Science Popularization

Environmental Challenges of Seawater Desalination Plants

Esmaeel Parizi[1,*], Samad Hamzei[1], Seiyed Mossa Hosseini[2]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:

Receive Date:
25 May 2026

Revise Date:
08 June 2026

Accept Date:
09 June 2026

Available online:
21 June 2026

Keywords:

Renewable Energy
Brine
Reverse Osmosis
Hybrid Technologies
Environmental Sustainability

The growing global demand for freshwater—particularly in arid and semi-arid regions—has underscored the necessity of adopting sustainable water supply solutions, making seawater desalination a strategic and technological option. A comprehensive review of emerging technologies reveals that significant advancements have been achieved in recent years in both membrane and thermal methods, including improved membrane selectivity and permeability, reduced energy consumption, optimization of reverse osmosis processes, and the development of hybrid and multi-stage systems. However, key challenges such as high energy consumption, dependence on fossil fuels, the generation and discharge of highly concentrated brine, and extensive chemical use continue to limit the sustainability of these systems. Integrating renewable energy sources, (particularly photovoltaic, solar-thermal, and wind energy systems,) offers significant potential to reduce the carbon footprint and enhance environmental performance, though operational issues such as cooling, scaling, dust accumulation, and equipment durability must be managed. Environmental impact assessments indicate that brine discharge remains the most critical ecological challenge, and the use of advanced modeling, modern diffusers, resource recovery strategies, and minimal-discharge technologies can help mitigate its negative effects. The development of advanced fouling-resistant membranes, hybrid energy systems, and optimized energy consumption strategies is considered essential for achieving a sustainable future in seawater desalination.

Cite this article: Parizi,E , Hamzei,S and Mossa Hosseini,S . (2026). Environmental Challenges of Seawater Desalination Plants. *Science Cultivation*, 16 (1).69-77.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

* Corresponding Author. Assistant professor, Tel: +989135835504, Fax: +982166944873, E-mail: Parizi@inio.ac.ir
[1] Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science (INIOAS), Tehran 1411813389, Iran
[2] Physical Geography Department, University of Tehran, Tehran, Iran.

Print ISSN 2008-935X Online ISSN 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

چالش‌های محیط‌زیستی تأسیسات نمک‌زدایی آب دریا

اسماعیل پاریزی*[1]، صمد حمزه‌ئی[1]، سید موسی حسینی[2]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت:
۰۴ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری:
۱۸ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش:
۱۹ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ انتشار:
۳۱ خرداد ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
انرژی تجدیدپذیر
شورابه
اسمزی معکوس
فناوری‌های هیبریدی
پایداری محیطی

چکیده

افزایش تقاضای جهانی برای آب شیرین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت بهره‌گیری از راهکارهای پایدار تأمین آب را برجسته کرده و شیرین‌سازی آب دریا را به یک گزینه راهبردی و فناورانه تبدیل نموده است. مرور جامع فناوری‌های نوین نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر پیشرفت‌های قابل¬توجهی در روش‌های غشایی و حرارتی، از جمله بهبود انتخاب‌پذیری و نفوذپذیری غشا، کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی فرآیند اسمزی معکوس و توسعه سامانه‌های هیبریدی و چندمرحله‌ای حاصل شده است. بااین‌حال، چالش‌های کلیدی شامل مصرف بالای انرژی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی، تولید و تخلیه شورابه با غلظت بالا و استفاده گسترده از مواد شیمیایی پایداری این سامانه‌ها را محدود می‌کنند. ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به¬ویژه سامانه‌های فتوولتائیک، خورشیدی حرارتی و انرژی باد، ظرفیت قابل¬توجهی برای کاهش ردپای کربنی و ارتقای عملکرد زیست‌محیطی فراهم می‌کند، هرچند مسائل عملیاتی مانند خنک‌سازی، رسوب‌گذاری، گردوغبار و دوام تجهیزات باید مدیریت شوند. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی نشان می‌دهد که تخلیه شورابه مهم‌ترین چالش اکولوژیک است و به‌کارگیری مدل‌سازی پیشرفته، دیفیوزرهای نوین، بازیافت منابع و فناوری‌های تخلیه حداقلی می‌تواند اثرات منفی آن را کاهش دهد. توسعه غشاهای پیشرفته مقاوم به گرفتگی، سامانه‌های ترکیبی انرژی و راهکارهای بهینه مصرف انرژی، کلید دستیابی به آینده‌ای پایدار برای آب‌شیرین‌سازی محسوب می‌شوند.

استناد: پاریزی,اسماعیل , حمزه ئی,صمد و حسینی,سید موسی . (۱۴۰۵). چالش‌های محیط‌زیستی تأسیسات نمک‌زدایی آب دریا. *نشاء علم*، ۱۶ (۱), ۶۹-۷۷.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران

© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: استادیار. تلفن: ۹۱۳۵۸۳۵۵۰۴ (۹۸+)، دورنگار: ۶۶۹۴۴۸۷۳(۹۸۲۱+)، آدرس الکترونیکی: Parizi@inio.ac.ir

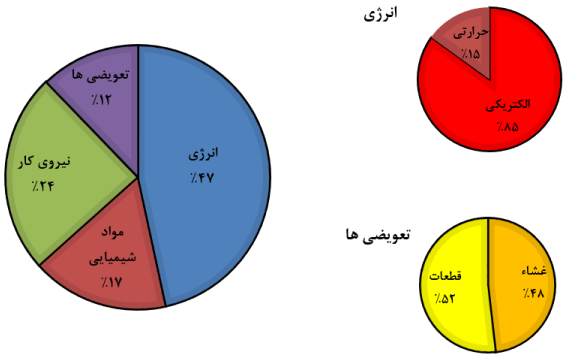
[1] پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

