فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲- صفحات۳۲-۱۴
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

روش‌های نوین استحصال آب شیرین از آب‌های شور: بررسی فناوری‌ها، چالش‌های کلیدی و روندهای آینده

لیلا حیدری[1]*، ابوالفضل حیدری[2]

۱. مدرس و مدیر دپارتمان مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو
۲ .دانشجوی کارشناسی مهندسی صنایع شیمیایی، ایران، تهران، دانشگاه علمی کاربردی، مرکز آموزش شرکت تولیدی و صنعتی آذین خودرو

چکیده

آب یکی از منابع طبیعی است که اگر سیاره ما و حیات روی آن باید پایدار بماند و توسعه اقتصادی در آینده مورد انتظار باشد، باید تعادل برقرار شود. انتظار می‌رود افزایش جمعیت جهان و سطح ثروت انسان‌ها، آب شیرین بیشتری را از بین ببرد. با این حال، از آنجایی که آب در حال حاضر یکی از منابع محدود است، سرانه آب موجود در جهان مطمئناً کاهش می‌یابد و کمبود آب رخ می‌دهد. آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی توسط نمک‌های محلول در حال افزایش است و این وضعیت کمبود آب را تشدید می‌کند. منابع این نمک‌های محلول (مانند عوامل ایجاد کننده شوری اولیه و ثانویه) به عنوان تغییر دهنده ترکیبات شیمیایی آب شناخته شده‌اند. پس از شناسایی عوامل مؤثر در کمبود آب، انسان آینده باید برای غلبه بر این چالش روی آن کار کند .

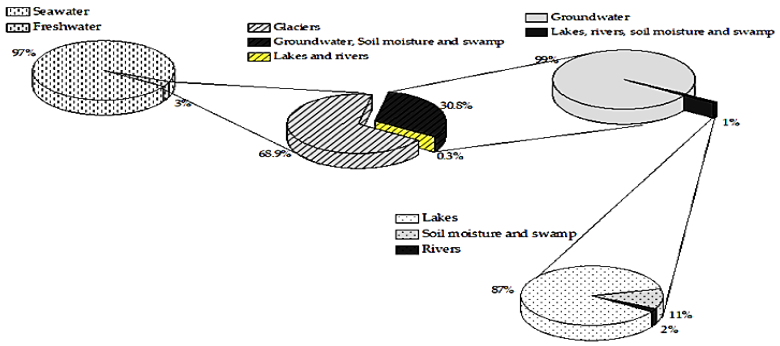
با تشدید بحران جهانی آب و افزایش فشار بر منابع آب شیرین طبیعی، شیرین‌سازی آب‌های شور (دریاها و آب‌های زیرزمینی شور) به یک راهبرد حیاتی برای تأمین آب پایدار تبدیل شده است. این مقاله به مرور جامع روش‌های مختلف استحصال آب شیرین، از جمله فرآیندهای حرارتی) مانند تقطیر چندمرحله‌ای، MEDو تقطیر با تراکم بخار، (VC، فرآیندهای غشایی) به ویژه اسمز معکوس، (RO، و فناوری‌های نوظهور و جایگزین می‌پردازد. عملکرد هر فناوری از منظر بازده انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی، پتانسیل تولید و اثرات زیست‌محیطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، روندهای آینده پژوهشی در جهت توسعه غشاهای نسل جدید، بازیابی مواد باارزش از براین و بهبود پایداری کلی فرآیندها ترسیم می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: آب، شیرین‌سازی، اسمز معکوس، تقطیر، انرژی تجدیدپذیر.

فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲- صفحات۳۲-۱۴
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

مقدمه

زمین سیاره‌ای است که ۷۱٪ از سطح آن پوشیده از آب است که ۹۷٪ آن آب دریا است [۱]. از آنجایی که آب دریا به ندرت برای مصرف انسان در دسترس است، جمعیت جهان تنها به ۳٪ آب شیرین موجود وابسته است، همانطور که در توزیع جهانی آب در شکل ۱ نشان داده شده است. از آب شیرین موجود، تنها ۰/۰۶٪ به راحتی قابل دسترسی است زیرا بقیه شامل کلاهک یخی قطبی یا یخچال‌های طبیعی، آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی است [۱،۲]. دریاچه‌ها و رودخانه‌ها نقش مهمی در محیط زیست جهانی دارند و به عنوان منابع آب آبیاری، پرورش ماهی، حمل و نقل دریایی، منابع آب صنعتی و آشامیدنی عمل می‌کنند [۳،۴]. و ۰/۳٪ از آب شیرین جهان توسط دریاچه‌ها و رودخانه‌ها ذخیره می‌شود [۵،۶]. دریاچه‌ها حاوی ۸۷٪ از کل آب شیرین مایع روی سطح زمین هستند در حالی که رودخانه تنها ۲٪ است [۶،۷]. علاوه بر این دو منبع اصلی آب شیرین موجود، آب‌های زیرزمینی یکی دیگر از منابع بالقوه آب شیرین برای بقای انسان هستند، اگرچه به راحتی قابل دسترسی نیستند [۸]. بنابراین، در مناطقی که رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در دسترس نیستند، یافتن آب‌های زیرزمینی که حدود ۹۹٪ از منابع آب شیرین مایع موجود در جهان را تشکیل می‌دهند، برای بقا ضروری است [۵]. حدود ۲/۵ میلیارد نفر فقط برای تأمین نیاز آب شیرین خود به این منبع آب وابسته هستند [۹]. بیشترین استفاده از آب‌های زیرزمینی برای بخش کشاورزی است [۱۰]. تغییر در استاندارد زندگی، فرهنگ زندگی و افزایش جمعیت تقاضا برای آب شیرین و برداشت آن را افزایش داد [۱۱ - ۱۳]. انتظار می‌رود جمعیت جهان به ۱۰/۲ -۹/۴ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد [۱۴]. بنابراین، انتظار می‌رود که تغییرات عظیمی از برداشت آب ناشی از تغییرات بیان‌شده سبک زندگی و جمعیت باشد. براساس منابع مختلف، تعداد افرادی که تحت منابع آب محدود زندگی می‌کنند به ۱/۱ میلیارد نفر رسیده است [۱۵ , ۱۶]. این نه تنها کمیت آب و یا سطح برداشت آن مهم است، بلکه کیفیت آب مورد استفاده نیز به همان اندازه مهم است. محققان به اشباع منابع آب محدود با نمک محلول به عنوان تهدیدی دیگر برای کمبود آب جهان هشدار داده‌اند [۱۷ , ۱۸]. لذا هدف از این مقاله بررسی کمی و کیفی منابع آب و ارائه راهکارهایی برای جلوگیری از کمبود آب شیرین است. به ویژه، مسائل تمرکز بر منابع آب شیرین، برداشت، کمیابی و نقش برداشت و شوری در کمیابی آب شیرین مشخص شده‌است.

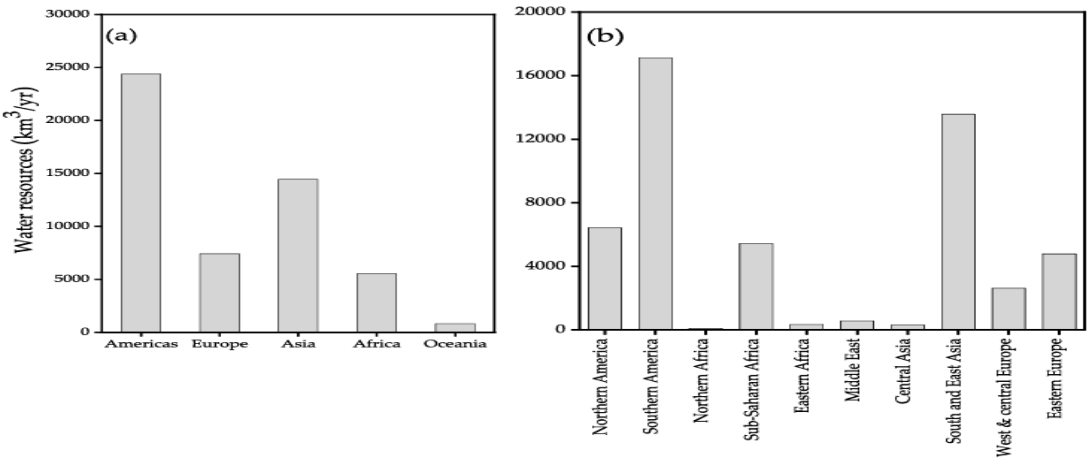


شکل ۱- توزیع جهانی آب

۱- منبع آب شیرین و توزیع آن

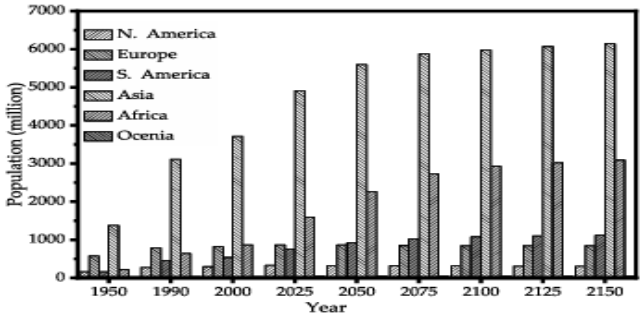
منابع تجدیدپذیر بالقوه منطقه‌ای جهان به $Km^3/year$ ۵۲۵۸۰ می‌رسد [۱۹]. براساس گزارش فائو [۱۹] سهم منابع آب به ترتیب برای آمریکا، اروپا، آفریقا، آسیا و اقیانوسیه به ترتیب ۲۴۳۶۲، ۷۴۱۸، ۵۵۳۰، ۱۴۴۵۱ و ۸۱۹ $Km^3/year$ به دست آمد شکل ۲ (a).

علاوه بر توزیع در سطح قاره‌ای، وضعیت منطقه‌ای نیز در شکل ۲ (b) نشان‌داده شده است که آمریکای جنوبی و جنوب و شرق آسیا با پتانسیل خوب منابع آب قرار می‌دهد [۲۰ , ۲۱].



