

Review Paper

مقاله مروری

## A Review on Boron Removal from Seawater Using Reverse Osmosis Technology

## مروری بر حذف بور از آب دریا با استفاده از فناوری اسمز معکوس

Zohreh Moosavinasab<sup>1\*</sup>, Sheida Esmailzadeh<sup>2</sup> and Amirhosein Haghghi<sup>3</sup>

زهرة موسوی نسب<sup>۱\*</sup>، شیدا اسمعیل‌زاده<sup>۲</sup> و امیرحسین حقیقی<sup>۳</sup>

1- Assistant Professor, Department of Geology, Estahban branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran.

۱- استادیار زمین‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، استهبان، ایران.

2- Associate Professor, Department of Chemistry, Darab branch, Islamic Azad University (and Department of Applied Researches, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz), Iran.

۲- دانشیار شیمی معدنی، گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد داراب (و گروه پژوهش‌های شیمی کاربردی، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز)، ایران.

3- Assistant Professor, Department of Polymer Engineering, Shiraz branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

۳- استادیار مهندسی پلیمر، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران.

\*Corresponding Author, Email: [z\\_moosavinasab@iauest.ac.ir](mailto:z_moosavinasab@iauest.ac.ir)

\*نویسنده مسئول، ایمیل: [z\\_moosavinasab@iauest.ac.ir](mailto:z_moosavinasab@iauest.ac.ir)

Received: 13/11/2021

Revised: 20/01/2022

Accepted: 15/02/2022

© IWWA

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶

© انجمن آب و فاضلاب ایران

### Abstract

### چکیده

It is predicted that by 2050, more than 48% of the world's population will face water shortages. Desalination of seawater as the best way to supply fresh water has been on the rise for the past three decades. Membrane desalination methods, especially reverse osmosis, have become more popular than other methods due to their lower energy consumption. Despite the success of this method in removing seawater salts, contaminants such as boron are still found in the produced water due to the presence of boron as boric acid in seawater, which due to its small molecular size, leaks into the produced water through membranes. The average concentration of boron in seawater is 4.6 mg/l, which comes from various natural sources such as volcanic activity as well as anthropogenic sources. High levels of boron are harmful to human health and agricultural products. Factors such as pH, temperature and ionic strength of feed water have a great impact on boron removal in membrane processes. By examining credible sources, while pointing to the importance of boron and its removal methods, this validity review article addresses the challenges of boron removal by reverse osmosis as the most common seawater desalination technology.

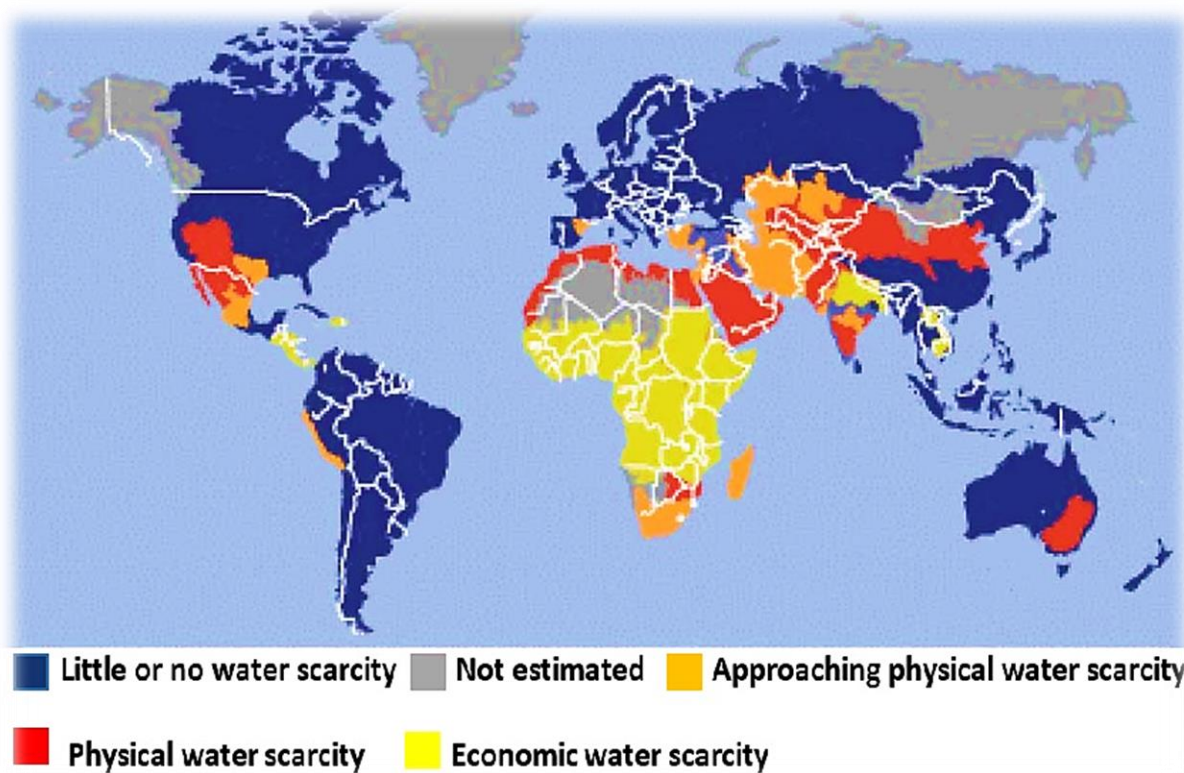
پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۴۸ درصد مردم جهان با کم‌آبی مواجه شوند. نمک‌زدایی از آب دریا به‌عنوان بهترین راه تامین آب شیرین، طی سه دهه گذشته روندی صعودی داشته است. روش‌های نمک‌زدایی غشایی به‌ویژه روش اسمز معکوس به‌دلیل مصرف انرژی پایین‌تر، محبوب‌تر از سایر روش‌ها شده است. علی‌رغم موفقیت این روش در حذف املاح آب دریا، آلاینده‌هایی مانند بور هنوز در آب تولیدی مشاهده می‌شود. علت آن حضور بور به‌صورت اسید بوریک در آب دریا است که به‌دلیل اندازه مولکولی کوچک، از طریق غشاهای آب تولیدی نشت می‌کند. غلظت متوسط بور در آب دریا ۴/۶ میلی‌گرم بر لیتر است که از منابع مختلف طبیعی مانند فعالیت‌های آتشفشانی و نیز منابع انسان‌زاد تامین می‌شود. مقادیر بالای بور، برای سلامت انسان و محصولات کشاورزی مضر است. عواملی چون pH، دما و قدرت یونی آب خوراک تاثیر زیادی بر حذف بور در فرایندهای غشایی دارند. این مقاله مروری روایی، با بررسی منابع معتبر، ضمن اشاره به اهمیت بور و روش‌های حذف آن، به چالش‌های حذف بور به‌روش اسمز معکوس به‌عنوان رایج‌ترین فناوری روز نمک‌زدایی آب دریا می‌پردازد.

**Keywords:** Boron Removal, Seawater Desalination, Reverse Osmosis, Membrane Processes.

**کلمات کلیدی:** حذف بور، نمک‌زدایی آب دریا، اسمز معکوس، فرایندهای غشایی.

اتخاذ کنند (Zetland, 2021). بین تقاضای آب و منابع آب شرب فاصله زیادی وجود دارد. انتظار می رود تا سال ۲۰۵۰ تقریباً نیمی از مردم جهان با مشکلات کم آبی زندگی روبرو شوند (Kürklü et al., 2017). حتی اگر تا سال ۲۰۳۰ پیشرفت‌های فناورانه و فراساختاری ظهور پیدا کند، هنوز ۳۰ درصد کسری در تامین آب مورد تقاضا وجود خواهد داشت (Boccaletti et al., 2010). موسسه بین‌المللی آب<sup>۱</sup> بر این اساس، چهار گروه معرفی کرده است: مناطق فاقد کمبود آب، مناطق در شرف وقوع کمبود آب، مناطق با کمبود آب فیزیکی و مناطق دارای کمبود آب اقتصادی (شکل ۱). زیرساخت ضعیف و توزیع نامتوازن آب، باعث کمبود آب اقتصادی شده است. کمبود فیزیکی زمانی است که در دسترس بودن منابع آب نمی‌تواند تقاضا را تامین کند مانند نواحی خشک خاورمیانه و آفریقا. اگر آب مصرفی برای کشاورزی ۷۰ مرتبه بیش از آب مصرفی برای آشامیدن و مصارف خانگی باشد چنین منطقه‌ای به تدریج دچار کمبود آب، آلودگی رودها، کمبود آب زیرزمینی و توزیع نامتوازن آب خواهد شد.