[2] گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱- مقدمه

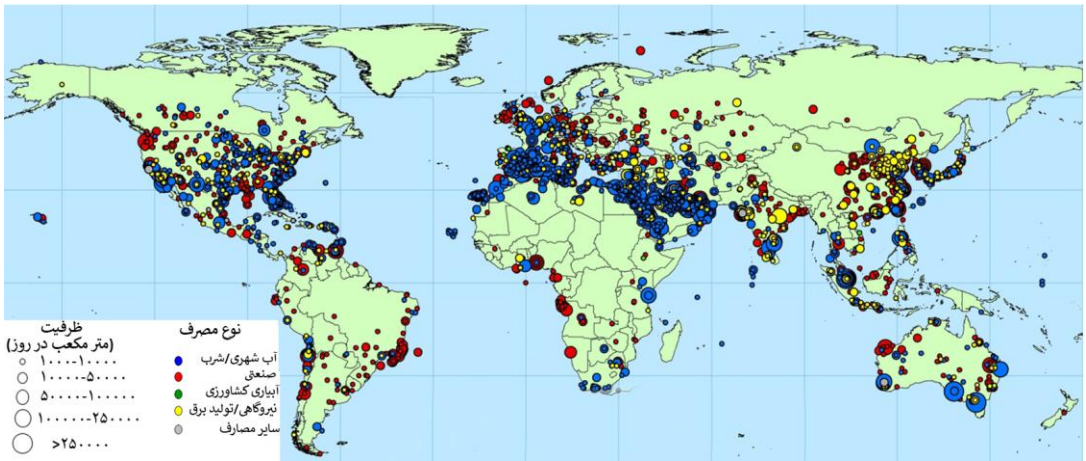
باتوجه‌به محدودیت منابع آب شیرین در مقایسه با آب شور، نمک‌زدایی آب دریا به‌عنوان راهکاری اساسی برای تأمین آب شیرین اهمیت یافته است. در حال حاضر، بیش از ۳۰۰ میلیون نفر در جهان به آب نمک‌زدایی‌شده وابسته هستند و ۱۵۰ کشور از این فناوری استفاده می‌کنند. ظرفیت جهانی تأسیسات نمک‌زدایی در سال ۲۰۱۸ بالغ بر ۹۲/۵ میلیون مترمکعب در روز بوده است [۱]. در حال حاضر، حدود ۲۱,۱۲۳ واحد نمک‌زدایی در جهان فعال هستند و روزانه ۱۴۲,۰۰۰,۰۰۰ مترمکعب آب شیرین تولید می‌کنند [۲]. کارخانه جبیل عربستان سعودی با تولید روزانه ۱,۴۰۱,۰۰۰ مترمکعب آب شیرین، بزرگ‌ترین تأسیسات نمک‌زدایی جهان است. توزیع مکانی، اندازه و نوع مصرف‌کننده تأسیسات آب‌شیرین‌کن با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز در شکل ۱ نشان داده شده است. تعداد زیادی از تأسیسات آب‌شیرین‌کن در ایالات متحده، چین و استرالیا و همچنین در مناطق اروپا، شمال آفریقا و خاورمیانه قرار دارند. در مقیاس جهانی، تأسیسات آب‌شیرین‌کن عمدتاً در نواحی ساحلی متمرکز هستند و آب‌شیرین‌کن‌های ساحلی معمولاً ظرفیت بیشتری نسبت به تأسیسات واقع در مناطق داخلی دارند [۳].

علی‌رغم اهمیت حیاتی نمک‌زدایی، هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری همچنان یکی از چالش‌های اصلی این صنعت است. پیش‌بینی می‌شود طی چهار سال آینده حدود ۹۳/۷ میلیارد دلار در بخش توسعه تأسیسات نمک‌زدایی سرمایه‌گذاری شود که بخش قابل‌توجهی از آن (حدود ۵۱/۶ میلیارد دلار) صرف هزینه‌های عملیاتی مانند انرژی، نیروی انسانی، مواد شیمیایی و قطعات یدکی خواهد شد (شکل ۲).



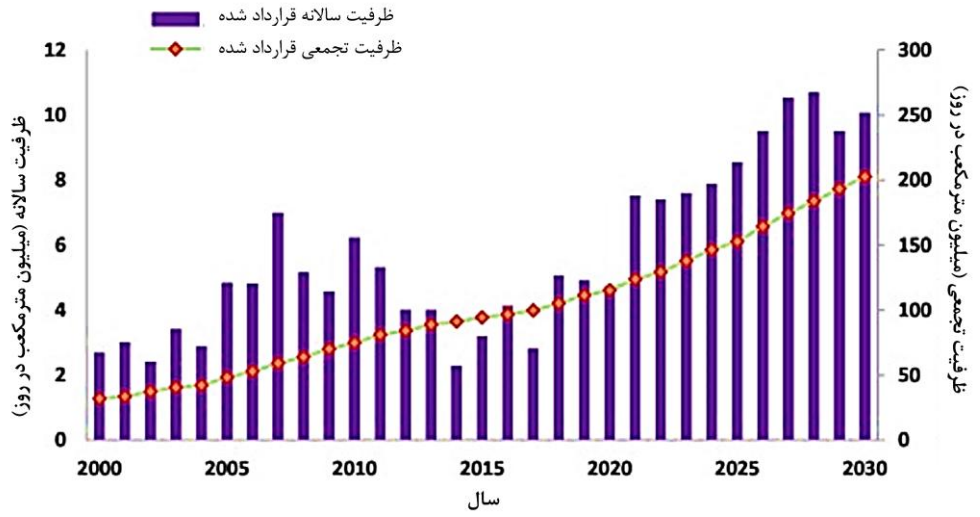
شکل ۲: هزینه‌های عملیاتی نمک‌زدایی بر حسب صنعت [۴].

