Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
DOI: 10.22112/JWWSE.2023.394456.1362

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب

بررسی فنی، محیط‌زیستی و اقتصادی شیرین‌سازی آب شور و تحلیل شرایط برای ایران

محمدرضا فدائی‌تهرانی[1*]، مریم ابارشی[2]

۱- عضو هیات‌علمی و استادیار مجتمع آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.
۲- دکتری آب و محیط‌زیست، مجتمع آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.
*- نویسنده مرتبط: محمدرضا فدائی‌تهرانی mfadaei@nri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

چکیده:
فن‌آوری‌های شیرین‌سازی آب شور به عنوان یک راهکار موثر و مطمئن برای تامین آب طی چند دهه اخیر تکامل یافته‌اند. توسعه واحدهای شیرین‌سازی در سواحل جنوبی ایران که با معضل کمبود منابع آب شرب مواجه است، به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های اصلی تامین پایدار آب مدنظر می‌باشد. در پژوهش حاضر، با مطالعه سه کشور پیشرو در شیرین‌سازی آب دریا، مسیر توسعه و مشخصات تاسیسات آنها مورد ارزیابی فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی قرار گرفته و مطابقِ شرایط بومی کشور، مدل بهینه توسعه واحدهای شیرین‌سازی در ایران، ارائه شد. بنابر تجربیات موجود و نتایج تحقیقات علمی، پساب شور، آسیب در ورودی، مصرف بالای انرژی و فقر مواد معدنی در آب تولیدشده، چهار چالش اصلی کشورها در شیرین‌سازی آب دریا می‌باشد. بر اساس یافته‌های این مطالعه، افزایش ظرفیت روزانه فعلی کشور در شیرین‌سازی آب دریا از ۵۸۵،۰۰۰ به ۱،۱۵۰،۰۰۰ مترمکعب جهت تامین مصارف شرب استان‌های دارای کمبود آبی، نیاز است. برمبنای تحلیل اقتصادی انجام شده با احتساب بهای برق یارانه‌ای در ایران، قیمت تمام‌شده هر مترمکعب آب برای مجاور دریا، کرمان، یزد و بیرجند به ترتیب برابر ۴۳۲، ۷۰۲، ۹۷۲ و ۱۰۲۶ هزارریال برآورد می‌شود. همچنین، به لحاظ شوری و مسائل محیط‌زیستی مکان‌یابی واحدهای شیرین‌سازی در سواحل مکران بر سواحل خلیج‌فارس مزیت دارد.

کلمات کلیدی:
نمک‌زدائی؛ آب شور؛ خلیج‌فارس؛ شیرین‌سازی؛

Technical, environmental and economic review of salt water desalination and analysis for Iran

Mohammadreza Fedai Tehrani[1*], Maryam Abarshi[2]

1- Faculty member and assistant professor of educational and research center, Niro Research Institute, Tehran, Iran.
2- PhD in water and environment, educational and research center, Niro Research Institute, Tehran, Iran.
* Corresponding author: mfadaei@nri.ac.ir

Received: 29/04/2023
Revised: 13/06/2023
Accepted: 29/06/2023

Abstract:
Saltwater desalination technologies have evolved as an effective and reliable solution for water supply over the last few decades. The development of desalination units in the southern coasts of Iran, is considered as one of the main solutions for sustainable water supply. In this research, by studying the three leading countries in seawater desalination, the improvement path of their facilities have been evaluated, and optimal model for the development of desalination units in Iran has been presented. According to results, the four challenges of countries are salty wastewater, damage at the inlet, high energy consumption and the poverty of minerals in desalinated water. Based on the findings, increasing the country's current capacity in seawater desalination from 585,000 to 1,150,000 m^3/day is needed to sustainably supply the drinking needs of water-deficient provinces. Based on economic analysis, including the price of subsidized electricity in Iran, the total price of each cubic meter of water for near the coast, Kerman, Yazd and Birjand is estimated to be 432, 702, 972 and 1026 thousand Rials respectively. Also, in terms of salinity and environmental issues, the location of sweetening units on the coasts of Makran has an advantage over the Persian Gulf.

Key words:
Salt removal; Salty water; Persian Gulf; sweetening;

۱- مقدمه

آب مهم‌ترین ماده طبیعت و به‌وجود آورنده حیات است. تامین آب کافی و با کیفیت مناسب برای شرب، کشاورزی و صنعت، اصلی‌ترین نیاز جوامع و از مهم‌ترین وظائف حکومت‌ها به شمار می‌رود. هرچند بیشتر سطح کره زمین پوشیده از اقیانوس‌ها و دریاها بوده و از منظر فضا، بصورت کره آبی به نظر می‌رسد، اما فقط حدود ۱ درصد این آب، در دسترس، شیرین و قابل مصرف است. بنابراین، آب یک منبع محدود و با پراکندگی بسیار متغیر است. پیش‌بینی سازمان همکاری اقتصادی و توسعه OECD نشان می‌دهد در حال

حاضر ۴۰ درصد از جمعیت جهان در حوضه‌های رودخانه‌ای با تنش آبی زندگی می‌کنند و تقاضای آب تا سال ۲۰۵۰ به میزان ۵۵ درصد افزایش خواهد یافت (Keller, 2020).

کشورهای خاورمیانه نظیر ایران در کمربند خشک کره زمین جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، و هم‌عرض صحراهای بزرگ آفریقا و آسیا بوده و کم و بیش با چالش تامین آب مواجه هستند. متوسط میزان بارندگی سالانه ایران، بنابر آمار ۴۰ ساله برابر ۲۴۵/۱ میلی‌متر، در حدود یک‌سوم بارندگی جهانی است که توزیع آن در نواحی مختلف به شدت ناهمگن است (Ajjur, 2021). ایران در قسمت زیادی از سواحل جنوبی خود در حاشیه خلیج‌فارس و دریای عمان با کمبود شدید بارش و منابع آب شیرین مواجه بوده و برخلاف سواحل شمالی، اقلیم آن کم‌بارش و با دمای بالا، می‌باشد. از طرفی گستردگی این سواحل در حاشیه دریا این امکان را بوجود آورده تا از منابع آب دریا برای مصارف شرب و صنعت بهره‌برداری نمود.

نمک‌زدایی فرآیند حذف مقدار بیش از حد نمک‌ها و سایر مواد شیمیایی از آب دریا است تا برای مصارف خانگی و سایر مصارف مناسب شود. نمک‌زدایی آب لب‌شور (غلظت نمک از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی گرم در لیتر) و آب دریا (دارای دامنه شوری بین ۳۰۰۰۰ تا ۴۴۰۰۰ میلی گرم در لیتر) در چند دهه اخیر، مورد توجه قرار گرفته است. مطابق با دستورالعمل‌های کیفیت آب آشامیدنی[۱] (GDWQ) از سازمان بهداشت جهانی[۲] (WHO) مراد از نمک‌زدائی یا شیرین‌سازی آب دریا، کاهش غلظت نمک به زیر ۵۰۰ ppm[۳] می‌باشد.

مردم، دانشمندان و دولت‌ها همگی به دنبال روش‌های نمک‌زدایی مقرون به صرفه و ایمن برای محیط‌زیست هستند تا زمین را از کمبود آب نجات دهند. کشورهای خلیج‌فارس به دلیل منابع محدود آب شیرین و جمعیت کمتر در مقایسه با سایر کشورهای توسعه یافته و وجود منابع سرشار انرژی، پیشرو در تولید آب شیرین از طریق نمک‌زدایی هستند. هرچند برای نمک‌زدایی آب فن‌آوری‌های متنوعی وجود دارد، اما دو روش حرارتی و غشائی به طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار گرفته است. فرآیند مبتنی بر حرارت شامل تبخیر آب شور با استفاده از انرژی حرارتی (گرما) و جمع‌آوری میعانات نمک‌زدایی برای تولید آب شیرین است. برای چندین دهه، فن‌آوری مبتنی بر حرارت به طور گسترده در کشورهای حاشیه خلیج‌فارس که در آن سوخت فسیلی فراوانی برای تولید انرژی حرارتی مورد نیاز در دسترس بود، استفاده شد؛ لیکن به دلیل تبعات محیط‌زیستی سوزاندن نفت و گاز و نقش آن در گرمایش کره زمین، تمایل به روش‌های غشائی برمبنای برق تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است (PHILLIP, 2011).

از جمله رایج‌ترین فن‌آوری‌های حرارتی می‌توان فلاش چند مرحله‌ای[۴] (MSF) و تقطیر چند اثره[۵] (MED) را نام برد. MSF به عنوان یک سری مراحل کار می‌کند که از بخار گرم و کندانسور برای جداسازی آب از نمک استفاده می‌کند. بخار گرم شده آب شور را گرم می‌کند و فشار در مراحل متعدد کاهش می‌یابد؛ بنابراین آب به بخار سرد شده تبدیل می‌شود. از طرف دیگر، پساب نمکی پس از هر

مرحله تشکیل می‌شود. به طور مشابه، MED از تکنیک مشابهی از چندین مخزن استفاده می‌کند که برای تصفیه آب دریا به بخار گرم و کندانسورها متکی است (Xu, 2013; Wiener, 2012). تفاوت عمده‌ای که MED را از MSF متمایز می‌کند، روش‌های تبخیر و انتقال حرارت است. در MED، تبخیر زمانی اتفاق می‌افتد که آب تغذیه با سطح انتقال حرارت تماس پیدا کند. در حالی که برعکس، فرآیندهای گرمایش MSF فقط در داخل لوله‌ها رخ می‌دهد.

از سوی دیگر، در فن‌آوری مبتنی بر غشاء، آب شور از طریق یک غشای انتخابی به آب شیرین عبور کرده و نمک‌های معلق و سایر جامدات باقیمانده در پشت غشاء، تفکیک می‌یابند. فن‌آوری غشایی برای تصفیه آب شامل اسمز معکوس[۶] (RO)، میکروفیلتراسیون[۷] (MF)، اولترافیلتراسیون[۸] (UF) و نانو فیلتراسیون[۹] (NF) تقسیم می‌شود. مکانیسم جداسازی در MF، UF و NF عمدتاً حذف اندازه است در حالی که RO از یک پدیده فیزیکی متفاوت برپایه پدیده نشر، استفاده می‌کند. اسمز معکوس آب خوراک را با استفاده از غشاها به دو جریان آب غلیظ با شوری بالا (یا پساب نمکی) و آب تصفیه شده بدون نمک جدا می‌کند. با این حال، تفاوت عمده بین این فن‌آوری‌ها اندازه منافذ است (Curto, 2021).