از ۷۰ درصد پوشش آبی سطح زمین، تنها ۲/۵ درصد آن آب شیرین و بقیه شامل آب شور دریاها و اقیانوس‌ها است. هفتاد درصد این آب شیرین در لایه‌های یخ، یخچال‌های طبیعی، برف و یخبندان‌های دائمی در مناطق قطبی و قله کوه‌ها محبوس شده است و فقط ۳۰ درصد باقی‌مانده قابل استفاده است که از این مقدار، تنها یک درصد آن به آسانی در دسترس است. پس تقریباً تنها ۰/۰۰۷ درصد آب‌های روی زمین قابل دسترس برای حدود ۸ میلیارد نفر انسان است (Kürklü et al., 2017). تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۲۵ دو سوم جمعیت جهان با کمبود آب مواجه شوند. ورود اخیر آب به بازار سهام، نمونه‌ای از چالش‌هایی است که قرن بیست و یکم با آن روبرو خواهد شد (Tappe, 2020). در این خصوص، دولت‌ها باید برای رفع نگرانی‌های اجتماعی در مورد دسترسی فقیرترین افراد جوامع به آب و نیز تضمین منابع آب مناسب برای مقاصد صنعتی و خانگی سیاست‌های کاربردی



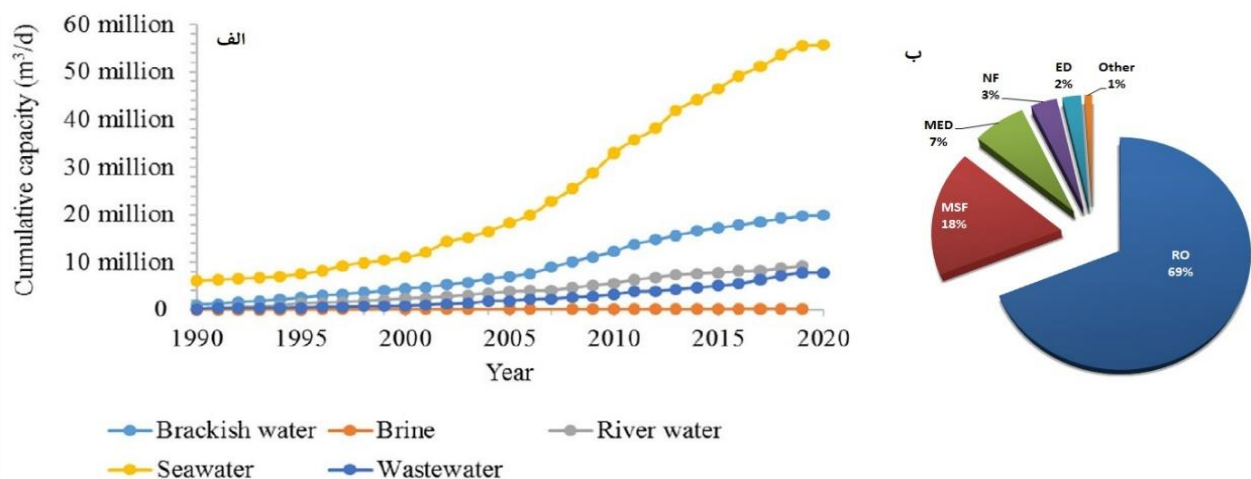
شکل ۱- نقشه جزئیات تنش آبی در دنیا (Rahmawati, 2011)

نمک‌زدایی آب دریا از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ روند صعودی قابل ملاحظه‌ای داشته است (شکل ۲-الف). بالغ بر ۲۱۰۰۰ واحد نمک‌زدایی آب در دنیا وجود دارد که بیش از ۵۰ درصد آن‌ها از آب دریا و مابقی از آب لب‌شور استفاده می‌کنند (Curto et al.,

از میان تلاش‌های متعدد برای پر کردن شکاف میان عرضه و تقاضای آب، نمک‌زدایی از آب دریا، به‌ویژه در نواحی خشک مانند خاورمیانه و آفریقا که از کم باران‌ترین مناطق دنیاست، بهترین شیوه تامین آب شیرین بوده است (Rahmawati, 2011).

به مولکول‌های منتخب، اجازه عبور می‌دهد. اگر دو محلول با غلظت‌های مختلف املاح، با یک غشای نیمه‌تراوا از هم جدا شوند، در اسمز مستقیم، حلال به‌طور خودجوش از محلول رقیق‌تر به محلول غلیظ‌تر می‌رسد تا پتانسیل انرژی هر دو محلول متعادل شود. اگر گرادیان فشار خارجی بزرگتر از فشار اسمزی روی غشا اعمال شود، جهت جریان برعکس شده و اسمز معکوس رخ خواهد داد (Curto et al., 2021).

(2021). فناوری‌های شیرین‌سازی انواع مختلفی دارد که به دو دسته کلی تقطیر حرارتی و جداسازی غشایی تقسیم بندی می‌شود. با افزایش قیمت انرژی در سال‌های اخیر، روش‌های غشایی، به‌ویژه اسمز معکوس، به‌دلیل نیاز به مصرف انرژی و فضای نصب کمتر نسبت به سایر روش‌ها رایج‌تر شده است (شکل ۲-ب)؛ به‌گونه‌ای که تا سال ۲۰۱۹ حدود ۶۹ درصد فرایند نمک‌زدایی جهان را به‌خود اختصاص می‌داد (Jones et al., 2019). اسمز معکوس فناوری مبتنی بر غشاهای نیمه‌تراوا است که تنها



شکل ۲- ظرفیت کل واحدهای نمک‌زدایی آب در دنیا: الف) براساس کیفیت آب خوراک (Eke et al., 2020)؛ ب) برحسب نوع فناوری نمک‌زدایی: RO<sup>۱</sup> اسمز معکوس، MED<sup>۲</sup> تقطیر چند اثره، NF<sup>۳</sup> تصفیه نانو و ED<sup>۴</sup> الکترودیالیز (Jones et al., 2019)

مقادیر بالاتر از سازمان بهداشت جهانی را در نظر گرفتند: نخست، عدم وجود داده‌های مبتنی بر تاثیرات سوء بور بر سلامت انسان و دیگری، مشکل و هزینه‌بر بودن دستیابی به حد استاندارد (Tu et al., 2010). در سال ۲۰۱۱ سازمان بهداشت جهانی مقدار جدید ۲/۴ میلی‌گرم بر لیتر بور را برای آب آشامیدنی اعلام و منتشر کرد. گرچه این دستورالعمل مبتنی بر سلامت انسان است اما برخی واحدهای اسمز معکوس هنوز میزان بور آب تولیدی خود را روی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر یا حتی کمتر از آن تنظیم کرده‌اند تا با ملزومات کشاورزی جور در بیاید. زیرا برخی محصولات کشاورزی نسبت به میزان بور حساس هستند. مطالعات گسترده در انگلستان و آمریکا نیز نشان داد که دریافت بور از هوا و غذا کمتر از حد پیش‌بینی شده است. این واقعیت باعث شد حد مجاز بور در آب آشامیدنی به میزان ۱۰ تا ۴۰ درصد افزایش یابد (Hilal et al., 2011). علی‌رغم این واقعیت، برخی کشورها مانند عربستان هنوز حد مجاز بور را ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر در نظر می‌گیرند.

برای حذف بور تاکنون روش‌های متعددی مانند انعقاد-رسوب‌دهی، تبادل یونی و الکترودیالیز پیشنهاد شده است.

علی‌رغم این‌که روش اسمز معکوس در حذف تمام املاح آب دریا و تامین آب شیرین موفق بوده است، اما آلاینده‌های اندکی مانند بور هنوز در آب تولیدی مشاهده می‌شود. علت این امر آن است که بور در pH طبیعی آب دریا به‌صورت اسید بوریک تجزیه نشده حضور دارد که به‌دلیل اندازه مولکولی کوچک، از طریق غشاهای آب شیرین تولیدی نشت می‌کند (Hilal et al., 2015). مشکل ناشی از مقادیر بالای بور در سال ۱۹۹۷ در منطقه ایلات<sup>۶</sup> فلسطین اشغالی مشاهده شد که کشاورزان از پساب بازیافتی برای آبیاری استفاده کردند و این امر منجر به سمی شدن برخی محصولات و از بین رفتن رنگ برگ آن‌ها شد. نخستین بار در سال ۱۹۸۴ محتوای بور توسط سازمان بهداشت جهانی به‌عنوان یکی از الزامات استاندارد آب آشامیدنی شناخته شد. به‌دلیل این‌که تحقیقات نشان داد بور برای حیوانات مضر است، در سال ۱۹۹۳ سازمان بهداشت جهانی حد مجاز ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر را برای بور در آب آشامیدنی مقرر کرد و پس از چند سال، این استاندارد را تا حد ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر بالا برد (WHO, 2003). اما به‌دلیل مشکل بودن حذف بور در فرایند تصفیه آب، این حد مجاز در نواحی مختلف متفاوت است. برخی کشورها به دو دلیل،

است. بور در لوازم آرایشی، شامپو و سایر محصولات مراقبت فردی (روغن بچه، رژلب، کرم و لوسیون) نیز وجود دارد اما جذب پوستی آن پایین است. وجود بور در غذاها ناشی از حضور آن در فرایند کشاورزی است بنابراین مقدار آن در مواد غذایی بشدت بستگی به مکان دارد. در غذاهای فراوری شده میزان بور می‌تواند از حد ناچیز تا ۲۶ میکروگرم بر لیتر محصول باشد. بور در بافت‌های حیوانی نیز وجود دارد اما مواجهه انسان با بور از طریق مصرف گوشت ناچیز است (Jaehong et al., 2009; Hilal et al., 2011).

## ۲-۲- اهمیت بور از دیدگاه سلامت و بوم‌شناسی

بور عنصری ریزمغذی برای انسان است و نیز نقش موثری در رشد محصولات گیاهی دارد. دریافت مقادیر کم بور، روی عملکرد سلولی و موثر بودن سایر مواد مغذی تاثیر می‌گذارد. میان بور و ویتامین D و نیز کلسیم برهم‌کنش وجود دارد که بر متابولیسم استروژن و فعالیت‌های مغزی تاثیر می‌گذارد. دریافت متوسط روزانه بور برای مردان بالغ حدود ۱/۵ میلی‌گرم در روز است (EPA, 2008). بور در ساخت داروهای ضد صرع، مالاریا و غیره کاربرد دارد. بیماری‌هایی که با این داروها تحت درمان قرار می‌گیرند دچار سوء هاضمه، بی‌اشتهایی و درماتیت می‌شوند. اما اگر دوز مصرف کاهش یابد، علائم ناپدید می‌شود. علائم مسمومیت با بور در انسان شامل: تهوع، استفراغ، اسهال، تورم پوست، بی‌حالی، کم‌اشتهایی، کاهش وزن و کاهش میل جنسی است (Hunt and Benjamin, 2003). سازمان بهداشت جهانی محدوده ایمن میانگین مصرف بور برای بزرگسالان را ۱ تا ۱۳ میلی‌گرم در روز اعلام کرده است (WHO and IPCS, 1998). اغلب ترکیبات بور سمیت کمی دارند اما دوزهای بیش از ۱۵ یا ۲۰ گرم اسید بوریک برای بزرگسالان، ۲ تا ۳ گرم برای نوزادان و ۵ تا ۶ گرم برای کودکان می‌تواند کشنده باشد که منجر به کاهش گردش خون، استفراغ مداوم و اسهال و به دنبال آن شوک و کما می‌شود. مهم‌ترین منبع قرارگرفتن انسان در معرض بور در درجه اول، از طریق مواد غذایی مانند میوه‌ها و سبزیجات و در وهله دوم از طریق مواد مصرفی آرایشی، داروئی و حشره‌کش‌ها است (Kabay et al., 2015). تاکنون گزارشی مبنی بر سرطان‌زایی بور و ترکیبات آن در انسان ارائه نشده است. در حیوانات دریافت اندک بور می‌تواند باعث عملکرد نادرست سلولی شده و روی فعالیت سائز مواد مغذی تاثیر بگذارد (EPA, 2008). محصولات کشاورزی برای رشد خود به مقادیر اندک بور نیازمندند. به‌همین دلیل بور به‌شکل بورات سدیم و اسید بوریک یکی از اجزای سازنده کودها است. مواجهه زیاد با بور خرابی برگ‌ها، کاهش محصول میوه و رسیدن

علی‌رغم این‌که روش‌هایی مانند انواع نمک‌زدایی حرارتی (مانند تقطیر چند اثره) ممکن است برای حذف بور موثرتر باشد، اما از آن‌جا که در فرآیند نمک‌زدایی از آب دریا باید هم‌زمان، ملاحظات دیگری چون هزینه عملیاتی، بازده، مصرف انرژی و امکان‌سنجی اجرایی را نیز مدنظر قرار داد، لذا روش اسمز معکوس علی‌رغم دارا بودن برخی محدودیت‌ها، همچنان در این زمینه پیش‌تاز است (Bhagyaraj et al., 2021). هرچند غشاهای سامانه اسمز معکوس تک‌گذره، نمک‌های محلول در آب را در حد استاندارد آب آشامیدنی حذف می‌کند اما در مورد دستیابی به استاندارد بور، این غشاها به تنهایی کارساز نیستند (Xu et al., 2010). لذا حذف بور از مباحث مهم در فرایند اسمز معکوس است.

## ۲- کلیات بور

### ۲-۱- رخداد بور در محیط‌زیست

فعالیت‌های آتشفشانی و زمین‌گرایی از دیرباز منبع اصلی ورود بور به جو زمین و اقیانوس بوده و هوازدگی سنگ‌ها و فعالیت‌های انسانی مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی، معادن و آتش‌سوزی‌های مرتبط با کشاورزی تنها سهم کمی در این زمینه دارند. میزان بور در جو متغیر بوده و معمولاً بین ۰/۲ تا ۳۰۰ میکروگرم بر لیتر است. در آب‌کره، مخزن اصلی بور، آب دریا است (مقدار کل ۱۰<sup>۱۵</sup> کیلوگرم) که تا حد زیادی با سایر مخازن بور مانند آب‌های زیرزمینی (۱۰<sup>۱۱</sup> کیلوگرم)، یخ (۱۰<sup>۱۱</sup> کیلوگرم) و آب‌های سطحی (۱۰<sup>۸</sup> کیلوگرم) تفاوت دارد. بور از اجزای اصلی آب دریا (به‌طور متوسط ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر) و برخی از آب‌های زیرزمینی در مناطق آتشفشانی فعال است. غلظت نسبتاً بالای بور در آب‌ها در مقایسه با پوسته زمین نشان می‌دهد این عنصر بسیار متحرک است. بور در فرآیندهای مهم خاک مانند چرخه زیست‌شناختی درون خاک، رطوبت‌سازی، جایگزینی در کانی‌های رسی و تشکیل کلوئیدها نیز دخیل است. بور در خاک عمدتاً به‌صورت جذب سطحی، کیلیت شده یا یون‌های کمپلکس با گیاه‌خاک حضور دارد و میزان آن در خاک‌های معمولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است (Kabay et al., 2015). بور به‌دلیل وزن سبک، قیمت پایین و مقاومت در برابر تنش و مواد شیمیایی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع ساخت ظروف آزمایشگاهی، شیشه‌های پیما، شیشه پنجره، صنایع پلاستیک و فایبرگلاس، و صنایع خودرو دارد (Inamuddin et al., 2021). مصرف شوینده‌ها، قارچ‌کش‌ها، ضدعفونی‌کننده‌ها، حشره‌کش‌ها و کودهای شیمیایی نیز از دیگر راه‌های ورود بور به محیط‌زیست

مقادیر استاندارد بور در آب آشامیدنی ظاهراً براساس حد تحمل گیاهانی است که حساس‌ترین گونه‌ها نسبت به بور هستند. مثلاً در فلسطین اشغالی استاندارد بور خیلی سخت‌گیرانه است (کمتر از ۰/۴ میلی‌گرم بر لیتر) زیرا مرکبات که گونه‌های حساس به بور هستند، از نظر کشاورزی در آن منطقه حائز اهمیت است. در کانادا حد مجاز بور در آب آشامیدنی ۵ میلی‌گرم بر لیتر است و دلیل آن احتمالاً این است که رخداد بور در آب شیرین این ناحیه بسیار کم است و اصولاً نمک‌زدایی آب دریا در کانادا انجام نمی‌شود. فناوری‌های حذف بور نیز می‌تواند موثر بر دستورالعمل‌ها باشد. همان‌گونه که ذکر شد، سازمان بهداشت جهانی در سال ۱۹۹۸ حد مجاز بور در آب آشامیدنی را به ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر افزایش داد که ناشی از نبود فناوری مقرون‌به‌صرفه برای حذف بور بود. با توجه به گسترش نمک‌زدایی و فناوری‌های حذف بور، پیش‌بینی می‌شود استانداردهای بور در آب آشامیدنی طی سال‌های آتی سختگیرانه‌تر شود. به همین دلیل، بیشتر واحدهای نمک‌زدایی، به‌صورت پیش‌گیرانه تولید آب با بور پایین را هدف قرار می‌دهند (Tu et al., 2010).

زود هنگام میوه را به دنبال دارد. حد بهینه غلظت بور در کشاورزی ۵/۳-۰/۰ میلی‌گرم بر لیتر است (Jaehong et al., 2009). مسمومیت با بور در مناطقی مانند غرب آسیا که دارای خاک‌های قلیایی و شور بوده و بارش و شستشوی خاک بسیار محدود است، منجر به کاهش محصول شده است. در چنین مناطقی اگر گیاهان با آب دارای بور و نمک بالا آبیاری شوند، به‌طور هم‌زمان دچار تنش ناشی از مسمومیت با بور و شوری می‌شوند (et al., 1997). حد تحمل بور در محصولات مختلف کشاورزی و باغداری متفاوت است. برخی مانند مرکبات و گندم حساس تا بسیار حساس و گوجه‌فرنگی و پنبه مقاوم هستند (Hilal et al., 2011).

### ۲-۳- مقررات و دستورالعمل‌ها در رابطه با بور

مقادیر استاندارد و دستورالعمل‌ها در رابطه با غلظت بور در آب آشامیدنی در سراسر جهان بسیار متفاوت است (شکل ۳) و از ۰/۵ تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر تغییر می‌کند (WHO, 2003). حداکثر غلظت مجاز در آب آشامیدنی معمولاً با در نظر گرفتن عواملی مانند: سلامت انسانی و بوم‌شناختی، ویژگی‌های اجتماعی و طبیعی، فناوری‌های موجود و مقرون‌به‌صرفه بودن تعیین می‌شود.

Regulations and guidelines (mg/L)	Time of issuing	1990	1997	1998	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009
	WHO		→ 0.3		0.5							
European Union (EU)				1.0								
Canada							5.0					
New Zealand					1.4							
Australia								4.0				
Israel								0.3				
Singapore							1.0					
Abu Dhabi												
U.S. (California)												
Japan (Fukuoka)												
Ashkelon (Israel)									≤0.4			
Palmahim (Israel)												≤0.4
Dhekelia (Cyprus)				<1								
Larnaca (Cyprus)							<1					
Sydney (Australia)												<1
Perth (Australia)												≤2

→: Not regulated or data unavailable.

شکل ۳- دستورالعمل‌ها و مقررات میزان بور در آب آشامیدنی (WHO, 2003)

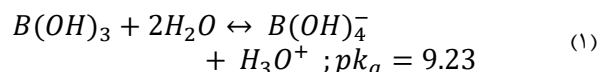
### ۳- شیمی بور و کمپلکس‌سازی آن

حل شده به‌صورت گونه‌های مختلف حضور دارد. در غلظت‌های کم بور (کمتر از ۲۱۶ میلی‌گرم بر لیتر) بور حل شده به‌صورت گونه‌های تک‌هسته‌ای مثل  $B(OH)_3^-$  و  $B(OH)_4^-$  است. در غلظت‌ها و pH بالاتر، گونه‌های چندهسته‌ای مثل  $B_2O(OH)_6^{2-}$  یا گونه‌هایی که حلقه‌های  $B_3O_3$  دارند مانند  $B_3O_3(OH)_4^-$  و  $B_4O_5(OH)_4^{2-}$  تشکیل می‌شوند. چون غلظت بور در آب دریا حدود ۴/۸ میلی‌گرم بر لیتر است بنابراین تنها گونه‌های تک‌هسته‌ای  $B(OH)_3$  و  $B(OH)_4$  در آب دریا حضور دارند. در pH خنثی بور در آب به شکل اسید بوریک تجزیه نشده است و چون یون‌های  $OH^-$  آب را جذب و  $H^+$  آزاد می‌کند یک

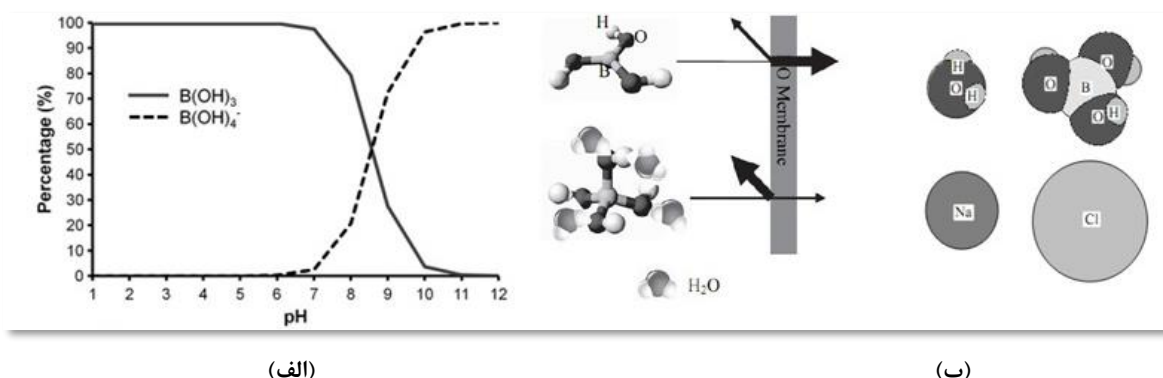
بور یک شبه‌فلز گروه ۱۳ جدول تناوبی با عدد اتمی ۵ و وزن اتمی ۱۰/۸۱ است. حالت‌های اکسایش بور متفاوت است اما عمدتاً به شکل  $B^{+3}$  است. بور یک عنصر دارای کمبود الکترون است که تمایل قوی به تشکیل پیوندهای کووالانسی به‌شدت پایدار با اتم‌های الکترون‌گاتیو مانند اکسیژن دارد که هم تشکیل  $BO_3$  با ساختار مثلثی و هم  $BO_4$  با بار منفی و ساختار چهار وجهی می‌دهد. بنابراین بور اغلب به‌صورت ترکیب با اکسیژن یافت می‌شود (EPA, 2008). بسته به غلظت بور در محیط آبی، بور

بود (شکل ۴-الف). انتشار اسید بوریک از طریق غشا، حاصل دفع اندک اسید بوریک است که با گروه‌های فعال در غشا، پیوندهای هیدروژنی تشکیل می‌دهد. شکل ۴-ب ابعاد مولکول‌های آب، اسید بوریک، بورات، سدیم و کلرید را نشان می‌دهد. اسید بوریک به‌طور ضعیفی هیدراته شده و شعاع هیدراته کوچکی دارد. به‌همین دلیل، در فرایند نمک‌زدایی، غشاهای اسمز معکوس تقریباً تمام یون‌های نمک موجود در آب دریا را براساس اندازه بزرگ آن‌ها نسبت به منافذ غشا، حذف می‌کنند اما گونه‌های بور همراه با مولکول آب به‌راحتی از سطح غشا عبور می‌کنند (Najid et al., 2021). لذا در روش‌های حذف بور تلاش بر فراهم‌آوردن شرایطی است که منجر به یونیزه شدن (باردار شدن) اسید بوریک و یا کمپلکس‌سازی بور با مواد مختلف شود تا بتوان به‌ترتیب، به شیوه دفع بارهای هم‌نام یا دفع ناشی از بزرگ بودن اندازه، بور را از آب حذف کرد. گاهی نیز کوچک‌تر کردن منافذ غشا (غشاهای نانو) مدنظر قرار گرفته است.

اسید لوییسی است (رابطه ۱). در جهت عکس و تبدیل بورات به اسید بوریک، یون  $\text{OH}^-$  آزاد می‌کند که به  $\text{H}^+$  چسبیده و تشکیل آب می‌دهد (Redondo et al., 2003). در pH های کمتر از  $pK_a$  اسید بوریک به‌صورت تجزیه نشده حضور دارد.



اسید بوریک و ترکیبات بورات قابلیت واکنش و تشکیل کمپلکس با ترکیبات شیمیایی محتوی چند گروه هیدروکسیل (پلی‌اول‌ها) مانند مانیتول دارد. این امر، اسیدیته اسید بوریک و محلول‌های بورات را افزایش می‌دهد (Geffen et al., 2006). دفع اسید بوریک در اغلب غشاهای تجاری اسمز معکوس آب دری<sup>۸</sup> ۸۲-۹۲ درصد و در غشاهای اسمز معکوس آب‌های لب‌شور<sup>۹</sup> ۳۰-۸۰ درصد است. علاوه بر این، در pH حدود ۱۰/۵ دفع بور بیش از ۹۸ درصد بوده و تقریباً تمام بور به شکل یون‌های بورات خواهد



شکل ۴-الف) تاثیر pH بر توزیع اسید بوریک و بورات در آب دریا (Hilal et al., 2011)؛ (ب) مقایسه مولکول‌های آب، اسید بوریک، بورات و یون‌های سدیم و کلر (Hung et al., 2009)

کشاورزی و شرب با حداقل میزان بور انجام شده است. بیشتر این مطالعات، به‌روش بالا بردن pH و تجزیه اسید بوریک به یون‌های بورات، روش‌های تلفیقی (هیبریدی) با رزین‌های تبادل یونی یا کی‌لیت‌کننده‌های جذبی اشاره داشته‌اند. برخی از این مطالعات عبارتند از: استفاده از جاذب‌های انتخابگر بور (Simonnot et al., 2000) و یا تلفیق اسمز معکوس با رزین‌های انتخابگر بور (Sassi and Mujtaba, 2013; Lin et al., 2020). اما هزینه بالای بازسازی رزین و دفع پساب استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند (Najid et al., 2021). حذف بور توسط غشاهای نانو و اسمز معکوس در حضور پلی‌ال‌ها که بسیار موثر بوده و هم‌چنین مانع تجمع رسوب بر روی غشا می‌شود (Geffen et al., 2006). ترکیبات پلی‌ال (زایلیتول، گلیسرول، سوربیتول و مانیتول) دارای چند گروه هیدروکسیل است که می‌تواند با تولید کمپلکس‌های آنیونی با اسید بوریک، مولکول‌های بزرگی تشکیل دهد که

میزان بور در محلول‌های آب‌گین را با روش‌های طیف‌نورسنجی و طیف‌سنجی می‌توان تعیین کرد. روش‌های طیف‌سنجی براساس واکنش‌های رنگ‌سنجی بور با برخی از معرف‌های خاص است که برای تجزیه صحرایی مناسب است اما حد آشکارسازی آن‌ها برای پایش بور در فرایند نمک‌زدایی آب دریا مناسب نیست. روش‌های طیف‌سنجی نشری مانند ICP-AES یا ICP-MS حد آشکارسازی بسیار بهتری دارند. اخیراً کروماتوگرافی یونی (IC) نیز به‌عنوان روشی جدید برای پایش غلظت بور در فرایند نمک‌زدایی به‌کار می‌رود (Kabay et al., 2015).

#### ۴- پیشینه مطالعات در زمینه حذف بور توسط فرایندهای غشایی

تاکنون مطالعات زیادی برای دستیابی به آب مناسب برای

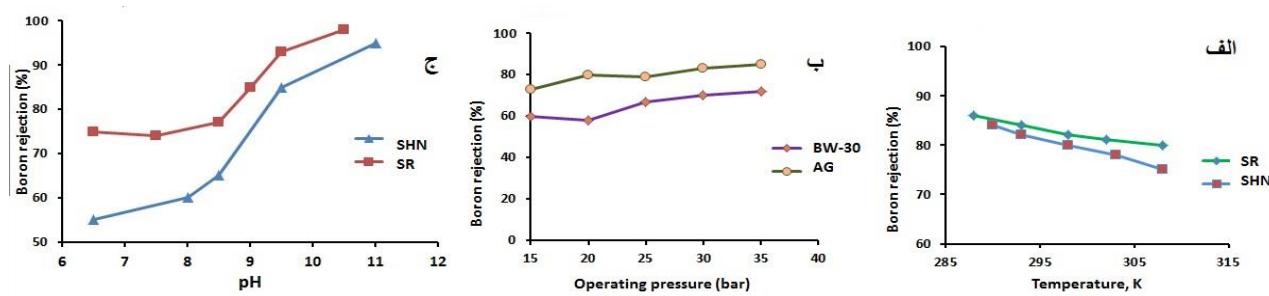
به کلرید تحمل بیشتری دارند اما معایبی نیز مانند: قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری، گستره محدود pH (۴-۸) و دما (۰-۳۵ درجه سانتیگراد) و هیدرولیز شدن گروه عملکردی بوسیله اسیدها و بازها دارند. به‌همین دلیل غشاهای کامپوزیت پلی‌آمید توسط سازنده‌های مختلف<sup>۱۱</sup> ساخته شد تا بر این مشکلات غلبه کند. امروزه دو ساختار برای غشاهای اسمز معکوس موجود است: غشاهای نامتقارن و غشاهای کامپوزیت فیلم نازک. از جمله مزایای غشاهای کامپوزیت این است که هر لایه آن را می‌توان به‌طور مستقل بهینه کرد. مزایای دیگر این نوع غشاها، محدوده pH گسترده، حساسیت کمتر به حملات بیولوژیکی و هیدرولیک مناسب است.

به‌طور کلی تا به امروز چهار چالش مرتبط با غشاهای اسمز معکوس آب دریا وجود داشته است: نیاز به معاوضه دائمی، دفع نسبتاً کم بور در طراحی تک‌گذره، جرم‌گرفتنی غشاء و مقاومت ضعیف غشاء در برابر کلر (Lim et al., 2021). مطالعات تجربی نشان داده است با افزایش دما، هم ثابت تراوایی و هم ضریب انتقال جرمی بور افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش دمای آب، حذف بور کاهش خواهد یافت (شکل ۵-الف) (et al., 2009) (Hung). حذف بور با افزایش فشار عملیاتی افزایش می‌یابد (شکل ۵-ب) (Cengeloglu et al., 2008). افزایش pH باعث ایجاد بار منفی بیشتر روی سطح غشا می‌شود. هم‌چنین در pH بالا اسید بوریک تجزیه شده و این امر باعث دافعه بین یون‌های بورات با بار منفی و سطح منفی غشا و در نتیجه، حذف بور می‌شود. حذف بور در pH حدود ۹/۵ به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و در pH برابر با ۱۱ به حداکثر خود (بیش از ۹۹٪) می‌رسد (شکل ۵-ج) (Hung et al., 2009). در یکی از جدیدترین مطالعات، غشاهای تجاری معرفی شد که حتی در pH برابر با ۷ تا ۷/۵ بازده حذف بور ۸۵ تا ۸۸٪ داشته و با افزایش pH تا حد ۱۰ این مقدار به ۹۰ تا ۹۵٪ افزایش خواهد یافت (Regis et al., 2022) با افزایش قدرت یونی محلول نیز حذف بور کاهش می‌یابد (Rahmawati, 2011). جرم‌گرفتنی غشاها چالش مهمی است که توسط جرم‌های مختلفی مانند پوسته غیر آلی، ریزجانداران، ذرات کلوئیدی و مواد آلی ایجاد می‌شود. جرم‌گرفتنی زیستی غشا، حذف بور را تا حد ۴۵٪ در غشا اسمز معکوس و حدود ۴۴٪ در غشا نانو کاهش می‌دهد (پسندیده‌پور و همکاران، ۱۴۰۰؛ Tu et al., 2010). برای رفع این مشکل راه‌کارهای متعددی بر دو مبنای اصلی کاهش زبری سطح غشا و افزایش آب دوستی و بار سطحی غشا به‌کار گرفته می‌شود (Lin et al., 2020).

به‌راحتی توسط غشای اسمز معکوس و در pH آب دریا حذف شود (Park et al., 2015). این ترکیبات در سامانه‌های تلفیقی نانو-اسمز معکوس نیز به‌کار گرفته می‌شود (Lin et al., 2020). رویکرد دیگر، فرآیندهای تلفیقی است. مانند تلفیق اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس و تبادل یونی (Nadav and Koutsakos, 2013). تلفیق کی‌لیت‌کننده‌های جذبی با اسمز معکوس (Güle et al., 2011) و تلفیق الکترودیالیز و اسمز معکوس همراه با بالابردن pH (Tang et al., 2017). از دیگر رویکردها، طراحی اسمز معکوس دو مرحله‌ای (دو‌گذره) با افزایش pH در مرحله دوم بوده است؛ زیرا افزایش pH در مرحله اول خطر پوسته‌زنی و رسوب کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم را به‌دنبال خواهد داشت (Tang et al., 2017). هم‌چنین در پژوهشی، دو گذر اسمز معکوس با استفاده از غشاهای تجاری نسل جدید بدون تنظیم pH آن‌ها و با اعمال فشارهای ۵۴ و ۱۵ بار به‌ترتیب در گذر اول و دوم به‌کار گرفته شد (Farhat et al., 2013). استفاده از سامانه اسمز معکوس تک‌گذره با قرار دادن ۷ غشا در هر مخزن تحت فشار تلاشی جدید در این راستا بوده است. در این طراحی، برخی غشاهای تجاری علی‌رغم عملکرد بهتر برای حذف بور، بازده تولید آب شیرین پایین‌تری نشان دادند (Ruiz-García and Nuez, 2021). استفاده از سامانه یکپارچه اسمز معکوس پساب-آب دریا<sup>۱۰</sup> با قابلیت صرفه‌جویی در انرژی و مزایای اقتصادی نیز به‌کار گرفته شده است اما برای حذف بور، محدودیت‌هایی در طراحی از نظر درصد اختلاط پساب-آب دریا، فشار عملکردی و نوع غشای مورد استفاده وجود دارد (Lee et al., 2021). از دیگر تلاش‌های اخیر، تلفیق سامانه اسمز معکوس با فرآیند الکتروشیمیایی است که می‌تواند ولتاژهای مختلفی را در سطح غشا روکش شده با یک لایه کربنی در نقش کاتد اعمال کند. میدان الکتریکی خارجی موجب الکترولیز آب و بالا رفتن موضعی pH در سطح غشا می‌شود که ضمن کمک به دفع بور، نیاز به افزودن مقادیر زیاد مواد قلیایی برای افزایش pH را رفع و به‌طور بالقوه می‌تواند نیاز به طراحی گذر دوم را برطرف کند (Bao et al., 2021).