در سال ۲۰۱۴، نمک‌زدایی به‌عنوان پرمصرف‌ترین فناوری تصفیه آب از نظر انرژی معرفی شد و سالانه حدود ۲/۷۵ تراوات ساعت انرژی مصرف می‌کرد. میزان مصرف انرژی به عواملی چون درجه تصفیه موردنیاز، ظرفیت واحد، فناوری مورد استفاده و کیفیت آب ورودی بستگی دارد. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، نمک‌زدایی آب دریا بیشترین مصرف انرژی را در مقایسه با سایر منابع آبی دارد. اگرچه تصفیه آب‌های سطحی و زیرزمینی انرژی کمتری نیاز دارد، اما ظرفیت تأمین این منابع برای پاسخگویی به تقاضای روبه‌رشد آب محدود است [۵]. با وجود هزینه‌های بالای انرژی، نمک‌زدایی آب شور همچنان یکی از مؤثرترین راهکارها برای مقابله با بحران کم‌آبی در سطح جهان است.



شکل ۱: توزیع جهانی تأسیسات فعال آب‌شیرین‌کن با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰ مترمکعب در روز و ظرفیت تولید آن‌ها بر اساس نوع بخش مصرف‌کننده آب شیرین‌شده [۳].

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی



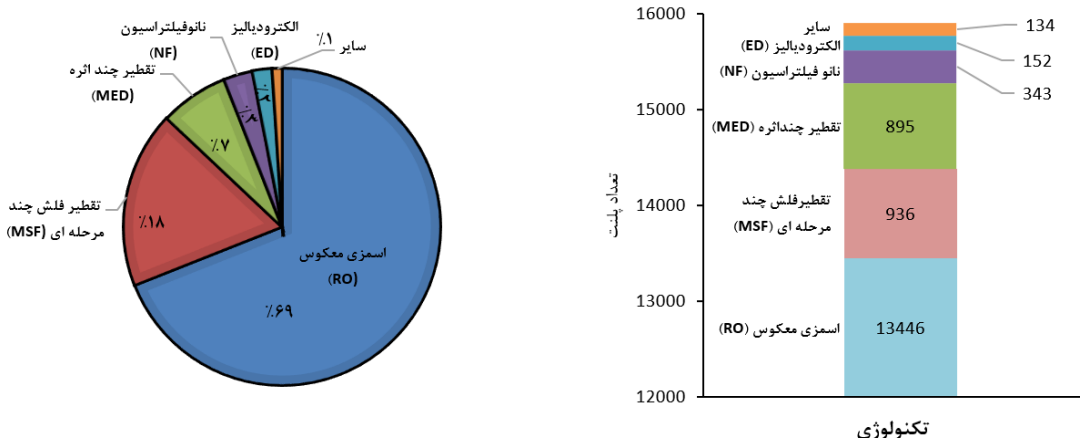
شکل ۳: برآورد ظرفیت نمک‌زدایی طی یک دوره ۳۰ ساله [۸].

جدول ۱: انرژی موردنیاز برای تولید یک مترمکعب آب شرب از منابع مختلف [۶].

منبع آب	نرژی مصرفی (کیلووات‌ساعت/متر مکعب)
آب دریا	۲/۵۸–۸/۵
بازچرخانی فاضلاب	۱/۰–۲/۵
تصفیه فاضلاب	۰/۶۲–۰/۸۷
آب زیرزمینی	۰/۴۸
آب سطحی (برکه یا کانال)	۰/۳۷

۲- فناوری‌های نمک‌زدایی

فناوری‌های نمک‌زدایی به طور کلی به دو دسته حرارتی و غشایی تقسیم می‌شوند. روش‌های حرارتی شامل تبخیری چندمرحله‌ای تقطیری[1] (MSF)، تقطیر چنداثره[2] (MED) و تراکم بخار[3] (VC) نوع مکانیکی (MVC) و حرارتی (TVC) می‌شوند [۴]. در بین فناوری‌های غشایی، روش‌های اسمزی معکوس[4] (RO) و الکترودیالیز[5] (ED) پرکاربردترین تکنیک‌ها محسوب می‌شوند. پیش‌بینی می‌شود ظرفیت نمک‌زدایی جهانی تا سال ۲۰۳۰ از ۲۰۰ میلیون مترمکعب در روز فراتر رود (شکل ۳). همچنین، سه فناوری اصلی RO، MED و MSF حدود ۹۴ درصد از کل تولید نمک‌زدایی جهان را تشکیل می‌دهند و ۶ درصد باقی‌مانده توسط روش‌های دیگر مانند نانوفیلتراسیون، الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس تأمین می‌شود (شکل ۴) [۷].