شکل ۲- منابع آب در (a) سطوح قاره‌ای (b) سطوح منطقه‌ای

منابع بالقوه آب مناطق تنها در صورتی می‌توانند وضعیت خود را حفظ کنند که عوامل موثر بر مصرف آب، عمدتاً جمعیت، نوع سبک زندگی یک جامعه (کشاورزی یا صنعتی)، ثروت و سطح توسعه اقتصاد و اقلیم محلی را به درستی مدیریت شوند. برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد[۱] همچنین رشد جمعیت مناطق مختلف را پیش‌بینی کرده است که نشان‌دهنده تغییرات عمده در آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی است، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است [۵]. قاره آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی همانطور که در شکل نشان داده شده است، از نظر جمعیت به شدت در حال افزایش هستند. این امر مطمئناً منابع آب شیرین موجود به ازای هر نفر را کاهش می‌دهد.



شکل ۳- افزایش جمعیت و پیش‌بینی آن در مناطق مختلف

افزایش جمعیت و کاهش پتانسیل آب موجود، نه تنها بر میزان مصرف یا برداشت آب، بلکه بر امنیت جهان نیز تأثیر قابل توجهی دارد [۲۲]. کاهش سطح برداشت به معنای افزایش کمبود آب است و از سوی دیگر، این به معنای افزایش تنش امنیتی است. موضوع بسیار مرتبط دیگر، کاهش کیفیت شیمیایی آب پس از استفاده است [۲۳]. کشورهایی که جمعیت

[۱] United Nations Environment Programme (UNEP)

بالایی دارند، تحت تأثیر فاضلاب تولید شده پس از استفاده قرار گرفته‌اند. بنابراین، اگر فاضلاب تولید شده پس از برداشت با اجرای تکنیک‌های تصفیه قابل استفاده مجدد نباشد، از طریق مسیرهای جاری به بدنه آبی باقی مانده می‌رود و بر ترکیبات شیمیایی آب شیرین تأثیر می‌گذارد که دوباره بر امنیت استفاده تأثیر می‌گذارد.

۲- شوری به عنوان عامل تنش آبی

علاوه بر افزایش برداشت آب به دلیل افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی، شوری یا تغییر در خواص شیمیایی آب به عنوان یک عامل ایجاد کننده کمبود شناسایی شده است [۲۱]. در این بخش، شرح شوری و استانداردهای موجود (معیارهای تصمیم‌گیری) برای قضاوت در مورد شور یا غیرشور بودن آب از دیدگاه استفاده، وضعیت جهانی شوری، علت و چالش‌های آن بررسی شده است تا ماهیت گسترده مشکل نشان داده شود.

۲-۱- شرح شوری و استانداردهای تصمیم‌گیری

علاوه بر برداشت زیاد آب، اشباع آب با نمک‌های محلول، تنش آبی و کمبود را افزایش می‌دهد [۱۷،۲۱،۲۴]. افزایش آب با نمک محلول به عنوان شوری آب شناخته می‌شود [۲۵]. این سطح شوری را می‌توان با کل جامدات محلول، درصد ترکیب یا رسانایی الکتریکی آب اندازه‌گیری کرد. شوری بیش از ۰/۸ ds/m در رسانایی الکتریکی نشان می‌دهد که این آب در معرض خطر است و نیاز به مراقبت در استفاده از آن دارد [۲۶].

منابع راهنمای مختلف، سطوح شوری را بر اساس کلاس‌های تأثیر آنها با استفاده از مقادیر هدایت الکتریکی[۲] [۲۱،۲۷] طبقه‌بندی کرده‌اند، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است. به عنوان مثال، طبق استاندارد سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده برای کلرید سدیم، نام‌های مختلفی نیز بر اساس غلظت نمک همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۸،۲۹] یا بر اساس شوری اندازه‌گیری شده از رسانایی الکتریکی [۳۰] به آب داده شده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی آب بر اساس شوری

Water type	NaCl (%)	NaCl (mg/L)	Salinity (dS/m)
Fresh	<۰,۱	<۱۰۰۰	<۰,۷
Slightly saline	۰,۱–۰,۳	۱۰۰۰–۳۰۰۰	۰,۷-۲-٤
Moderately saline	۰,۳–۱	۳۰۰۰–۱۰۰۰۰	۲–۱۰
Highly saline	۱–۳,۵	۱۰,۰۰۰–۳۵۰۰۰	۱۰–۲۵
Very highly saline (Ocean/seawater)	>۳,۵	~۳۵,۰۰۰	>۲۵

بنابراین، پارامترهای یونی در آب آشامیدنی و پارامترهای آبیاری باید توسط WHO و FAO که به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند، هدایت شوند تا تغییرات جمعیتی، شهرنشینی، صنعتی شدن و تولید انرژی پایدار بمانند [۳۱،۳۲].

جدول ۲- خواص شیمیایی آب آشامیدنی

Inorganic parameter	Value	Inorganic Parameter	Value
Antimony	۰,۰۰۵	Sodium	۲۰۰
Manganese	۰,۱	Chloride	۲۵۰
Selenium	۰,۰۱	TDS	۱۰۰۰
Cyanide	۰,۰۷	Zinc	۳
Manganese	۰,۵	Aluminum	۰,۲

[۲] Electrical Conductivity (EC)

Molybdenum	۰,۰۷	Toluene	۲٤–۱۷۰
Cadmium	۰,۳	Copper	۱
Copper	۲	۱,۲ Dichlorobenzene	۱–۱۰
Nitrate	٥۰	Ammonia	۱,٥
Arsenic	۰,۰۱	Color	۱٥
Fluoride	۱,٥	Turbidity	٥
Lead	۰,۰۱	Dichlorobenzene	٥–٥۰
Chromium	۰,۰۰۳	Sulfate	۲٥۰
Nitrite	۳	Ethyl-Benzene	۲,٤–۲۰۰
Nickel	۰,۰۲	Hydrogen Sulfide	۰,۰٥
Mercury	۰,۰۰۱	۱,۲ Dichlorobenzene	۰,۳–۳۰
Barium	۰,۷	Iron	۰,۳

– همه مقادیر به جز رنگ (TCU) و کدورت (NTU) بر حسب میلی‌گرم در لیتر هستند.

جدول ۳- استانداردهای کیفیت آب آبیاری US/FAO

Water quality	Salinity Hazard		SAR (meq/L)	RSC (meq/L)
	EC at ۲٥ °C (Micromhols/cm)	TDS (mg/L)	Up to ۱۰	
Excellent	<۲٥۰	<۱٦۰	۱۰–۱۸	<۱,۲٥
Good	۲٥۰–۷٥۰	۱٦۰–٥۰۰	۱۸–۲٦	۱,۲٥–۲,٥
Medium	۷٥۰–۲۲٥۰	٥۰۰–۱٥۰۰	>۲٦	>۲,٥
Bad	۲۲٥۰–٤۰۰۰	۱٥۰۰–۲٥۰۰	>۲٦	–
Very Bad	>٤۰۰۰	>۲٥۰۰		–

۲-۲- وضعیت شوری در سراسر جهان

در سطح جهان، بیش از ۱۰۰ کشور با مشکلات شوری مواجه شده‌اند و انتظار می‌رود که دامنه توزیع آن گسترش یابد [۳۳]. کشورهایی که عموماً به عنوان خلیج فارس شناخته می‌شوند به دلیل کمبود یا عدم وجود آب شیرین برای تأمین جمعیت خود شناخته می‌شوند [۲۴]. شور شدن آب‌های سطحی و زیرزمینی یک چالش رو به رشد آب شیرین است [۳۴،۳۵]. منطقه جنوب آسیا با حدود ۳۵۲ دریاچه شور با اندازه‌های مختلف شناخته می‌شود [۳۶]. دریاچه‌ها و رودخانه‌ها در منطقه غرب، شرق آفریقا، ایالات متحده آمریکا، آمریکای جنوبی و استرالیا رایج‌ترین توده‌های آب شور هستند [۳۷]. به ویژه، کشورهایی مانند آرژانتین، ایالات متحده آمریکا، استرالیا، سودان، چین، هند، پاکستان، ایران، روسیه، افغانستان، اتیوپی، کنیا و تانزانیا برخی از کشورهای زیادی هستند که با شوری دریاچه‌ها یا رودخانه‌ها شناخته می‌شوند [۲۳،۳۷]. دریاچه‌های شرق آفریقا (مانند اتیوپی، کنیا و تانزانیا) نیز پارامتر شوری و قلیائیت را نشان دادند [۳۸]. آب‌های شور شناخته شده جهانی در جدول ۴ نشان داده شده است تا سطح شوری بر حسب درصد و اجزای نمکی مؤثر را نشان دهد. ترکیبات یونی برخی از دریاچه‌ها و رودخانه‌های شور به ترتیب در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است.

جدول ۴- شوری برخی از شورترین آب‌های روی زمین

Name	Location	Salinity (%)	Components (>۱۰٪)	Reference
Gaet'ale Pond	Ethiopia	٤۳,۳	$CaCl_2$ and $MgCl_2$	[۳۹]

Don Juan Pond	Antarctica	۲٤–٤۰	CaCl۲	[٤۰]
Kara-Bogaz-Gol	Turkmenistan	۲۷–۳٥	NaCl	[٤۱]
Lake Assal	Djibouti	۳۰,٤	NaCl	[٤۲]
Dead Sea	Israel/Jordan	۲۹,۸	MgCl۲, NaCl, CaCl۲	
Great Salt Lake	USA	۲۸,٥	NaCl	
Lake Urmia	Iran	۲٤	NaCl	[٤۳]
Lake Vanda	Antarctica	۱۲	CaCl۲, MgCl۲, NaCl	[٤۰]

جدول ٥- ترکیب شیمیایی برخی از رودخانه‌های جهان

Country	River	Ionic composition (mg/L)							
		Na	K	Mg	Ca	Cl	SO_4	HCO_3	CO_3
Algeria	Chelif[a]		۱۲۰۸	۲۳٦	۳٥٤	۲۰۹۸	۱۳۸۲		٥۹
Argentina	Rio de los[a]		٤٥	۳۳	۷٤۸	۲۹۹۷	۲۹۲۲		٥,٥
Australia	Rio saladillo[a]		۲,۰	٤,۸	۹٤,۱	٥,۹	–		
Iran	McKinnon[a]		۷۲٦	۱۱٦	۱۸۰	۱۳۹۰	۱۳٤		–
USA	Niriszufilus[a]	۲٤۳۲	۳۸	۱۱٤	۱۳۷	۲۲٦۱	۱۲۸	–	۱۳۸
	Salzflus[a]	۳۹,٤۰۳	٥۷	۱٤۷٦	٦۱٦	۱۰,۸۹۸	٥۲۱۳	٤۹۰	۲٤٦٦
Russia	Kansas[a]	۱۲۲۰	۱۱٥۰	٦۷	۱۳٦	۱٥۸۰	٦۷۰		۰
	Pecos[a]	۷۹۲٥	۱٦۱٤	۱۳۰۱	۷۳۷	٤۱۳٥	۳۰٦۰	۳۲۲	۰
Ethiopia	Charisacha[a]			۱۸۹۹	۳٦٤	۲۸,٥۲۹	۳۱۳۰	۱٥۳	– ۰
	Gorkoi-jerik[a]	۱٥,۹۹۳	۱۷٦۹	٤۲۰	۷٤۲	۱۲,۷٥۸	–	–	
	kalaus[a]	٦٦۲۳	۷۲٤,۲	۳۷۹	۳۰۳	۱٥۱۸	۳٥۲۷	–	
	Hora Kelo[b]	۷۲٤,۲	۱۹,٥	٦,۰	۳۱,۳	۲,٤		۳۷۸	
	Bulbulla[b]	۲۱۳,۸		۸,٥	۱۸,۰	۸٥,۱			

[a] [۳۷].
[b] [٤٤].

جدول ٦- ترکیب شیمیایی برخی از رودخانه‌های جهان

Country	Lakes	Ionic composition (mg/L)

		Na	K	Mg	Ca	Cl	SO_4	HCO_3	CO_3
Djibouti	Assal[d]	۱۰۱,۱۰۰	۵۱۶۰	۱۲,۵۰۰	۲۶۷۶	۱۹۸,۸۰۰	۴۴۰۰	۱۳۴,۲	
Israel	Dead Sea[e]	۳۴,۳۰۰	۸۰۰۰	۴۷,۱۰۰	۱۸,۳۰۰	۲۲۸,۶۰۰	۴۰۰	۳۰۰	
Iran	Urmia[e]	۸۸,۰۰۰	۱۱۰۰	۶۶۰۰	۱۲۱۰	۱۵۳,۰۰۰	۱۴,۲۰۰	۲۸۴,۰۰۰	
Kenya	Nakuru[a]	۳۸,۰۰۰	۱۳۱۲	۳۰	۱۰	۱۳,۰۰۰	۱۸۰۰	۱۴۰	
Madagaskar	Ihotry[a]	۱۲,۹۰۰	۳۸۰	۱۲۷۲	۴۰۰	۲۱,۰۰۰	۷۹۰		
Australia	Beeac[a]	۱۸,۶۹۹	۱۴۳	۶۲۰	۲۰۰	۳۴,۷۹۰	۷۷۸	۶۸۰	
	Corangamite[a]	۴۲,۰۵۴	۲۶۴۰	۳۳۹۴	۴۸	۷۴,۴۳۸	۲۸۲۱	۴۱۱۸	
Canada	Red Rock[a]	۱۱,۱۹۲	۱۲۱۶	۱۳۹	۱۵	۱۱,۵۷۴	–	۳۳۱۲	
	Goodenough[a]	۱۲,۶۵۰	۵۱۱	۳۰	۱۴	۵۰۰۳	۰	۷۹۳	
China	Big Quill[a]	۸۰۵۰	۵۷۵	۴۴۸۲	۳۸۲	۳۵۱۰	۳۰,۲۰۰	۷۷۶	
USA	Little	۱۲,۳۰۰	۸۹۰	۹۵۱۸	۴۹۷	۱۸,۰۰۰	۳۹,۶۰۰	۰	۰
	Manitou[a]	۲۸,۰۰۰	۲۰,۴۴۰	۷۶,۰۸۰	۹۲۰	۲۷۲,۹۷۰	۱۶,۹۰۰	۴۷۶۰	۴۶۱
	Nyer Co[f]	۴۶,۸۰۰	۱۶,۵۴۰	۱۵,۳۲۰	۶۱۰	۸۸,۱۱۰	۵۶,۵۵۰	۵۰	۳۵۸
Ethiopia	Qinghai[f]	۱۰۱,۰۰۰	۶۹۰۰	۸۵۰۰	۲۸۰	۱۷۵,۰۰۰	۲۲,۰۰۰	۴۴۲	۴۸۹۰
	Great Salt[e]	۶۳,۳۹۴	۴۳۱۱	۱۴۲۶	۴۲۳۳	۱۱۲,۹۷۱	۳۵۳۵		۱۴,۲۰۸
	South	۸۰۰۰	۳۱۰	۱۴۵	۵	۶۵۰۰	۵۶۰۰	۸۶۰	۱۳۳
	Panamint[a]	۱۷۲۰	۱۱۸	۱۱۴	۹,۳	۲۰۸۰	۲۸۰		۲۰۹
	Big Soda[a]	۱۳۰۰	۲۴۰۰	۳۴,۹۰۰	۱۰۹,۰۰۰	۲۸۱,۰۰۰	۳۹۰۰		
	Pyramid[a]	۷۳۸۴	۲۹۳	۰,۰	۴,۰	۲۹۵۷		۱۱۸۰	
	Gaet'ale[b]	۱۹,۸۶۳	۱۲۲۰	۱,۲	۴,۰	۳۵۱۰			۰
	Abijata[b]	۶۶۴۶	۲۱۵	۰,۰	۲,۰	۳۰۱۰	۹۹۰		۴۰۰۰
	Chitu[b]	۲۵۸۷	۶۲	۴,۲	۱,۲	۹۳۷			۳۰۰
	Shalla[b]								
	Beseka[c]								۳۲۰

[a] [37]
[b] [44]
[c] [45]
[d] [46]
[e] [46]
[f] [46]

۳-۲- علل شوری آب

علل شوری بسیار پیچیده و متنوع هستند و شامل نمک‌های موجود در هوا، نمک‌های ناشی از هوازدگی سنگ‌ها و خاک‌ها، آب‌های زیرزمینی آلوده به نمک، فعالیت‌های معدنی و ساختمانی مانند جاده‌سازی و راه‌آهن می‌شوند [۳۶،۳۷،۴۹]. به طور کلی، عوامل ایجاد کننده شوری را می‌توان به شور شدن اولیه و ثانویه طبقه‌بندی کرد. علت اصلی شوری، فرآیندهای طبیعی مانند هوازدگی سنگ‌های مادر شور و خاک است که در آن باد و باران نمک را حمل و در طول هزاران سال رسوب می‌کنند [۲۱،۴۹]. بسترهای نمکی دریایی باستانی یا باتلاق‌های جزر و مدی (تپه‌های نمکی طبیعی) نیز در دسته عوامل ایجاد کننده شوری اولیه قرار دارند. با این حال، منشأ دریاچه‌های شور، تکتونیکی (زمین‌ساخت)، آتشفشانی، یخچالی و ترکیبات آنها است [۳۷]. برخی از توده‌های آب شور که به دلیل وجود آب دریا یا نفوذ اقیانوس در منطقه قبل از منشأ فشاری پوسته تکتونیکی یا قاره‌ای تشکیل شده‌اند، عبارتند از دریای مرده، دریاچه نمک بزرگ و دریاچه ارومیه [۳۹]. تبخیر محیط‌های آبی با منشأ دریایی نیز می‌تواند باعث ایجاد دریاچه‌های شور شود و دریاچه‌های آسال جیبوت و کارا-بغاز-گل از توده‌های آب شور ایجاد شده در اثر تبخیر به دلیل گرمای زمین‌گرمایی هستند. زلزله نیز می‌تواند باعث شوری شود، به ویژه هنگامی که چشمه‌های آب گرم در منطقه وجود داشته باشد [۳۹]. وجود آتشفشانی-تکتونیکی مانند دریاچه باساکا در اتیوپی نیز می‌تواند دلیل تشکیل دریاچه‌های شور باشد [۵۰].

علل شوری ثانویه بسیار گسترده است و عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی به دلیل شیوه‌های نادرست استفاده از زمین (مانند جنگل‌زدایی، آبیاری ضعیف، چرای بیش از حد یا کشت فشرده) و آلودگی‌های مرتبط با صنعتی شدن مانند معدن‌کاری، استفاده از نمک جاده‌ای یخ‌زدا و خروجی‌های صنعتی است [۴۹،۵۱]. آبیاری بیش از حد، آب بیشتری را نفوذ می‌دهد و نمک انباشته شده در سفره آب را به سطح خاک می‌آورد تا نمک را به آب‌های سطحی حل کند و باعث شوری شود. آبیاری کم باعث تبخیر آب می‌شود که نمک را در خاک جمع می‌کند و در هنگام سیل یا باران شدید باعث شوری آب می‌شود. یکی دیگر از اقدامات انسان که باعث شوری آب می‌شود، انتخاب نامناسب محصول برای انواع مختلف خاک است [۲۶]. برای مناطق پرآب، باید از درختان ریشه عمیق برای افزایش تبخیر و تعرق و جلوگیری از ورود نمک از سفره آب‌های پایین‌تر استفاده شود، در حالی که برای جلوگیری از تجمع نمک، باید از محصولات کم مصرف در خاک‌های شنی (بسیار نفوذپذیر) استفاده شود.

کاهش جریان رودخانه و توسعه پروژه‌های کشاورزی و صنعتی، عواملی هستند که سطح شوری آب‌های باقی‌مانده را تشدید می‌کنند. شوری عمدتاً به آلودگی ناشی از مواد شیمیایی و رسوبات خروجی از بخش‌های مختلف مربوط می‌شود [۱۲]. تقریباً در هر کشوری که کشاورزان از کودهای کشاورزی و آفت‌کش‌ها استفاده می‌کنند، آب‌های زیرزمینی و سطحی آلوده وجود دارد. دلیل این امر آن است که آبی که پس از آبیاری یا باران شدید به رودخانه‌ها و نهرها بازمی‌گردد، اغلب به دلیل مواد مغذی اضافی، شوری بیشتر و رسوبات به شدت تخریب می‌شود [۲۴]. آلاینده‌های صنعتی مانند نمک‌ها اغلب مستقیماً به آبراه‌ها ریخته می‌شوند، در حالی که برخی دیگر مانند فلزات سنگین و کلرهای آلی از محل‌های دفن زباله شهری و [۲۴] شسته می‌شوند. محل‌های دفن زباله می‌توانند آب اقیانوس/دریا، فاضلاب یا زمین‌های کشاورزی، حوضچه تبخیر یا تزریق چاه‌های عمیق باشند. رایج‌ترین صنایعی که مواد جامد محلول ایجادکننده شوری را در کارخانه‌های مختلف تخلیه می‌کنند، کارخانه‌های نمک‌زدایی (۸۲-۷/۵ گرم در لیتر)، گوگردزدایی از گاز دودکش (۵۰-۵ گرم در لیتر)، نفت و گاز (۴۰۰-۵ گرم در لیتر)، شیرابه‌های محل دفن زباله (۱۰-۱ گرم در لیتر)، نساجی (۵۰-۱/۶ گرم در لیتر)، لبنیات (۱۲۰-۸ گرم در لیتر)، آبزی‌پروری (۴۷-۱۲ گرم در لیتر)، فاضلاب شهری (۴-۰/۶ گرم در لیتر)، داروسازی (۵۰-۲۰ گرم در لیتر) و پتروشیمی (۸۵-۲۰ گرم در لیتر) هستند [۵۲].

۴-۲- چالش‌های شوری آب

وقتی آب برداشت شده برای محصولات کشاورزی از منطقه ریشه عبور کرده و با آب‌های زیرزمینی مخلوط می‌شود، سطح آب زیرزمینی و نمک را به سطح زمین بالا می‌آورد. وقتی آب از مخلوط تبخیر می‌شود، نمک را در خاک باقی می‌گذارد و این باعث شوری خاک می‌شود که بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده و ناامنی غذایی ایجاد می‌کند [۵۳،۵۴]. این امر همچنین دسترسی به زمین‌های زراعی را که توسط تغییرات اقلیمی جهانی پشتیبانی می‌شوند، کاهش می‌دهد [۵۳]. از سوی دیگر، نمک‌ها و یون‌های محلول با تأثیر بر خواص شیمیایی آب، زندگی انسان‌ها را به چالش می‌کشند [۳۱]. به عنوان مثال، یون‌های کروم و آرسنیک به دلیل ماهیت سمی خود برای انسان‌ها، حیوانات و تعادل حیاتی محیط‌های آبی شناخته شده‌اند و کربنات‌ها و سولفات‌های کلسیم، منیزیم و سدیم به دلیل ایجاد آب سخت یا تشکیل رسوب شناخته شده‌اند. سایر ترکیبات شیمیایی مانند کلرید سدیم به دلیل جنبه‌های زیبایی‌شناختی (تغییر طعم و بو) آب شناخته شده‌اند. بنابراین، آب آلوده به نمک را نمی‌توان برای مصارف خانگی معمولی استفاده کرد.

کشاورزی و بهره‌وری محصول یک عامل کنترل‌کننده برای تقاضای رو به رشد جمعیت است. و شوری با محدود کردن رشد گیاه و بهره‌وری محصول از طریق تأثیر اسمزی خود، بر کشاورزی تأثیر می‌گذارد [۲۶،۵۳]. در گزارش‌های مختلف، تأثیر شوری در گیاه بسیار متنوع شناخته شده است و می‌تواند به کاهش بهره‌وری و اختلال در فتوسنتز تعمیم داده شود [۵۵،۵۶]. کاهش کلروفیل «a» و افزایش کاروتنوئید در برگ و کاهش اندازه برگ به دلیل شوری در آب، ارتباط مستقیمی با اختلال در فتوسنتز دارد [۵۵]. شوری زیاد در خاک باعث کاهش پتانسیل آب می‌شود و گیاه مجبور می‌شود به جای جذب آب، آب را از دست بدهد. در این زمان، گیاهان سعی می‌کنند با بستن روزنه‌ها با سختی تنش آب مقابله کنند و این بر تعرق تأثیر می‌گذارد [۴۹]. تجمع بیشتر برخی یون‌ها، به عنوان مثال، کلر باعث آسیب نوع سوختگی برگ می‌شود که دوباره فتوسنتز و تعرق را مختل می‌کند. در مجموع، اثر کلی باعث افزایش تجزیه پروتئین برای زنده ماندن سلول و در نتیجه رشد ضعیف شاخه و ریشه گیاه می‌شود [۴۹،۵۶]. بنابراین، اثرات شوری به دلیل کاهش جذب آب، تجمع یون‌ها تا سطح سمی و کاهش دسترسی به مواد مغذی آشکار می‌شود [۴۹].

۳- راهکارهای مقابله با کمبود آب و چشم‌انداز آینده

۳-۱- استفاده از کنترل مبتنی بر طبیعت و بهبود کارایی

مشکلاتی که می‌توانند در مورد آب مطرح شوند، عمدتاً توزیع ناهموار و شوری هستند. توزیع ناهموار یا کمبود فیزیکی به عدم تطابق در رشد جمعیت مربوط می‌شود. به عبارت دیگر، این افزایش برداشت آب به دلیل افزایش تقاضای آب با افزایش جمعیت جهان است. علاوه بر افزایش مصرف آب، شوری آب پتانسیل محدود کردن پایداری حیات بر روی زمین را دارد. بنابراین، حفظ منابع طبیعی آب، استفاده متعادل از آن و جستجوی راه‌حل‌هایی برای جبران آن، تنها راه پایداری خواهد بود. این شامل بهره‌وری مصرف آب، مدیریت تقاضای آب و تنوع‌بخشی به منابع آب است [۵۷]. برای تنوع‌بخشی به منابع آب، می‌توانیم راه‌حل‌های مختلفی مانند ساخت سدها، کانال‌های آب، بازیافت زباله یا استفاده مجدد از فاضلاب موجود را برای بازیابی آب شیرین و تغذیه جمعیت عظیمی که در آینده می‌آیند، ارائه دهیم. مهم‌تر از همه، باید آگاهی عمومی در مورد برداشت و مصرف آب وجود داشته باشد، به طوری که بتوان آب کمتری برداشت و به طور مؤثر استفاده کرد.

همچنین می‌توان روی واردات محصولات پرمصرف آب مانند غلات، گوشت، لبنیات و صادرات محصولات کم‌مصرف آب مانند زیتون و پرتقال کار کرد [۵۸]. این بدان معناست که کشورها محصولاتی را که در برخی کشورهای دیگر با استفاده

از آب شیرین کشور تولیدکننده تولید می‌شوند، وارد می‌کنند. به طور مشابه، محصولات صنعتی وجود دارند که برای صرفه‌جویی در منابع آب باید مراقبت‌های ویژه‌ای در استفاده از آب شیرین انجام دهند. خلاصه‌ای از این صنایع که از مقادیر زیادی آب استفاده می‌کنند و زباله تولید می‌کنند، در مقالات مختلف نشان داده شده است. صنایع شیمیایی، پالایش نفت، خمیر و کاغذ، فلزات اولیه و فرآوری مواد غذایی صنایع پیشرو در مصرف آب هستند [۵۹]. سهم جهانی ردپای آب در کشاورزی، صنعت و تأمین آب خانگی به ترتیب ۹۲٪، ۴.۴٪ و ۳.۶٪ است.

اگر شوری از قبل وجود داشته باشد و سطح رسانایی الکتریکی قابل تحمل باشد، استفاده از آب برای جلوگیری از میزان بالای تبخیر ضروری است [۲۶]. برای انجام این کار، آبیاری در شب، جلوگیری از تماس برگ (استفاده از آبیاری قطره‌ای)، مرطوب نگه داشتن خاک (برای شستشوی آسان نمک‌ها از ناحیه ریشه)، اطمینان از زهکشی خوب زیرسطحی و رقیق کردن آب شور با منابع کم نمک یا اجرای شیوه‌های قابل تحمل آب شور، برخی از استراتژی‌ها هستند. بنابراین، پرورش گوسفند، گاو و گاو شیری و تولید گونه‌های زراعی مقاوم به شوری مانند جو، پنبه، چغندر قند، کلزا، گندم و علف‌های علوفه‌ای مانند یونجه برای حیوانات چراکننده، برخی از طرح‌های مهم هستند [۳۰]. از آنجایی که استفاده گسترده از آب برای اهداف مختلف، پتانسیل تخریب کیفیت آب را دارد و سطح شوری را به سطح غیرقابل تحمل افزایش می‌دهد، باید به پساب‌های صنعتی، آلودگی شهری و جریان‌های برگشتی از آبیاری توجه شود.

۲-۳- نمک‌زدایی با استفاده از روش‌های غشایی، حرارتی و در حال توسعه

شوری آب یک چالش بزرگ بوده است و قبل از اینکه به تنش آبی و مشکلات بهداشت عمومی تبدیل شود، نیاز به راه‌حل‌های عملی دارد. اگر سطح شوری بیش از حد قابل تحمل باشد (TDS>۱۰۰۰ ppm)، راه‌حل عملی برای این چالش بدون نمک‌زدایی بسیار دشوار است [۶۳-۶۰]. نمک‌زدایی در بیش از ۱۵۰ کشور جهان مورد استفاده قرار گرفته است [۶۴]. یافتن روشی مقرون‌به‌صرفه‌تر و از نظر فنی امکان‌پذیرتر برای نمک‌زدایی که بتواند در سطوح مختلف اقتصادی مورد استفاده قرار گیرد، محور تحقیقات برای مقابله با مشکل فزاینده آب بوده و خواهد بود.

نیاز فزاینده به آب شیرین در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب، به دلیل رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییرات اقلیمی، یکی از بحران‌های پیش روی جهان در قرن بیست و یکم است. در این میان، منابع عظیم آب‌های شور (حدود ۹۷.۵٪ از آب‌های کره زمین) پتانسیل بالایی برای تبدیل به یک منبع پایدار آب دارند. فناوری شیرین‌سازی، با حذف املاح محلول (عمدتاً نمک)، این پتانسیل را بالفعل می‌کند [۶۵].

اولین واحدهای تجاری شیرین‌سازی در دهه ۱۹۶۰ راه‌اندازی شدند و از آن زمان تاکنون،این صنعت با سرعت زیادی رشد کرده است. بر اساس گزارش انجمن بین‌المللی نمک‌زدایی[۳] (IDA)، ظرفیت نصب‌شده جهانی شیرین‌سازی در پایان سال ۲۰۲۳ از مرز ۱۰۰ میلیون مترمکعب در روز گذشته است [۶۶]. انتخاب فناوری بهینه به عوامل متعددی از جمله کیفیت آب ورودی، مقیاس مورد نیاز، دسترسی و هزینه انرژی، و ملاحظات زیست‌محیطی وابسته است. این مقاله قصد دارد تا با نگاهی سیستماتیک، مهم‌ترین فناوری‌های موجود و در حال توسعه را معرفی و تحلیل نماید.

۱-۲-۳- روش‌های حرارتی[۴]

این روش‌ها بر پایه تبخیر آب و سپس چگالش بخار برای تولید آب مقطر استوارند. عمدتاً برای آب‌های با شوری بسیار بالا (مانند آب دریا) و در مناطقی که دسترسی به منابع انرژی حرارتی ارزان (مانند نفت و گاز) دارند، مناسب‌تر هستند.

[۳] International Desalination Association (IDA)
[۴] Thermal Desalination

۱-۱-۲-۳- تقطیر چندمرحله‌ای[۵] (MSF): در این روش، آب شور تا دمای بالا گرم شده و سپس وارد مراحل متوالی (گاهی تا ۴۰ مرحله) با فشار کاهشی می‌شود. کاهش ناگهانی فشار در هر مرحله باعث «شیرجه»[۶] و تبخیر بخشی از آب می‌گردد. بخار تولیدشده بر روی لوله‌های حاوی آب خوراک سرد، چگالیده شده و آب شیرین تولید می‌کند. MSF فناوری بالغی با سابقه طولانی است، اما مصرف انرژی ویژه آن بالا (در حدود ۸۰-۶۰ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب) و نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه قابل توجهی دارد [۶۷].

۲-۱-۲-۳- تقطیر چنداثری[۷] (MED): این سیستم از یک سری تبخیرکننده (افکت) به‌صورت سری استفاده می‌کند. بخار تولیدشده در اثرت اول، به عنوان منبع حرارت برای تبخیر آب در اثرت دوم استفاده می‌شود و این روند ادامه می‌یابد. MED بازده حرارتی بالاتری نسبت به MSF دارد و مصرف انرژی ویژه آن پایین‌تر است (در محدوده ۶۰-۴۰ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب). همچنین در دماهای پایین‌تری کار می‌کند که منجر به کاهش مشکل رسوب‌گیری (اسکیلینگ) می‌گردد [۶۸].

۳-۱-۲-۳- تراکم بخار[۸] (VC): در این روش، انرژی مورد نیاز برای تبخیر از طریق فشرده‌سازی مکانیکی یا ترمال بخار تأمین می‌شود. انواع اصلی آن عبارتند از تراکم مکانیکی بخار (MVC) که برای واحدهای کوچک تا متوسط ایده‌آل است و تراکم حرارتی بخار (TVC) که اغلب در ترکیب با واحدهای MED استفاده می‌شود تا بازده افزایش یابد. VC معمولاً مصرف انرژی الکتریکی بالایی دارد اما بازده حرارتی خوبی ارائه می‌دهد [۶۹].

۲-۲-۳- روش‌های غشایی[۹]

این فناوری‌ها با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا و اعمال یک محرک (مانند فشار یا میدان الکتریکی)، آب شیرین را از محلول شور جدا می‌کنند.

۱-۲-۲-۳- اسمز معکوس[۱۰] (RO): امروزه RO با سهم بیش از ۷۰٪ از بازار جهانی، پرکاربردترین فناوری شیرین‌سازی محسوب می‌شود [۶۶]. در این روش، با اعمال فشاری بیش از فشار اسمزی طبیعی آب شور، مولکول‌های آب از میان منافذ بسیار ریز غشا عبور می‌کنند، در حالی که یون‌های نمک و دیگر ناخالصی‌ها پشت غشا باقی می‌مانند. پیشرفت‌های چشمگیر در ساخت غشاهای پلی‌آمیدی با شار و انتخابگری بالا، همراه با توسعه سیستم‌های بازیابی انرژی کارآمد (مانند توربوشارژرها و مبدل‌های فشار)، مصرف انرژی ویژه RO برای شیرین‌سازی آب دریا را به کمتر از ۳ کیلووات‌ساعت بر مترمکعب در پیشرفته‌ترین واحدها کاهش داده است [۷۰]. چالش‌های اصلی آن شامل حساسیت غشا به کلر، گرفتگی بیولوژیکی و شیمیایی (فاولینگ) و مدیریت براین است.

۲-۲-۲-۳- الکترودیالیز[۱۱] (ED) و الکترودیالیز معکوس[۱۲] (EDR): این روش عمدتاً برای شیرین‌سازی آب‌های شور با غلظت متوسط (آب‌های لب‌شور) مناسب است. با اعمال میدان الکتریکی، یون‌های مثبت (کاتیون‌ها) و منفی (آنیون‌ها) به ترتیب به سمت کاتد و آند مهاجرت کرده و از طریق غشاهای تبادل یونی مخصوص عبور می‌کنند، در نتیجه

[۵] Multi-Stage Flash (MSF)
[۶] Flash
[۷] Multi-Effect Distillation (MED)
[۸] Vapor Compression (VC)
[۹] Membrane Desalination
[۱۰] Reverse Osmosis (RO)
[۱۱] Electrodialysis (ED)
[۱۲] Electrodialysis Reversal (EDR)

آب در محفظه‌های میانی عاری از یون می‌شود. EDR با معکوس کردن دوره‌ای قطبیت الکترودها، مشکل رسوب‌گیری روی غشاها را کاهش می‌دهد [۷۱].

۳-۲-۳- فناوری‌های نوظهور و جایگزین

۱-۳-۲-۳- اسمز مستقیم[۱۳] (FO): در FO، از یک محلول جاذب[۱۴] با فشار اسمزی بالا برای کشش آب از محلول شور از طریق یک غشا استفاده می‌شود. سپس آب از محلول جاذب جدا می‌گردد. این روش نیاز به فشار عملیاتی پایینی دارد و پتانسیل کاهش گرفتگی غشا و مصرف انرژی را دارد، اما چالش اصلی، توسعه محلول جاذب کارآمد و روش جداسازی کم‌انرژی است [۷۲].

۲-۳-۲-۳- تقطیر غشایی[۱۵] (MD): یک فرآیند هیبریدی که از غشاهای آب‌گریز و گرادیان دمایی به عنوان محرک جداسازی استفاده می‌کند. بخار آب از منافذ غشا عبور کرده و در سمت دیگر چگالیده می‌شود. MD می‌تواند از منابع حرارتی کم‌دما (مانند انرژی خورشیدی یا گرمای تلف‌شده صنعتی) بهره ببرد [۷۳].

۳-۳-۲-۳- شیرین‌سازی خورشیدی[۱۶]: این مفهوم کلی شامل بهره‌گیری از انرژی خورشید به‌عنوان منبع انرژی برای فرآیندهای حرارتی (حوضچه‌های خورشیدی، کلکتورها برای MED) یا تولید برق برای سیستم‌های غشایی (RO خورشیدی) است. اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالاست، اما هزینه عملیاتی و ردپای کربنی بسیار پایینی دارد [۷۴].

۴-۳-۲-۳- روش‌های مبتنی بر رطوبت‌گیری از هوا[۱۷]: اگرچه مستقیماً بر روی آب‌های شور اعمال نمی‌شود، اما به عنوان یک جایگزین در مناطق مرطوب مطرح است. این فناوری‌ها با سرد کردن هوا و چگالش رطوبت موجود در آن، آب تولید می‌کنند.

۴-۲-۳- چالش‌های کلیدی و راهکارها

۱-۴-۲-۳- مصرف انرژی: شیرین‌سازی یک فرآیند انرژی‌بر است.

راهکار: توسعه مداوم غشاهای کم‌مصرف، بهینه‌سازی سیستم‌های بازیابی انرژی، و ادغام با منابع انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، انرژی اقیانوسی) [۷۴].

۲-۴-۲-۳- مدیریت پساب غلیظ (براین): تخلیه براین به دریا می‌تواند اثرات مخرب بر اکوسیستم‌های دریایی داشته باشد.

راهکار: توسعه روش‌های کاهش حجم (مانند تبخیر در حوضچه‌ها)، بازیابی مواد معدنی باارزش (مانند لیتیوم، منیزیم) از براین، و تزریق کنترل‌شده به چاه‌های عمیق [۷۵].

۳-۴-۲-۳- هزینه‌ها: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری می‌تواند بالا باشد.

راهکار: مقیاس‌پذیری، تولید انبوه و استانداردسازی تجهیزات.

۴-۴-۲-۳- گرفتگی غشا[۱۸]: کاهش کارایی و افزایش هزینه‌های عملیاتی.

راهکار: پیش‌تصفیه دقیق آب خوراک (فیلتراسیون، اولترافیلتراسیون) و توسعه غشاهای ضدگرفتگی.

---

[۱۳] Forward Osmosis (FO)
[۱۴] Draw Solution
[۱۵] Membrane Distillation (MD)
[۱۶] Solar Desalination
[۱۷] Atmospheric Water Generation
[۱۸] Fouling

۳-۳- نمک‌زدایی با استفاده از مواد جاذب

نمک‌زدایی آب با استفاده از مواد جاذب، اخیراً به دلیل هزینه عملیاتی پایین (حداقل انرژی) و سازگاری بیشتر با محیط زیست (انتشار کم دی‌اکسید کربن) به عنوان فناوری نمک‌زدایی سازگار با محیط زیست در نظر گرفته می‌شود [۷۶]. در صورت بهبود راندمان نمک‌زدایی و ظرفیت مواد جاذب، طیف گسترده‌ای از مواد، ظرفیت بالقوه‌ای برای حذف نمک‌های محلول مختلف نشان می‌دهند [۷۷]. از میان این طیف مواد، کاربرد مواد آلومینوسیلیکات مانند زئولیت [۷۸] و بنتونیت [۷۹] به طور گسترده توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، مواد لیگنوسلولزی مانند پوسته برنج [۸۰]، تفاله نیشکر و چغندر قند [۸۱]، بلال ذرت [۸۲]، الیاف فیکه [۸۳]، باگاس و پوسته قهوه [۸۴] به عنوان گزینه‌های بالقوه نمک‌زدایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نمک‌زدایی جذبی با کمک تغییر فاز اخیراً برای به دست آوردن آب شیرین رایج شده‌اند. این روش شامل تبخیر آب شور و عبور از جاذب‌ها برای جمع‌آوری آب شیرین پس از چگالش است. این روش از جاذب‌های با سطح ویژه بالا مانند چارچوب‌های فلزی-آلی، ژل‌های سیلیکا، هیدروژل‌ها، گرافن و مشتقات آن (مانند $CaCl_2$/سیلیکاژل، NaBr، $CaCl_2$/کربن فعال، LiCl/کربن فعال و غیره) [۸۵]، کامپوزیت ژل سیلیکای جاسازی‌شده با نانوذرات با $CaCl_2$ [۸۶] استفاده می‌کند. نمک‌زدایی‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر نیز اخیراً در این روش‌های جذب تغییر فاز استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، نمک‌زدایی با استفاده از جاذب‌های ژل سیلیکا و هیدروژل [۸۷]، منابع حرارتی مختلف (مانند انرژی خورشیدی، زمین‌گرمایی، گرمای تلف‌شده و زیست‌توده) با استفاده از کربن فعال متخلخل [۸۸]. ترکیبی از نمک‌زدایی با کمک تغییر فاز و نمک‌زدایی RO نیز برای افزایش راندمان استفاده می‌شود و برای تحقیقات بیشتر پیشنهاد شده است [۸۹].

۴- نتیجه گیری

زمین از قبل با مزایا و معایب خود خلق شده است و این موجود طبیعی است. یافتن راهی برای استفاده از منبعی که می‌تواند با حفظ جایگاه خود فراهم کند، بشریت است و این نیز یک موجود طبیعی است. با این حال، اضافه کردن یک مشکل به اکوسیستم طبیعی به گونه‌ای که می‌تواند به وجود دیگران آسیب برساند، عملی غیرقانونی است که انسان‌ها باید در زندگی روزمره در نظر داشته باشند. اگر این منطق را در مورد منبع آب طبیعی در نظر بگیریم، کافی است. همانطور که در مقدمه نشان داده شده است، پتانسیل عظیمی از آب شور وجود دارد و استفاده از این پتانسیل آب به هر وسیله‌ای بسیار مهم است. با این حال، استفاده باید به گونه‌ای باشد که وضعیت مشکل آب را تشدید نکند. یکی از روش‌های استفاده ایمن می‌تواند نمک‌زدایی و استفاده از آب نمک غلیظ برای تولید محصول دیگری باشد. اینگونه است که باید به نمک‌زدایی آب دریای طبیعی یا آب شور نگریسته یا آن را پذیرفت.

از سوی دیگر، نباید اجازه داد آب‌های شور تولید شده توسط انسان‌ها در زندگی روزمره از منطقه‌ای که تولید می‌شوند، خارج شوند. یا باید دستورالعملی برای جمع‌آوری این نوع زباله‌ها در یک مکان و کار بر روی روش‌های بازیافت داده شود. اما وقتی منبع شوری بخش کشاورزی است، جایگزینی با کودهای طبیعی مانند کمپوست، وجین کردن علف‌های هرز طبیعی و انجام یا حمایت از تحقیقات در این زمینه باید به خوبی جواب دهد. علاوه بر این، استفاده از محصولاتی که هزینه کمتری برای منابع آب دارند و استفاده از زمین به گونه‌ای که بتواند خود را بازسازی کند نیز بسیار ضروری است. به طور کلی، برای جلوگیری از عواقب کمبود آب در آینده در سراسر یا در داخل مرزهای کشورها، باید آگاهی عمومی در مورد استفاده از آب و تلاش برای پایداری آن ضروری باشد.

شیرین‌سازی آب به یک فناوری ضروری برای امنیت آبی در بسیاری از مناطق جهان تبدیل شده است. در حال حاضر، اسمز معکوس به دلیل بازده انرژی و اقتصادی مطلوب، فناوری غالب است، اما روش‌های حرارتی در کاربردهای خاص و در ترکیب با منابع حرارتی ارزان یا بازیابی حرارت تلف‌شده، همچنان جایگاه خود را حفظ کرده‌اند.

روندهای پژوهشی آینده بر روی موارد زیر متمرکز است:

۱. توسعه غشاهای نسل جدید: غشاهای نانوساختار، غشاهای زی‌ایمیتیک (تقلید از طبیعت) و غشاهای دو بعدی (مانند گرافن) برای افزایش شار و انتخابگری.

۲. سیستم‌های هیبریدی هوشمند: ترکیب هوشمندانه فناوری‌های مختلف (مثلاً MD-RO یا MED-RO) با انرژی‌های تجدیدپذیر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و هزینه.

۳. اقتصاد دورانی[۱۹] در شیرین‌سازی: تمرکز بر بازیابی کامل منابع از برابن و به صفر رساندن پسماند.

۴. دیجیتال‌سازی و هوش مصنوعی: استفاده از سنسورهای پیشرفته، اینترنت اشیا و الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پایش لحظه‌ای، پیش‌بینی گرفتگی و بهینه‌سازی عملیات.

با ادامه این پیشرفت‌ها، انتظار می‌رود شیرین‌سازی در آینده‌ای نزدیک، انرژی‌بری کمتر، پایداری بیشتر و مقرون‌به‌صرفه‌تری داشته و نقش کلیدی‌تری در تضمین دسترسی جهانی به آب شیرین ایفا کند.

۴- منابع

[۱] S. Ahuja, Handbook of Water Quality and Purity, Elsevier Inc, ۲۰۰۹.
[۲] R.F. Rijsberman, Water scarcity: fact or fiction? Elsivier (۲۰۰۶) ۵–۲۲, https://doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.agwat.۲۰۰۵,۰۷,۰۰۱.
[۳] D.o. G, Lakes (۱۹۹۵), https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۲۸۶۲۲-۸.
[٤] J. Adamowski, K. Sun, Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds, J. Hydrol. ۳۹۰ (۱–۲) (۲۰۱۰) ۸۵–۹۱, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jhydrol.۲۰۱۰,۰٦,۰۳۳.
[۵] UNEP, Vital water graphics, in: R. Johnstone (Ed.), An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters, ۲۰۰۲, pp. ۱–۸۸. Nairobi, Kenya.
[٦] A. El-Ghonemy, Future sustainable water desalination technologies for the Saudi Arabia: a review, Renew. Sustain. Energy Rev. ١٦ (٩) (٢٠١٢) ٦٥٦٦, https:// doi.org/١٠,١٠١٦/j.rser.٢٠١٢,٠٧,٠٢٦.
[۷] H.T. El-Dessouky, H.M. Ettouney, Fundamentals of Salt Water Desalination, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, ۲۰۰۲.
[۸] Y. Wada, L.P. Van Beek, C.M. Van Kempen, J.W. Reckman, S. Vasak, M.F. Bierkens, Global depletion of groundwater resources, Geophys. Res. Lett. ۳۷ (۲۰) (۲۰۱۰), https://doi.org/۱۰,۱۰۲۹/۲۰۱۰GL۰٤٤٥٧١.
[۹] E. Shaji, M. Santosh, K. Sarath, P. Prakash, V. Deepchand, B. Divya, Arsenic contamination of groundwater: a global synopsis with focus on the Indian Peninsula, Geosci. Front. ۱۲ (۳) (۲۰۲۱), ۱۰۱۰۷۹, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.gsf.۲۰۲۰,۰۸,۰۱۵.
[۱۰] B. Misstear, B. D, L. Clark, Water Wells and Boreholes, John Wiley & Sons Ltd, UK, ۲۰۱۷.

[۱۹] Circular Economy

[۱۱] X. Qu, J. Brame, Q. Li, J.J.P. Alvarez, Nanotechnology for a safe and sustainable water supply: enabling integrated water treatment and reuse, Acc. Chem. Res. (۲۰۱۳) ۸۳٤–۸٤۳, https://doi.org/۱۰,۱۰۲۱/ar۳۰۰۰۲۹v.
[۱۲] E.J. Miller, Review of Water Resources and Desalination Technologies, Sand Report, United State, ۲۰۰۳, pp. ۱–٥٤.
[۱۳] Y. Wada, M. Florke, N. Hanasaki, S. Eisner, G. Fischer, S. Tramberend, Y. Satoh, M. Van Vliet, P. Yillia, C. Ringler, Modeling global water use for the ۲۱st ¨ century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches, Geosci. Model Dev. (GMD) ۹ (۱) (۲۰۱٦) ۱۷٥–۲۲۲, https://doi.org/۱۰,٥۱۹٤/ gmd-۹-۱۷٥-۲۰۱٦.
[۱٤] UNWWD, Nature-Based Solutions for Water Paris, ۲۰۱۸.
[۱٥] V. Roaf, A. Khalfan, M. Langford, Monitoring Implementation of the Right to Water: a Framework for Developing Indicators, Heinrich Boll Stiftung, Berlin,¨ ۲۰۰٥.
[۱٦] C.L. Moe, R.D. Rheingans, Global challenges in water, sanitation and health, J. Water Health ٤ (S۱) (۲۰۰٦) ٤۱–٥۷.
[۱۷] M. Ashraf, M. Ozturk, H.R. Athar, Salinity and Water Stress, springer, ۲۰۰۹, p. ٤٤.
[۱۸] M.T. van Vliet, M. Florke, Y. Wada, Quality matters for water scarcity, Nat. Geosci. ۱۰ (۱۱) (۲۰۱۷) ۸۰۰¨ _۸۰۲, https://doi.org/۱۰,۱۰۳۸/ngeo۳۰٤۷.
[۱۹] K. Frenken, V. Gillet, Irrigation Water Requirement and Water Withdrawal by Country, Aquastat, FAO, Rome, ۲۰۱۲.
[۲۰] FAO, Review of world water resources by country, Water Reports ۲۳ (۲۰۰۳).
[۲۱] A. Velmurugan, P. Swarnam, T. Subramani, B. Meena, M.J. Kaledhonkar, Water demand and salinity, Open Access Peer Rev. (۲۰۲۰), https://doi.org/۱۰,٥۷۷۲/ intechopen.۸۸۰۹٥.
[۲۲] A.T. Wolf, "Water Wars" and Water Reality: Conflict and Cooperation along International Waterways, Environmental Change, Adaptation, and Security, Kluwer Academic Publishers, ۱۹۹۹, pp. ۲٥۱–۲٦٥.
[۲۳] FAO, The State of the Worlds Land and Water Resources for Food and Agriculture– Managing Systems at Risk, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London, ۲۰۱۱, pp. ۱–۳۰۸.
[۲٤] D. Hinrichsen, H. Tacio, The Coming Freshwater Crisis Is Already Here; the Linkages between Population and Water, Woodrow Wilson International Center for Scholars, ۲۰۰۲, pp. ۱–۲٦.
[۲٥] T. Sonqishe, G. Balfour, E. Iwouha, L. Petrik, Treatment of Brines Using Commercial Zeolites and Zeolites Synthesized from Fly Ash Derivative, ۲۰۰۹, pp. ٦۹٥–۷۰۲.
[۲٦] SAI Platform Water Conservation Technical Briefs, TB۱٤ – Salinity control, ۲۰۱۲, pp. ۱–۲۰.
[۲۷] M. Zaman, S.A. Shahid, L. Heng, Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques, Springer, Switzerland, ۲۰۱۸, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۹٦۱۹۰-۳.

[۲۸] USGS, Saline Water and Salinity, ۲۰۱۸. https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/saline-water-and-salinity. (Accessed ۱٦ January ۲۰۲۳).
[۲۹] C.J. Robinove, R.H. Langford, J.W. Brookhart, Saline-water resources of North Dakota, in: Geological Survey Water-Supply Paper ۱٤۲۸, US Government Printing Office, USA, ۱۹٥۸, pp. ۱–۷۷.
[۳۰] A. Singh, Soil salinity: a global threat to sustainable development, Soil Use Manag. ۳۸ (۱) (۲۰۲۲) ۳۹–٦۷, https://doi.org/۱۰,۱۱۱۱/sum.۱۲۷۷۲.
[۳۱] F. Schutte, Handbook for the Operation of Water Treatment Works, The Water Research Commission, Southern Africa, ۲۰۰٦, pp. ۱–۲٤۲.
[۳۲] M. Arshad, A. Shakoor, Irrigation Water Quality, ۲۰۱۷.
[۳۳] S.K. Gupta, M.R. Goyal, A. Singh, Engineering Practices for Management of Soil Salinity: Agricultural, Physiological, and Adaptive Approaches, Apple Academic Press, Canada, ۲۰۱۹.
[۳٤] M. Canedo-Argüelles, C.P. Hawkins, B.J. Kefford, R.B. Sch˜ afer, B.J. Dyack, S. Brucet, D. Buchwalter, J. Dunlop, O. Fr¨ or, J. Lazorchak, Saving freshwater from ¨ salts, Science ۳٥۱ (٦۲۷٦) (۲۰۱٦) ۹۱٤–۹۱٦, https://doi.org/۱۰,۱۱۲٦/science.aad۳٤۸۸.
[۳٥] D. Nielsen, M. Brock, G. Rees, D.S. Baldwin, Effects of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia, Aust. J. Bot. ٥۱ (٦) (۲۰۰۳) ٦٥٥–٦٦٥, https:// doi.org/۱۰,۱۰۷۱/BT۰۲۱۱٥.
[۳٦] M. Zheng, An Introduction to Saline Lakes on the Qinghai—Tibet Plateau, Springer Science & Business Media, ۱۹۹۷, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۹٤-۰۱۱-٥٤٥۸-۱.
[۳۷] U.T. Hammer, Saline Lake Ecosystems of the World, Springer Science & Business Media the Netherlands, ۱۹۸٦.
[۳۸] S.O. Oduor, L. Kotut, Soda Lakes of East Africa, Springer, Switzerland, ۲۰۱٦, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۲۸٦۲۲-۸.
[۳۹] E. Perez, Y. Chebude, Chemical Analysis of Gaet'ale, a Hypersaline Pond in Danakil Depression (Ethiopia): New Record for the Most Saline Water Body on Earth, ۲۰۱۷, pp. p۱۱۰–p۱۱۷, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰٤۹۸-۰۱۷-۹۳۱۲-z.
[٤۰] T. Torii, S. Murata, N. Yamagata, Geochemistry of the dry valley lakes, J. Roy. Soc. N. Z. (۱۹۸۱) ۳۸۷–۳۹۹, https://doi.org/۱۰,۱۰۸۰/ ۰۳۰۳٦۷٥۸,۱۹۸۱,۱۰٤۲۳۳۲۹.
[٤۱] A.N. Kosarev, A.G. Kostianoy, I.S. Zonn, Kara-bogaz-gol bay: physical and chemical evolution, Aquat. Geochem. ۱٥ (۲۰۰۹) ۲۲۳–۲۳٦, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/ s۱۰٤۹۸-۰۰۸-۹۰٥٤-Z.
[٤۲] M. Meybeck, Global Distrib. Lakes (۱۹۹٥) ۱–۳٥.
[٤۳] S. Alipour, Hydrogeochemistry of Seasonal Variation of Urmia Salt Lake, Iran, Saline Systems, ۲۰۰٦, pp. ۱–۱۹.
[٤٤] K. Reaugh-Flower, Assessment of factors driving environmental change for management decision-making, in: Report to the Ethiopian Wildlife Protection Authority's Sustainable Development of the Protected Area System of Ethiopia Program, Abijata-Shalla Lakes National Park, ۲۰۱۱, pp. ۱–۱۱٥.

[٤٥] O.M. Dinka, Analysing the Temporal Water Quality Dynamics of Lake Basaka, IOPscience, Central Rift Valley of Ethiopia, ٢٠١٧, pp. ١–٨, https://doi.org/ ١٠,١٠٨٨/١٧٥٥-١٣١٥/٥٢/١/٠١٢٠٥٧.

[٤٦] B. Bosch, J. Deschamps, M. Leleu, M. Lopoukhine, A. Marce, C. Vilbert, The geothermal zone of lake Assal (FTAI), geochemical and experimental studies, Geothermics ٥ (١–٤) (١٩٧٧) ١٦٥–١٧٥, https://doi.org/١٠,١٠١٦/٠٣٧٥-٦٥٠٥(٧٧)٩٠٠١٧-٧.

[٤٧] C.D. Litchfield, Saline lakes, Encyclopedia of Geobiology (٢٠١١), https://doi.org/١٠,١٠٠٧/٩٧٨-١-٤٠٢٠-٩٢١٢-١.

[٤٨] B. Jones, D. Deocampo, Geochemistry of saline lakes, Treatise Geochem. ٥ (٢٠٠٣) ٦٠٥, https://doi.org/١٠,١٠١٦/B٠-٠٨-٠٤٣٧٥١-٦/٠٥٠٨٣-٠.

[٤٩] M. Ashraf, L. Wu, Breeding for Salinity Tolerance in Plants, Critical Reviews in Plant Sciences, ١٩٩٤, pp. ١٧–٤٢.

[٥٠] L. Jin, P.G. Whitehead, G. Bussi, F. Hirpa, M.T. Taye, Y. Abebe, K. Charles, Natural and anthropogenic sources of salinity in the Awash River and Lake Beseka (Ethiopia): modelling impacts of climate change and lake-river interactions, J. Hydrol.: Reg. Stud. ٣٦ (٢٠٢١), ١٠٠٨٦٥, https://doi.org/١٠,١٠١٦/j. ejrh.٢٠٢١,١٠٠٨٦٥.

[٥١] H.A. Dugan, S.L. Bartlett, S.M. Burke, J.P. Doubek, F.E. Krivak-Tetley, N.K. Skaff, J.C. Summers, K.J. Farrell, I.M. McCullough, A.M. Morales-Williams, Salting our freshwater lakes, Proc. Natl. Acad. Sci. USA ١١٤ (١٧) (٢٠١٧) ٤٤٥٣–٤٤٥٨, https://doi.org/١٠,١٠٧٣/pnas.١٦٢٠٢١١١١٤.

[٥٢] A. Panagopoulos, Study and evaluation of the characteristics of saline wastewater (brine) produced by desalination and industrial plants, Environ. Sci. Pollut. Control Ser. ٢٩ (١٦) (٢٠٢٢) ٢٣٧٣٦–٢٣٧٤٩, https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s١١٣٥٦-٠٢١-١٧٦٩٤-x.

[٥٣] V. Kumar, S. Hussain, W.P. Suprasanna, L.P. Tran, Salinity Responses and Tolerance in Plants, Springer International Publishing AG, Switzerland, ٢٠١٨, https://doi.org/١٠,١٠٠٧/٩٧٨-٣-٣١٩-٩٠٣١٨-٧.

[٥٤] S. Panta, T. Flowers, P. Lane, R. Doyle, G. Haros, S. Shabala, Halophyte agriculture: success stories, Environ. Exp. Bot. (٢٠١٤) ٧١–٨٣, https://doi.org/١٠,١٠١٦/ j.envexpbot.٢٠١٤,٠٥,٠٠٦.

[٥٥] M. Ashraf, M. Ozturk, Salinity and Water Stress: Improving Crop Efficiency, Springer Science & Business Media, German, ٢٠٠٨.

[٥٦] R. Munns, Genes and salt tolerance: bringing them together, New Phytol. ١٦٧ (٣) (٢٠٠٥) ٦٤٥–٦٦٣, https://doi.org/١٠,١١١١/j.١٤٦٩-٨١٣٧,٢٠٠٥,٠١٤٨٧.x.

[٥٧] M. Kettani, P. Bandelier, Techno-economic assessment of solar energy coupling with large-scale desalination plant: the case of Morocco, Desalination ٤٩٤ (٢٠٢٠), ١١٤٦٢٧.

[٥٨] M.M. Mekonnen, W. Gerbens-Leenes, The water footprint of global food production, Water ١٢ (١٠) (٢٠٢٠) ٢٦٩٦, https://doi.org/١٠,٣٣٩٠/w١٢١٠٢٦٩٦.

[٥٩] M. Ellis, S. Dillich, N. Margolis, Industrial water use and its energy implications, Proceedings (٢٠٠١) ٢٣–٣٤.

[٦٠] R. Clayton, A Review of Current Knowledge; Desalination for Water Supply, Foundation for Water Research, ٢٠١٥, pp. ١–٥٢.
[٦١] M. Shatat, S.B. Riffat, Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, Int. J. Low Carbon Technol. (٢٠١٤) ١–١٩, https://doi.org/١٠,١٠٩٣/ijlct/cts٠٢٥.
[٦٢] J. Kucera, Water from Water; Desalination, second ed., Scrivener Publishing, USA, ٢٠١٩.
[٦٣] M.W. Shahzad, M. Burhan, A. Li, K.C. Ng, Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability, Desalination (٢٠١٧) ٥٢–٦٤, https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.desal.٢٠١٧,٠٣,٠٠٩.
[٦٤] Z. Zhu, D. Peng, H. Wang, Seawater desalination in China: an overview, J. Water Reuse Desalination ٩ (٢) (٢٠١٨) ١١٥–١٣٢, https://doi.org/١٠,٢١٦٦/ wrd.٢٠١٨,٠٣٤.
[٦٥] United Nations World Water Development Report. (٢٠٢٣). Partnerships and cooperation for water. UNESCO.
[٦٦] International Desalination Association (IDA). (٢٠٢٤). IDA Desalination Yearbook ٢٠٢٣-٢٠٢٤. Media Analytics Ltd.
[٦٧] El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (٢٠٠٢). Fundamentals of salt water desalination. Elsevier Science.
[٦٨] Al-Shammiri, M., & Safar, M. (٢٠٢٠). Multi-effect distillation plants: State of the art. Desalination, ٢٤٩(١), ١-١٥.
[٦٩] Kamali, R., & Abbassi, A. (٢٠١٩). Performance analysis of a vapor compression desalination system. Applied Thermal Engineering, ١٦٠, ١١٤٠٩٢.
[٧٠] Werber, J. R., Deshmukh, A., & Elimelech, M. (٢٠١٦). The critical need for increased selectivity, not increased water permeability, for desalination membranes. Environmental Science & Technology Letters, ٣(٤), ١١٢-١٢٠.
[٧١] Strathmann, H. (٢٠١٠). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. Desalination, ٢٦٤(٣), ٢٦٨-٢٨٨.
[٧٢] Shaffer, D. L., Werber, J. R., Jaramillo, H., Lin, S., & Elimelech, M. (٢٠١٥). Forward osmosis: Where are we now? Desalination, ٣٥٦, ٢٧١-٢٨٤.
[٧٣] Alkhudhiri, A., Darwish, N., & Hilal, N. (٢٠١٢). Membrane distillation: A comprehensive review. Desalination, ٢٨٧, ٢-١٨.
[٧٤] Gude, V. G. (٢٠١٦). Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective. Water Research, ٨٩, ٨٧-١٠٦.
[٧٥] Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (٢٠١٩). Desalination brine disposal methods and treatment technologies – A review. Science of The Total Environment, ٦٩٣, ١٣٣٥٤٥.
[٧٦] C. Qin, R. Wang, W. Ma, Adsorption kinetic studies of calcium ions onto Ca-Selective zeolite, Elsiver (٢٠١٠) ١٥٦–١٦٠, https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.desal.٢٠١٠,٠٤,٠١٥.
[٧٧] A. Gunay, E. Arslankaya, I. Tosun, Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: adsorption equilibrium and kinetics, Elsiver (٢٠٠٧) ٣٦٢–٣٧١, https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.jhazmat.٢٠٠٦,١٢,٠٣٤.

[۷۸] J. Adinehvand, S.A. Rad, S.A. Tehrani, Acid-treated zeolite (clinoptilolite) and its potential to zinc removal from water sample, Int. J. Environ. Sci. Technol. (۲۰۱٦) ۱–۸, https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۳۷٦۲-۰۱٦-۱۱۰٥-۱.

[۷۹] K. Al-Essa, Activation of Jordanian bentonite by hydrochloric acid and its potential for olive mill wastewater enhanced treatment, J. Chem. (۲۰۱۸) ۱۰.

[۸۰] P. Singh, S. Garg, S. Satpute, A. Singh, Use of rice husk ash to lower the sodium adsorption ratio of saline water, Int.J.Curr.Microbiol (۲۰۱۷) ٤٤۸–٤٥۸, https:// doi.org/۱۰,۲۰٥٤٦/ijcmas.۲۰۱۷,٦۰٦,۰٥۲.

[۸۱] S.A. Ahmed, Removal of lead and sodium ions from aqueous media using natural wastes for desalination and water purification, Desalination Water Treat. (۲۰۱٥) ۱–۱۷, https://doi.org/۱۰,۱۰۸۰/۱۹٤٤۳۹۹٤,۲۰۱٥,۱۰۲٤۷٤٥.

[۸۲] M. Song, B. Jin, R. Xiao, L. Yang, Y. Wu, Zh Zhong, Y. Huang, The Comparison of Two Activation Techniques to Prepare Activated Carbon from Corn Cob, biomass and bioene r g y, ۲۰۱۳, pp. ۲٥۰–۲٥٦, https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.biombioe.۲۰۱۲,۱۱,۰۰۷.

[۸۳] N. Agudelo, P.J. Hinestroza, J. Husserl, Removal of Sodium and Chloride Ions from Aqueous Solutions Using Fique Fibers, Water Science & Technology, ۲۰۱٦, pp. ۱۱۹۷–۱۲۰۱, https://doi.org/۱۰,۲۱٦٦/wst.۲۰۱٥,٥۹۳.

[۸٤] A.A. Werkneh, K.A. Abay, M.A. Senbeta, Removal of water hardness causing constituents using alkali modified sugarcane bagasse and coffee husk at Jigjiga city, Ethiopia: a comparative study, Int. J. Environ. Monit. Anal. (۲۰۱٥) ۷–۱٦, https://doi.org/۱۰,۱۱٦٤۸/j.ijema.۲۰۱٥۰۳۰۱,۱۲.

[۸٥] H. Banda, A. Rezk, E. Elsayed, A. Askalany, Experimental and computational study on utilising graphene oxide for adsorption cooling and water desalination, Appl. Therm. Eng. ۲۲۹ (۲۰۲۳), ۱۲۰٦۳۱.

[۸٦] W. Xie, W. Hua, X. Zhang, H. Xu, L. Gao, L. Zhang, Preparation and characteristics analysis of the new-type silica gel/CaCl۲ adsorbents with nanoparticles for adsorption desalination and cooling system, J. Sol. Gel Sci. Technol. ۱۰٥ (۲) (۲۰۲۳) ٥۲٥–٥۳٦.

[۸۷] M.Z.S. Abad, M. Behshad Shafii, B. Ebrahimpour, Experimental evaluation of a solar-driven adsorption desalination system using solid adsorbent of silica gel and hydrogel, Environ. Sci. Pollut. Control Ser. ۲۹ (٤۷) (۲۰۲۲) ۷۱۲۱۷–۷۱۲۳۱.

[۸۸] A.S. Alsaman, M.S. Ahmed, E. Ibrahim, E.S. Ali, A. Farid, A.A. Askalany, Experimental investigation of porous carbon for cooling and desalination applications, npj Clean Water ٦ (۱) (۲۰۲۳) ٤.

[۸۹] M.S. Atab, A. Smallbone, A. Roskilly, A hybrid reverse osmosis/adsorption desalination plant for irrigation and drinking water, Desalination ٤٤٤ (۲۰۱۸) ٤٤–٥۲.