## ۵- عوامل موثر بر حذف بور در روش‌های غشایی

عوامل موثر بر حذف بور در روش‌های غشایی عبارتند از: شیمی و رفتار غشا، فشار و دمای عملیاتی، pH، قدرت یونی محلول و جرم‌گرفتنی غشا. در ابتدا غشاهایی از جنس استات سلولز غیر متقارن برای فرایند اسمز معکوس طراحی شد. گرچه این غشاها نسبت



شکل ۵- رابطه درصد حذف بور در برخی غشاهای تجاری: الف) با دما (Hung et al., 2009); ب) با فشار عملیاتی (Cengeloglu et al., 2008); و ج) با pH محلول (Dydo et al., 2005)

### ۶- مروری بر فناوری‌های حذف بور و انواع پیکربندی سامانه اسمز معکوس با هدف حذف بور

که جذب سطحی و تصفیه غشایی را طی یک فرآیند با هم ترکیب می‌کند، اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. فناوری جذب سطحی عمدتاً برای محلول‌های رقیق به کار می‌رود؛ درحالی‌که روش‌های تبادل یونی و غشایی برای محلول‌های غلیظ استفاده می‌شود. در روش‌های جذب سطحی از جاذب‌های مختلفی مانند سیلیس، کربن فعال، خاک رس، خاکستر بادی، مواد معدنی طبیعی، مواد زیستی، نانوذرات، هیدروکسیدهای دو لایه‌ای، رزین‌های انتخاب‌گر بور و غشاهای کمپلکس‌ساز استفاده می‌شود. اخیراً، محققان بیشتر بر روی جاذب‌هایی با گروه‌های عاملی کیلیت‌کننده، خاک رس، اکسیدهای فلزی و مواد طبیعی تمرکز کرده‌اند. برای پساب‌های با غلظت بور بالا یا با ساختار پیچیده، روش‌های انعقاد (انعقاد الکتریکی و انعقاد شیمیایی) کارآمدتر است که بور محلول را به جامد نامحلول تبدیل می‌کند (Bhagyaraj et al., 2021).

همان‌گونه که در بخش پیشینه مطالعات ذکر شد، فناوری‌های مختلفی برای حذف موثر بور از آب دریا تا حد استاندارد، مورد مطالعات تجربی قرار گرفته است. فناوری‌های پیشنهاد شده هر کدام دارای مزایا و معایبی است (Xu et al., 2010) (جدول ۱). موثرترین راه حذف بور محلول، استفاده از روش‌های نمک‌زدایی حرارتی است. امروزه به دلیل مصرف بالای انرژی، کشورهای توسعه‌یافته بیش از این از روش‌های مذکور حمایت نمی‌کنند؛ اما در برخی نقاط در مقیاس کوچک و با استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند راهگشا باشد (سامی حصار و همکاران، ۱۳۹۸). رویکردهای متفاوت پیشنهاد شده برای حذف بور همگی وابسته به دو راهبرد است: جداسازی به کمک جذب سطحی روی یک بستر یا جداسازی به روش تصفیه غشایی. رویکردهای تلفیقی نیز

جدول ۱- خلاصه مزایا و معایب روش‌های حذف بور

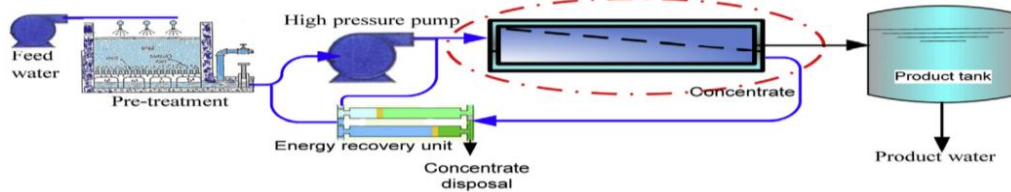
دسته‌بندی روش	روش‌ها	مزایا	معایب
تصفیه فیزیکی- شیمیایی	انعقاد-رسوب‌دهی	بازده بالا (۹۰٪)	فرآیند پیچیده، جایگاهی لجن، هزینه ماده معرف
فرآیند جذب سطحی	رزین تبادل یونی	بازده بالا (۹۰-۹۹٪)، بدون گاز زدایی، سرمایه‌گذاری کم، عملیات ساده، انتخاب بور بالا	رزین مخصوص بور، هزینه رزین و بازسازی، مدیریت پسماند، مسائل مرتبط با فولینگ، هزینه عملیاتی بالا
فرآیندهای غشایی	الکترودیالیز	بازده بالا (۹۰-۹۶٪)، حداقل نیاز به افزودنی‌های شیمیایی، فرآیندهای شناخته شده، کاهش انرژی مورد نیاز	هزینه بالای سرمایه‌گذاری، مدیریت پسماند، هدایت الکتریکی پایین، تأثیر کلرید، تعویض مکرر الکترود
	۱ یا ۲ یا ۳ مرحله اسمز معکوس در شرایط قلبایی	بازده بالا (۹۰-۹۵٪) در pH بین ۱۰ تا ۱۱، عملیات ساده، فروش آسان	غشاء خاص بور، هزینه شیمیایی، پایداری غشاء، پوسته‌زنی غشاء، هزینه انرژی بالا، پایش مکرر غشا
	۲ یا ۳ مرحله اسمز معکوس در شرایط قلبایی	بازده بالا (۹۰-۹۵٪) در pH بین ۱۰ تا ۱۱، عملیات ساده، مقرون به صرفه برای آب آشامیدنی با نیاز ۰/۵ میلی گرم بر لیتر، فروش آسان	غشای مخصوص بور، مصرف انرژی بالا، باز یافت کلی کم، پوسته‌زنی غشاء، پایش مکرر غشا
	طراحی آبشاری <sup>۱۲</sup>	بازده بالا (بیش از ۹۰٪)، بدون پوسته‌زنی غشاء، هزینه پایین آب	فرآیند پیچیده، کنترل دوز مواد شیمیایی، هزینه غشا
طراحی تلفیقی	اسمز معکوس + تبادل یونی	بازده بالا (بیش از ۹۰٪)، مصرف انرژی پایین، مقرون به صرفه برای آب آبیاری با نیاز ۰/۵ میلی گرم بر لیتر بور	فرآیند پیچیده، رزین‌های مخصوص بور، بازتولید رزین



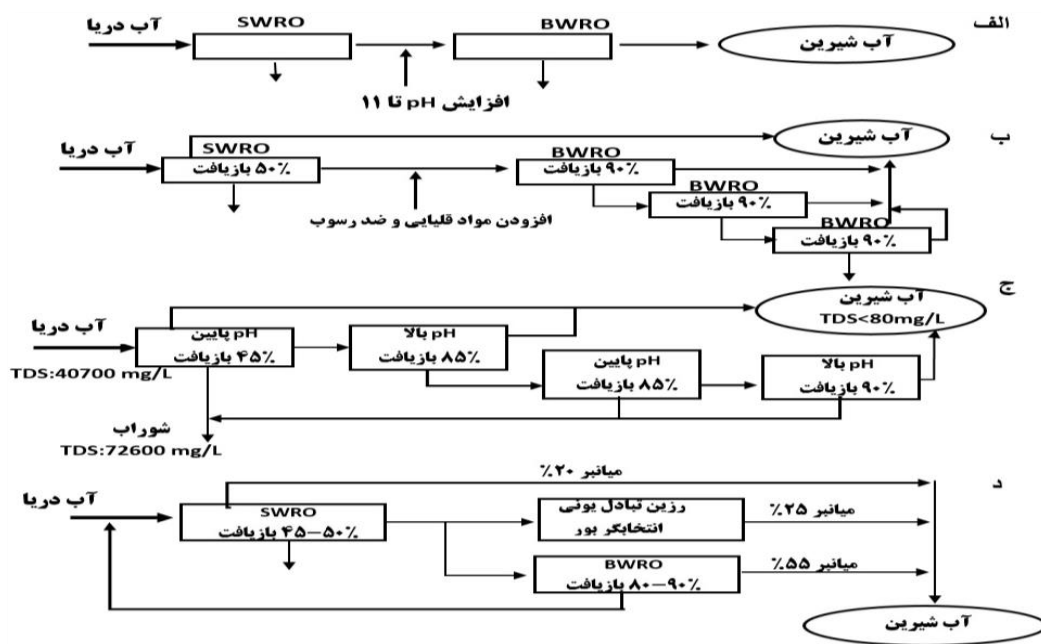
هر دو انتهای مخزن‌های غشا جمع‌آوری می‌شود (شکل ۷-ب). تراوه از انتهای خوراک با شوری و غلظت بور کمتر برای اختلاط استفاده می‌شود درحالی‌که تراوه حاصل از انتهای کنسانتره با غلظت بور بالاتر وارد گذر دوم می‌شود. در تراوه گذر اول، pH باید تا حد ۱۰ افزایش یابد سپس به صورت خوراک وارد گذر دوم شود. چون چنین شرایط pH بالا می‌تواند منجر به رسوب نمک‌های محلول شود، نیاز است ماده ضد رسوب<sup>۱۵</sup> به خوراک گذر دوم اضافه شود. مشکل دیگر آرایش چندگذره، افزایش هزینه عملیاتی ناشی از بازده پایین سامانه است. زمانی که نمک‌های محلول آب خوراک بسیار بالا است و استاندارد آب تولیدی سخت‌گیرانه است، یک سامانه اسمز معکوس پیچیده مانند منطقه آشکلون فلسطین اشغالی که دارای چهار گذر اسمز معکوس به صورت سری است، می‌تواند استفاده شود (شکل ۷-ج) (Gorenflo et al., 2017). در این سامانه در گذر اول pH پایین است و جامدات محلول حذف می‌شود. در گذر دوم pH بالاتر از ۱۰ به حذف بور کمک می‌کند. نوع دیگر طراحی، سامانه تلفیقی فناوری غشایی با تبادل یونی است (شکل ۷-د) (Redondo et al., 2003).