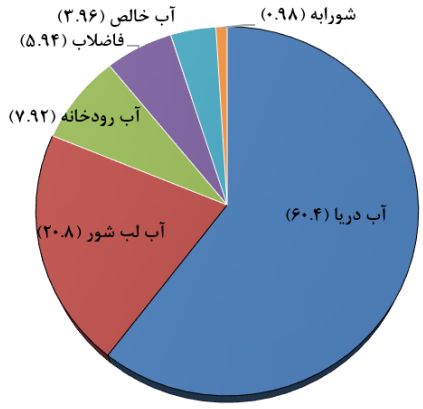
شکل ۴: تعداد تأسیسات نمک‌زدایی بر اساس فناوری‌های مورد استفاده که هم‌اکنون در حال بهره‌وری است [۳]

[1]- Multistage Flash Distillation
[2]- Multi-Effect Distillation
[3]- Vapor Compression
[4]- Reverse Osmosis
[5]- Electrodialysis

https://www.sciencecultivation.ir شاپا الکترونیکی 2783-0934 شاپا چاپی 2008-935X

انرژی مورد نیاز برای نمک‌زدایی عمدتاً از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود، درحالی‌که استخراج و پالایش این منابع انرژی نیز به آب نیاز دارد. انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] (GHG) ناشی از این فرآیندها و سوزاندن سوخت‌های فسیلی، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر اکوسیستم دارد. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات نمک‌زدایی از ۰/۴ میلیارد تن معادل CO_2 در سال فراتر رود. این امر نه‌تنها ذخایر سوخت‌های فسیلی را تخلیه می‌کند، بلکه به محیط‌زیست آسیب جدی وارد می‌سازد [۹]. سیستم‌های نمک‌زدایی حرارتی به دلیل مصرف انرژی بالاتر و نیاز به نگهداری بیشتر، از نظر اقتصادی نسبت به RO جذابیت کمتری دارند. با پیشرفت‌های علمی و کاهش مصرف انرژی ویژه، RO توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. بااین‌حال، فناوری‌های حرارتی همچنان در مناطقی مانند خلیج فارس به دلیل فراوانی منابع نفتی برای تولید برق و عملکرد بهتر در برابر پدیده‌هایی مانند شکوفه‌های جلبکی و آب‌های شور با کدورت بالا، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند [۱۰]. با این وجود، پیشرفت‌های تکنولوژیک باعث افزایش کاربرد RO در این مناطق نیز شده است.

در کنار آب شیرین، پسابی به نام «آب شور غلیظ یا شورابه» تولید می‌شود که حداقل ۱/۶ برابر شورتر از آب دریا است (جدول ۲) و مدیریت آن به دلیل اثرات زیست‌محیطی منفی، حیاتی است. فرآیند نمک‌زدایی شامل ورودی‌هایی مانند آب خوراک (شکل ۵)، انرژی و مواد شیمیایی و خروجی‌هایی چون آب شیرین، شورابه



شکل ۵: دسته‌بندی منابع آب خوراک مورد استفاده در تأسیسات نمک‌زدایی [۱۷].

و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. فناوری RO به دلیل کارایی، مقیاس‌پذیری و مدولار بودن، پیشرفت قابل‌توجهی داشته است. بیش از ۸۰ درصد تأسیسات نمک‌زدایی از RO برای آب لب‌شور یا آب دریا استفاده می‌کنند.

جدول ۲: ترکیبات آب لب‌شور، آب دریا و شورابه [11].

محلول شور	PO_4^{3-} (mg/ L)	HCO^{-3} (mg/ L)	SO_4^{2-} (mg/ L)	Cl^- (mg/ L)	K^+ (mg/ L)	Na^+ (mg/ L)	Mg^{2+} (mg/	Ca^{2+} (mg/ L)	(TDS) (mg/L)	منبع
آب لب‌شور	–	–	۷۲.۴	۳۸۲	–	۱۴۲	۶۶.۸	۲۳۰	۲۴۸۰	[۱۲]
	–	۳۵۰	۸۰	۶۴۵	۶	۳۴۰	۷۸.۵	۱۰۲	۱۶۹۱.۴	[۱۳]
آب دریا	–	۱۴۰	۲۶۴۹	۱۸,۹۸۰	۳۸۰	۱۰,۵۵۶	۱۲۶۲	۴۰۰	۳۴,۴۸۳	[۱۴]
	–	۱۴۶	۲۷۷۲	۲۱,۵۳۵	۴۳۴	۱۲,۲۴۵	۱۳۵۶	۴۷۴	۳۹,۰۱۷	[۱۳]
شورابه	۲۵	–	۴۰۲۵	۳۲,۱۲۷	۴۹۱	۱۸,۴۳۴	۱۷۳۸	۵۲۱	۵۷,۴۰۰	[۱۵]
	–	۱۷۳	۵۳۱۶	۳۸,۸۸۶	۷۴۳	۲۱,۹۲۱	۲۴۷۹	۷۹۰	۷۰,۴۸۸	[۱۶]

۳- چالش‌های زیست‌محیطی نمک‌زدایی آب دریا

با وجود اینکه فرآیند نمک‌زدایی راهکاری برای تأمین آب آشامیدنی پاک محسوب می‌شود، اثرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی دارد. یکی از این اثرات، تولید شورابه است که به دلیل شوری بالا و احتمال آلودگی با مواد شیمیایی ناشی از فرآیندهای مختلف می‌تواند برای محیط‌زیست دریایی مضر باشد [۱۸]. انرژی مصرفی این فرآیند عمدتاً از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود و موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا می‌گردد. ساخت و احداث تأسیسات نیز پیامدهایی شامل پاک‌سازی و تسطیح زمین، ایجاد جاده و زیرساخت، اتصال به شبکه برق و فاضلاب و تغییر کاربری زمین دارد که بر اکوسیستم و منظر محیطی اثرگذار است. پیامدهای زیست‌محیطی اصلی شامل کاهش کمیت و کیفیت منابع طبیعی، تغییر در اکوسیستم‌های آبزیان، استفاده گسترده از مواد شیمیایی، آسیب به سلامت عمومی از طریق پساب‌ها و انتشار مواد و تغییرات در چشم‌انداز محیطی هستند [۱۹].

