آن (Nitto Denko، Dupont و دیگران) عمدتاً در واحدهای نمک زدائی RO، ED/EDI وNF استفاده می شوند. همچنین غشاهای عرضه شده توسط Dow FilmTec، Hydranautics و Pentair نیز به لحاظ استفاده در آب شیرین کن های فعلی از غشاهای ممتاز و خوبی به حساب می آیند.



شکل شماره 15- درصد انواع غشای بکار برده شده در شیرین سازی منابع آبی مختلف

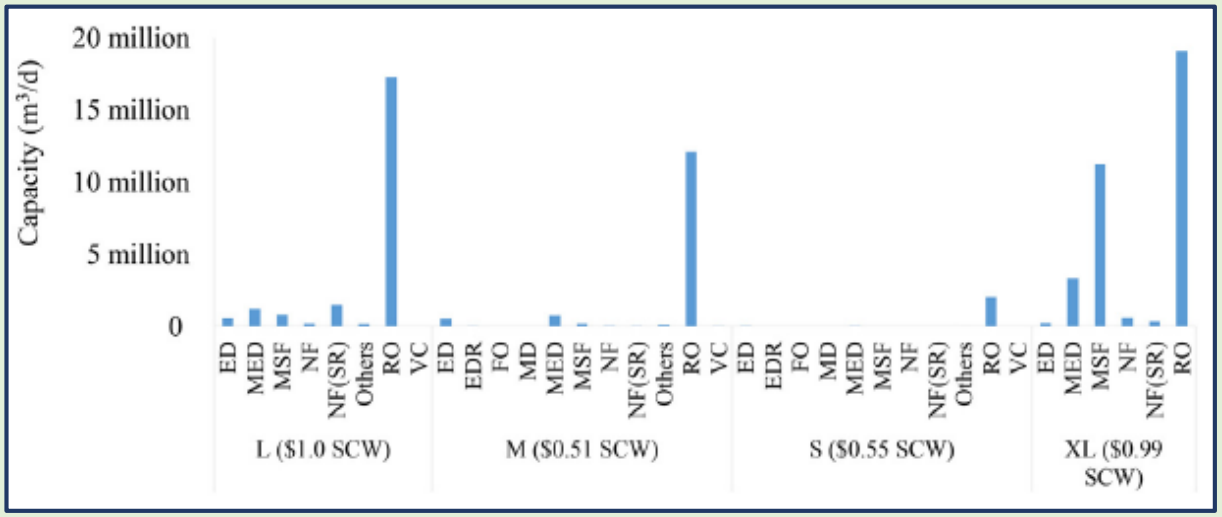
3-3-شاخص های اقتصادی در واحدهای نمک زدائی فعلی

اصلی ترین شاخص اقتصادی در آب شیرین کن ها، هزینه تولید آب است. این هزینه با توجه به حجم تولید و اندازه واحد های آب شیرین کن متفاوت است. از سایر شاخص های مهم اقتصادی میتوان به بازگشت سرمایه و سودآوری اشاره نمود. امروزه، برخلاف قواعد سنتی اقتصاد مرتبط با مقیاس واحد، هزینه تولید آب در واحدهای شیرین سازی در مقیاس بزرگ نسبت به واحدهای کوچکتر بیشتر می باشد. بر اساس تجزیه و تحلیل داده های GWI در سال 2017، میانگین هزینه های تولید آب شیرین (SCW) در واحدهای با مقیاس کوچک 0/55 و در مقیاس متوسط 0/51 دلار امریکا محاسبه شده است (شکل 16 الف). هزینه تولید در سایت های نمک زدائی بزرگ 1 دلار و در واحدهای خیلی بزرگ 0/99 دلار امریکا محاسبه شده است. وجود این روند به دلیل سرمایه بر بودن آب شیرین کن های امروزی می باشد و هزینه سرمایه گذاری در زیر ساخت ها، بخش قابل توجهی از هزینه های کا را به خود اختصاص می دهند.

هزینه های سرمایه ای عمدتاً ناشی از طراحی کارخانه، ساخت پیش تصفیه، انواع کارهای عمرانی، پمپ ها، خدمات حقوقی و حرفه ای، خدمات نصب، ممبران ها و محفظه های تحت فشار مربوطه، مخازن تحت فشار، لوله کشی با آلیاژ مناسب و با درجه بالا، سیستم مخزن ورودی آب، سیستم و مخزن خروجی آب و دستگاه بازیابی انرژی می باشند که با توجه به تحلیل و محاسبات انجام شده بر اساس داده های به دست آمده از Desaldata، هزینه سرمایه ای مذکور حدود 52٪ کل هزینه نمک زدائی را شامل میگردد (شکل شماره 16ب). این اطلاعات بر مبنای اطلاعات یک واحد مشخص در کشور امارات با مشخصات زیر بوده است.