فرایند اسمز معکوس، در طراحی عادی تک مرحله‌ای<sup>۱۳</sup> با یک غشای ساده، حذف یون‌های سدیم، کلر، کلسیم و منیزیم را به منظور نمک‌زدایی از آب انجام می‌دهد (شکل ۶). فرایند اسمز معکوس نیاز به فشار بالا دارد تا بتواند بر فشار تفاضلی اسمز که بین آب دریا خوراک و جریان آب تولیدی وجود دارد غلبه کند. اما این طراحی برای کاهش بور تا حد ۰/۵ ppm یا کمتر موثر نیست (Kürklü et al., 2017). لذا برای رفع این مشکل، تاکنون چند مدل پیکربندی برای سامانه‌های اسمز معکوس پیشنهاد شده است.

در عمل، سامانه اسمز معکوس آب دریا شامل دو گذر است که در گذر اول pH خنثی و در گذر دوم به ۱۱ می‌رسد تا بور را تا حد کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر حذف کند (شکل ۷-الف). تعداد گذرها بستگی به ویژگی‌های آب خوراک و استانداردهای آب تولیدی دارد. چون جامدات محلول در آب (TDS)، پس از اولین گذر به شدت کاهش می‌یابد، در گذر دوم می‌توان از غشاهای اسمز معکوس آب لب‌شور استفاده کرد تا انرژی ذخیره شود. طراحی خلاقانه‌ای نخستین بار در منطقه ایلات فلسطین اشغالی به کار گرفته شد. در این سامانه، در گذر اول، تراوه<sup>۱۴</sup> خروجی از



شکل ۶- سامانه نمک‌زدایی اسمز معکوس آب دریا. غشای اسمز معکوس به ورت خط چین قرمز است (Kabay et al. 2015)



شکل ۷- الف) سامانه نمک‌زدایی و حذف بور دوگذره؛ ب) پیکربندی واحد نمک‌زدایی آب دریا در ایلات فلسطین اشغالی؛ ج) نمک‌زدایی آب دریا در آشکلون فلسطین اشغالی؛ و د) سامانه حذف بور تلفیقی اسمز معکوس/رزین تبادل یونی (Tu et al., 2010)

## ۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

طول فرآیند جذب، سریع و کارآمد عمل می‌کنند. از این‌رو، در آینده، طراحی مواد مغناطیسی در اندازه نانو با سطح بالا که پس از جذب، امکان جداسازی سریع با استفاده از روش‌های جدایش مغناطیسی را فراهم کند، مورد توجه قرار خواهد گرفت. همچنین ایجاد جاذب‌هایی که بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی و در pH طبیعی آب دریا بتواند حداکثر جذب بور را داشته باشد، مهم خواهد بود. افزایش انتخابگری بور توسط جاذب‌ها و بازسازی موثر جاذب برای استفاده مجدد از دیگر اولویت‌های پژوهشی در این راستا است. توسعه پلیمرهای جدید به‌عنوان تکیه‌گاه عوامل کی‌لیت‌کننده برای حذف موثر بور، طراحی گروه‌های عملکردی پیچیده جدید که بتواند به‌طور سریع و کارآمد در pH های مختلف با بور کمپلکس‌سازی کند، توسعه جاذب‌های ارزان قیمت از مواد طبیعی مانند پلیمرهای زیستی و ضایعات کشاورزی و توسعه فناوری‌های ترکیبی جدید برای افزایش کارایی حذف بور، از دیگر علاقه‌مندی‌های پژوهشگران برای مطالعات آتی است. در نهایت و به‌عنوان نتیجه کلی باید ذکر کرد که انتخاب بهترین روش برای حذف بور در فرایند شیرین‌سازی آب دریا، بستگی به شرایط منطقه، غلظت محلی بور، استانداردهای منطقه‌ای برای آب شرب، در دسترس بودن جاذب‌های مناسب، منابع و هزینه‌های انرژی مصرفی، هزینه سرمایه‌گذاری و به‌طور خلاصه، کلیه ملاحظات اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی در آن منطقه خاص دارد. البته هم‌چنان نیاز به تحقیقات پایه‌ای برای فهم بهتر فرایند حذف بور، تاثیرات قدرت یونی محلول، اثر جرم‌گرفتنی و پاکسازی شیمیایی غشاها بر حذف بور، مدل‌سازی ریاضی حمل بور از طریق غشاها در شرایط هیدرولیکی مختلف و در نهایت اندیشیدن به استفاده از سایر فناوری‌های نمک زدایی آب دریا به‌غیر از اسمز معکوس وجود خواهد داشت.

## ۹- پی‌نوشت‌ها

- 1- International Water Management Institute (IWMI)
- 2- Reverse Osmosis (RO)
- 3- Multi Effect Distillation (MED)
- 4- Nano Filtration (NF)
- 5- Electrodialysis (ED)
- 6- Eilat
- 7- Polyols
- 8- Sea Water Reverse Osmosis (SWRO)
- 9- Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO)
- 10- Waste Water- Sea Water (WW-SW)
- 11- Dow/Filmtech - Nitto Denko/Hydranautics –TORAY
- 12- Cascade
- 13- Single pass reverse osmosis
- 14- Permeate
- 15- Antiscalant

علی‌رغم نقش مهم بور به‌عنوان یک ریزمغذی برای گیاهان و حیوانات، انتشار بور از منابع مختلف طبیعی و انسان‌زاد، محط زیست را به خطر می‌اندازد. این امر منجر به ورود بور به منابع آبی مختلف و از جمله دریا شده که باید مطابق با استانداردها برای شرب و آبیاری تصفیه شوند. با توجه به ضرورت استفاده از نمک‌زدایی آب دریا به‌عنوان مهم‌ترین راهکار معطل کمبود آب، حذف بور یکی از چالش‌های مهم در فرایند شیرین‌سازی آب دریا محسوب می‌شود. فناوری‌های متعددی برای نمک‌زدایی آب دریا و نیز حذف بور وجود دارد که موثرترین آن‌ها، روش‌های حرارتی است اما امروزه به‌دلیل مصرف بالای انرژی، دیگر مورد توجه کشورهای توسعه‌یافته نیست. اسمز معکوس هرچند پر کاربردترین فناوری روز نمک‌زدایی آب دریا است اما برای حذف موثر بور تا حد استاندارد، به تنهایی کافی نبوده و نیاز به طراحی چندگذره دارد که در گذر دوم پس از حذف نمک‌ها، pH افزایش داده شود. اما این امر، باعث افزایش هزینه خواهد شد. پیشنهادات متنوع ارائه شده برای حل این مشکل عبارتند از: طراحی غشاهای جدید با قابلیت بالای حذف بور، تلفیق اسمز معکوس با سایر فرایندها نظیر تبادل یونی، نانوفیلتراسیون، الکترودیونیزاسیون، جذب سطحی، انعقاد و ته‌نشینی که هر یک مزایا و محدودیت‌هایی دارد. چالش اصلی در روش تبادل یونی، نیاز به پس‌تصفیه، بازسازی رزین‌ها و دفع پسماد حاصله است. نانوفیلتراسیون به‌عنوان یک فرایند پیش‌تصفیه، با مشکل جرم‌گرفتنی غشا و نیاز به پاکسازی شیمیایی متناوب مواجه است. اخیراً روش الکترودیونیزاسیون به‌دلیل مزایای فراوان مانند کیفیت خوب آب شیرین تولید شده، مصرف انرژی کمتر و عدم نیاز به کاربرد مواد شیمیایی به‌عنوان یک فناوری سبز و امیدوارکننده در نظر گرفته شده است. در روش‌های جذب سطحی، رزین‌های کیلیت‌کننده نتایج امیدبخشی را برای کاربردهای صنعتی نشان داده‌اند، به‌ویژه که اخیراً به کمک تکنیک‌های ابتکاری مانند افزایش سطح، بهبود آب‌دوستی زمینه و استفاده از اجزای مغناطیسی، کارایی آن‌ها بهبود بخشیده شده است. جاذب‌های مبتنی بر خاک رس، با وجود سازگاری با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه بودن، گزینش‌پذیری ضعیفی نسبت به بور نشان می‌دهد که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی نیز برای حذف بور مفید بوده و می‌توان کامپوزیت‌های اکسید فلزی پایدار جدیدی را برای حذف بور طراحی کرد. به‌لحاظ چشم‌انداز روش‌های حذف بور در آینده نزدیک، باید ذکر کرد که جاذب‌های مغناطیسی در

- removal from saline water: A comprehensive review”, *Desalination*, 273(1), 23-35, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.012>.
- Hung, P.V.X., Cho, S-H., and Moon, S-H., (2009), “Prediction of boron transport through seawater reverse osmosis membranes using solution-diffusion model”, *Desalination*, 247(1-3), 33-44.
- Hunt, C.D., and Benjamin, C., (2003), “Boron”, In: *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, Academic Press, Oxford, 566-574.
- Inamuddin, Ahamed, M.I., Lichtfouse, E., and Asiri, A.M., (2021), *Green adsorbents to remove metals, dyes and boron from polluted water*, Environmental Chemistry for a Sustainable World 49, Springer Nature Switzerland AG, 462 p.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S.M., (2019), “The state of desalination and brine production: A global outlook”, *Science of The Total Environment*, 657, 1343-1356, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>.
- Kabay, N., Bryjak, M., and Hilal, N., (2015), *Boron separation processes*, Elsevier; 1<sup>st</sup> Edition, 412 p.
- Kürklüa, S., Velioglua, S., Ahunbaya, M.G., Tantekin-Ersolmaz, S.B., and Krantz, W.B., (2017), “A novel energy-efficient concurrent desalination and boron removal (CDBR) process”, *Desalination*, 423, 79-94, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.005>.
- Lim, Y.J., Goh, K., Kurihara, M., and Wang, R., (2021), “Seawater desalination by reverse osmosis: Current development and future challenges in membrane fabrication, A review”, *Journal of Membrane Science*, 629, 119292, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119292>.
- Lin, J.Y., Mahasti, N.N.N., and Huang, Y.H., (2020), “Recent advances in adsorption and coagulation for boron removal from wastewater: a comprehensive review”, *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124401, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124401>.
- Nable, R.O., Bañuelos, G.S., and Paull, J.G., (1997), “Boron toxicity”, *Plant and Soil*, 193(1), 181-198.
- Nadav, N., Koutsakos, E., (2013), “Innovative design of the UF and SWRO Limassol desalination plant in Cyprus”, *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3), 95-100.
- Najid, N., Kouzbou, S., Ruiz-García, A., Fellaou, S., Gourich, B., and Stiriba, Y., (2021), “Comparison analysis of different technologies for the removal of boron from seawater: A review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 1-20, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105133>.
- Park, B., Lee, J., Kim, M., Sun Won, Y., Lim, J.K., and Kim, S. (2015) “Enhanced boron removal using polyol compounds in seawater reverse osmosis processes”, *Desalination and Water Treatment*, 57(17), 7910-7917, <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1038596>.
- Rahmawati, K., (2011), “Boron removal in seawater reverse osmosis system”, M.Sc. Thesis, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia.
- پسندیده پور، ف.، غلامی، ف.، و اسدی، آ.، (۱۴۰۰)، “مروری بر عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون اصلاح شده با نانومواد معدنی، کربنی و ترکیبی از آنها”، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، (۱)۸، <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.316060.1297>
- سامی حصار، ب.، زرغامی، م.، یگانی، ر.، و صباحی، م.، (۱۳۹۸)، “طراحی سیستم آب شیرین کن خورشیدی به روش اسمز معکوس- فتوولتائیک (مطالعه موردی: آب لب شور روستای سربند اردبیل)”، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، (۲)۴، ۳۷-۴۶.
- Bao, X., Long, W., Liu, H., and She, Q., (2021), “Boron and salt ion transport in electrically assisted reverse osmosis”, *Journal of Membrane Science*, 637, 119639, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119639>.
- Bhagyaraj, S., Al-Ghouti, M.A., Kasak, P., and Krupa, I., (2021), “An updated review on boron removal from water through adsorption processes”, *Emergent Materials*, 4, 1167-1186.
- Boccaletti, G., Grobbel, M., and Stuchtey, M.R., (2010), “The business opportunity in water conservation”, *McKinsey Quarterly*, December 1, 67-75.
- Cengeloglu, Y., Arslan, G., Tor, A., Kocak, I., and ve Dursun, N., (2008), “Removal of boron from water by using reverse osmosis”, *Separation and Purification Technology*, 64(2), 141-146.
- Curto, D., Franzitta, V., and Guercio, A., (2021), “A review of the water desalination technologies”, *Applied Sciences*, 11(2), 670.
- Dydo, P., Turek, M., Ciba, J., Trojanowska, J., and Kluczka, J., (2005), “Boron removal from landfill leachate by means of nanofiltration and reverse osmosis”, *Desalination*, 185(1-3), 131-137.
- Eke, J., Yusuf, A., Giwab, A., and Sodi, A., (2020), “The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity”, *Desalination*, 495, 114633, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
- EPA, (2008), *Drinking water health advisory for boron*, Health and Ecological Criteria Division Office of Science and Technology Office of Water, Document Number: 822-R-08-013, Washington, D.C., USA.
- Farhat, A., Ahmad, F., Hilal, N., and Arafat, H.A., (2013), “Boron removal in new generation reverse osmosis (RO) membranes using two-pass RO without pH adjustment”, *Desalination*, 310, 50-59, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.003>.
- Geffen, N., Semiat, R., Eisen, M., and Balazs, Y.S., (2006), “Boron removal from water by complexation to polyol compounds”, *Journal of Membrane Science*, 286(1-2), 45-51.
- Hilal, N., Kim, G., and Somerfield, C., (2011), “Boron

- Redondo, J., Busch, M., and De Witte, J.P., (2003), "Boron removal from seawater using FILMTECTM high rejection SWRO membranes", *Desalination*, 156(1-3), 229-238.
- Regis, A.O., Vanneste, J., Acker, S., Martínez, G., Ticona, J., García, V., Alejo, F.D., Zea, J., Krahenbuhl, R., Vanzin, G., and Sharp, J.O., (2022), "Pressure-driven membrane processes for boron and arsenic removal: pH and synergistic effects", *Desalination*, 522, 115441, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115441>.
- Ruiz-García, A., and Nuez, I., (2021), "Performance evaluation and boron rejection in a SWRO system under variable operating conditions", *Computers and Chemical Engineering*, 153, 07441, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107441>.
- Tang, Y.P., Luo, L., Thong, Z., and Chung, T.S., (2017), "Recent advances in membrane materials and technologies for boron removal", *Journal of Membrane Science*, 541, 434-446, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.07.015>.
- Tappe, A., (2020), "Investors can now trade water futures-CNN", Accessed on 12 December 2020, <https://edition.cnn.com/2020/12/07/investing/water-futures-trading/index.html>.
- Tu, K.L., Nghiem, L.D., and Chivas, A.R., (2010), "Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications", *Separation and Purification Technology*, 75(2), 87-101.
- WHO and IPCS, (1998), *Boron*, World Health Organization, Geneva, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42046>
- WHO, (2003) *Boron in drinking-water, Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*, WHO/SDE/WSH/03.04/54, Geneva.
- Xu, J., Xu, J., Gao, X., Chen, G., Zou, L., and Gao, C. (2010) "High performance boron removal from seawater by two-pass SWRO system with different membranes", *Water Science and Technology: Water Supply*, 10(3), 327-336.
- Zetland, D. (2021) "The role of prices in managing water scarcity", *Water Security*, 12, 100081, scarcity", *Water Security*, 12, 100081, <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100081>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.