روش‌های تخلیه آب شور شامل تخلیه سطحی به آب‌های آزاد، تزریق به چاه‌های عمیق، خروجی فاضلاب، حوضچه‌های تبخیر و

1. Greenhouse Gas

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

کاربردهای زمینی است (جدول ۳). انتخاب روش به کیفیت و حجم آب شور، موقعیت تخلیه و دسترسی به سایت جذب بستگی دارد. بیش از ۹۰ درصد تأسیسات، آب شور را از طریق تخلیه سطحی به آب‌های آزاد می‌فرستند که به دلیل نزدیکی کارخانه به دریا، رایج‌ترین روش است [۱۱]. تخلیه سطحی و زیرسطحی با رقیق‌سازی آب شور و استفاده از لوله‌های قائم و دیفیوزر، اثرات منفی بر اکوسیستم را کاهش می‌دهد.

جدول ۳: مرور کلی بر تکنیک‌های تخلیه شورابه [۱۱].

فناوری‌ها	اصل کار	هزینه (دلار آمریکا)	مسائل زیست‌محیطی
تخلیه به آب‌های سطحی	آب شور در آب‌های سطحی رها می‌شود.	۰/۰۵–۰/۳۰	آلوده شدن آب دریا
تخلیه به فاضلاب	در سیستم جمع‌آوری فاضلاب، آب شور دفع می‌شود.	۰/۳۲–۰/۶۶	جلوگیری از رشد باکتری‌ها در تصفیه‌خانه فاضلاب
تزریق به چاه عمیق	آب شور به لایه‌های نفوذپذیر زیرسطحی سنگ تزریق می‌شود.	۰/۵۴–۲/۶۵	آلودگی آب‌های زیرزمینی و شوری خاک
استفاده در کاربری زمین	آب شور برای آبیاری گیاهان و محصولات مقاوم به شوری استفاده می‌شود.	۰/۷۴ – ۱/۹۵	شوری خاک
استخر تبخیری	در یک استخر، آب شور تبخیر شده و نمک‌های باقی‌مانده جمع‌آوری می‌شوند.	۳/۲۸–۱۰/۰۴	آلودگی آب‌های زیرزمینی و شوری خاک

کیفیت آب شور تحت‌تأثیر عواملی چون فناوری مورد استفاده، کیفیت آب خوراک، فرآیندهای پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه و نحوه شستشو و نگهداری تجهیزات قرار دارد. علاوه بر شوری بالا، آب شور ممکن است حاوی مواد شیمیایی مضر مانند فلوکولانت‌ها، انعقادکننده‌ها و آنتی‌اسکالانت‌ها (مانند پلی‌فسفات‌ها) باشد که برای موجودات دریایی خطرناک هستند. اثرهای زیست‌محیطی آب شور شامل شوک اسمزی، تغییرات جمعیتی و سازگاری گونه‌ها، افزایش دما و آلودگی شیمیایی است. فناوری‌های حرارتی عمدتاً از آلیاژهای فلزی استفاده می‌کنند و منبع فلزات سنگین هستند، درحالی‌که سیستم‌های غشایی از مواد پلیمری بهره می‌برند و اثرات کمتری دارند. اثرات محلی و تجمعی تخلیه آب شور به شرایط فیزیکوشیمیایی، هیدروگرافیکی و زیستی منطقه بستگی دارد [۲۰]. مناطق کم‌عمق و بسته با تراکم بالای حیات دریایی آسیب‌پذیرترند، درحالی‌که جریان‌های قوی اقیانوسی اثرات را کاهش می‌دهند. برای کاهش اثرات، استفاده از ضدرسوب‌های سبز، غشاهای مقاوم، مواد ضدخوردگی و مدیریت بهینه شورابه توصیه می‌شود. مدیریت آب شور با رویکرد حداقل تخلیه مایع[1] (ZLD) و بازیابی مواد معدنی رویکردی پیشرفته است که با ترکیب روش‌های نمک‌زدایی، آب شیرین و نمک‌های جامد با خلوص بالا را بازیابی کرده و بازده اقتصادی را افزایش می‌دهد، اما همچنان با مصرف انرژی زیاد و انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است [۱۶].

آب شور ممکن است حاوی فلزات سنگین، ترکیبات آلی، کلر و مواد شیمیایی پیش‌تصفیه باشد که قبل از تخلیه به طور کامل تصفیه نمی‌شوند و سلامت موجودات دریایی را تهدید می‌کنند. حساسیت گونه‌ها به شوری متفاوت است؛ موجودات متحرک مانند ماهی‌ها مقاوم‌ترند، اما گونه‌های ثابت نظیر مرجان‌ها و گیاهان آسیب‌پذیری بیشتری دارند. چگالی بالای آب شور باعث ته‌نشینی در کف دریا و ایجاد لایه‌بندی می‌شود و دمای بالای ۳۰–۴۰ درجه سانتی‌گراد آن، سمیت فلزات و مواد شیمیایی موجود را تشدید می‌کند [۲۱]. گونه‌های دریایی متحرک می‌توانند با مهاجرت به مکان‌های مساعدتر، به تغییرات محیطی مانند تغییر شوری یا اختلال در زیستگاه خود پاسخ دهند. تحمل گونه‌ها به شوری بالا متفاوت است؛ گونه‌های پلی‌کیت و خرچنگ بیشترین تحمل (تا ۶۰ psu) برای مدت طولانی را دارند، پس‌ازآن گونه‌های نرم‌تنان و دوکفه‌ای‌ها دارای تحمل متوسط و در نهایت میگو، کوپپود و آمفی‌پودها کمترین تحمل را دارند. در دریای سرخ، تخلیه آب شور باعث مرگ مرجان‌ها و پلانکتون‌ها، کاهش جمعیت ماهی‌ها و افزایش آلودگی ناشی از افزایش Cu^{2+} و Ni شده است. در امارات متحده عربی، تالاب رأس‌هنجورا شاهد افزایش مرگ‌ومیر مانگروها و گیاهان دریایی بوده است [۲۲]. اثر افزایش شوری بر گیاهان دریایی شامل کاهش رشد ریشه، افزایش مرگ‌ومیر، افزایش اسمورگولاتورها مانند اسیدهای آمینه و ساکارز و کاهش غلظت یون‌های K^{+} و Ca^{2+} است (شکل ۶). افزایش غلظت مواد مغذی مانند نیترات‌ها نیز باعث افزایش تعداد اپی‌فیت‌ها می‌شود که یکی دیگر از اثرات ناشی از تخلیه آب شور است [۲۳].