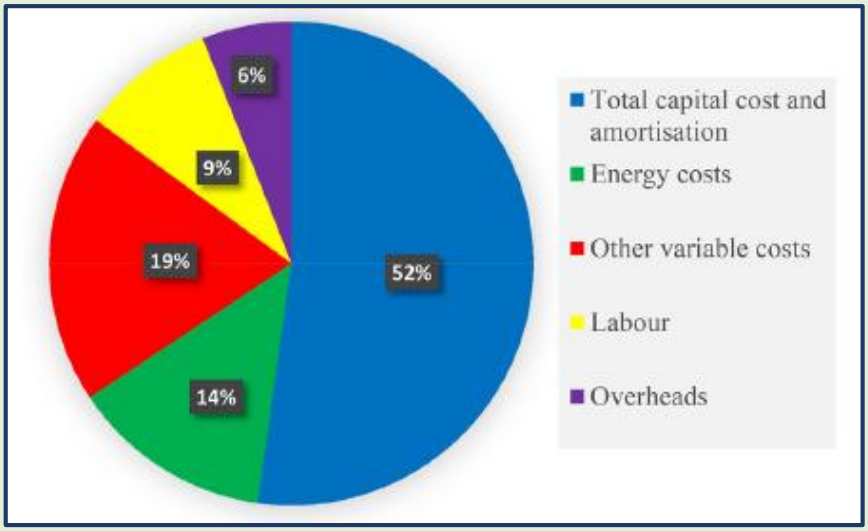
ظرفیت این واحد آب شیرین کن که با استفاده از روش RO احداث گردیده، با 150 هزار متر مکعب ظرفیت تولید در شبانه روز، با ورودی و خروجی معمولی، با منبع تغذیه آب دریا با شوری 35 گرم در لیتر، و دمای آب حداقل 15 و حداکثر 38 درجه سانتیگراد، دارای واحد پیش تصفیه قوی، 25٪ Second pass، تزریق مواد معدنی مورد نیاز، نرخ بهره وری 95٪ ، مصرف انرژی 3/5 کیلووات ساعت بر متر مکعب، قیمت برق

0/025 دلار بر کیلووات ساعت، نرخ سود 6 درصد ،12 درصد سود سهام، بازپرداخت 20 ساله وام و نسبت بدهی به حقوق صاحبان سهام ٪ 75 درصد می باشد. هزینه های عملیاتی برای این مورد خاص 48 درصد از کل هزینه تولید آب شیرین را شامل میگردد. به عبارتی هزینه های مرتبط با قطعات یدکی، مواد شیمیایی، نیروی کار، جایگزینی ممبران ها، انرژی الکتریکی و هزینه های سربار از جمله هزینه های عملیاتی مرتبط می باشند. با این حال، این مقادیر ثابت نبوده و بسته به شرایط خاص، کشور و محل سایت، مصرف انرژی (SEC) در فرایند نمک زدائی، حتی در زمانی که سایر عوامل ثابت نگه داشته شوند، میتوانند قیمت تمام شده را تغییر دهند. SEC انرژی مصرف شده در واحد تولید آب یا همان هر متر مکعب آب است و بستگی به تکنولوژی بکار گرفته شده دارد. SEC اثر چند برابری بر کل انرژی مورد نیاز دارد و مرتبط با حجم کل تولید آب است. محل واحد شیرین سازی تاثیر زیادی بر هزینه برق داشته و بر کل هزینه برق مصرفی واحد نیز بسیار تاثیرگذار می باشد.



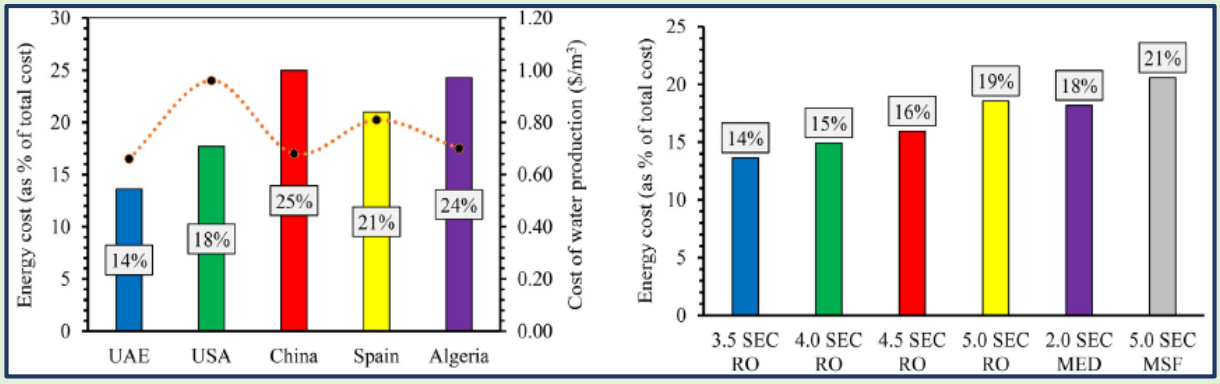
شکل شماره 16 الف- هزینه تولید آب شیرین بر اساس ظرفیت تولید و فناوری بکار گرفته شده

بنابراین، لازم است تجزیه و تحلیل حساسیت برای ارزیابی اثر تغییرات SEC در هزینه انرژی انجام شود. بطور مثال بر اساس نتایج حاصل از بررسی در سه سناریوی مختلف با استفاده از روش اسمز معکوس و با SEC های مختلف شامل مقادیر، 4 و 4/5 و 5 کیلووات ساعت بر متر مکعب ،MED با مقدار SEC متوسط دو کیلووات ساعت بر متر مکعب و در واحد MSF با مقدار متوسط 5 کیلووات ساعت بر متر مکعب محاسبه شده است. مشاهده می شود که هزینه انرژی وابستگی شدیدی به مقدار SEC و تکنولوژی به کار رفته دارد. به عبارتی با استفاده از سیستم RO، هزینه انرژی به عنوان درصدی از کل هزینه ها، با افزایش SEC از 3/5 به 4 و 4/5 و5 کیلو وات ساعت بر متر مکعب، میزان هزینه ها از 14٪ به 15٪، 16٪ و 19٪ افزایش می یابد (شکل 16 ج) . همچنین با استفاده از فناوریMED و MSF ، وقتی ارزش SEC 2 و 5 کیلووات ساعت بر متر مکعب باشد، هزینه انرژی به 18٪ و 21٪ افزایش می یابد. همانگونه که گفته شد مقادیر SEC درسیستم MED وMSF، فقط در خصوص مصرف انرژی الکتریکی خاص است.



شکل 16 ب- اجزای هزینه های سرمایه ای و میزان و تاثیر آن در کل هزینه های سرمایه ای

تجزیه و تحلیل دیگری برای ارزیابی اثر تغییر مکان نیروگاه بر هزینه انرژی انجام گرفت. بر اساس این تحلیل تغییر محل از امارات متحده عربی به کشورهای دیگر مناطق ، از جمله آمریکا، چین، اسپانیا و الجزایر. تاثیر زیادی بر هزینه انرژی دارد (شکل 16 د). این تأثیر به دلیل قیمت برق متفاوت در این کشورها است. قیمت واحد برق در امارات متحده عربی، همانطور که در پایگاه داده Desaldata ارائه شده است، 0/025 دلار در کیلووات ساعت است در حالی که قیمت واحد در هر یک از ایالات متحده آمریکا، چین، اسپانیا و الجزایر 0/05 دلار در کیلو وات بر ساعت است. لذا افزایش هزینه انرژی، به عنوان درصدی از کل هزینه ها، سبب افزایش آن از 14٪ در کشور امارات به 18٪ در کشور امریکا، به 25٪ در چین، به 21٪ در اسپانیا و ٪24 در کشور در الجزایر تحت شرایط عملیاتی یکسان میگردد. در این حال، هزینه تولید آب در کشور امارات 0/66، در کشور چین 0/68 و در کشور الجزایر 0/70 دلار به ازای هر متر مکعب آب محاسبه شده است در حالی که هزینه آب تولیدی برای کشور آمریکا بالاتر بوده و 0/96و در اسپانیا 0/81 دلار به ازای تولید هر مترمکعب آب شیرین بوده است که دلیل آن هزینه های بالای نیروی کار و هزینه های سربار در این کشورها می باشد.



شکل 16ج (سمت راست) میزان افزایش هزینه انرژی بر حسب هزینه کل انرژی بر اثر افزایش نرخ SEC در سیستمهای مختلف، (سمت چپ) میزان هزینه انرژی و هزینه آب در کشورهای مختلف

بنابراین، ایجاد واحدهای نمک زدایی بزرگ و خیلی بزرگ سرمایه بر بوده و هزینه های تولید بالاتری دارند که علت آن دلیل سهم بالای هزینه های سرمایه ای به هزینه تولید است (شکل 16 الف). بطوریکه در واحد آب شیرین کن در کشور امارات متحده عربی که منبع تامین آب آن از دریا می باشد، هزینه های سرمایه ای و زیر ساخت ها حدود 52٪ هزینه تولید آب را به خود اختصاص داده و هزینه های عملیاتی و بهره برداری ٪48 هزینه تولید آب را شامل میگردد (شکل 16 ب). این موضوع در مطالعات انجام گرفته در منطقه خاورمیانه و شمال افریقا (MENA) نیز مشاهده گردید[58]. در فناوریهای استفاده شده در منطقه MENA میانگین هزینه های سرمایه ای از میانگین هزینه های عملیاتی بالاتر می باشد (جدول 6). این بدان معناست که مطالعات انجام شده در طی سالهای گذشته بیشتر بر چگونگی کاهش هزینه های عملیاتی تمرکز داشته است و لازم است مطالعات و تحقیقات بیشتری بر روی کاهش هزینه های سرمایه ای صورت پذیرد.

فناوری نمک زدائی	میانگین هزینه سرمایه ای$/m3	میانگین هزینه عملیاتی$/m3	جمع هزینه ها $/m3
اسمز معکوس با آب دریای مدیترانه	0/63	0/35	0/98
روش ترکیبی اسمز معکوس و آب دریا	0/68	0/35	1/03
روش ترکیبی MSF/MED	0/92	0/23	1/15
اسمز معکوس با آب دریا خلیج فارس	0/71	0/64	1/35
اسمز معکوس با آب دریای سرخ	0/87	0/51	1/38
روش ترکیبی MED-TVC	1/25	0/14	1/39
MSF	1/18	0/26	1/44

جدول شماره 6- میانگین هزینه تولید آب در منطقه MENA با استفاده از روش های مختلف نمک زدائی

در این راستا لازم است تلاش‌های تحقیقاتی آینده بر بهینه‌سازی هر دو بعد هزینه های سرمایه و هزینه های عملیاتی تمرکز یابد، زیرا تحلیل ها نشان داده است که همه اجزای هزینه دارای اهمیت مربوط به خود هستند. به لحاظ تئوری، با افزایش ظرفیت واحد نمک زدائی باید SEC کاهش یابد که این موضوع قبلا توسط KIM و همکارانش اشاره شده بود [59]. این کاهش بیشتر در واحدهای نمک زدائی با ظرفیت کمتر از 100 هزار متر مکعب در شبانه روز مشاهده شده است. اما سایت های بزرگ که کار نمک زدائی را با استفاده از آب دریا انجام میدهند دارای کارائی انرژی بالایی نیستند و علت آن استفاده از ایستگاههای پمپاژ متعدد است. ظرفیت ایستگاههای پمپاژ در مقایسه با تاثیر سیستم مورد استفاده در شیرین سازی آب دریا، تاثیر بیشتری بر راندمان پمپ ها دارد. بنابراین مصرف انرژی می تواند به دلیل ظرفیت محدود پمپ ها افزایش یافته و منجر به افزایش تعداد پمپ های مورد نیاز در سیستم اسمز معکوس شود. احداث واحدهای نمک زدائی بزرگ آب شیرین کن با استفاده از آب دریا همراه با کارآمدی در انرژی و کاهش SEC ، نیازمند پمپ های بزرگتر و با ظرفیت بالا می باشد. بدین منظور در حال حاضر استفاده از پمپ هایی با فشار بالا، در واحدهای نمک زدائی خیلی بزرگ

و بزرگ در حال افزایش است. در طراحی های مرتبط، مکان پمپ های با فشار بالا (HPP) ، بوستر پمپ (BP) و دستگاههای بازیافت انرژی (ERD) در ردیف های میانی(Train) سیستم اسمز معکوس در نظر گرفته می شوند. عملیات شامل تحت فشار قراردادن آب مورد استفاده در ردیف های میانی سیستم است که در نتیجه آن، راندمان پمپ ها در مقایسه با شرایط معمولی افزایش می یابد. در سالهای اخیر شرکت IDE ، فناوری هایی را با استفاده از درجه حرارت پائین برای نمک زدائی (Ltd) آب دریا در مقیاس بزرگ استفاده نموده و با قرار دادن پمپ ها در ردیف های میانی راندمان پمپ ها را افزایش داده است که میتوان به واحدهای نمک زدائی Ashkelon [60]، Hadera [61] وSorek [62] اشاره کرد.

با این وجود استفاده از سیستم اسمز معکوس در واحدهایی با ابعاد مختلف، هنوز هم استفاده از این روش ، بیشترین سهم از کل ظرفیت تولید آب شیرین در سطح جهان را به خود اختصاص داده است. در مجموع تولید 19 میلیون متر مکعب آب شیرین در شبانه روز در واحدهای خیلی بزرگ، 17/3 میلیون متر مکعب آب در واحدهای بزرگ، 12/1 میلیون متر مکعب آب در واحدهای متوسط و 2 میلیون متر مکعب آب در واحدهای کوچک، با استفاده از فناوری سیستم اسمز معکوس صورت میگیرد (در مجموع 50/4 میلیون متر مکعب در شبانه روز). روش های MSF و MED نیز از فناوریهای عمده مورد استفاده در واحدهای شیرین سازی بویژه در خاورمیانه هستند که 11/2 میلیون مترمکعب آب شیرین در شبانه روز را در واحدهای خیلی بزرگ و 3/3 میلیون مترمکعب آب شیرین در شبانه روز را شیرین سازی می نمایند. NF با احیای سولفات (SR) عمدتا در واحدهای نمک زدائی در مقیاس بزرگ استفاده می شوند. همچنین واحدهای نمک زدائی مبتنی بر ED عمدتاً در مقیاس بزرگ هستند در حالیکه فناوریهای نوظهور در مقیاس متوسط (EDR, FO, and MD) عمدتا در واحدهای نمک زدائی متوسط و کوچک مورد استفاده قرار میگیرند.

4- نتیجه گیری

بر اساس تحلیل های آماری این پژوهش می توان نتیجه گرفت که ظرفیت آب شیرین کن ها در جهان با نرخ رشد حدود 7 درصد در هر سال، در طی سالهای 2010 تا پایان سال 2019، به صورت مستمر در حال افزایش بوده است. این توسعه در مناطقی مانند اروپا و آفریقا، که انتظار می رفت کمترین توسعه آب شیرین کن ها در این مناطق باشد، در سه دهه گذشته، افزایشی بیش از حدود 1600 درصد در اروپا و بیش از 1700 درصد در افریقا داشته است. توسعه سریع آب شیرین کن ها در این مناطق نشان میدهد که، نیاز فزاینده به آب شیرین، ناشی از چالش های تغییرات آب و هوایی و رشد جمعیت می باشد. صنعت برق بزرگترین تولید کننده آب شیرین (به غیر از آب شیرین کن های شهری) می باشند که ظرفیت تولید 4/6 میلیون مترمکعب آب در شبانه روز را به خود اختصاص داده است. همچنین آب دریا به عنوان منبع اصلی تغذیه آب شیرین کن ها جهت نمک زدائی مورد استفاده قرار میگیرد. در طول سه دهه گذشته (سال 1990 تا 2019) ظرفیت واحدهای شیرین سازی، با استفاده از آب دریا به عنوان منبع اصلی تغذیه ، 813 درصد در جهان افزایش یافته است. به طوریکه در حال حاضر، سهم منابع مختلف در تامین آب به عنوان منبع تغذیه، حدود 57٪ برای آب

دریا، ٪20 آب لب شور و 23٪ با استفاده از سایر منابع می باشد. در این میان هزینه شیرین سازی آب دریا متناسب با ظرفیت واحد نمک زدائی 0/35 تا 1/87 و برای آبهای لب شور 0/35 تا 1/53 دلار به ازای تولید هر متر مکعب آب شیرین، متغیر بوده است. همچنین استفاده از روش اسمز معکوس یا RO ، با ظرفیت تولید 48/4 میلیون متر مکعب آب شیرین در شبانه روز (30/6 میلیون متر مکعب با استفاده از آب دریا و 17/8 میلیون متر مکعب با استفاده از آب لب شور) رایج ترین فناوری مورد استفاده برای نمک زدائی در سال 2019 بوده است. استفاده از سیستم UF ، ضدعفونی با کلر و سیستم DAF روش های پیش تصفیه ای هستند که غالبا در صنعت نمک زدائی با استفاده از روش سیستم اسمز معکوس مورد استفاده قرار میگیرند، با این حال استفاده از سیستم DMF نیز به عنوان یک فناوری پیشرفته پیش تصفیه در بسیاری از واحدهای نمک زدائی وجود مشاهده میگردد. لذا بدلیل وجود واحد پیش تصفیه در واحدهایی با مقیاس خیلی بزرگ و بزرگ، این واحدها نیاز به سرمایه گذاری اولیه بیشتری داشته و پرهزینه تر از واحدهای کوچک تولید آب شیرین هستند. در واقع با استفاده ار فناوریهای موجود، در واحدهای بزرگ شیرین سازی، هزینه های سرمایه ای، بیشتر از هزینه های عملیاتی و بهره برداری بوده و نسبت بیشتری را به خود اختصاص میدهند. در حال حاضر استفاده از فناوریهای نوین (EDR, FO, and MD) در واحدهای نمک دائی با مقیاس کوچک و متوسط رایج می باشند.

با این حال محدودیت هایی نیز در انجام این مطالعه وجود داشت. برخی از داده های مورد نیاز وجود نداشته و ثبت نشده بودند و امکان دسترسی به برخی از داده های و اطلاعات مربوط به همه واحدهای نمک زدائی مانند نوع و شرایط مکانی، هزینه تولید آب، شرکت های مدیریتی، مدل های تدارکاتی، اطلاعات ساخت و ساز، اطلاعات عملیات، شرکت های مشاور، منبع اصلی آب مورد استفاده یا منبع اصلی تامین آب، روش پیش تصفیه، نوع ممبران ها، دستگاه بازیافت انرژی، بصورت کامل وجود نداشت. فقدان اطلاعات و عدم ثبت برخی از این اطلاعات ممکن است سبب عدم قطعیت و ایجاد شبهه در محاسبات و نتایج ارائه شده در این مطالعه گردد. با این حال نتایج حاصل از این مطالعه، بازتابی از وضعیت صنعت نمک زدائی بر اساس منابع ذکر شده می باشد. در این راستا ضرورت دارد تجزیه و تحلیل آینده بر روی اثرات زیست محیطی نمک زدائی متمرکز گردد. در حال حاضر، داده های مربوط به انتشار گازهای گلخانه ای و اثرات پساب یا شورابه حاصل از واحد نمک زدائی کم بوده و چندان در دسترس نمی باشند. در آینده، دستیابی به چنین داده هایی باید از طریق ارزیابی چرخه عمر واحدهای نمک زدائی و تجزیه و تحلیل اثرات واحدهای نمک زدائی در سطح جهان صورت گیرد. همچنین میتوان اطلاعات و داده های واحدهای نمک زدائی را که از فناوریهای یکپارچه خاصی استفاده می نمایند (MSF + RO، MED + RO، RO + MD، و غیره)، در بررسیهای آتی گنجاند. تجزیه و تحلیل انجام گرفته در این مقاله تنها بر اساس شناسایی روندها و پیامدهای آنها بر نمک زدائی در سطح جهان است. برای مشاهده روابط متقابل متغیرهای مختلف نمک زدائی، در مقیاس عملی، باید در آینده تجزیه و تحلیل داده های غیر خطی و تحلیل همبستگی دقیق با استفاده از ابزارهای آماری ترکیبی صورت پذیرد.

ممکن است در آینده یک مدل مبتنی بر هوش مصنوعی مانند مدل شبکه عصبی برای تحلیل پیشرفته چند متغیره موضوع مورد بحث در این مقاله باشد.

اعلامیه منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ رقیب مالی شناخته شده ، علایق یا روابط شخصی که در گزارش حاضر تاثیر گذار باشد، ندارند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از دانشگاه علوم و فناوری، خلیفه ابوظبی، امارات متحده عربی به جهت اشتراک و ایجاد امکان استفاده از داده های GWI Desaldata's قدردانی به عمل می آید.

هیئت نویسندگان

Joyner Eke: تحقیق و بررسی، تدوین پیش نویس اصلی، مرور متن و ویرایش،

Ahmed Yusuf: بررسی صحت داده ها، روش کار و تحقیق و بررسی، تدوین پیش نویس اصلی، مرور و ویرایش متن،

Adewale Giwa: مفاهیم، روش شناسی، تحقیق و بررسی، نوشتن پیش نویس اصلی، مرور متن و ویرایش، سرپرستی و نظارت،

Ahmed Sodiq: تحقیق و بررسی، نوشتن پیش نویس اصلی، مرور متن و ویرایش،

فهرست منابع

[1] N. Voutchkov, Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends, Desalination. 431 (2018) 2–14, https://doi.org/10.1016/j. desal.2017.10.033.

[2] Global Water Intelligence, Desalination plants, Desaldata, https://www.desaldata.com/, (2020).

[3] E. Jones, M. Qadir, M.T.H. van Vliet, V. Smakhtin, S. Kang, The state of desalination and brine production: a global outlook, Sci. Total Environ. 657 (2019) 1343–1356, https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2018.12.076.

[4] D. Zarzo, D. Prats, Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? Desalination. 427 (2018) 1–9, https://doi.org/10.1016/j. desal.2017.10.046.

[5] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, T. Melin, State-of-the-art of reverse osmosis desalination, Desalination. 216 (2007) 1–76, https://doi.org/10.1016/j. desal.2006.12.009.

[6] M. Al-Shammiri, M. Safar, Multi-effect distillation plants: state of the art, Desalination. 126 (1999) 45–59, https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)-00154-X.

[7] M.A. Darwish, N.M. Al-Najem, Energy consumption by multi-stage flash and reverse osmosis desalters, Appl. Therm. Eng. (2000), https://doi.org/10.1016/S1359-00032-0(99)4311

[8] A.M. Alklaibi, N. Lior, Membrane-distillation desalination: Status and potential, Desalination. 171 (2005) 111–131, https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.03.024.

[9] N. Akther, A. Sodiq, A. Giwa, S. Daer, H.A. Arafat, S.W. Hasan, Recent advancements in forward osmosis desalination: a review, Chem. Eng. J. 281 (2015).502-522, https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.080.

[10] Y. Oren, Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment-past, present and future (a review), Desalination. 228 (2008) 10–29, https://doi.org/10. 1016/j.desal.2007.08.005.

[11] Z. Lu, L. Xu, Freezing desalination process, Therm. Desalin, Process, 2010.

[12] G.P. Narayan, J.H. Lienhard, Humidification Dehumidification Desalination, in: Desalination, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2014, pp. 425–472, https://doi.org/10.1002/9781118904855.ch9.

[13] K.C. Kang, P. Linga, K. Park, S.-J. Choi, J.D. Lee, Seawater desalination by gas hydrate process and removal characteristics of dissolved ions (Na+, K+, Mg2+, Ca2+, B3+, Cl−, SO42−), Desalination. 353 (2014) 84–90, https://doi.org/10. 1016/j.desal.2014.09.007.

[14] S.C.J.M. van Hoof, A. Hashim, A.J. Kordes, the effect of ultrafiltration as pretreatment to reverse osmosis in wastewater reuse and seawater desalination applications, Desalination. 124 (1999) 231–242, https://doi.org/10.1016/S0011- 9164(99)00108-3.

[15] C.K. Diawara, Nanofiltration process efficiency in water desalination, Sep. Purif. Rev. 37 (2008) 302–324, https://doi.org/10.1080/15422110802228770.

[16] M.W. Shahzad, M. Burhan, L. Ang, K.C. Ng, Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability, Desalination. 413 (2017) 52–64, https://doi.org/10.1016/j. desal.2017.03.009.

[17] A.N. Mabrouk, H.E.S. Fath, Technoeconomic Study of a Novel Integrated Thermal MSF-MED Desalination Technology, Desalination, (2015), https://doi.org/10. 1016/j. desal.2015.05.025.

[18] K.C. Ng, K. Thu, S.J. Oh, L. Ang, M.W. Shahzad, A. Bin Ismail, Recent developments in thermally-driven seawater desalination: energy efficiency improvement by hybridization of the MED and AD cycles, Desalination. 356 (2015) 255–270, https:// doi.org/10.1016/j. desal.2014.10.025.

[19] A.M. Helal, A.M. El-Nashar, E.S. Al-Katheeri, S.A. Al-Malek, Optimal design of hybrid RO/MSF desalination plants part III: sensitivity analysis, Desalination. 169 (2004) 43–60, https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.006.

[20] A.A. Alsarayreh, M.A. Al-Obaidi, A.M. Al-Hroub, R. Patel, I.M. Mujtaba, Evaluation and minimisation of energy consumption in a medium-scale reverse osmosis brackish water desalination plant, J. Clean. Prod. 248 (2020) 119220, https://doi.org /10.1016/j. jclepro.2019.119220.

[21] O.A. Hamed, Thermal Desalination: Performance and Challenges, in: Corros, Fouling Control Desalin. Ind. (2020), https://doi.org/10.1007/978-3-030-34284-5_2.

[22] A.M.S. El Din, R.A. Mohammed, Brine and Scale Chemistry in MSF Distillers, Desalination, (1994), https://doi.org/10.1016/0011-9164(94)00120-0.

[23] S. Al-Zahrani, A.M. Al-Ajlan, A.M. Al-Jardan, Using Different Types of Anti-Scalants at the Al-Jubail Power and Desalination Plant in Saudi Arabia, Desalination, (1994), https://doi.org/10.1016/0011-9164(94)00070-0.

[24] N. Nada, Evaluation of various additives at Jubail phase I during reliability trials, Desalination. 51 (1984) 137–148, https://doi.org/10.1016/0011-9164(84) 85001-8.

[25] C. Sommariva, H. Hogg, K. Callister, Forty-year design life: the next target material selection and operating conditions in thermal desalination plants, Desalination. 136 (2001) 169–176, https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00179-5.

[26] O.A. Hamed, Evolutionary Developments of Thermal Desalination Plants in The Arab Gulf Region 1, n.d.

[27] O.A. Hamed, Overview of hybrid desalination systems - current status and future prospects, Desalination. 186 (2005) 207–214, https://doi.org/10.1016/j.desal. 2005.03.095.

[28] O.H.-I. Conference, undefined 2009, undefined 2009, Succesful Operation of MEDTVC Desalination Process at TBT of 125°C without Scaling, Ci. Nii.Ac.Jp. (n.d.).

[29] F.E. Ahmed, R. Hashaikeh, N. Hilal, Solar Powered Desalination – Technology, Energy and Future Outlook, Desalination, (2019), https://doi.org/10.1016/j.desal. 2018.12.002.

[30] S. Lee, J. Choi, Y.G. Park, H. Shon, C.H. Ahn, S.H. Kim, Hybrid Desalination Processes for Beneficial Use of Reverse Osmosis Brine: Current Status and Future Prospects, Desalination, (2019), https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.002.

[31] A. Panagopoulos, M. Loizidou, K.-J. Haralambous, Stainless steel in thermal desalination and brine treatment: current status and prospects, Met. Mater. Int. (2019), https://doi.org/10.1007/s12540-019-00398-w.

[32] C. Chen, Y. Jiang, Z. Ye, Y. Yang, L. Hou, sustainably integrating desalination with solar power to overcome future freshwater scarcity in China, Glob. Energy Interconnect. 2 (2019) 98–113, https://doi.org/10.1016/j.gloei.2019.07.009.

[33] U. Caldera, C. Breyer, Assessing the potential for renewable energy powered desalination for the global irrigation sector, Sci. Total Environ. 694 (2019) 133598, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133598.

[34] A. Yusuf, A. Sodiq, A. Giwa, J. Eke, O. Pikuda, G. De Luca, J.L. Di Salvo, S. Chakraborty, A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment, J. Clean. Prod. 121867 (2020), https://doi.org/10. 1016/j.jclepro.2020.121867.

[35] Global Water Intelligence, Desalination plants, Desaldata, https://www.desaldata. com/, (2018).

[36] A. Bennett, A. AlMisnad, X. Zhang, H. Bao, H. Wang, M. Skitmore, S. Sevda, I.M. Abu-Reesh, H. Yuan, Z. He, N. Ghaffour, T.M. Missimer, G.L. Amy, M. Schiffler, N. Voutchkov, V.G. Gude, C. Fersi, L. Gzara, M. Dhahbi, D. Xevgenos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou, T.M. Pankratz, Advances in desalination technology, Desalination. 309 (2016) 101–107, https://doi.org/10.1016/S0015-1882(13) 70128-9.

[37] C. Fersi, L. Gzara, M. Dhahbi, Treatment of textile effluents by membrane technologies, Desalination. 185 (2005) 399–409, https://doi.org/10.1016/j.desal. 2005.03.087.

[38] V. Buscio, M.J. Marín, M. Crespi, C. Gutiérrez-Bouzán, Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes, Chem. Eng. J. 265 (2015) 122–128, https://doi.org/10.1016/j.cej. 2014.12.057.

[39] N. Dow, J. Villalobos García, L. Niadoo, N. Milne, J. Zhang, S. Gray, M. Duke, Demonstration of membrane distillation on textile waste water: assessment of long term performance, membrane cleaning and waste heat integration, Environ. Sci. Water Res. Technol. 3 (2017) 433–449, https://doi.org/10.1039/C6EW00290K.

[40] A. Bes-Piá, M.I. Iborra-Clar, A. Iborra-Clar, J.A. Mendoza-Roca, B. Cuartas-Uribe, M.I. Alcaina-Miranda, Nanofiltration of textile industry wastewater using a physicochemical process as a pre-treatment, Desalination. 178 (2005) 343–349, https:// doi.org/10.1016/j. desal.2004.11.044.

[41] M. Schiffler, Perspectives and challenges for desalination in the 21st century, Desalination. 165 (2004) 1–9, https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.001.

[42] A. Almisnad, D. Newman, Desalination under Uncertainty: Understanding the Role of Contractual Arrangements on the Adoption of Flexibility Signature Redacted Signature Redacted Signature Redacted, Massachusetts Institute of Technology (2007).

[43] Y.S. Alsulaiman, Risk Management in Independent Water and Power Plant (IWPP) Projects in Saudi Arabia: A Grounded Theory Study to Improve Effectiveness, Heriot-Watt University, 2015.

[44] X. Zhang, H. Bao, H. Wang, M. Skitmore, A model for determining the optimal project life span and concession period of BOT projects, Int. J. Proj. Manag. 34 (2016) 523–532, https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.01.005.

[45] T.M. Pankratz, Advances in desalination technology, Int. J. Nucl. Desalin. 1 (2005) 450, https://doi.org/10.1504/IJND.2005.007015.

[46] D. Xevgenos, K. Moustakas, D. Malamis, M. Loizidou, an overview on desalination & sustainability: renewable energy-driven desalination and brine management, Desalin. Water Treat. 57 (2016) 2304–2314, https://doi.org/10.1080/19443994. 2014.984927.

[47] J.R. Ziolkowska, Desalination leaders in the global market – current trends and future perspectives, Water Sci. Technol. Water Supply 16 (2016) 563–578, https:// doi.org/10.2166/ws.2015.184.

[48] S. Jeong, G. Naidu, R. Vollprecht, T. Leiknes, S. Vigneswaran, In-depth analyses of organic matters in a full-scale seawater desalination plant and an autopsy of reverse osmosis membrane, Sep. Purif. Technol. 162 (2016) 171–179, https://doi.org/10. 1016/j.seppur.2016.02.029.

[49] A.A. Bakr, Pretreatment for Seawater Desalination Plants by Calcite Ooids Filter, Int. J, Energy Water Resour, 2020, https://doi.org/10.1007/s42108-019-00049-1.

[50] S. Jeong, R. Vollprecht, K. Cho, T. Leiknes, S. Vigneswaran, H. Bae, S. Lee, Advanced organic and biological analysis of dual media filtration used as a pretreatment in a full-scale seawater desalination plant, Desalination. 385 (2016) 83–92, https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.017.

[51] C.E. Hickman, I. Jamjoom, A.B. Riedinger, R.E. Seaton, Jeddah seawater reverse osmosis installation, Desalination. 30 (1979) 259–281, https://doi.org/10.1016/ S0011-9164(00)88453-2.

[52] A. Saiba, S. Kourdali, B. Ghernaout, D. Ghernaout, In desalination, from 1987 to 2009, the birth of a new seawater pretreatment process: electrocoagulation-an overview, Desalin. Water Treat. 16 (2010) 201–217, https://doi.org/10.5004/dwt. 2010.1094.

[53] R.P. Huehmer, MF/UF pretreatment in seawater desalination: applications and trends, Proc. World Congr. Desalin, Reuse, Int. Desalin. Assoc. IDAWC/DB09-253, Dubai, United Arab Emirates, 2009.

[54] W.J. Lau, P.S. Goh, A.F. Ismail, S.O. Lai, Ultrafiltration as a pretreatment for seawater desalination: a review, Membr. Water Treat. (2014), https://doi.org/10. 12989/mwt.2014.5.1.015.

[55] A.H.M. El-Aassar, Polysulfone/Polyvinyl alcohol thin film nano-composite membranes: Synthesis, characterization and application for desalination of saline groundwater, J. Appl. Sci. Res. 8 (2012) 3811–3822.

[56] J.G. Jacangelo, N. Voutchkov, M. Badruzzaman, L.A. Weinrich, Pretreatment for seawater reverse osmosis: existing plant performance and selection guidance, The Water Research Foundation. (2018).

[57] V.G. Gude, Desalination and sustainability – an appraisal and current perspective, Water Res. 89 (2016) 87–106, https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.012.

[58] ALMAR, Water solutions, desalination technologies and economics: CAPEX, OPEX & technological game changers to come, Mediterr. Reg. Tech. Meet, Marseille CMI, 2016, pp. 1–56.

[59] J. Kim, K. Park, D.R. Yang, S. Hong, A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants, Appl. Energy 254 (2019). 113652, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113652.

[60] B. Sauvet-Goichon, Ashkelon desalination plant — a successful challenge, Desalination. 203 (2007) 75–81, https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.525.

[61] M. Faigon, Y. Egozy, D. Hefer, M. Ilevicky, Y. Pinhas, Hadera desalination plant two years of operation, Desalin. Water Treat. (2013), https://doi.org/10.1080/ 19443994.2012.701414.

[62] G. Zehtabian, H. Khosravi, M. Ghodsi, High Demand in a Land of Water Scarcity: Iran, in: Water Sustain, Arid Reg, Springer