RO رایج‌ترین فن‌آوری نمک‌زدایی است که برای تصفیه آب دریا و آب‌های لب‌شور در سراسر جهان به‌دلیل کارائی بالا، پساب کمتر، هزینه انرژی پایین در مقایسه با سایر فن‌آوری‌ها مزیت دارد. فن‌آوری RO امکان تمیز نگه داشتن محیط‌زیست، کاهش ضایعات و در نتیجه رعایت استانداردهای بهداشت عمومی را بهتر از سایر روش‌ها فراهم می‌کند. در مقایسه با فرآیندهای حرارتی، RO نرخ بازیابی بالاتری دارد، بنابراین آب نمک کمتری تولید می‌کند (Matin, 2019). دفع پساب نمکی، آب شور با غلظت بالای نمک، بزرگترین چالش محیط‌زیستی ناشی از واحدهای شیرین‌سازی بوده که لازمست قبل از تخلیه رقیق شود تا به اکوسیستم دریا آسیب نرساند.

در سال ۲۰۲۰، آب شیرین تولید شده از روش RO با نسبت ۶۹ درصد تولید کل، دارای بالاترین سهم شیرین‌سازی بوده و پس از آن دو فن‌آوری اصلی حرارتی MSF و MED به ترتیب با سهم ۱۸ و ۷ درصد قرار داشته است. این سه فن‌آوری ۹۴ درصد از آب شیرین شده تولید شده در جهان را تشکیل می‌دهند (Huang, 2020).

در پژوهش حاضر، در کنار بررسی تجربیات سه کشور پیشرو در شیرین‌سازی آب دریا (عربستان، ایالات‌متحده آمریکا و امارات متحده عربی) و مقایسه وضعیت ایران با آنها، به آسیب‌شناسی فن‌آوری‌های مربوط به شیرین‌سازی به لحاظ فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی پرداخته شده است. برمبنای نتایج بدست آمده، ضمن تحلیل اقتصادی با محاسبه هزینه تمام شده هر مترمکعب آب تصفیه شده، ظرفیت مورد نیاز شیرین‌سازی آب برای ایران تخمین و محل بهینه برای احداث واحدهای آب‌شیرین‌کن پیشنهاد شده است. در تحقیق حاضر تلاش شده به این سوال که "شیرین‌سازی آب دریا تا چه حدی می‌تواند پاسخگوی نیاز آبی کشور ایران باشد؟" پاسخ داده شود.

۲- مواد و روش‌ها

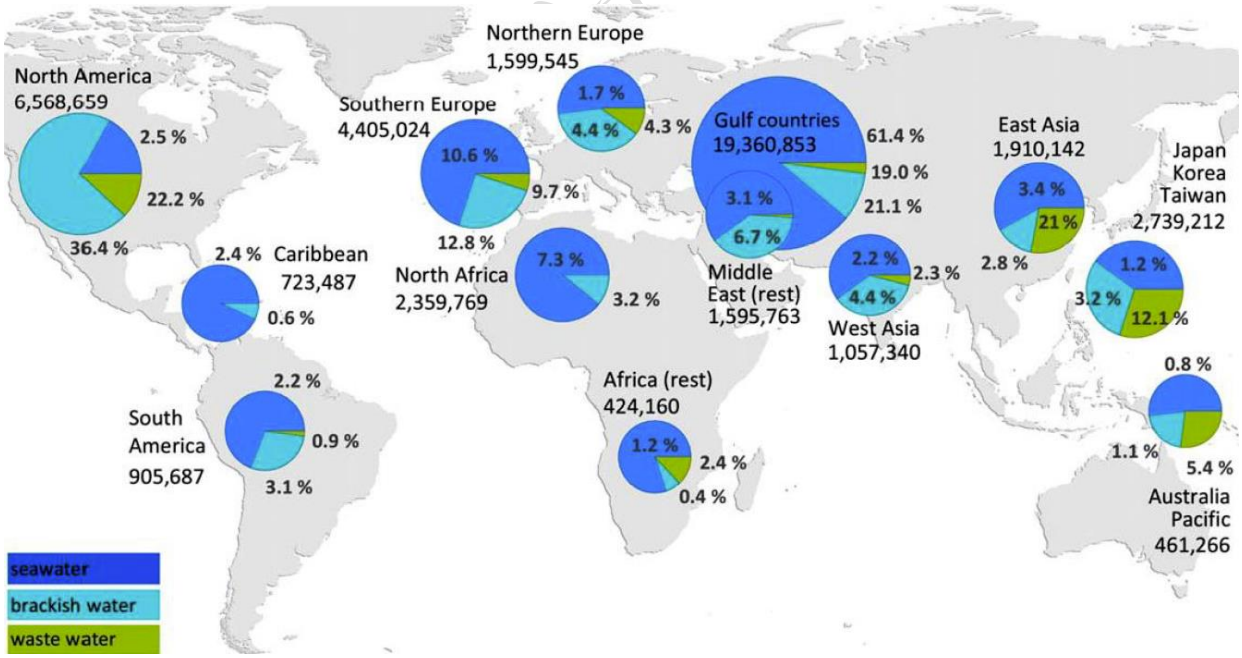
تا سال ۲۰۱۸، حدود ۱۷هزار واحد آب‌شیرین‌کن در نقاط مختلف کره زمین تقریباً ۳۵/۸ میلیارد متر مکعب در سال (۹۵/۴ میلیون متر مکعب در روز) برای بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در ۱۷۷ کشور تولید کردند. پیش‌بینی می‌شود ظرفیت تولید تا سال ۲۰۵۰ با رشد دوبرابری به ۷۰/۱ میلیارد متر مکعب در سال برسد. اکثر کشورهایی که از آب شیرین‌کن استفاده می‌کنند، کشورهای پردرآمدی هستند که منابع آب شیرین محدودی دارند. جدول (۱) تولیدکنندگان برتر آب شیرین شده و سهم جهانی آنها را نشان می‌دهد. کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا[۱۰] (MENA) تقریباً نیمی از سهم جهانی ظرفیت نمک‌زدایی (۴۸ درصد) را تشکیل می‌دهند. عربستان سعودی همچنان با سهم ۲۲ درصد بزرگترین تولید کننده آب شیرین و پس از آن ایالات متحده آمریکا با سهم ۱۴ درصد قرار دارد. کشورهایی مانند امارات متحده عربی، قطر و کویت تقریباً ۱۰۰ درصد از منابع آبی خود را به آب شیرین شده متکی هستند. از سوی دیگر، کشورهای با درآمد پایین (مانند آسیای جنوبی و جنوب صحرای آفریقا) سهم ناچیزی در تولید جهانی با کمتر از ۰/۱ درصد دارند (Ihsanullah, 2021).

جدول ۱- ده کشور برتر در زمینه شیرین‌سازی آب دریا (Matin, 2019)

رتبه	نام کشور	ظرفیت تولید (میلیون‌مترمکعب در روز)	مترمکعب تولید سالانه به ازای هر نفر جمعیت	سهم از کل (درصد)
۱	عربستان سعودی	۱۲	۳۵۳	۲۲/۰
۲	ایالات متحده آمریکا	۱۰/۶	۳۲/۳	۱۴/۰
۳	امارات متحده عربی	۷/۵	۷۷۳	۱۲/۵
۴	اسپانیا	۵/۳	۱۱۲	۸/۹
۵	کویت	۲/۵	۶۲۵	۴/۲
۶	چین	۲/۴	۱/۷	۴/۰
۷	ژاپن	۱/۶	۱۲/۷	۲/۶
۸	قطر	۱/۴	۵۰۰	۲/۴
۹	الجزایر	۱/۴	۳۲/۵	۲/۳
۱۰	استرالیا	۱/۲	۴۸	۲/۰

اگرچه RO دارای طیف گسترده‌ای از مزیت‌ها نظیر مصرف انرژی کم‌تر، سازگاری بیشتر با محیط‌زیست و تولید شیرابه نمکی کمتری است، رسوبات جمع‌شده روی غشاء همچنان یک چالش بزرگ است. رسوب عبارت است از تجمع ذرات نامطلوب روی سطح غشاء که منجر به کاهش شار نفوذ و دفع نمک و در نهایت انسداد غشاء می‌شود. رسوب غشایی می‌تواند به طور قابل توجهی بر کیفیت فیلتراسیون و تولید نیز تأثیر بگذارد. میانگین طول عمر یک غشاء بین ۲ تا ۵ سال تخمین زده می‌شود. نوع و دمای آب خوراک، میزان پیش‌تصفیه، تمیز کردن و نگهداری از عوامل موثر بر طول عمر غشاء هستند. به عنوان مثال، مطالعه تصفیه‌خانه SWRO در یونان نشان داد که اگر پیش تصفیه آب خوراک به درستی برای حذف آلاینده‌ها از آب انجام شود، غشای RO می‌تواند تا ۵ سال دوام بیاورد (Moradi, 2019). چنانچه پیش‌تصفیه نادیده گرفته شود، تمیز کردن بیشتری مورد نیاز خواهد بود که می‌تواند طول عمر غشاء را کاهش دهد. در صورت بروز رسوب، کارائی RO در تولید آب شیرین کاهش می‌یابد. در نتیجه، انرژی، نگهداری و هزینه بیشتری برای غلبه بر مشکل ناشی از رسوب غشاء مورد نیاز است.

در شکل (۱) فناوری و میزان و سهم کشورهای مختلف در شیرین‌سازی آب شور نشان داده شده است. در ادامه این قسمت، وضعیت سه کشور برتر ارائه و شرایط ایران در مقایسه با آن بیان شده است.



شکل ۱- سهم مشارکت کشورهای مناطق مختلف در شیرین‌سازی آب شور (Sabine Lattemann, 2010)

۲-۱- عربستان سعودی

عربستان سعودی در منتهی الیه غرب آسیا واقع شده و بخش بزرگی از شبه جزیره عربستان را تشکیل می‌دهد. این کشور دارای ۳۴ میلیون جمعیت در مساحت ۲,۱۴۹,۶۹۰.۰ کیلومتر مربع است. تا سال ۲۰۱۹، حدود ۳۳ کارخانه آب‌شیرین‌کن بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز، روزانه بیش از ۱۲ میلیون مترمکعب تولید کردند (Report, 2019). برای بیش از ۱۰۰ سال، عربستان سعودی شیرین‌سازی آب را از طریق تقطیر انجام داده است. در ابتدا، از زغال سنگ و حتی بدنه کشتی‌های شکسته برای تقطیر آب استفاده می‌شد. در سال ۱۹۲۸، عربستان سعودی دو کارخانه تقطیر جداگانه در ساحل غربی، نزدیک دریای سرخ احداث نمود. هر کارخانه باید روزانه ۲۳۰ هزار متر مکعب آب شیرین تولید می‌کرد که به دلیل حضور زائران و بازدیدکنندگان به شهر مقدس مکه، دسترسی به آب آشامیدنی، ضروری است. در سال ۱۹۷۰، یک کارخانه آب‌شیرین‌کن دیگر در جده ساخته شد تا روزانه ۵۰۰ هزار مترمکعب آب شیرین تولید کند. در سپتامبر ۱۹۷۴، شرکت تبدیل آب شور[11] (SWCC) با فرمان سلطنتی تأسیس شد تا تمام آب مورد نیاز مناطق مختلف عربستان را با آب نمک‌زدایی تامین کند. همچنین، مسئولیت سایر امور مربوط به یکپارچه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب طبیعی، از جمله آب‌های زیرزمینی، و ساخت واحدهای آب شیرین‌کن با بهترین فن‌آوری موجود نیز به SWCC واگذار شد. بنابر این دستاوردها، عربستان سعودی یکی از موفق‌ترین کشورها در نمک‌زدایی و استحصال آب شیرین از دریا به شمار می‌رود. در سال ۲۰۱۹، دو گواهینامه توسط کتاب رکوردهای جهانی گینس، یکی برای SWCC، بزرگترین شرکت نمک‌زدایی در جهان با تولید روزانه ۵/۶ میلیون مترمکعب آب شیرین و دومی برای کارخانه آب‌شیرین‌کن الجبیل، بزرگترین تاسیسات در جهان با ۱/۴ میلیون مترمکعب در روز، به عربستان سعودی اعطا شد. در طی این دهه‌ها، SWCC تولید آب خود را بیش از ۹۰ برابر افزایش داده و به تولید سالانه ۱۸۸۴ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ رسانده است (Report, 2019). نکته حائز اهمیت اینکه، تولید سالانه به طور قابل توجهی از ۱۰۷۱ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۶ به ۱۸۸۴ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ (افزایش ۶۴ درصد طی سه سال) ارتقاء یافته است.

تا سال ۲۰۱۹، عربستان سعودی مالک و اداره کننده ۳۳ کارخانه آب‌شیرین‌کن در دو ساحل بود؛ ۸ کارخانه در شرق که ۵۵ درصد از کل تولید سالانه را تولید می‌کنند و ۲۵ کارخانه در غرب ۴۴ درصد باقی مانده را تولید می‌کنند. تصفیه‌خانه‌هائی که در ساحل غربی، نزدیک مکه و جده قرار دارند، قدیمی‌ترین واحدهای شیرین‌سازی هستند. اخیراً SWCC سه واحد اصلی، دو تای آنها در غرب و یکی در ساحل شرقی، به دلیل تأثیرات محیطزیستی و در دسترس بودن فن‌آوری بهتری که باعث صرفه‌جویی در هزینه و انرژی می‌شود، را تعطیل نمود. مانند سایر نقاط جهان، در عربستان سعودی نیز از RO به عنوان فن‌آوری اصلی نمک‌زدایی در ۵۳ درصد از تأسیسات خود استفاده می‌شود. هرچند، فن‌آوری‌های حرارتی مانند MSF و MED هنوز با سهم ۴۳ درصدی رایج هستند لیکن با گذشت زمان به تدریج روند نزولی دارند (Report, 2019).

۲-۲- ایالات‌متحده آمریکا

ایالات‌متحده آمریکا با ۳۲۸ میلیون نفر جمعیت در مرکز آمریکای شمالی، چهارمین کشور بزرگ جهان است. تا سال ۲۰۱۸، تقریباً ۲۲۴۰ کارخانه آب‌شیرین‌کن بزرگتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در روز ۱۱ میلیون متر مکعب در روز در ایالات‌متحده تولید کردند (Miller, 2021). از سال ۱۹۵۲، ایالات‌متحده از نمک‌زدایی آب با تصویب قانون تبدیل آب شور[۱۲] (SWCA) توسط کنگره استفاده کرد. نزدیک به ده سال بعد، جان‌اف‌کندی حمایت خود را برای گسترش استفاده از نمک‌زدایی تجاری ابراز کرد. او آشکارا گفت: «نمک‌زدایی می‌تواند بیشتر از هر پیشرفت علمی دیگری برای نجات مردان و زنان از زندگی فقیرانه موثر باشد». در دهه ۱۹۷۰ دفتر تحقیقات و فن‌آوری آب[۱۳] (SWCA) برای تامین مالی فن‌آوری‌های پیشرفته در نمک‌زدایی تاسیس شد. بین سال‌های ۱۹۷۰ و ۲۰۱۰، ایالات‌متحده برای حمایت از تحقیق و توسعه فن‌آوری‌های نمک‌زدایی، با فراز و نشیب‌های بودجه‌ای و تنگناهای مالی مواجه شد. تا سال ۲۰۱۰، دولت ایالات‌متحده تقریباً ۲ میلیارد دلار هزینه کرده بود (Gleick, 2006). برخلاف سایر نقاط جهان، حدود ۵۰ درصد از آب تصفیه شده در ایالات‌متحده، در مقایسه با سایر نقاط جهان که بیشتر آب دریا را تصفیه می‌کنند، از آب لب‌شور[۱۴] است که نمک‌زدایی آن به طور قابل توجهی راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر از آب شور دریا می‌باشد. مانند سایر نقاط جهان، پرکاربردترین فن‌آوری نمک‌زدایی در ایالات‌متحده RO با سهم حدود ۷۰ درصد است.

بطور خاص مناطق ساحلی ایالات‌متحده، طی دو قرن گذشته به آب‌های سطحی و زیرزمینی متکی بوده‌اند. در دو دهه اخیر به دلیل خشکسالی‌های پی‌درپی و نفوذ آب شور، این منابع ارزشمند به منابع آبی غیرقابل اعتماد تبدیل شده‌اند. برای غلبه بر کمبود آب شیرین، مقامات ایالتی از بسیاری از پروژه‌های نمک‌زدایی برای کاهش وابستگی به آب‌های سطحی و زیرزمینی، حمایت کرده‌اند. ایالت‌های کالیفرنیا، فلوریدا و تگزاس، به عنوان مناطق ساحلی نیازمند به منابع آب شیرین پایدار، ایالت‌های پیشرو برای توسعه واحدهای نمک‌زدایی هستند. اخیراً، کالیفرنیا به دلیل تشدید کمبود آب و پیشرفت در فن‌آوری نمک‌زدایی، معطوف شدن دیدگاه‌ها به شیرین‌سازی آب شور را تجربه کرده است. پیش از این، کالیفرنیا علاقه محدودی به نمک‌زدایی داشت تا اینکه کارخانه نمک‌زدایی کارلزباد[۱۵] در دسامبر ۲۰۱۵ افتتاح شد که در زمان تاسیس، بزرگترین واحد شیرین‌سازی آب در ایالات‌متحده بود. این پروژه برای تامین آب شرب ساکنان سَن‌دیگو، یک میلیارد دلار هزینه داشت (Ziolkowska, 2017). کارخانه آب‌شیرین‌کن کارلزباد بیش از ۱۹۰هزار مترمکعب در روز تولید می‌کند تا حدود ۳۰ درصد از کل آب مورد نیاز سَن‌دیگو را پوشش دهد. پس از آن، در کالیفرنیا به دلایلی نظیر افزایش تقاضای آب، بهبود فن‌آوری، و افزایش یارانه‌های دولتی، تمایل به نمک‌زائی افزایش پیدا کرد. دپارتمان منابع آب کالیفرنیا[۱۶] (DWR) بیش از ۱۰۰ میلیون دلار کمک بلاعوض را برای مطالعات امکان‌پذیری و تبعات محیط‌زیستی اختصاص داده و پیشنهاد ساخت ۲۰ تاسیسات نمک‌زدایی آب دیگر را در سراسر ایالت ارائه نمود (Panagopoulos, 2019).

علی‌رغم مخالفت‌هایی که بر نگرانی‌های محیط‌زیستی دریایی متمرکز شده، رهبران کالیفرنیا مشتاقانه منتظر ساخت کارخانه‌های بیشتری در آینده نزدیک هستند. آنها حامی بهبود مستمر فن‌آوری پیشرفته‌ای هستند که هزینه کل را کاهش و در عین حال کارایی را افزایش می‌دهد؛ البته، هزینه سایر منابع آبی نیز در حال افزایش است.

۲-۳- امارات متحده عربی

امارات متحده عربی، به اختصار امارات، کشوری در غرب آسیا و شمال شرق شبه‌جزیره عربستان واقع شده که در سال ۲۰۲۰ جمعیت آن ۹/۹ میلیون نفر ثبت شده است. اقلیم امارات خشک و بیابانی و متوسط بارندگی سالانه در سواحل آن کمتر از ۱۲۰میلیمتر گزارش شده است. این کشور فاقد جریان روان‌آب دائمی یا دریاچه آب شیرین می‌باشد که همواره تامین آب شرب کافی یکی از چالش‌های آن بوده است. در سال ۱۹۷۶ اولین واحد شیرین‌سازی امارات در ابوظبی با ظرفیت روزانه ۲۵۰ مترمکعب راه‌اندازی شد و پس از آن در سایر شهرهای ساحلی این کشور احداث واحدهای شیرین‌سازی توسعه یافت بطوری که تقریباً صددرصد از آب آشامیدنی و تجاری شهرهای ابوظبی و دبی از طریق شیرین‌سازی آب دریا تامین می‌شود. در گذشته به دلیل فراوانی و ارزانی انرژی در امارات، بطور عمده از روش MSF برای شیرین‌سازی استفاده می‌شد لیکن امروزه تمایل به روش‌های پیشرفته مبتنی بر فن‌آوری RO مورد توجه این کشور قرار گرفته است. با توجه به تعهد کشور امارات در کاهش آلاینده‌های محیط‌زیستی، سرمایه‌گذاری برای تامین انرژی شیرین‌سازی آب از منابع جایگزین سوخت فسیلی نظیر انرژی خورشیدی یا نیروگاه‌های برق هسته‌ای در دست انجام است.

۲-۴- ایران

ایران، برخلاف کشورهای عربستان و امارات متحده عربی، کشوری پهناور با منابع آب متعدد است لیکن توزیع منابع آب در آن یکنواخت نبوده و به ویژه مناطق مرکز، شرق و جنوب در امتداد سواحل دریای عمان و خلیج فارس با مشکل کمبود آب شیرین مواجه هستند. یکی از گزینه‌های مناسب برای این مناطق استفاده از آب شور دریا جهت تامین بخشی از نیاز شرب به عنوان یک منبع پایدار و قابل اعتماد است. در سال ۱۹۶۰ اولین واحد شیرین‌سازی آب دریا در جزیره خارک با ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب در روز به روش MSF احداث شد و پس از آن در شهرهای بوشهر، عسلویه، بندرعباس، کنارک واحدهای شیرین‌سازی آب دریا توسعه یافت. در ایران نیز مشابه سایر کشورهای حوزه خلیج فارس، در گذشته واحدهای شیرین‌سازی حرارتی مورد توجه بوده که در سال‌های اخیر تمایل به RO به عنوان جایگزینی مناسب، افزایش یافته است. بنابر آمار غیررسمی شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، در انتهای سال ۱۴۰۱، تعداد ۷۸ واحد شیرین‌سازی در استان‌های مختلف با مجموع ظرفیت ۵۸۵ هزار مترمکعب در روز فعال بوده و ۱۶ پروژه دیگر برای توسعه واحدهای نمک‌زدائی با ظرفیت مجموع ۱۵۶ هزار مترمکعب در روز در دست ساخت قرار دارد. این ظرفیت

شیرین‌سازی مربوط به شرکت‌های آب و فاضلاب جهت تامین مصارف شرب هستند. بنابر آمار انجمن شیرین‌سازی ایران، علاوه بر مصارف شرب، صنایع مختلف بصورت متوسط ۲۵۵ هزار مترمکعب در روز از تاسیسات نمک‌زدائی وابسته به صنایع بهره‌برداری می‌نمایند که خارج از بحث و موضوع این پژوهش قرار دارد. سهم مجموع این ظرفیت‌ها، در مقایسه با حجم شیرین‌سازی در خلیج‌فارس و سرجمع جهانی به ترتیب ۳ و ۰/۷ درصد می‌باشد که ناچیز است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل فنی و محیط‌زیستی

محدودیت در دسترس بودن آب شیرین عامل اصلی نمک‌زدائی آب شور است؛ بطوری که هرچه کمبود آب بیشتر باشد، کشورهای بیشتری نیازمند توسعه واحدهای شیرین‌سازی آب دریا خواهند بود. برمبنای گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد[۱۷] (FAO) کشورهای واقع در خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) شامل عربستان سعودی، کویت، لیبی و امارات متحده عربی، بیش از ۱۰۰۰ درصد تنش آبی را تجربه می‌کنند، در حالی که میانگین جهانی تنها ۱۳ درصد است (FAO, 2018). بر اساس همین گزارش، ایالت‌های مختلف آمریکا، بین ۱۰ تا ۲۵ درصد و مناطق مختلف ایران نیز ۱۰ تا ۶۰ درصد تنش آبی را تجربه می‌کند. تنش آبی به عنوان نسبت برداشت آب بر تمام منابع آبی موجود محاسبه می‌شود. در همین حال، انتظار می‌رود که تنش آبی در سطح جهان به سه دلیل اصلی رشد جمعیت، دسترسی محدود به آب شیرین و گرم شدن زمین افزایش یابد. بنابراین، تقاضای زیاد برای نمک‌زدایی به ویژه در مناطقی که تحت تنش آبی زندگی می‌کنند، در حال افزایش است. بطور مثال، دو کشور عربستان سعودی و ایالات‌متحده آمریکا در مجموع با ۳۶ درصد نمک‌زدایی، بالاترین سهم را دارند. هرچند، رویکردها و انگیزه‌های متفاوتی دارند.

از نظر تقاضای آب، عربستان سعودی برای پوشش تقریباً ۷۰ درصد نیاز مصرف خانگی، به شدت به آب شیرین شده وابسته است. ۳۰ درصد دیگر از آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. آب شیرین‌شده مصرفی ایالات‌متحده ۴ درصد کل آب مصرفی است که عمدتاً در ایالت‌های کالیفرنیا، فلوریدا و بخشی از تگزاس استفاده می‌شود. از نظر نوع آب خوراک، آب دریا و آب لب‌شور به ترتیب با سهم میانگین جهانی ۶۱ و ۲۱ درصد، منبع اصلی نمک‌زدایی است. عربستان سعودی به شدت به آب دریا متکی است در حالی که ایالات‌متحده از آب لب‌شور به عنوان منبع اصلی برای نمک‌زدایی استفاده می‌کند. آب لب‌شور نسبت به دریا مزیت بالائی دارد، زیرا شوری کمتری دارد و در نتیجه نیاز به تصفیه و هزینه تمام شده آن، کمتر خواهد بود. انتخاب آب خوراک عمدتاً ناشی از در دسترس بودن منابع است، اما پایداری متعاقب آن می‌تواند چالش بزرگی را ایجاد کند. آب لب‌شور تنها ۱ درصد از آب جهان را تشکیل می‌دهد در حالی که دریاها و اقیانوس‌ها، آب شور، ۹۷ درصد از آب کره زمین را تشکیل می‌دهند. کاهش بالقوه، یا تغییر در محتوای نمک

منابع آب لب‌شور و تأثیرات ناشی از آن بر اکوسیستم‌های خاصی که آب لب‌شور از آنها استخراج می‌شود، ممکن است یک تهدید محیط‌زیستی باشد (Elsaid, 2020).

از نظر فن‌آوری، RO تا حد زیادی پرکاربردترین فرآیند نمک‌زدایی آب در سراسر جهان است. ترتیب فن‌آوری شیرین‌سازی در عربستان اول RO با سهم ۵۳ درصد و پس از آن MSF با سهم ۱۲ درصد می‌باشد؛ هرچند تمایل و گرایش عربستان در سال‌های اخیر به سمت RO متمایل شده است. هم‌مکانی بین نیروگاه و تاسیسات نمک‌زدایی به استفاده از منابع موجود کمک می‌کند. آب خنک‌کننده نیروگاه به‌عنوان منبعی برای مخلوط کردن پساب نمک‌زدایی برای رقیق‌سازی و کاهش شوری قبل از تخلیه استفاده می‌شود. علاوه بر این، عربستان سعودی به دلیل مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی خود به RO متمایل شده است. به همین ترتیب، ایالات‌متحده از RO برای ۶۹ درصد از ظرفیت نمک‌زدایی خود استفاده می‌کند، که با فن‌آوری دوم NF با سهم ۱۵ درصد، فاصله دارد. برخلاف سایر نقاط جهان، ایالات‌متحده از NF به عنوان دومین فن‌آوری کاربردی نمک‌زدایی استفاده می‌کند، زیرا هزینه عملیاتی و نگهداری کمتری نسبت به RO دارد (Alobireed, 2014).

۳-۲- چالش‌های محیط‌زیستی

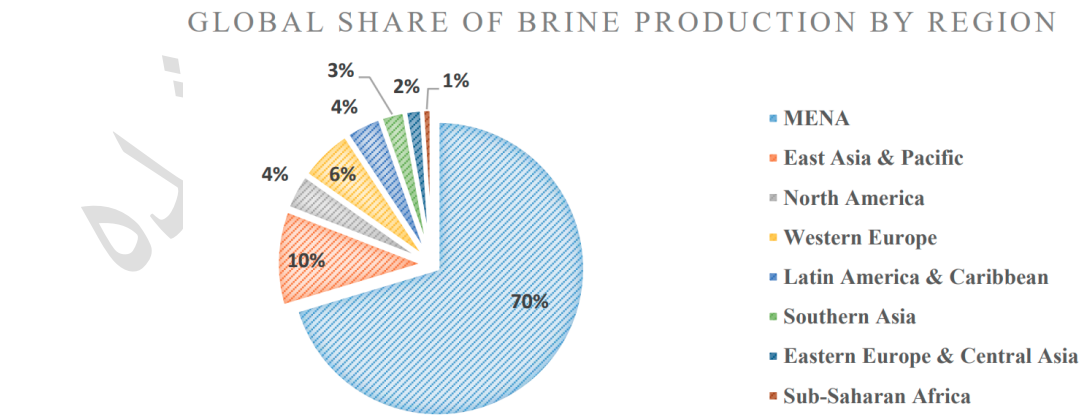
نمک‌زدایی آب، در حالی که به کشورها کمک می‌کند تا به طور قابل اعتماد آب شیرین را تامین کنند، به دلیل اثرات بالقوه محیط‌زیستی و اقتصادی آن همچنان بحث برانگیز است. مانند هر فرآیند صنعتی دیگری، اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی نمک‌زدایی باید شناسایی، مدیریت و کاهش یابد. پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از مصرف آب دریا و دفع آب‌های غلیظ و گرم‌تر، ماهی‌ها، جوامع اعماق دریا و دیگر ارگانیسم‌های ساحلی را تهدید می‌کند. در حالی که اثرات اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه عملیاتی و نگهداری، هزینه انرژی و هزینه مدیریت پساب نمکی است. همچنین، آلایندگی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی برای واحدهای شیرین‌سازی بطور غیرمستقیم تاثیرگذار خواهد بود.

۳-۲-۱- پساب غلیظ نمک

به طور کلی، با عبور آب شور از واحد نمک‌زدایی، آب شیرین (محصول) و آب نمک غلیظ فوق شور (پساب نمکی) تولید می‌شود. این پساب، حاوی مقدار قابل توجهی نمک (عمدتاً NaCl) و غلظت‌های متفاوت سرب، ید و نیترات است. کمیت و کیفیت پساب خروجی به نوع آب خوراک، تکنولوژی مورد استفاده و حداکثر ظرفیت کارخانه بستگی دارد. نرخ بازیافت آب برای تعیین درصد تولید آب نمک با تقسیم مقدار آب‌شیرین‌تولیدشده بر مقدار آب‌خوراک محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش کیفیت آب خوراک، میزان

بازیابی افزایش می‌یابد و مقادیر کمتری آب نمک تولید می‌شود. برای توضیح بیشتر، اگر یک تاسیسات نمک‌زدایی با نرخ بازیافت ۰/۶ کار کند، به این معنی است که ۶۰ درصد از آب خوراک به آب شیرین تبدیل می‌شود و به طور پیش‌فرض، ۴۰ درصد باقی‌مانده به آب نمک تبدیل می‌شود. با در نظر گرفتن RO به عنوان مثال، نرخ بازیافت کمتر از ۴۲ درصد با آب دریا در مقایسه با ۶۵ درصد برای نمک‌زدایی آب شور ثبت شده است (Jones, 2019).

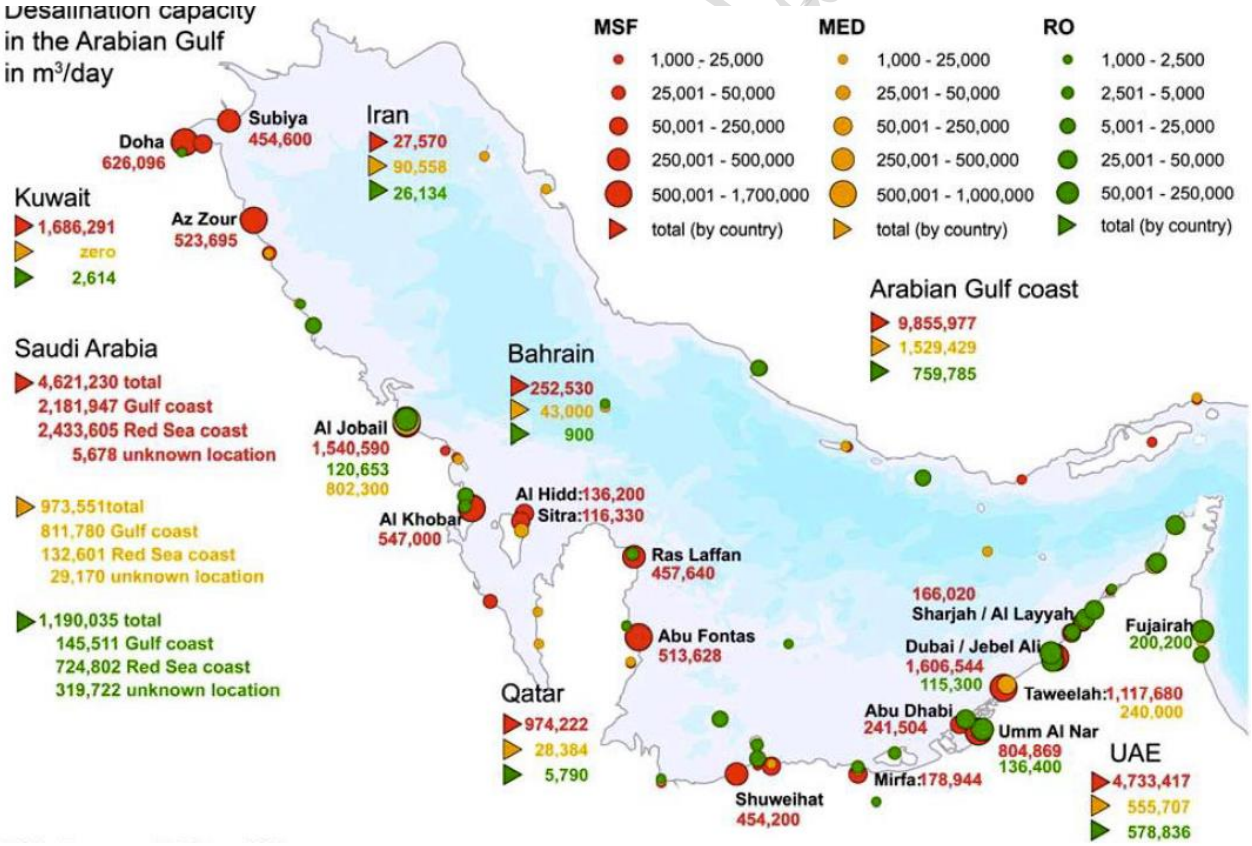
مطابق شکل (۲)، در سال ۲۰۱۸، در مجموع ۱۴۱/۵ میلیون مترمکعب در روز پساب شور از واحدهای شیرین‌سازی دفع شد که بیش از ۷۰ درصد از آن سهم خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA)، ۱۰/۵ درصد سهم آسیای شرقی و اقیانوس آرام و ۳/۹ درصد سهم آمریکای شمالی بود. آب نمک تولیدی MENA می‌تواند تا ۵۰ درصد آب فرآوری‌شده آن باشد، که به این معنی است که میزان بازیابی و کارائی آنها پایین است. آب نمک یا از طریق تخلیه به آب سطحی، تزریق به آب‌های عمیق یا سایر روش‌ها به سیستم آب جهانی دفع می‌شود و یا با هدف تخلیه مایع صفر[۱۸] (ZLD) مورد تصفیه قرار می‌گیرد. سیستم‌های ZLD برای دستیابی به نرخ بازیابی حداکثری با نرخ بین ۹۵ تا ۹۹ درصد (تولید حداقل پساب نمکی) طراحی شده‌اند. علی‌رغم دانستن اینکه تصفیه آب نمک گزینه بهتری است، بسیاری از مناطق هنوز آب نمک دفع شده را در آب دریا دفع می‌کنند. در سطح جهانی، هیچ استراتژی تخلیه پساب مشخصی متناسب با نوع، اندازه و فن‌آوری موجود برای نمک‌زدایی، وجود ندارد. در عربستان سعودی و اکثر کشورهای MENA، نیروگاه‌های نمک‌زدایی در مجاورت آب‌های ساحلی (دریای سرخ یا خلیج فارس) بوده و بیشتر آنها با یک نیروگاه تولید الکتریسیته همراه هستند و آب نمک با آب خنک‌کننده نیروگاه مخلوط و سپس از طریق لوله‌هایی به دریا تخلیه می‌شود (Report, 2019). در ایالات‌متحده آمریکا نیز کارخانه‌های نمک‌زدایی بیشتری در سواحل کالیفرنیا ساخته شده و پساب خروجی آن پس از مخلوط شدن با فاضلاب، آب نمک را دوباره به آب دریا دفع می‌کنند.



شکل ۲- تولید آب نمک بر اساس منطقه و درصد سهم جهانی (Jones, 2019)

مجوزهای سیستم ملی حذف آلاینده[۱۹] (NPDES) و قوانین کیفیت آب ایالتی/محلی، ضوابط استاندارد برای دفع پساب واحدهای شیرین‌سازی آب دریا در جهت عدم آسیب به اکوسیستم دریائی و آبزیان را تدوین نموده است. با این حال، چالش‌های زیادی وجود دارد. به عنوان مثال، هیچ هدف خاصی برای جزئیات نحوه تصفیه یا کنترل آب نمک، و همچنین هیچ محدودیتی برای افزایش غلظت نمک وجود ندارد. تحقیقات علمی پیشنهاد کرده‌اند که سطح شوری پساب خروجی نباید از ۲ تا ۳ PSU (واحد عملی شوری[۲۰]) تجاوز کند زیرا اکوسیستم دریایی برای دفع پساب سطوح بیش از آن دچار اثرات نامطلوب خواهد شد. علاوه بر سمیت ناشی از شوری پساب شور، اختلاف دمای پساب خروجی با منابع آب پذیرنده نیز مطلوب نیست؛ اما اثرات سوء آن کمتر است.

در مقیاس جهانی، اقیانوس‌ها و دریاهای باز و عمیق، آسیب‌پذیری کمتری نسبت به تخلیه پساب شور واحدهای شیرین‌سازی دارند. اما محیط‌های دریایی نیمه بسته و محلی، بیشتر تحت آسیب دفع پساب شور قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، خلیج فارس یک دریای نیمه محصور کم عمق (با میانگین عمق ۳۵ متر و حداکثر ۱۰۰ متر) می‌باشد که مطابق شکل (۳) یکی از نواحی با بیشترین تعداد و حجم واحدهای شیرین‌سازی می‌باشد. در مناطق کم‌عمق پتانسیل تشکیل حباب‌های آب شور بیشتر است (Jones, 2019).



شکل۳- ظرفیت، نوع و واحدهای شیرین‌سازی آب در خلیج فارس (ارقام مترمکعب در روز) (Lattemann, 2010)

بنابراین در شرایطی که اختلاط و پراکندگی پساب در آب دریا به شکل مناسبی انجام نشود، مقدار زیادی از آب شورتر در کف دریا تجمع‌یافته و در نتیجه به دلیل کمبود اکسیژن به موجودات کف دریا آسیب خواهد زد. اما در اقیانوس‌ها و دریاهای باز ممکن است اثرات منفی کمتر باشد. به عنوان مثال، شیلی در عرض جغرافیایی قرار دارد که در معرض جزر و مدی قوی است که می‌تواند به اختلاط سریع پساب نمکی تخلیه شده در اقیانوس آرام کمک کند (Ihsanullah, 2021). در نتیجه، کارخانه‌های نمک‌زدایی ساحلی، لوله‌های خود را در پشت نواحی جزر و مدی نصب می‌کنند تا به حداکثر رقت و در نتیجه تجمع کمتر کنسانتره نمک در محیط اعماق دریا برسند.

هرچند بنابر برخی تحقیقات در عربستان ادعا شده تاثیرات سوء محیط‌زیستی مربوط به تخلیه پساب به لحاظ شوری یا اختلاف دما قابل توجه نیست، لیکن در تحقیقات متعدد علمی ثابت شده که تخلیه پساب واحدهای شیرین‌سازی آب دریا، به آبزیان آسیب می‌رساند و در بلندمدت اکوسیستم دریائی محل تخلیه را دچار اختلال جدی می‌نماید (Jones, 2019).

در جهت حذف تبعات منفی، تصفیه و تخلیه ایمن پساب شور خروجی از واحدهای شیرین‌سازی با هدف جلوگیری از آسیب به اکوسیستم دریایی ضروری است. مدیریت پساب نمکی می‌تواند شامل اضافه کردن آب خنک غیرقابل شرب برای کاهش شوری و دما، قبل از تخلیه مجدد به اقیانوس باشد. روش متعارف و مقرون‌به‌صرفه، بازگرداندن آب نمک به اقیانوس با اختلاط کامل بدون انباشتگی غلظت نمک می‌باشد. البته اتخاذ سیستم تخلیه مایع صفر (ZLD) برای تصفیه آب نمک رویکرد مطلوب‌تری است که مستلزم سرمایه‌گذاری و صرف هزینه بیشتر است. نرخ بازیابی تأسیساتی که از ZLD استفاده می‌کند می‌تواند به ۹۹ درصد برسد، به این معنی که تولید آب نمک ناچیز خواهد بود. فرآیند ZLD منجر به محصول خشک جامد (مستقیماً در محل دفن زباله یا بازیافت نمک) و مقدار کمی‌آب تصفیه شده می‌شود که می‌تواند در همان تاسیسات برای اهداف تصفیه، مورد استفاده مجدد قرار گیرد (Charisiadis, 2018).

۳-۲-۲- اثرات منفی در آبگیر ورودی[۲۱]

جریان دریافتی از دریا برای واحد شیرین‌سازی فقط حاوی آب و نمک نیست. کمیسیون انرژی کالیفرنیا در یکی از گزارش‌های خود آب دریا را چنین توصیف کرد: «این یک زیستگاه شامل اکوسیستمی کامل از فیتوپلانکتون‌ها، ماهی‌ها و بی‌مهرگان است». در طی فرآیند مصرف، دو مکانیسم اجتناب‌ناپذیر حیات آبزیان را تهدید می‌کند. اول، برخورد، هنگامی‌که موجودات بزرگتر (مانند ماهی یا خرچنگ) با مش غربالگری ورودی برخورد کرده و کشته می‌شوند. تخلیه ضایعات شیمیایی عواملی که برای تمیز کردن صفحه‌ها استفاده می‌شوند، یک پیامد نامطلوب ثانویه مرتبط با برخورد است. دوم، زمانی که گونه‌های کوچک‌تر (مانند جلبک‌ها، پلانکتون‌ها

یا باکتری‌ها) در طول عملیات از طریق کانال‌های ورودی به تصفیه‌خانه می‌روند و تلف می‌شوند. سپس، این بقایا دوباره در آب دریا ریخته شده و بهم‌خوردن تعادل در اکوسیستم را موجب می‌شود (Gleick, 2006).

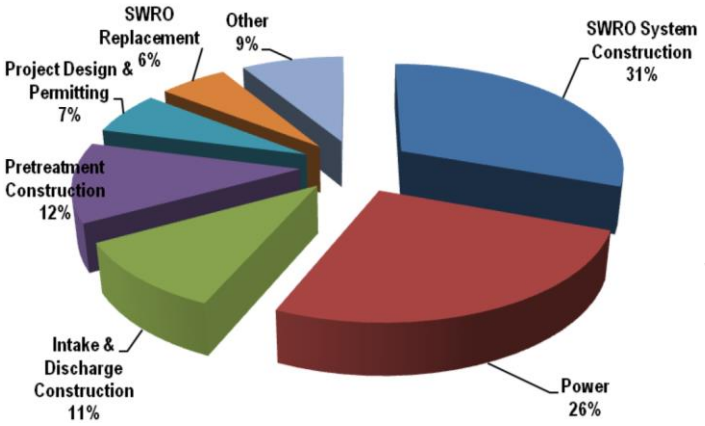
در سال ۲۰۱۸، یک تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی توسط دکتر توماس ام. میسیمر[۲۲] برای بررسی پیامدهای ورودی آب و پیشنهاد راه حل انجام شد (Missimer, 2018). وی گزارش کرد با تمهیداتی می‌توان برخورد و آسیب موجودات دریائی را مدیریت و از خسارات آن کاست. بطور مثال می‌توان آبگیری را از عمق پائین‌تر اقیانوس‌ها که در آن موجودات کمتری وجود دارد، انجام داد. علاوه بر این، سیستم‌های آبگیر زیرسطحی برای حذف این اثرات منفی، پیشنهاد شد. با این حال، آبگیر زیرسطحی علاوه بر هزینه بالاتر، اثرات اجتماعی دیگری مانند کاهش دسترسی به سواحل و اختلال در چشم‌انداز بصری را در پی دارد.

۳-۳- تحلیل اقتصادی و محاسبه قیمت تمام‌شده

هزینه نمک‌زدایی متغیر بوده و از عوامل متعددی نظیر هزینه انرژی، قیمت فروش آب، پیامدهای محیط‌زیستی و استفاده از زمین، تاثیر می‌پذیرد. برای ایران علاوه‌براین موارد، تحریم و دشواریِ دسترسی به فناوری‌های سایر کشورها نیز وجود دارد.

تحلیل اقتصادی هزینه‌های شیرین‌سازی کشورها به شدت تابع شرایط محلی بوده و عواملی نظیر کیفیت آب شور، طول خطوط انتقال، دسترسی و هزینه‌هایی تامین زمین، قیمت انرژی، ضوابط و مقررات محیط‌زیستی مربوط به دفع پساب و کیفیت مورد نیاز آب آشامیدنی، بر آن تاثیرگذار می‌باشد؛ در شکل (۴) و جدول (۲) برآورد هزینه‌های راه‌اندازی و بهره‌برداری از واحدهای شیرین‌سازی آب شور برمبنای شرایط نرمال، ارائه شده است. بنابر تحلیل‌های اقتصادی، بطور میانگین حدود ۵۰ درصد از کل هزینه‌ها در تاسیسات RO ناشی از تقاضای انرژی است. واحدهای شیرین‌سازی با روش‌های حرارتی حتی به انرژی بیشتری نیاز دارند، بنابراین هزینه‌های بالاتری دارند. از آنجایی که انرژی یک آیتم هزینه عمده برای نمک‌زدایی است، اپراتورها و دولت‌ها باید تلاش بیشتری برای مدیریت مصرف انرژی انجام دهند. یکی از این راه‌حل‌ها، احداث نیروگاه تولید برق در نزدیکی تاسیسات نمک‌زدایی برای داشتن تاسیسات دو منظوره است که همزمان آب شیرین و برق تولید کند (Alkaisi, 2017).

همانطور که در جدول (۳) نیز ذکر شده، با مطالعه هزینه عملیات ۲۵ کارخانه نمک‌زدایی RO در سراسر جهان، قیمت تمام‌شده تقریباً در محدوده ۰/۴۵ تا ۱/۴۸ دلار برای هر متر مکعب برای اولین سال بهره‌برداری بدست آمده است. این اعداد شامل تغییرات هزینه عملیاتی به دلیل در نظر گرفتن شوری آب خوراک، فن‌آوری مورد استفاده، تقاضای انرژی، یارانه‌های موجود و هر شرایط محیطی دیگری است که به آن توجه شده است. هزینه انرژی (برق) بزرگترین متغیر منفرد است که بر هزینه خالص یک کارخانه آب‌شیرین‌کن تاثیر می‌گذارد (Youssef, 2014).



شکل۴- تفکیک هزینه‌های معمول برای واحدهای RO شیرین‌سازی آب دریا (SWRO) (Youssef, 2014)

جدول ۲- متغیرهای عملیات و نگهداری واحدهای نمک زدایی (مثال تیپ) (Youssef, 2014)

ردیف	متغیر	توضیحات	سهم از هزینه
۱	نگهداری	ابزار و تجهیزات تعمیر و نگهداری پمپ تعمیر و نگهداری تاسیسات ورودی تعویض جزئی تجهیزات ویدئومتری و کنترل	٪ ۶
۲	قانونی/مجاز	رعایت ضوابط محیط‌زیستی دفع پساب رعایت استاندارد کیفیت آب آشامیدنی سایر ضوابط و مقررات محیط‌زیستی	٪ ۲
۳	عملیات	کارکنان و کارگران	٪ ۶
		دفع لجن و مواد زائد در مراحل مختلف	٪ ۴
		تعویض فیلترهای کارتریج و غشای RO	٪ ۱۱
		انرژی (برق)	٪ ۵۵
		مواد شیمیائی مورد نیاز	٪ ۶
		سایر موارد	٪ ۱۰
۴		جمع کل:	۱۰۰

جدول ۳- محاسبه هزینه‌های شیرین‌سازی آب و برآورد در ایران با یارانه انرژی

روش	سرمایه‌گذاری احداث تاسیسات	انرژی مورد نیاز	قیمت تمام‌شده جهانی
	$/m^3.day$	kWh/m^3	$/m^3$
روش‌های متداول حرارتی	۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰	>۱۰	۰/۸ تا ۱/۵
تقطیر چندمرحله‌ای	۹۰۰ تا ۲۰۰۰	۵ تا ۱۰	۰/۷ تا ۱/۲
اسمز معکوس آب دریا	۹۰۰ تا ۲۵۰۰	۳ تا ۵	۰/۵ تا ۱/۲
اسمز معکوس آب لب‌شور	۳۰۰ تا ۱۲۰۰	۰/۵ تا ۳	۰/۲ تا ۰/۴

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و بادی، که سازگار با محیط‌زیست است، نیز مورد توجه قرار دارد هرچند قیمت تولید برق حرارتی از سوخت‌های فسیلی به لحاظ اقتصادی، به‌صرفه‌تر است. اتحادیه جهانی نمک‌زدایی[۲۳] (IDA) رسیدن به هدف تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر برای ۲۰ درصد از نمک‌زدایی‌های جدید یا به‌روزرسانی شده تا سال ۲۰۲۵ را پیشنهاد داده است . به عنوان نمونه، عربستان سعودی قراردادی ۱۳۰میلیون دلاری برای ساخت نیروگاه SWRO با انرژی خورشیدی با تولید ۶۰ هزار مترمکعب در روز امضا کرده است (Alkaisi, 2017). کشورهای دیگر مانند امارات متحده عربی، اسپانیا و هند در حال اجرای آزمایش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ قبل از استفاده کامل هستند.

علاوه بر هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری اولیه در احداث تاسیسات، سایر هزینه‌ها شامل انتقال و توزیع آب، ضدعفونی و گندزائی آب و هزینه‌های محیط‌زیستی اقلام اصلی قیمت تمام‌شده آب در تاسیسات شیرین‌سازی را تشکیل می‌دهند.

هرچند اظهارنظر دقیق در خصوص قیمت تمام شده آب مستلزم بررسی دقیق بصورت موردی با احتساب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نرخ بهره و نرخ فروش آب است، لیکن در جدول (۳) سعی شده برمبنای اطلاعات موجود، برآورد قیمت تمام‌شده آب شیرین‌سازی شده به روش RO با احتساب هزینه انتقال، ارائه گردد. در این جدول با توجه به شرایط انرژی در ایران و در دسترس بودن منابع فسیلی فراوان در مناطق جنوبی دو سناریو قیمت جهانی انرژی و قیمت انرژی برای شیرین‌سازی آب در ایران (یارانه انرژی) تحلیل شده است.

قیمت تمام‌شده آب شیرین‌سازی‌شده بستگی کامل به بهای انرژی مورد استفاده دارد. در ایران، هزینه انرژی برای تاسیسات آب و فاضلاب مشابه بخش کشاورزی و با یارانه محاسبه می‌شود. بنابر ابلاغ وزارت نیرو (بخشنامه ۱۴۰۱/۲۷۸۰۰/۲۰۰ مورخ ۱۴۰۱/۰۴/۲۸) متوسط بهای هر کیلووات‌ساعت برق مصارف کشاورزی ۲۷۵ ریال بوده که با ضریب ماه‌های گرم برابر ۳۳۰ ریال خواهد بود که در مقایسه با نرخ صادرات برق (۸ تا ۱۰ سنت برای هر کیلووات‌ساعت معادل ۳۶هزار ریال)، با ۹۹ درصد یارانه همراه است.

در جدول (۴) برای محاسبه قیمت تمام‌شده نرخ سود سرمایه‌گذاری ۲۰ درصد، عمر مفید تاسیسات سازه‌ای ۱۵ سال و عمر تجهیزات مکانیکال و غشاء ۵ سال فرض شده است. همچنین، به ازای هر ۱۰۰ کیلومتر انتقال آب و به ازای هر ۲۰۰ متر اختلاف ارتفاع برای انتقال یک مترمکعب آب، بطور تقریبی یک کیلووات-ساعت انرژی مورد نیاز خواهد بود.

جدول۴- برآورد قیمت تمام‌شده آب شیرین‌سازی‌شده برای نواحی مختلف ایران (روش اسمز معکوس)

مراکز استانی	طول مسیر خط انتقال (km)	قیمت تمام‌شده* (ریال/مترمکعب)	
		بهای جهانی انرژی بدون کمک دولتی	انرژی با یارانه و کمک دولتی
چابهار، بندرعباس و بوشهر (مجاورت دریا)	صفر	۶۲۴۰۰۰	۴۳۲۰۰۰
یزد	۱۰۰۰	۱۱۶۴۰۰۰	۹۷۲۰۰۰
بیرجند	۱۱۰۰	۱۲۱۸۰۰۰	۱۰۲۶۰۰۰
جنوب کرمان	متوسط: ۵۰۰	۸۹۴۰۰۰	۷۰۲۰۰۰

* مبنای محاسبات، تبدیل هر یک دلار معادل ۴۰۰هزار ریال بوده است.

در تمامی این حالت‌ها حتی با اعمال یارانه انرژی، قیمت تمام‌شده آب نسبت به سایر روش‌ها از جمله اصلاح فرایندها جهت کاهش مصرف آب (تمرکز روی برنامه‌های خوش‌مصرفی و سازگاری با کم‌آبی) و یا بازچرخانی پساب برای صنعت، گران‌تر و غیرقابل توجیه اقتصادی است. بنابراین، بجز مصارف شرب که نیاز حیاتی جامعه بوده و تامین منابع پایدار آب به لحاظ ژئواستراتژیک فراتر از تحلیل اقتصادی ضرورت دارد، در خصوص مصارف کشاورزی توجیه‌ناپذیر و در خصوص مصارف صنعتی هم نیازمند آنالیز و تحلیل دقیق مطابق با شرایط خاص صنعت و موقعیت جغرافیائی در مقایسه با سناریوهای جایگزین می‌باشد. بنابراین، مقایسه وضعیت تامین آب در ایران، با کشورهای حاشیه خلیج‌فارس صحیح نیست. سرانه آب تجدیدپذیر به ازای هر نفر در عربستان، امارات متحده عربی، کویت، بحرین و قطر به ترتیب ۸۹، ۲۲، ۷، ۴ و ۳۵ مترمعکب در سال است و در این کشورها تقریباً رودخانه یا منابع قابل توجه آب سطحی وجود ندارد. در مقابل، این کشورها سرشار از منابع انرژی بوده و به دلیل مجاورت با خلیج فارس و دریای سرخ، دسترسی به آب شور برای آنها فراهم است. بنابراین شیرین‌سازی آب دریا راهکاری مطلوب برای این منطقه تلقی می‌شود هرچند ممکن است برای سایر کشورها، در این حد مطلوبیت نداشته باشد.

۳-۴- برآورد نیاز شیرین‌سازی در ایران

در ایران وزارت نیرو به عنوان نهاد متولی مدیریت منابع آب، ، استان‌های کشور را مطابق تعاریف جدول (۵) در شش دسته مرطوب، نرمال، قابل تحمل، دارای تنش آبی، دارای تنش آبی شدید و کمبود آب طبقه‌بندی کرده است؛ استان‌های بوشهر، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، فارس، کرمان، هرمزگان و یزد در رده مناطق در مواجه با کمبود آب قرار گرفته‌اند. بنابراین، استفاده از فن‌آوری شیرین‌سازی آب دریا به عنوان یک گزینه برای تامین پایدار بخشی از نیاز آبی این استان‌ها مورد توجه قرار دارد.

جدول ۵- توصیف وضعیت و طبقه‌بندی مناطق برمبنای منابع آب دردسترس

منطقه	توصیف وضعیت
مرطوب	امکان افزایش ظرفیت منابع آب به منظور مدیریت و مصـرف در سـال های آتـی به ویژه در آبگیری مخازن فراهم است.
نرمال	وضعیت منابع آب در شرایط عادی بوده و مدیریت آن مطابق روال معمول قابل انجام است.
قابل تحمل	شرایط در آستانه ورود به تنش آبی قرار دارد که با اعمال مدیریت مناسب و بدون نیاز به اتخاذ تمهیدات ویژه می توان از آن پیشگیری نمود.
تنش آبی	وجود محدودیت جدی برای تامین آب در دسترس، لیکن با اعمال روش‌های ویژه مدیریتی وبرنامه ریزی منابع آب عبور از آن امکان‌پذیر خواهد بود.
تنش آبی شدید	وضعیت قرمز برای کمبود آب وجود دارد به نحوی که با اعمال تمهیدات سازه ای (مانند حفر چاه و استفاده از حجم مرده مخازن سدها) و سایر ابتکارات مدیریتی میتوان از شدت صدمات کاست. البته تامین نیاز بخشهائی از مصارف بویژه کشاورزی دشوار بوده و بایستی نسبت به صرفه‌جویی عملی در بخش های مختلف اقدام نمود.
کمبود آبی	بیانگر وضعیت هشدار بوده که آب کافی برای پاسخگویی به نیاز منطقه وجود ندارد و لازمست آمادگی لازم برای ورود به آستانه شرایط حاد مد نظر قرار گیرد.

کمبود آب شامل تنش آب، کم‌آبی و بحران آب به معنای نبود منابع آب شیرین برای تأمین تقاضای آب متعارف می‌باشد که بایستی به هر شکل ممکن، صرفنظر از مسائل اقتصادی، نسبت به رفع پایدار آن اقدام نمود.

نگاه نوآورانه این پژوهش، مقایسه و تحلیل بخش دارای کمبود آب کشور به عنوان یک ناحیه مستقل با کشورهای کم‌آب حاشیه خلیج‌فارس و در نتیجه، محاسبه ظرفیت مورد نیاز برای شیرین‌سازی می‌باشد که نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- جدول آمار و تحلیل اطلاعات تولید و مصرف آب و محاسبه ظرفیت شیرین‌سازی

نام کشور/استان		جمعیت سال ۱۳۹۵	سرانه آب تجدیدپذیر	متوسط مصرف خانگی**	ظرفیت شیرین‌سازی ۱۴۰۱	برنامه شیرین‌سازی پیشنهادی (شرب)
		میلیون نفر	مترمکعب	میلیون‌مترمکعب	میلیون‌مترمکعب/سال	میلیون‌مترمکعب/سال
وضعیت فعلی برای کل ایران		۸۰	۱۲۰۶	۵۴۰۰	۲۱۳	۴۲۱
منطقه خشک ایران	س‌وب	۲/۸	۵۱۴	۱۸۹	۲۵	۳۸
	هرمزگان	۱/۸	۱۵۹۶	۱۲۲	۹۹	۲۳
	بوشهر	۱/۲	۸۳۸	۸۱	۵۳	۲۸
	کرمان	۳/۲	۶۰۸	۲۱۶	-	۷۲
	یزد	۱/۳	۷۱	۸۸	-	۲۹

(کمبود آبی مطابق جدول ۲)	خراسان جنوبی	۰/۸	۱۰۲	۵۴	-	۱۸
	کل مناطق	۱۰/۷۵	۸۹۹	۷۵۰	۱۷۷	۲۰۸
عربستان		۳۳	۸۹/۵	۴۲۰۰	۴۳۸۰	-
امارات متحده عربی		۹/۹	۲۱/۶	۱۲۶۰	۲۷۵۰	-

* در محاسبه متوسط مصرف خانگی، سرانه مصرف هر نفر در شبانه‌روز برای ایران ۱۸۵ لیتر/نفر-روز و برای عربستان و امارات با توجه به گرمای هوا و پذیرش جمعیت زائر و توریست و همچنین سطح بالای درآمد اقتصادی، بیشتر از ۳۵۰ لیتر/نفر-روز منظور شده است. برای شهرهای مجاورت دریا (فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر) ۱۰۰درصد و برای سایر مناطق ۳۰ درصد از مصرف از شیرین‌سازی لحاظ شده است.

۳-۵- چشم‌انداز نمک‌زدائی

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، کمبود آب بر ۵ میلیارد نفر تأثیر بگذارد. رشد اخیر در بازار جهانی آب‌شیرین‌کن نشان‌دهنده چالش‌ها و چشم‌اندازها برای این صنعت است. چالش‌هایی که مانع رشد نمک‌زدایی می‌شوند شامل هزینه انرژی و نگرانی‌های دریایی و محیط‌زیستی می‌شود. رویکردها برای پرداختن به این چالش‌ها حول محور کاهش هزینه و به حداقل رساندن پیامدهای محیط‌زیستی است. یکی از رویکردهای اصلی برای کاهش هزینه، کاهش مصرف انرژی یا یافتن منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین است. قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر در حال کاهش است و انتظار می‌رود با توجه به فن‌آوری پیشرفته توجه بیشتری را به خود جلب کند. انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند هزینه نمک‌زدایی را در درازمدت کاهش دهند، زیرا قیمت‌ها کاهش می‌یابد و احتمالاً در آینده با پیشرفت فن‌آوری، میزان کاهش بیشتر هم خواهد شد.

از سوی دیگر، تولید آب نمک تاثیر عمده محیط‌زیستی ناشی از نمک‌زدایی است. متأسفانه، در اکثر تأسیسات، پساب نمکی خروجی واحدهای تصفیه در اقیانوس دفع می‌شود زیرا مدیریت آب نمک گران و هزینه‌بر است. مقررات بین‌المللی محیط‌زیست، روش‌های دفع مرسوم مانند تخلیه به آب دریا، آب سطحی یا تزریق چاه عمیق را محدود خواهد کرد.

آب آشامیدنی علاوه بر آب خالص، حاوی مواد معدنی مانند کلسیم، منیزیم، منگنز، سدیم، فلوراید، کلرید، ید و پتاسیم است که برای سلامت انسان حیاتی هستند. از سوی دیگر، آب شیرین‌شده به دلیل فرآیند حذف نمک‌ها و سایر آلاینده‌های یونی طبیعی، فاقد اکثر این عناصر است. سازمان بهداشت جهانی (WHO) ضوابطی را برای کیفیت آب آشامیدنی[۲۴] (GDWQ) و آب آشامیدنی ایمن حاصل از نمک‌زدایی منتشر کرده تا زمینه مقرراتی لازم برای تولید آب آشامیدنی ایمن‌تر فراهم شود (Darre, 2018).

مطالعه‌ای با مقایسه ۲۶ مکان مختلف در اسرائیل قبل و بعد از اجرای نمک‌زدایی نشان داد که نیمی از جمعیت مورد مطالعه (که بعد از آن به آب شیرین شده متکی بودند) کمبود منیزیم داشتند. علاوه بر این، کمبود فلوراید در آب نمک‌زدایی تشخیص داده شده و با پوسیدگی دندان ها مرتبط است. معدنی‌سازی مجدد به عنوان یک فرآیند پس از نمک‌زدایی برای دستیابی به کیفیت مطلوب آب معرفی می‌شود. این کار را می‌توان با مخلوط کردن آب شیرین‌شده با آب‌های زیرزمینی یا اعمال دی‌اکسیدکربن با فیلترهای انحلال

سنگ آهک انجام داد. با این حال، اکثر تاسیسات نمک‌زدایی تمام مواد معدنی ضروری را اضافه نمی‌کنند. بنابراین باید مقررات سختگیرانه‌تری اعمال شود تا اطمینان حاصل شود که آب محصول نهائی، حاوی مواد حیاتی مورد نیاز در حد استانداردهای آب آشامیدنی، باشد (Elsaid, 2020).

با وجود همه این موانع، نمک‌زدایی می‌تواند یکی از مطمئن‌ترین منابع آب برای آینده باشد. برمبنای بررسی کشورهای پیشرو در زمینه شیرین‌سازی آب شور، تحلیل‌های انجام شده و نتایج پژوهش حاضر، گزاره‌های زیر مطابق با شرایط ایران برای برنامه‌ریزان حوزه آب کشور پیشنهاد می‌شود:

۱- با توجه به هزینه تمام‌شده و مقایسه سرانه آب تجدیدپذیر ایران با سایر کشورهای جهان، شیرین‌سازی آب برای مصارف شرب و خانگی در مناطق بدون منابع آب پایدار، اجتناب ناپذیر است اما برای کشاورزی و یا شرب در مناطقی که امکان دسترسی به سایر منابع آب وجود دارد، غیرقابل توجیه است. درخصوص صنعت، در هر مورد با تحلیل اقتصادی قیمت تمام شده آب و میزان دسترسی به سایر منابع آب نظیر پساب فاضلاب شهری و یا امکان اصلاح فرایندها جهت کاهش مصرف آب، تصمیم‌گیری قابل انجام خواهد بود. در این خصوص توجه به مفهوم همبست آب-غذا-انرژی سودمند است.

۲- استفاده از فن‌آوری RO به عنوان مناسب‌ترین روش از بین سایر روش‌های موجود، برای توسعه واحدهای شیرین‌سازی و در مجاورت سواحل ایران توصیه می‌شود. سواحل مکران به دلیل شوری کمتر آب دریای عمان و ظرفیت بالاتر جهت پذیرش پساب شور و خط ساحل طولانی، قابلیت تبدیل به قطب شیرین‌سازی و ارسال آب به استان‌های شرق و مرکز کشور را دارد.

۳- جهت جلوگیری از آسیب فزاینده به اکوسیستم خلیج‌فارس، تشکیل کمیته حفاظت خلیج در برابر پساب شور با مشارکت کشورهای حاشیه مورد نیاز است. با فرض تحقق توسعه شیرین‌سازی تا دو برابر ظرفیت موجود و رسیدن به رقم یک میلیون مترمکعب در روز حتی با فرض عدم توسعه واحدهای شیرین‌سازی در خلیج‌فارس، سهم ایران کمتر از ۵ درصد نسبت به سایر همسایگان ناچیز خواهد بود.

٤- توسعه فن‌آوری‌های صنعتی مربوط به ساخت و نصب و بهره‌برداری تاسیسات شیرین‌سازی آب دریا بصورت بومی برای ایران و با نگاه به صادرات به کشورهای جنوب خلیج‌فارس به عنوان یک صنعت ژئواستراتژیک و سودآور با توجه به ظرفیت بالای ساخت تجهیزات و شرکت‌های دانش‌بنیان کشور، اهمیت دارد.

٥- سرمایه‌گذاری جهت تولید برق هسته‌ای یا تجدیدپذیر جهت رعایت مسائل محیط‌زیستی و حتی احداث نیروگاه‌های حرارتی تولید برق در مجاورت تاسیسات شیرین‌سازی، برای آینده این صنعت مورد نیاز خواهد بود.

٦- با توجه به اینکه حجم قابل توجهی از منابع آب سطحی ایران، بالغ بر ده میلیارد مترمکعب، بصورت سالیانه از غرب و جنوب غرب ایران به کشور عراق و خلیج فارس تخلیه می‌شود و با درنظرگیری مسائل محیطزیستی شیرین‌سازی آب دریا و هزینه تمام‌شده بالای آن، به نظر می‌رسد برای تامین آب نواحی مرکزی و جنوبی ایران، بایستی سایر گزینه‌ها نظیر انتقال آب از نواحی غربی نیز مورد توجه قرار گیرد.

۴- جمع‌بندی

بدون منابع آب شیرین کافی، رفاه اجتماعی و توسعه صنعتی مختل می‌شود. برای شیرین‌سازی آب شور مانند هر عملیات استخراج منابع از معدن، روش ایده‌آلی که کاملاً عاری از مخاطرات محیطی باشد، وجود ندارد. نمک‌زدایی یک فن‌آوری قدرتمند است که می‌تواند از بحران کمبود آب شیرین بطور موثری جلوگیری یا تبعات منفی آن‌را کاهش دهد. کمبود آب و مسائل مربوط به بهداشت عمومی تحت فشار فزاینده‌ای از رشد جمعیت و تغییرات آب و هوایی قرار دارد. تا سال ۲۰۲۵، بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق تحت تنش آبی زندگی خواهند کرد. اگرچه نمک‌زدایی بسیار مفید است، اما اولا هر کشوری نمی‌تواند هزینه آن‌را بپردازد و ثانیا بجز در مناطق با بحران تنش شدید آبی، برای سایر مناطق استفاده از سایر روش‌ها مقرون‌به‌صرفه‌تر است. اکثریت قریب به اتفاق کشورهایی که در حال حاضر از نمک‌زدایی استفاده می‌کنند، مناطقی با درآمد بالا و سرانه آب تجدیدپذیر کمتر از ۵۰۰ مترمکعب/نفر-سال هستند. رشد فناوری‌های شیرین‌سازی همراه با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند در آینده به تولید آب شیرین پاک بیشتر با هزینه کمتر، کمک نمایند.

۵- قدردانی

ایده اصلی انجام پژوهش و نگارش این مقاله در کلاس درس استاد فرزانه امیر حبیب‌الله سیاری، رئیس ستاد و معاون هماهنگ‌کننده ارتش جمهوری اسلامی ایران و عضو هیات‌علمی دانشگاه عالی دفاع ملی، در راستای تامین پایدار آب به عنوان یکی از زیرساخت‌های اصلی توسعه سواحل مکران مطرح گردیده که جای تقدیر و تشکر دارد. ارزش معنوی این اثر به امیر سیاری و تمامی دریادلان نیروی دریائی ارتش جمهوری اسلامی ایران تقدیم می‌شود.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Guidelines for Drinking-Water Quality
2- World Health Organization
3- Part per Million (ppm) = mg/Lit

4- Multi-Stage Flash
5- Multi-Effect Distillation
6- Reverse Osmosis
7- Microfiltration
8- Ultrafiltration
9- Nano filtration
10- Middle East and North Africa
11- Saline Water Conversion Corporation
12- Saline Water Conversion Act
13- Office of Water Research and Technology
14- Brackish
15- Carlsbad desalination plant
16- California Department of Water Resources
17- United Nations Food and Agriculture Organization
18- Zero Liquid Discharge
19- National Pollutant Discharge Elimination System
20- Practical Salinity Unit
21- Water Intake
22- Dr. Thomas M. Missimer
23 International Desalination Association's
24- Guidelines for Drinking Water Quality

۷- منابع و مراجع

Ahmed Alkaisi, R. M., and Ahmad Sharifian, (2017), "A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy" Energy Procedia, 110, 7, DOI: 10.1080/02508060.2021.1889192.

AJJUR, S. B. B., and H.M., (2021), "A review on implementing managed aquifer recharge in the Middle East and North Africa region: methods, progress and challenges", WATER INTERNATIONAL, 46, DOI: 10.1080/02508060.2021.1889192.

Alobireed, A. N., (2014), "Global Water Desalination: A Comparison Between Saudi Arabia and The United States of America", Submitted to the Graduate Faculty of the Department of Environmental and Occupational Health, Graduate School of Public Health in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Public Health.

Asif Matin A, F. R. B., Hafiz Zahid Shafi C, and Syed M. Zubair, (2019), "Scaling of reverse osmosis membranes used in water desalination: Phenomena, impact, and control; future directions", Desalination, 455, 15.

Charisiadis, C., (2018), "Brine zero liquid discharge (ZLD) fundamentals and design", LENNTECH https://www.lenntech.com/Data-sheets/ZLD-booklet-for-Lenntech-site-min-L.pdf.

Darre, N. C., and Toor, G. S., (2018), "Desalination of water: a review", Current Pollution Reports, 4, 7.

Domenico Curto, and V. F. A. A. G., (2021), "A Review of the Water Desalination Technologies", Appl. Sci, 11, DOI: 10.3390/app11020670.

Edward Jones, M. Q., Michelle T.H. Van Vliet, Vladimir Smakhtin, and Seong-Mu Kang, (2019), "Review: The state of desalination and brine production: A global outlook", Science of the Total Environment, 657, 13, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.

FAO, (2018), "Progress on level of water stress - Global baseline for SDG 6 Indicator", 6.4.2 2018. Rome. FAO/UN-Water. 58 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO www.fao.org/3/CA1592EN/ca1592en.pdf.

Hao Huang, L. Z., Qiao Yu, Panlong Lin, Jing Xu, Xianze Yin, Shaohua Chen, Hua Wang, and Luoxin Wang, (2020), "Flexible and Highly Efficient Bilayer Photothermal Paper for Water Desalination and Purification: Self-Floating, Rapid Water Transport, and Localized Heat", ACS Appl. Mater. Interfaces, 12.

Ihsanullah Ihsanullah, M. A. A., Muhammad Sajid, and Mazen K. Nazal, (2021) "Review: Desalination and environment_ A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies", Science of The Total Environment, 780, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146585.

Jones, E., Qadir, M., Van Vliet, M. T., Smakhtin, V., and Kang, S. M., (2019), "The state of desalination and brine production: A global outlook", Science of the Total Environment, 657, 13, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.

Keller, N. H., T., (2020), "OECD water governance principles on the local scale – an exploration in Dutch water management", International Journal of River Basin Management, 18, DOI: 10.1080/15715124.2019.1653308.

Khaled Elsaid, E. T. S., Mohammad Ali Abdelkareem, Mohamed S. Mahmoud, Mohamad Ramadan, and A.G. Olabi, (2020), "Environmental impact of emerging desalination technologies: A preliminary evaluation", Journal of Environmental Chemical Engineering, 8, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141528.

Miller, O. L., Putman, A. L., Alder, J., Miller, M., Jones, D. K., and Wise, D. R., (2021), "Changing climate drives future streamflow declines and challenges in meeting water demand across the southwestern United States", Journal of Hydrology X, 11.

Missimer, T. M., and Maliva, R. G., (2018), "Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls", Desalination, 434, 17, DOI: 10.1016/j.desal.2017.07.012.

Moradi, M. R., Pihlajamaki, A., Hesampour, M., Ahlgren, J., and Manttari, M., (2019), "End-of-life RO membranes recycling: reuse as NF membranes by polyelectrolyte layer-by-layer deposition", Journal of Membrane Science, 584, 9, DOI: 10.1016/j.memsci.2019.04.060.

P.G. Youssef, R. K. A.-D., and S.M. Mahmoud, (2014), "Comparative Analysis of Desalination Technologies", Energy Procedia, 61, 4, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.258.

Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., and Loizidou, M., (2019), "Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review", Science of the Total Environment, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.351.

Peter H. Gleick, G. W. J., (2006), "Desalination with a grain of salt", A California Perspective Heather Cooley, ISSN: 13: 978-1-893790-13-1.

Phillip, M. E. A. W. A., (2011), "The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment", Science of the Total Environment, 333, 6.

Report, A., (2019), "The Saline Water Conversion Corporation (SWCC)", https://www.swcc.gov.sa/Arabic/MediaCenter/SWCCPublications/PUBLICATION%20FILES/ANNUAL_REPORT_2019579972DE-2CB9-4E02-91F3-0DDB5D025391.PDF.

Sabine Lattemann, M. D. K., Jan C. Schippers, and Gary Amy, (2010), "Global Desalination Situation", Sustainability Science and Engineering, 2, 34, DOI: 10.1126/science.1200488.

Wiener, M. V. S., Benjamin, and Ocampo Diaz, Juan, So, A. and Eliezer, Amir, (2012), “Materials and Corrosion Control in Desalination Plants”, Materials Performance, 51, 5.

Xu, P., Cath, T. Y., Robertson, A. P., Reinhard, M., Lechie, J. O., and Drewes, J. E., (2013), “Critical review of desalination concentrate management, treatment and beneficial use”, Environmental Engineering Science, 30, 12, DOI: 10.1089/ees.2012.0348.

Ziolkowaska, J. R., and Reyes, R., (2017), “Prospects for desalination in the United States: Experiences from California, Florida, and Texas”, In Competition for Water Resources, 18, DOI: 10.1016/B978-0-12-803237-4.00017-3.

پذیرفته شده | ویرایش نشده