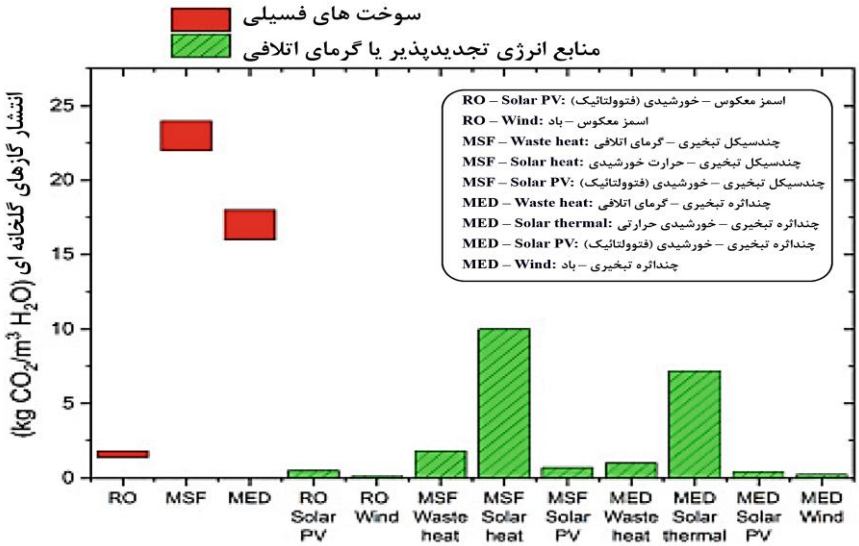
[1]. Zero Liquid Discharge

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

شکل ۶: اثرات احتمالی شوری آب شور بر گیاهان دریایی [۲۳].

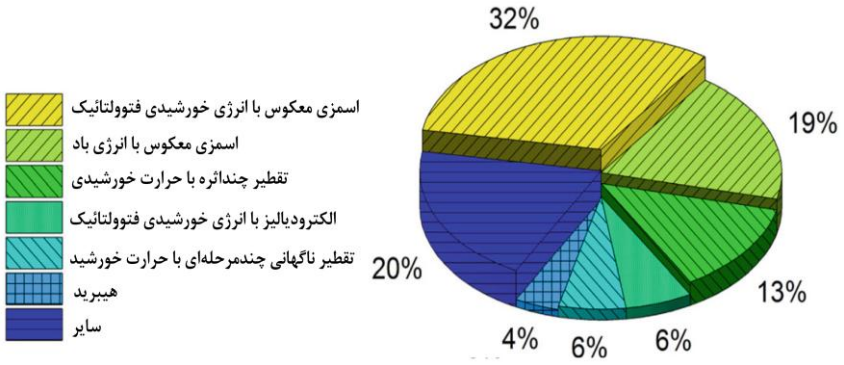
آب شور حاصل از نمک‌زدایی ممکن است شامل مواد شیمیایی مورد استفاده در پیش‌تصفیه، شستشو و تمیزسازی غشاها و فیلترها باشد. این مواد شامل کلر به‌عنوان بیوساید، ضدرسوب‌ها، عامل‌های کاهنده، منعقدکننده‌ها و مهارکننده‌های رسوب هستند و انتخاب آن‌ها به کیفیت آب و شرایط کارخانه بستگی دارد. در واحدهای RO، کلر قبل از غشاها خنثی می‌شود، اما در واحدهای حرارتی ممکن است ترکیبات ارگانیک هالوژنه تولید کند و اثرات زیست‌محیطی داشته باشد [۲۴]. مواد پیش‌تصفیه و ضد رسوب، اگرچه در غلظت‌های معمول کم‌خطرند، اما می‌توانند بر مرجان‌ها و جوامع میکروبی اثر بگذارند. برای کاهش کف، واحدهای حرارتی معمولاً از پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌پروپیلن گلیکول استفاده می‌کنند. خوردگی تجهیزات، به‌ویژه در واحدهای حرارتی، موجب ورود فلزات سنگین مانند Cu^{2+} و Ni به پساب می‌شود، درحالی‌که RO با فولاد ضدزنگ و دمای پایین‌تر اثرات کمتری دارد. شستشوی غشاها با محلول‌های اسیدی و قلیایی و استفاده از بیوسایدها برای حذف بیوفیلم و رسوبات ضروری است، اما تخلیه آن‌ها بدون تصفیه می‌تواند بر حیات دریایی تأثیر بگذارد [۱۸]. مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در فناوری‌های مختلف متفاوت است (شکل ۷). فناوری‌های حرارتی، مانند MSF و MED، انتشار گازهای گلخانه‌ای حداقل ۱۰ برابر بیشتر از RO دارند (میله‌های قرمز در شکل ۷). استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر یا حرارت زائد (میله‌های سبز) می‌تواند این انتشارها را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

این واقعیت که همه منابع انرژی تجدیدپذیر در هر مکان به طور دائم در دسترس نیستند، چالش دیگری ایجاد می‌کند. به‌عنوان‌مثال، انرژی خورشیدی در کشورهایی با تابش خورشیدی بالا مانند امارات متحده عربی (۵/۷۲ – ۶/۱۸ کیلووات‌ساعت بر مترمربع) مؤثرتر است تا در کشورهایی با حداقل تابش خورشیدی مانند نروژ (۱/۹۵ – ۳/۰۵ کیلووات‌ساعت بر متر مربع). بااین‌حال، با توجه به مشوق‌هایی که در کشورهایی مانند اتحادیه اروپا ارائه



شکل ۷: نشان می‌دهد که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط سیستم‌های اصلی آب‌شیرین‌کن به ازای هر متر مکعب آب تولیدی، هم هنگام استفاده از سوخت‌های فسیلی (میله‌های قرمز) و هم هنگام استفاده از حرارت زائد یا منابع انرژی تجدیدپذیر (میله‌های سبز) چگونه است [۱۸].

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی



شکل ۸: منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیب‌شده با فناوری آب‌شیرین‌کن در تأسیسات سراسر جهان را نشان می‌دهد [۱۸].

می‌شود، انتظار می‌رود در آینده چندین واحد آب‌شیرین‌کن مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر ساخته شود. شکل ۸ منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیب‌شده با فناوری آب‌شیرین‌کن در تأسیسات سراسر جهان را نشان می‌دهد. نتایج مؤید آن است که روش اسمزی معکوس با انرژی خورشیدی بیشترین مقدار (۳۲ درصد) را به خود اختصاص می‌دهد.

۴- نمونه‌های موفق آب‌شیرین‌سازی و استراتژی ملی

باتوجه‌به تجربیات جهانی، برخی از پروژه‌های موفق آب‌شیرین‌سازی به طور هم‌زمان بر بهره‌وری انرژی، استفاده از منابع تجدیدپذیر و مدیریت بهینه شورابه تمرکز داشته‌اند. برای نمونه، واحد Al-Khafji در عربستان سعودی از سیستم RO خورشیدی با ظرفیت روزانه ۶۰,۰۰۰ مترمکعب بهره می‌برد که به‌طور چشمگیری مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده است [۲۵]. همچنین، کارخانه آب‌شیرین‌کن شرقیه عمان در شهر صور که آب بیش از ۶۰۰,۰۰۰ نفر را تأمین می‌کند، میزبان بزرگترین تأسیسات انرژی خورشیدی برای نمک‌زدایی در این کشور است. این واحد فتوولتائیک ۱۷ مگاواتی، اولین نمونه از این نوع در خاورمیانه، سالانه بیش از ۳۰ گیگاوات ساعت برق سبز تولید می‌کند که بیش از یک‌سوم مصرف روزانه کارخانه را پوشش داده و انتشار CO_2 را حدود ۲۷,۲۰۰ تن در سال کاهش می‌دهد [۲۶]. یک مطالعه فنی-اقتصادی در مدیترانه شرقی (یونان، قبرس و اسرائیل) یک سیستم نمک‌زدایی هیبریدی ZLD را برای تصفیه آب نمک و بازیابی منابع ارزیابی کرد. این سیستم با ادغام RO فشار بالا، تغلیظ‌کننده‌های آب نمک و کریستالایزرها، به نرخ بازیابی استثنایی ۹۹/۱۹ درصد و تقاضای انرژی معقول (۲۰/۲۳ کیلووات ساعت بر مترمکعب) دست یافت. از نظر اقتصادی، ZLD بیش از سه برابر ارزان‌تر از حوضچه‌های تبخیر و قابل‌مقایسه با تزریق چاه عمیق و کاربرد در زمین بود. این سیستم از نظر مالی در صورت فروش آب به‌تنهایی یا هر دو آب و نمک‌های بازیابی شده، مقرون‌به‌صرفه است [۲۷]. استراتژی ملی آب‌شیرین‌سازی و کاهش شورابه در سواحل خلیج فارس ایران می‌تواند استفاده از RO کم‌مصرف، ادغام انرژی خورشیدی و بادی، بهره‌گیری از سیستم ZLD برای بازیابی آب و نمک و مدیریت کنترل‌شده شورابه با مدل‌سازی و تخلیه ایمن، باهدف کاهش مصرف انرژی، انتشار CO_2 و اثرات زیست‌محیطی باشد.

۵- نتیجه‌گیری

باتوجه‌به رشد جمعیت، شهرنشینی، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی، راهکارهای سنتی مدیریت آب به تنهایی پاسخگوی تقاضای جهانی نیستند و آب‌شیرین‌کن‌های دریایی به‌عنوان منبعی مطمئن و مستقل از بارش به‌ویژه برای کشورهایی با کمبود شدید آب اهمیت حیاتی یافته‌اند. پیشرفت‌های فناوری RO و روش‌های حرارتی، توسعه غشاهای پیشرفته و طرح‌های هیبریدی بهره‌وری را افزایش و هزینه‌ها را کاهش داده‌اند. بااین‌حال، مصرف بالای انرژی، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از تخلیه شورابه، مصرف مواد شیمیایی و گرفتگی غشاها چالش‌های اصلی باقی مانده‌اند. ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه خورشیدی، مسیر دستیابی به پایداری بلندمدت را هموار می‌کند، هرچند گردوغبار، دما و محدودیت‌های جوی باید مدیریت شوند. با استفاده از مدل‌سازی‌های پیشرفته، دیفیوزرهای نوین، رقیق‌سازی و بازیافت نمک، اثرات تخلیه شورابه قابل‌کاهش است. مطالعات ارزیابی چرخه عمر نشان می‌دهند که ترکیب آب‌شیرین‌کن‌ها با انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند انتشار گازهای

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

گلخانه‌ای را کاهش دهد. این صنعت با نوآوری در غشاهای مقاوم، کنترل رسوب و خوردگی و طراحی سیستم‌های هوشمند، مسیر تبدیل شدن به پایه‌ای کلیدی در امنیت آبی جهان را طی می‌کند. تحقیقات آینده باید بر توسعه فناوری‌های نوین، مواد ارزان و بادوام و گسترش ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر متمرکز شود تا تولید آب پایدار و مطمئن تضمین گردد.

نویسندگان اعلام می‌دارند که مقاله حاضر توسط هوش مصنوعی نگارش نشده و تمام یا بخشی از آن تاکنون در هیچ پایگاه اطلاعاتی، نشریه یا منبع علمی دیگری منتشر نشده است.

منابع Reference

[1]. International Desalination Association, “The IDA water security handbook.” 2019.

[2]. N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability,” Desalination, vol. 309, pp. 197–207, Jan. 2013.

[3]. E. Jones, M. Qadir, M. T. Van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, “The state of desalination and brine production: A global outlook,” Science of the total environment, vol. 657, pp. 1343–1356, 2019.

[4]. A. Al-Karaghouli and L. L. Kazmerski, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 24, pp. 343–356, 2013.

[5]. J. Williams, “Desalination in the 21st century: a critical review of trends and debates,” Water Alternatives, vol. 15, no. 2, pp. 193–217, 2022.

[6]. G. Prashanth, H. N. Akolkar, A. Haghi, and S. Rao, Seawater Desalination. Springer, 2026.

[7]. A. B. Stambouli and S. Flazi, “A review of the water-energy nexus,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 65, pp. 319–331, 2016.

[8]. I. Ihsanullah, M. A. Atieh, M. Sajid, and M. K. Nazal, “Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies,” Science of the Total Environment, vol. 780, p. 146585, 2021.

[9]. V. G. Gude, “Geothermal source potential for water desalination–Current status and future perspective,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 1038–1065, 2016.

[10]. B. Moossa, P. Trivedi, H. Saleem, and S. J. Zaidi, “Desalination in the GCC countries-a review,” Journal of Cleaner Production, vol. 357, p. 131717, 2022.

[11]. G. K. Prashanth, A. Hemantkumar N, H. A. K., and R. Srilatha, Seawater Desalination Technologies and Environmental Impact. Springer, 2026.

[12]. D. A. Miller and M. Gil, “Spray-drying technology,” in Formulating poorly water soluble drugs, Springer, 2011, pp. 363–442.

[13]. X. Chen and N. Y. Yip, “Unlocking high-salinity desalination with cascading osmotically mediated reverse osmosis: energy and operating pressure analysis,” Environmental science & technology, vol. 52, no. 4, pp. 2242–2250, 2018.

[14]. A. S. Goudie, Human impact on the natural environment: Past, present and future. John Wiley & Sons, 2018.

[15]. M. Ahmed, D. Hoey, W. Shayya, and M. F. Goosen, “Brine disposal from inland desalination plants: current status, problems, and opportunities,” Environmental Sciences and Environmental Computing, vol. 2, 2004.

[16]. I. Sola et al., “Review of the management of brine discharges in Spain,” Ocean & Coastal Management, vol. 196, p. 105301, 2020.

[17]. T. M. Missimer and R. G. Maliva, “Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls,” Desalination, vol. 434, pp. 198–215, 2018.

[18]. A. Panagopoulos and K.-J. Haralambous, “Environmental impacts of desalination and brine treatment-Challenges and mitigation measures,” Marine Pollution Bulletin, vol. 161, p. 111773, 2020.

[19]. C. M. Galanakis and E. Agrafioti, Sustainable water and wastewater processing. Elsevier, 2019.

[20]. T. Alharbi, H. Alfaifi, S. A. Almadani, and A. El-Sorogy, “Spatial distribution and metal contamination in the coastal sediments of Al-Khafji area, Arabian Gulf, Saudi Arabia,” Environmental monitoring and assessment, vol. 189, no. 12, p. 634, 2017.

[21]. N. Ahmad and R. E. Baddour, “A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments,” Ocean & coastal management, vol. 87, pp. 1–7, 2014.

[22]. T. M. Remaili et al., “Assisted natural recovery of hypersaline sediments: salinity thresholds for the establishment of a community of bioturbating organisms,” Environ. Sci.: Processes Impacts, vol. 20, no. 9, pp. 1244–1253, 2018.

[23]. M. Omerspahic, H. Al-Jabri, S. A. Siddiqui, and I. Saadaoui, “Characteristics of desalination brine and its impacts on marine chemistry and health, with emphasis on the Persian/Arabian gulf: a review,” Frontiers in Marine Science, vol. 9, p. 845113, 2022.

[24]. A. H. Al-Kaabi and H. R. Mackey, “Environmental assessment of intake alternatives for seawater reverse osmosis in the Arabian Gulf,” Journal of Environmental Management, vol. 242, pp. 22–30, Jul. 2019.

[25]. E. T. Sayed, A. G. Olabi, K. Elsaid, M. Al Radi, R. Alqadi, and M. Ali Abdelkareem, “Recent progress in renewable energy based-desalination in the Middle East and North Africa MENA region,” Journal of Advanced Research, vol. 48, pp. 125–156, Jun. 2023.

[26]. Veolia, “Veolia inaugurates largest solar power plant for a desalination plant in the Middle East.” 2023.

[27]. A. Panagopoulos, “Techno-economic assessment and feasibility study of a zero liquid discharge (ZLD) desalination hybrid system in the Eastern Mediterranean,” Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, vol. 178, p. 109029, Aug. 2022.

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir