

1286P-NWWCE

بررسی اقتصادی روش‌های مختلف نمک‌زدایی آب‌های شور و لب‌شور با تکیه بر میزان انرژی مصرفی

سیداحمد میرباقری^۱، خدیجه دهقان^۲، مهدی اعلم^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

khadije.dehghan1991@yahoo.com

خلاصه

با توجه به کاهش روز افزون منابع آب درجهان، نمک‌زدایی آب دریاها و آب‌های لب‌شور به منظور تأمین آب آشامیدنی، بهداشتی و صنعتی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. نیاز جهانی به آب گوارا و سالم باعث گردیده تا جوامع مختلف به تصفیه و استفاده از منابع آب غیرمتعارف روی آورند به گونه‌ای که در طول دهه‌های گذشته آب دریا به یکی از منابع مهم برای تولید آب گوارا و سالم تبدیل شده است. تعداد، اندازه و بازده واحدهای نمک‌زدایی در دنیا با هدف جبران کمبود آب، به شدت در حال رشد است و تنها در این بین کاهش هزینه در فرایندهای نمک‌زدایی به عنوان اصلی‌ترین چالش فراروی این صنعت به شمار می‌آید. در این مقاله، نخست فرایندهای نمک‌زدایی که به طور عمومی شامل فرایندهای حرارتی، غشایی، الکتریکی و شیمیایی است به اختصار بیان شده و در انتها این روش‌ها از نظر فنی و اقتصادی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در مجموع در بحث نمک‌زدایی آب شور دریا عموماً روش اسمز معکوس و روش‌های تقطیری از عملکرد بهتری برخوردارند، این در حالی است که روش اسمز معکوس هزینه جاری و اثرات زیست محیطی به مراتب پایین‌تری را داراست. در قسمت نمک‌زدایی آب‌های لب‌شور نیز تکنولوژی‌هایی نظیر الکترودیالیز، یون‌زدایی خازنی و برخی دیگر از تکنولوژی‌های جدید قابلیت رقابت قابل قبولی را با روش مرسوم اسمز معکوس دارند.

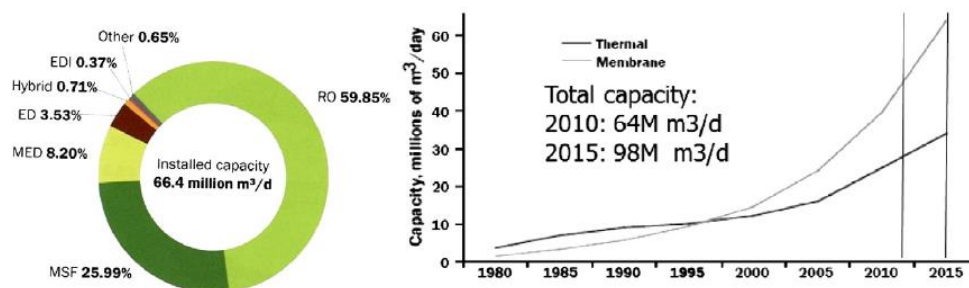
کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، فن‌آوری‌های استحصال آب شیرین، مقایسه اقتصادی و فنی

۱. مقدمه

آب یکی از منابع طبیعی است که به میزان فراوان، حدود ۷۵٪ از سطح کره زمین را پوشش داده است. اما به هر حال فقط ۳٪ از کل این منابع آب، قابل شرب است. حدود ۲۵٪ از جمعیت جهان به آبی که دارای کیفیت و کمیت رضایت بخش باشد دسترسی ندارند و بیشتر از ۸۰ کشور با مشکلات شدید آب روبرو هستند. انتظار می‌رود خشکسالی و کویرزایی جهانی، مسأله‌ی کمبود آب را تشدید نماید. حتی کشورهایی که در حال حاضر با مشکل کمبود آب مواجه نیستند هم در آینده با مشکل کمبود آب سالم مواجه خواهند شد، به طوری که تا سال ۲۰۲۵ حدود دو سوم از جمعیت جهان کمبود آب را تجربه خواهند نمود [۱]. رشد فزاینده جمعیت نیز نگرانی‌های مربوط به کمبود شدید آب در آینده‌ای نه چندان دور را تشدید می‌نماید. با این حساب می‌توان تأمین آب سالم را یکی از دغدغه‌های اصلی و کلیدی جوامع در آینده دانست.

از آب سالم برای مصارف کشاورزی، صنایع مختلف و مصارف آشامیدنی و بهداشتی استفاده می‌شود. تاکنون آب‌های سطحی و زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین منابع آب شیرین برای این مصارف مورد برداشت قرار می‌گرفت. این در حالی است که این منابع همیشه و به میزان کافی در دسترس نیستند و همانطور که در بالا به آن اشاره شد، انتظار می‌رود در آینده با کمبود شدید آن‌ها مواجه شویم. با این اوصاف، منابع آب جایگزین مانند

فاضلاب و آب‌های لب‌شور و آب دریا اهمیت گسترده‌ای در کنار منابع آب متعارف پیدا کرده‌اند. نمک‌زدایی از آب دریا یک روش قابل اطمینان برای تأمین آب سالم در کل دنیا است که به صورت موفقیت‌آمیزی برای دهه‌های متمادی مورد استفاده قرار گرفته و از نظر اقتصادی و فنی کارآمدی آن قابل مشاهده است [۲]. صنایع نمک‌زدایی نقش مؤثری در پیشرفت زندگی بشر دارند. هم‌اکنون این تکنولوژی به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته و تأسیسات مربوط به آن به صورت فزاینده‌ای در مناطق ساحلی کشورهای مختلف نصب و بهره‌برداری شده است و بسیاری از کشورها در سراسر دنیا از این تکنولوژی برای تأمین مصارف آب سالم خود استفاده می‌کنند [۳]. فرایندهای نمک‌زدایی، عوامل شوری آب که در واقع همان املاح و نمک‌های محلول در آب هستند را حذف می‌نمایند. میزان کل نمک‌های محلول^۱ در آب‌هایی غیر از آب دریا که آب‌های لب‌شور نامیده می‌شوند به طور عمومی بین ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است، این در حالی است که میزان نمک‌های محلول در آب‌های شور (دریاها و اقیانوس‌ها) در حدود ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر یا بیشتر است که عموماً مربوط به سدیم کلرید می‌باشد^۲. از آغاز پیدایش صنعت نمک‌زدایی در سال ۱۹۵۰ تاکنون در بازه‌ی زمانی نسبتاً کوتاه، پیشرفت‌های شگرفی در آن رخ داده است. شاید بتوان این پیشرفت را در مقایسه ظرفیت واحدهای شیرین‌سازی به خوبی مشاهده نمود جایی که ظرفیت واحدها از مقدار $500 \text{ m}^3/\text{d}$ به $75000 \text{ m}^3/\text{d}$ در یک واحد بزرگ تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای^۳ افزایش یافت [۴]. در حال حاضر ظرفیت جهانی واحدهای نمک‌زدایی حدود $66,4 \text{ million m}^3/\text{d}$ است و انتظار می‌رود این میزان در سال ۲۰۱۵ به $100 \text{ million m}^3/\text{d}$ برسد. ۶۳٫۷٪ از ظرفیت کل آب‌های نمک‌زدایی شده مربوط به فرایندهای غشایی و ۳۴٫۲٪ مربوط به فرایندهای حرارتی است. ۵۸٫۹٪ از منابع تأمین آب برای نمک‌زدایی مربوط به آب دریا و ۲۱٫۲٪ از آنها آب‌های لب‌شور زیرزمینی و درصد باقی‌مانده آن آب‌های سطحی و پساب‌های شور است [۵]. شکل ۱ توزیع ظرفیت واحدهای نمک‌زدایی در سال ۲۰۱۲ و پیش‌بینی آن را در سال ۲۰۱۵ نشان می‌دهد.



شکل ۱. ظرفیت واحدهای نمک‌زدایی نصب شده در سال ۲۰۱۲ (چپ) و پیش‌بینی ظرفیت واحدهای نمک‌زدایی در سال ۲۰۱۵ (راست) [۵]

۲. انواع فرایندهای نمک‌زدایی

فناوری‌های تجاری نمک‌زدایی در گذشته عموماً شامل فرایندهای حرارتی مانند تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر موثر چند مرحله‌ای^۴ و یا فرایندهای جداسازی غشایی همانند اسمز معکوس^۵ بودند. بعدها واحدهای نمک‌زدایی که ترکیبی از فرایندهای حرارتی و غشایی به صورت یکپارچه بودند نیز به میان آمدند. علاوه بر این فرایندها، روش‌هایی مانند تبخیر تراکمی^۶، الکترودیالیز^۷، الکترودیالیز معکوس^۸ و تکنولوژی‌های جدید مختلفی نظیر اسمز مستقیم^۹، تقطیر غشایی^{۱۰}، یون‌زدایی خازنی^{۱۱}، هیدراته کردن گاز^۱، انجماد^۲، رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی^۳ و آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی

^۱ Total Dissolved Solid (TDS)

^۲ Database Establishment for the Evaluation of the Effectiveness and performance of Desalination Equipment in A.R.E

^۳ Multi-Stage Flash Distillation (MSF)

^۴ Multi-effect distillation (MED)

^۵ Reverse osmosis (RO)

^۶ Vapor compression (VS)

^۷ Electrodialysis (ED)

^۸ Electrodialysis Reversal

^۹ Forward osmosis (FO)

^{۱۰} Membrane Distillation (MD)

^{۱۱} Capacitive Deionization (CDI)

نیز هر یک در مقیاس آزمایشگاهی و حتی تجاری به بازار عرضه شدند. سایر تکنولوژی‌های جانبی نیز که در برخی موارد در کنار روش‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از اولترافیلتراسیون^۴، نانوفیلتراسیون^۵ و فیلترهای یونی^۶ [۶].

۱-۲ فرایندهای حرارتی

تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر موثر چند مرحله‌ای اصلی‌ترین فرایندهای نمک‌زدایی حرارتی هستند. فرایندهای حرارتی مخصوصاً در منطقه خاورمیانه فرایندی غالب بوده که هزینه انرژی پایین و وجود واحدهای بسیار بزرگ دوگانه تولید الکتریسیته و تصفیه، استفاده روزافزون از این واحدها را تضمین می‌کند. این فرایندها در واقع تقلیدی از چرخه طبیعی آب در فرایند تبخیر و سپس چگالش و تولید آب خروجی به همراه غلظت پایین نمک است [۶].

۱-۱-۲ تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای

فرایند تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای آب خالص را با جوشاندن و سپس چگالش آب شور تولید می‌کند. در این فرایند آب شور ورودی ابتدا با عبور از یک سری لوله قبل از ورود به فضای گرمکن اصلی مورد پیش گرمایش قرار می‌گیرد. آب شور در فضای گرمکن با استفاده از هر گونه انرژی گرمایی - ای که به آن داده می‌شود گرم شده سپس این آب گرم وارد اتاقک‌هایی می‌شود که در آن فشار کمتر از فشار گرمکن است. این فشار کم منجر به جوشش ناگهانی^۷ آب شور می‌شود. در حین جوشش بخار تشکیل شده و این بخار توسط لوله‌هایی که آب ورودی را حمل می‌کنند چگالیده می‌شود و آب مقطر بدست آمده جمع‌آوری می‌گردد. فقط درصد کمی از آب گرم در هر اتاقک به بخار تبدیل می‌شود، باقی مانده آب از مرحله قبل وارد اتاقک بعدی که در آن فشار کمتر از اتاقک قبلی است می‌شود و این فرایند تا جایی که آب شور سرد و تخلیه شود ادامه پیدا می‌کند [۶]. ظرفیت این سیستم معمولاً بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ مترمکعب در روز متغیر است. در برخی از واحدهای تقطیری، آب شور وارد شده به لوله‌ها به بالاترین دمای مورد نیاز یعنی ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد [۸]. فرایند تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای ممکن است ۴ تا ۴۰ اتاقک را شامل شود، اما معمولاً مشتمل بر ۱۸ تا ۲۵ اتاقک است. فرایند تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای به عنوان یک روش نمک‌زدایی حرارتی با قابلیت اطمینان زیاد طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ فرایند غالب نمک‌زدایی در دنیا بود. به هر حال به دلیل پیشرفت در تکنولوژی‌های رقیب مانند اسمز معکوس، نصب واحدهای تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای کاهش پیدا کرد و هم اکنون در حدود ۲۵٪ از ظرفیت جهانی واحدهای نمک‌زدایی مربوط به این فرایند است. در سالهای بین ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ بیشترین کاهش در تعداد واحدهای نمک‌زدایی مشاهده شد و همچنین تمایل به این کاهش با ظهور فرایندهای اسمز معکوس و تقطیر موثر چند مرحله‌ای دیده شد. به هر حال هنوز هم این فرایند عمده‌ترین فرایند نمک‌زدایی حرارتی بخصوص در نواحی حاشیه خلیج فارس است [۶].

۲-۱-۲ تقطیر موثر چند مرحله‌ای

فرایند تقطیر موثر چند مرحله‌ای داخل یک سری از اتاقک‌هایی اتفاق می‌افتد که از ضوابط تبخیر و چگالش همزمان با کاهش فشار محیطی تبعیت می‌کند. طراحی‌های واحد تقطیر موثر چند مرحله‌ای همراه با جزئیات فرایند متغیر است. معمولاً آب تغذیه بعد از پیش گرمایش در چگالش نهایی در بخش‌های مساوی به اتاقک‌های متفاوتی تغذیه می‌شود. بخار تولید شده در مرحله اول برای گرم کردن در مراحل بعدی استفاده می‌شود. بخار تولید شده در مرحله قبل در چگالنده‌ی نهایی چگالیده و سرد می‌شود تا آب خالص تولید شود. در این روش همه‌ی آب ورودی به بخار تبدیل نمی‌شود. در هر مرحله آب باقی‌مانده محلول شور است که این آب به ورودی مرحله‌ی بعد تغذیه می‌شود. واحدهای تقطیر موثر چند مرحله‌ای یک سیستم خلا

¹ Gas hydrates (GH)

² Freezing

³ Humidification-Dehumidification (HDH)

⁴ Ultrafiltration (UF)

⁵ Nanofiltration (NF)

⁶ Ionic Filtration (IF)

⁷ Flashing

جدآگانه‌ای را برای نگه داشتن فشارهای متفاوت در اتاقک‌های مختلف بکار می‌گیرد. سیستم تقطیر موثر چند مرحله‌ای معمولاً ظرفیتی بین ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمکعب در روز دارد. در استفاده از واحدهای تقطیر موثر چند مرحله‌ای جدید یک چرخه‌ی تراکمی حرارتی تبخیری به واحدها اضافه شده تا تعداد و سطح مورد نیاز را کاهش دهد [۶].

۲-۲ فرایندهای غشایی

عملکرد فرایندهای غشایی بر اساس اجازه دادن یا ممانعت از عبور یون نمک‌های خاص از درون غشاء می‌باشد. فرایند اسمز معکوس اصلی‌ترین فرایند غشایی تجاری است که برای هر دو نوع آب دریا و آب لب‌شور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲-۱ اسمز معکوس

در فرایند اسمز معکوس، آب شور به داخل یک اتاقک بسته که در مقابل غشاء قرار دارد با فشار بسیار بالا پمپ می‌شود. آب خالص به داخل غشاء نفوذ می‌کند و املاح و نمک‌ها در جهت مخالف خارج می‌شوند. شوراب تخلیه شده ممکن است غلظتی بین ۲۰٪ تا ۷۰٪ بسته به حجم نمک داخل آب تغذیه داشته باشند. اغلب واحدهای مدرن اسمز معکوس سیستم بازیافت انرژی دارند. تخلیه املاح معمولاً با فشار زیاد صورت می‌گیرد، در حالی که آب خالص در فشار پایین قرار دارد. استفاده از سیستم بازیافت انرژی و ارتقاء دهنده‌ی غشاهای منجر به یک کاهش کلی در هزینه‌ی سیستم نمک‌زدایی به روش اسمز معکوس می‌گردد. امروزه سیستم اسمز معکوس یک تکنولوژی پیش‌تاز جهانی است که بیشترین سهم را در تولید آب شیرین نسبت به بقیه فرایندهای نمک‌زدایی دارد. شوراب حاصل از سیستم اسمز معکوس با راندمان حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد، دارای شوری بسیار بالایی است مجموع کل املاح آن ۵۰٪ تا ۸۰٪ بیشتر از املاح موجود در آب تغذیه است. گرایش به سمت فرایند اسمز معکوس برای نمک‌زدایی از آب دریا در حال افزایش است و با افزایش نیاز به آب و ظهور غشاهای با فشار پایین این گرایش تقویت می‌گردد. پیوستن سیستم نانوفیلتراسیون به سیستم اسمز معکوس با هدف پیش‌تصفیه، پیش گرمایش آب تغذیه، ارتقای موثر بهبود فشار، ایجاد واحدهای با اندازه بزرگ‌تر و غشاهای با فشار کم‌تر میزان بهبود سیستم اسمز معکوس و عملکرد و مصرف انرژی آن را به شدت ارتقاء می‌دهد [۶].

۲-۲-۳ نمک‌زدایی ترکیبی

سیستم‌های نمک‌زدایی ترکیبی از ترکیب کردن فرایندهای حرارتی و غشایی برای اقتصادی کردن و اضافه کردن ویژگی‌های فنی به آن‌ها حاصل می‌شوند. از مزایای این ترکیب می‌توان به انعطاف در عملکرد، مصرف انرژی مخصوص کمتر، کاهش هزینه‌های ساخت واحدها، دسترسی بیشتر به واحد نمک‌زدایی و توان بهتر اشاره نمود [۶].

۲-۴ سایر تکنولوژی‌های تجاری‌سازی شده

۲-۴-۱ تقطیر تراکمی تبخیری

تقطیر تراکمی تبخیری فرایندی است که در آن انرژی حرارتی خارجی از فشرده‌سازی بخشی از بخار تولید شده ناشی می‌شود. بخارات را می‌توان با استفاده از روش تراکم بخار حرارتی^۱ یا تراکم بخار مکانیکی^۲ متراکم نمود. تراکم بخار مکانیکی از الکتریسته برای متراکم کردن استفاده می‌کند. به طور کلی روش‌های تراکم تبخیری به صورت ترکیبی با سایر تکنولوژی‌ها بویژه روش تقطیر موثر چند مرحله‌ای بکار می‌رود. میزان انرژی مصرفی در روش تراکم تبخیری نسبت به روش تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای کمتر است. به طور کلی میزان آب خالص تولیدی در واحد تراکم تبخیری بیشتر از

^۱ Thermal vapor compression(TVC)

^۲ Mechanical vapor compression(MVC)

واحدهای تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر موثر چند مرحله‌ای است، با وجود اینکه ظرفیت واحدهای تبخیر تراکمی کوچک‌تر است [۶]. تراکم بخار مکانیکی ظرفیتی بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمکعب در روز و تراکم بخار حرارتی ظرفیتی بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ مترمکعب در روز دارد [۸]. سهم تولید آب شیرین توسط روش تراکم تبخیری خیلی کم است. ترکیب شدگی و استفاده‌ی جزئی از گرمای تلف شده برای پیش گرمایش آب تغذیه منجر به ارتقاء عملکرد واحدهای تبخیر تراکمی و کاهش مصرف سوخت آن می‌شود [۶].

۲-۴ الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس

الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس، هر دو فرایندی از نوع جداسازی الکتروشیمیایی هستند که در آن‌ها از انرژی الکتریکی برای به حرکت در آوردن یون‌های نمک به صورت انتخابی از طریق یک غشاء استفاده می‌شود. الکترودیالیزهای تجاری در اواسط دهه‌ی ۱۹۵۰ معرفی شدند. از این سیستم‌ها معمولاً برای نمک‌زدایی آب‌های با شوری کم (آب‌های لب شور) استفاده می‌شود. ظرفیت معمول سیستم الکترودیالیز در حدود ۲ تا ۱۴۵۰۰ مترمکعب در روز متغیر است. در الکترودیالیز معکوس بعد از مدتی جهت کاهش میزان گرفتگی غشاءها با برعکس کردن قطب‌های الکتریکی جهت جریان یون‌ها برعکس می‌شود. در صورت فائق آمدن بر مشکل سطح محدود الکترودها به منظور افزایش جذب یون‌های نمک و کاهش نیاز به انرژی الکتریکی، می‌توان به استفاده از فرایند الکترودیالیز در نمک‌زدایی از آب دریا نیز امیدوار بود [۶].

۲-۵ تکنولوژی‌های جانبی

۲-۵-۱ میکروفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون

این فرایندها یک تکنولوژی نمک‌زدایی محسوب نمی‌شوند، اما به هر حال در فرایند پیش‌تصفیه واحدهای نمک‌زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروفیلتراسیون در کاهش میزان کدورت و حذف جامدات معلق و باکتریایی کاربرد دارد. اولترافیلتراسیون نیز جهت حذف آلودگی‌هایی مانند ترکیبات آلی نامحلول سنگین و باکتری‌ها و برخی ویروس‌ها که بر رنگ آب اثر دارند بکار برده می‌شود. نانوفیلتراسیون نیز برای نرم کردن آب و حذف مواد آلی و سولفات‌ها و ویروس‌ها استفاده می‌شود. در ایالات متحده آمریکا از بین این سه روش، نانوفیلتراسیون بیشترین کاربرد را دارد [۶].

۲-۵-۲ تبادل یونی^۱

در فرایند تبادل یونی از رزین‌ها برای حذف یون‌های ناخواسته استفاده می‌شود. این روش برای خالص‌سازی آب‌هایی که بخش زیادی از حجم نمک‌های آنها بوسیله سایر روش‌های نمک‌زدایی حذف شده بکار می‌رود [۶].

۲-۶ تکنولوژی‌های خورشیدی

نیاز به آب شیرین به طور اساسی در کشورهای با آب و هوای خشک نمود بیشتری دارد، مناطقی که اشعه قابل توجهی از خورشید را دریافت می‌کنند، این یک ملاک برای استفاده از انرژی خورشیدی در راه اندازی سیستم‌های نمک‌زدایی است. انرژی خورشیدی می‌تواند به انرژی حرارتی یا الکتریکی تبدیل شود. انرژی حرارتی می‌تواند با استفاده از دستگاه تقطیر خورشیدی جهت شیرین‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. از انرژی الکتریکی خورشیدی نیز می‌توان با بهره‌گیری از تبدیل‌های فتولتائیک یا نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی، با هدف بکارگیری در فرایندهای شیرین‌سازی استفاده نمود [۸].

^۱ Ion exchange (IE)

۲-۶-۱ تقطیر خورشیدی مستقیم^۱

دستگاه تقطیر خورشیدی مستقیم، شبیه به چرخه طبیعی آب عمل می کند. این سیستم شامل یک حوضچه کم عمق پوشیده شده توسط یک سقف شفاف است، که این سقف به عنوان چگالنده عمل می کند. تابش خورشیدی در داخل دستگاه به دام می افتد و باعث تبخیر آب می گردد. تولید میانگین دستگاه تقطیر خورشیدی مستقیم در مقیاس معمول، بین ۴ تا ۶ لیتر در روز است [۸].

۲-۶-۲ رطوبت زنی چند مرحله ای خورشیدی^۲

رطوبت زنی چند مرحله ای شامل یک تبخیر کننده است که هوا در آن مرطوب و یک چگالنده که آب تقطیر شده در آن بازیابی می شود. این فرایند به دو نوع تقسیم می شود: چرخه آب باز-هوا بسته و چرخه آب بسته-هوا باز. در نوع اول، هوا بین تبخیر کننده و چگالنده در حال چرخش است. آب شور ورودی در چگالنده پیش گرمایش می شود و سپس بخش چگالنده را ترک و با کلکتور خورشیدی گرم شده از بالای بخش تبخیر کننده اسپری می شود. در نوع دوم، آب گرم می شود و هوا با ورود به بخش تبخیر کننده مرطوب می شود. هوای گرم و مرطوب سپس وارد بخش چگالنده شده باعث تبخیر آب می گردد. اصل رطوبت زنی چند مرحله ای چندین مزیت دارد که از آن جمله می توان به انعطاف پذیری در ظرفیت، هزینه های بهره برداری، نصب و راه اندازی متوسط، سادگی و امکان استفاده از انرژی با دمای پایین مانند انرژی خورشیدی اشاره نمود. دو نوع انرژی شامل حرارت با دمای پایین در حدود ۸۵ درجه سانتی گراد و برق در فرایند رطوبت زنی چند مرحله ای مورد نیاز است. این دستگاه در یکی از کشورهای حاشیه خلیج فارس اجرا شده و از سال ۲۰۰۸ در حال بهره برداری است. این سیستم شامل ۱۵۶ متر مربع جاذب و ۴۰۸ کیلووات پانل فتولتائیک است [۸].

۲-۷-۲ فرایند یون زدایی خازنی^۳ و یون زدایی خازنی غشائی^۴

فرادی در سال ۱۸۳۳ برای نخستین بار به تجزیه یون ها تحت تأثیر میدان الکتریکی در محلول ها اشاره نمود. این کشف بعدها به پیشرفت های چشمگیری در صنایع مختلف از جمله آبکاری فلزات، استخراج کانی ها، پیش گیری از خوردگی فلزات و غیره منجر گردید. یکی از تکنولوژی های برآمده از این کشف، روش یون زدایی خازنی در نمک زدایی از آب های شور و لب شور است که در سال های اخیر به صورت چشمگیری در عرصه نمک زدایی به آن پرداخته شده است. تکنولوژی یون زدایی خازنی، یکی از روش های نمک زدایی الکتریکی به حساب می آید. روش یون زدایی خازنی، از دو مفهوم حذف یون ها به عنوان عوامل شوری آب و ویژگی خازنی شکل می گیرد. بخش یون زدایی به حذف اتم ها و مولکول های باردار که به شکل یون هستند بر می گردد و بخش ویژگی خازنی آن به این واقعیت اشاره دارد که عامل حذف این یون ها، خاصیت خازنی الکترود های به کار گرفته شده در این روش است. خازن وسیله ای است که از یک جفت یا بیشتر، الکترود تشکیل شده که به صورت مخالف باردار شده است. در این روش یک پتانسیل الکتریکی به الکترود هایی که قطب های باردار مثبت و منفی را تولید می کنند، وارد می شود. مولکول های نمک در آب به شکل یون های باردار مثبت و منفی وجود دارند. یون های مثبت (کاتیون ها) به وسیله نیروی الکترواستاتیک جذب الکترود منفی و یون های منفی (آنیون ها) جذب الکترود مثبت می گردند. به این صورت یون های محلول عامل شوری، از آب حذف می شوند. نکته بسیار مهم در روش یون زدایی خازنی این است که اختلاف پتانسیل الکتریکی نباید به هیچ وجه به نقطه ای برسد که موجب شکسته شدن پیوندهای بین اتم اکسیژن و هیدروژن آب شود.

روش CDI یک ضعف اساسی در مرحله ای احیای الکترود ها دارد. این مسأله زمانی اتفاق می افتد که الکترود با یون های باردار مخالف اشباع شده است. در این هنگام فرایند نمک زدایی متوقف شده و فرایند احیا به وسیله ی معکوس کردن بار الکتریکی الکترود ها به منظور دفع یون ها از سطح الکترود آغاز می شود. به طور طبیعی هنگامی که پتانسیل الکتریکی قطب الکترود عوض می شود، الکترود، یون های جذب شده را دفع خواهد کرد اما در همان زمان یون های باردار مخالف را از توده ی مایع جذب خواهد کرد. در حقیقت دفع یون ها و جذب در همین مرحله به صورت همزمان اتفاق می افتد. این مسأله سبب می شود تا احیای ناقص الکترود ها به تقلیل ظرفیت جذب آن ها و مدت زمان احیای طولانی تر منجر گردد. برای غلبه بر این

¹ Solar still² Solar Multi-Effect Humidification (MEH)³ Capacitive Deionization (CDI)⁴ Membrane Capacitive Deionization (MCDI)

مشکلات روش یونزدایی خازنی غشائی معرفی شده است. این روش در واقع اصلاح تکنولوژی ابداعی یونزدایی خازنی با اضافه نمودن غشاهای تبادل یونی است که به جلوگیری از جذب هنگام فرایند احیاء یونها کمک می کند [۹].

۳. انرژی مصرفی فرایندهای مختلف نمکزدایی و مقایسه بین آنها

روش های تبخیری به خصوص روش تبخیر ناگهانی چند مرحله ای و روش های غشایی مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز از اصلی ترین روش های جداسازی هستند که برای تولید آب قابل شرب به دلیل بهره وری قابل توجه آنها مورد استفاده قرار می گیرند. اما مصرف انرژی روش های تبخیری برای آب های لب شور خیلی زیاد است. برای نمکزدایی از آب لب شور با میزان املاح محلول حدود ۲ گرم در لیتر، انرژی مصرفی برای روش الکترودیالیز و اسمز معکوس تقریباً به یک اندازه است در حالی که برای میزان املاح محلول بیشتر از ۵ گرم در لیتر هزینه سرمایه گذاری و انرژی مصرفی برای روش اسمز معکوس پایین تر از روش الکترودیالیز خواهد بود. بنابراین روش الکترودیالیز عمده تاً برای نمکزدایی از آب های لب شور با میزان املاح محلول کمتر از ۲ میلی گرم در لیتر به کار می رود، در حالی که روش اسمز معکوس هم برای آب دریا و هم آب های لب شور قابل استفاده است [۱۰].

هزینه انرژی، هزینه های بهره برداری و نگهداری و هزینه سرمایه گذاری از عوامل اصلی هزینه های تولید آب شیرین در فرایندهای نمکزدایی است. ۵۰٪ از هزینه های تولید آب خالص مربوط به هزینه های انرژی است. برای روش های تقطیری همانند روش های MSF، MED و TVC دو شکل از انرژی برای عملیات مورد نیاز است: ۱. گرمای با درجه حرارت پایین که سهم اساسی از انرژی ورودی را شامل می شود و این گرما را معمولاً به سیستم به وسیله تعدادی از منابع خارجی مانند سوخت های فسیلی، انرژی پسماند، انرژی اتمی و انرژی خورشیدی اعمال می کنند. ۲. انرژی الکتریکی که برای به کار انداختن پمپ سیستم و سایر اجزای الکتریکی به کار می رود. برای فرایند MVC که یک فرایند تقطیر حرارتی محسوب می شود فقط انرژی الکتریکی مورد نیاز است. برای روش های غشایی فقط انرژی الکتریکی به عنوان انرژی ورودی به سیستم استفاده می شود. سیستم های انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی گرمایی خورشیدی، فتولتائیک، انرژی باد و انرژی زمین گرمایی تکنولوژی هایی هستند که هم اکنون به عنوان تأمین کننده ی انرژی برای سیستم های نمکزدایی بکار می روند. میزان مصرف انرژی گرمایی در واحدهای MSF در محدوده ۱۹۰-۲۸۲ مگاژول بر مترمکعب متغیر است. انرژی الکتریکی معادل این مقادیر در محدوده $15,83 \text{ Kwhe/m}^3$ - $23,5 \text{ Kwhe/m}^3$ قرار می گیرد. انرژی الکتریکی مصرفی برای پمپ ها نیز حدود $2,5 \text{ Kwhe/m}^3$ - 5 Kwhe/m^3 می باشد، بنابراین کل انرژی مصرفی معادل برای فرایند MSF بین $19,33 \text{ Kwhe/m}^3$ - $27,25 \text{ Kwhe/m}^3$ است.

میزان انرژی مصرفی در واحدهای MED در محدوده 145 MJ/m^3 - 230 MJ/m^3 قرار می گیرد که این مقدار حدوداً معادل $12,2 \text{ Kwhe/m}^3$ - $19,12 \text{ Kwhe/m}^3$ است. کل میزان مصرف انرژی پمپ ها نیز در محدوده $2,5 \text{ Kwhe/m}^3$ - $2,5 \text{ Kwhe/m}^3$ قرار می گیرد. لذا کل انرژی مصرفی معادل برای فرایند MED در محدوده $14,45 \text{ Kwhe/m}^3$ - $21,35 \text{ Kwhe/m}^3$ است. واحد MVC به انرژی الکتریکی یا مکانیکی نیاز دارد. میزان مصرف انرژی الکتریکی این فرایند بین 7 Kwhe/m^3 - 12 Kwhe/m^3 است. در فرایند TVC انرژی گرمایی با درجه حرارت پایین و انرژی الکتریکی نیاز است که میزان انرژی گرمایی در محدوده $14,56 \text{ MJ/m}^3$ - $227,3 \text{ MJ/m}^3$ است و انرژی الکتریکی مصرفی در محدوده $1,8 \text{ Kwhe/m}^3$ - $1,6 \text{ Kwhe/m}^3$ می باشد. بنابراین کل انرژی مصرفی در فرایند TVC حدود $16,26 \text{ Kwhe/m}^3$ است. میزان انرژی مصرفی در فرایند اسمز معکوس به طور عمده به میزان شوری آب تغذیه و نرخ بهره وری بستگی دارد. فشار اسمزی هم به غلظت TDS آب تغذیه بستگی دارد؛ بنابراین آب با شوری بالا نیاز به انرژی زیاد و در نتیجه نیاز به فشار اسمزی بالاتری دارد. واحدهای اسمز معکوس در اندازه های متفاوت از واحدهای کوچک با ظرفیت ۰,۱ مترمکعب در روز تا واحدهای بزرگ با ظرفیت ۳۹۵۰۰۰ مترمکعب در روز وجود دارند. میزان مصرف متوسط انرژی گزارش شده حدود $3,7 \text{ Kwh/m}^3$ - 8 Kwh/m^3 است. اما میزان مصرف انرژی برای واحدهای بسیار کوچک شاید از 15 Kwh/m^3 نیز تجاوز کند. برای واحدهای معمول فرایند اسمز معکوس آب دریا با ظرفیت ۲۴۰۰۰ مترمکعب در روز، میزان مصرف انرژی الکتریکی در محدوده بین 4 Kwhe/m^3 - 6 Kwhe/m^3 قرار می گیرد که شامل یک سیستم بازیافت انرژی^۱ نیز هست. از آنجا که برای نمکزدایی آب های لب شور از فشار پایین تری استفاده می شود؛ بنابراین غشاهای مختلفی با میزان بازیافت انرژی بالاتر که میزان مصرف انرژی را پایین می آورند قابل استفاده هستند. فرایند اسمز معکوس برای آب های لب شور^۲ $1,5 \text{ Kwh/m}^3$ - $2,5 \text{ Kwh/m}^3$ انرژی الکتریکی مصرف می کند. در فرایند الکترودیالیز با شوری کم میزان انرژی الکتریکی مصرفی در محدوده $0,7 \text{ Kwh/m}^3$ - $2,5 \text{ Kwh/m}^3$ متغیر است و برای شوری بالاتر این مقدار در محدوده $2,64 \text{ Kwh/m}^3$ - $5,5 \text{ Kwh/m}^3$ تغییر می کند.

^۱ Seawater RO

^۲ Energy recovery(ER)

^۳ Brackish water RO(BWRO)

عوامل متعددی بر روی میزان انرژی مصرفی اثر می‌گذارند که از آن‌جمله می‌توان به ظرفیت واحد، نحوه طراحی واحد، مواد و تجهیزات و کیفیت جریان ورودی آب اشاره نمود که دارای اثرات قابل توجهی در میزان انرژی مصرفی فرایند هستند. اما در این میان، میزان مصرف انرژی در واحدهای تقطیری چندان تحت تأثیر غلظت نمک آب تغذیه نیست، اما در فرایندهای غشایی مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز غلظت نمک‌ها به شدت تأثیرگذار است. اگر میزان مصرف انرژی در فرایندهایی مانند MSF، MED و RO که در نمک‌زدایی از آب دریا بیشترین کاربرد را دارند مقایسه کنیم در می‌یابیم که فرایندهای تقطیری نسبت به RO نیاز به انرژی بیشتری دارند. نتیجه این بحث این است که میزان انرژی بالا برای تبخیر آب و پیشرفت رو به رشد تکنولوژی‌های غشایی مانند RO منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی می‌شود. انرژی الکتریکی مصرفی برای آب‌های لب شور حدود $2.5-1.5 \text{ Kwh/m}^3$ است و میزان مصرف انرژی برای فرایند الکترودیالیز $0.7-2.5 \text{ Kwh/m}^3$ برای میزان TDS کمتر از 2500 ppm است و برای میزان شوری بیشتر این مقدار بین $2.64-5.5 \text{ Kwh/m}^3$ متغیر است [۸]. در جدول ۱ مقادیر مصرفی انرژی به ازای هر مترمکعب نمک‌زدایی از آب به تفکیک روش‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه میزان مصرف انرژی در فرایندهای اصلی نمک‌زدایی

مشخصات	MSF	MED	MVC	TVC	SWRO	BWRO	ED
ظرفیت واحد (m^3/day)	۵۰۰۰-۷۰۰۰	۵۰۰۰-۱۵۰۰	۱۰۰-۳۰۰	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰	بیش از ۱۲۸۰۰۰	بیش از ۹۸۰۰۰	۲-۱۴۵۰۰۰
انرژی الکتریکی مصرفی (kwh/m^3)	۲/۵-۵	۲-۲/۵	۷-۱۲	۱/۶-۱/۸	۴-۶ باز یافت انرژی	۱/۵-۲/۵	۲/۶۴-۵/۵
انرژی گرمایی مصرفی (MJ/m^3)	۱۹۰-۲۸۲	۱۴۵-۲۳۰	-	۲۲۷	-	-	-
انرژی الکتریکی معادل انرژی گرمایی (kwh/m^3)	۱۵/۸۳-۲۳/۵	۱۲/۲-۱۹/۱	-	۱۴/۵	-	-	-
کل انرژی الکتریکی مصرفی (kwh/m^3)	۱۹/۵۸-۲۷/۲۵	۱۴/۴۵-۲۱/۳۵	۷-۱۲	۱۶/۲۶	۴-۶	۱/۵-۲/۵	۲/۶۴-۵/۵ در 2500 ppm پایین
کیفیت آب تولیدی	حدود ۱۰	حدود ۱۰	حدود ۱۰	حدود ۱۰	۴۰۰-۵۰۰	۲۰۰-۵۰۰	۱۵۰-۵۰۰

اصلی‌ترین عواملی که فرایند CDI را از عرصه رقابت با فرایندهای RO و روش‌های تقطیری باز می‌دارد، قابلیت اجرا در مقیاس‌های متفاوت، شوری، کارایی‌های الکتروود و مقرون به صرفه بودن است. واحدهای نمک‌زدایی اسمز معکوس عادی ظرفیت نمک‌زدایی 100000 مترمکعب در روز را دارند. با در نظر گرفتن حدود شوری و هزینه، مطالعات نشان می‌دهد که روش CDI نسبت به روش RO در شوری‌های پایین مقرون به صرفه‌تر است. علاوه بر این روش CDI در شوری‌های بالا و فقط اگر کاهش چشمگیر در هزینه‌های سرمایه‌گذاری وجود داشته باشد قابل رقابت با سایر روش‌هاست. مطالعات نشان می‌دهد برای محلول تغذیه با شوری 2000 ppm هزینه‌های روش RO برابر است با 0.35 دلار بر مترمکعب در حالی که برای روش CDI این مقدار 0.11 دلار در هر متر مکعب است. در فرایند نرم کردن آب روش CDI ثابت کرده است که توانایی حذف 0.85 از یون‌ها را دارد. میزان انرژی مصرفی روش MCDI، 1.96 Kwh/m^3 است. در تحقیقات بعمل آمده نشان داده شده است که در روش MCDI انرژی که برای باردار کردن خازن‌ها استفاده می‌شود قابل باز یافت است اما در روش CDI این میزان 62.1% است. میزان باز یافت انرژی در این سیستم‌ها به میزان باز یابی انرژی طی چرخه احیا بر می‌گردد [۹]. در جدول ۲ حدود تقریبی انرژی مورد نیاز برای تکنولوژی‌های مختلف نمک‌زدایی ارائه شده است.

جدول ۲. حدود تقریبی انرژی مورد نیاز برای تکنولوژی‌های مختلف نمک‌زدایی

فرایند نمک‌زدایی	میزان انرژی مورد نیاز (Kwh/m^3)
MSF	۱۰-۵۸
MED	۶-۵۸
RO	۲-۶
ED	۰,۴-۸/۷
CDI	۰,۱-۲/۰۳

۴. نتیجه گیری

رویکرد نمک‌زدایی به عنوان منبع تأمین آب در بسیاری از نقاط جهان همزمان با افزایش بحران آب، افزایش جمعیت، رشد صنعت و اقتصاد، در هر دو زمینه طراحی سیستم و عملکرد طی دهه‌های گذشته به صورت مداوم و به سرعت در حال رشد است. لذا این مسأله به صرفه‌جویی بسیار زیاد در مصرف برق و کاهش هزینه‌ها در فرایند تولید آب خالص منجر شده است. انتخاب یک فرایند نمک‌زدایی خاص بر مبنای عوامل مختلفی از جمله شرایط ویژه سایت، نوع و کیفیت آب ورودی، دسترسی به انرژی و میزان مصرف، اقتصاد و اثرات زیست محیطی استوار است. برای آب دریا میزان انرژی مصرفی و هزینه تولید آب برای فرایند RO کمتر از فرایندهای تقطیری است. این مسأله منجر به ارتقای فنی تولیدات غشایی، بهره‌وری بالا در تجهیزات بازیابی، بهره‌وری بالا در پمپ‌ها، کنترل بهتر در مقیاس‌بندی و بهبود فرایندها می‌شود. برای نمک‌زدایی آب‌های لب شور دو روش RO و ED اقتصادی هستند. فرایند RO به طور کلی زمانی که میزان TDS بیشتر از ۵۰۰۰ ppm است مقرون به صرفه است؛ در حالی که در غلظت TDS کمتر از ۵۰۰۰ ppm فرایند ED توجیه اقتصادی بیشتری دارد. همه فرایندهای نمک‌زدایی به نحوی دارای اثرات منفی بر محیط زیست هستند که نتیجه مصرف زیاد انرژی و دفع مواد زائد حاصل از فرایند نمک‌زدایی است. در نتیجه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی فرایندهای نمک‌زدایی می‌تواند این اثرات را کاهش دهد، اگرچه هزینه‌های جاری تولید آب سیستم‌های ترکیبی نمک‌زدایی که از منابع انرژی تجدیدپذیر تغذیه می‌کنند خیلی بیشتر از سیستم‌های معمولی نمک‌زدایی است. به هر حال این هزینه‌های بالا بواسطه فواید زیست محیطی جبران می‌شوند. سیستم‌های نمک‌زدایی به همراه منابع انرژی تجدیدپذیر به طور منحصر به فرد برای تأمین آب در مناطق دور افتاده مناسب هستند، مکان‌هایی که فاقد زیرساخت‌های آب و برق بوده و به دلیل موقعیت آب و هوای نیمه خشک، دارای اشعه‌ی خورشیدی و سرعت باد مناسب هستند. در نهایت، این نکته قابل توجه است که فرایندهای نمک‌زدایی بخشی از راه حل برای جبران بحران آب است و نباید از سایر راهکارها از جمله مدیریت آب، کاهش مصرف و استفاده‌ی مجدد از پساب غافل بود.

۵. مراجع

- [1] I. C. Karagiannis and P. G. Soldatos, "Water desalination cost literature: review and assessment," *Desalination*, vol. 223, pp. 448–456, 2008.
- [2] B. V. der B. and C. Vandecasteele., "Distillation vs. membrane filtration: Overview of process evolutions in seawater desalination," *Desalination*, vol. 143, no. 3, pp. 207–218, 2002.
- [3] M. M. Elabbar and F. A. Elmagbrouk, "Environmental impact assessment for desalination plants in Libya. Case study: Benghazi North and Tobrouk desalination plants," *Desalination*, vol. 185, no. 1–3, pp. 31–44, 2005.
- [4] M. Al-Sahali and H. Ettouney, "Developments in thermal desalination processes: Design, energy, and costing aspects," *Desalination*, vol. 214, no. 1–3, pp. 227–240, 2007.
- [5] N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, "Technical review and evaluation of the economics of



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران

دانشگاه تهران، تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



- water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability,” *Desalination*, vol. 309, no. 2013, pp. 197–207, Jan. 2013.
- [6] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, and A. Khaled, “Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies,” *Desalination*, vol. 266, no. 1–3, pp. 263–273, 2011.
- [7] M. a. Anderson, A. L. Cudero, and J. Palma, “Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?,” *Electrochim. Acta*, vol. 55, no. 12, pp. 3845–3856, Apr. 2010.
- [8] A. Al-Karaghoul and L. L. Kazmerski, “Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 343–356, 2013.
- [9] F. a. AlMarzooqi, A. a. Al Ghaferi, I. Saadat, and N. Hilal, “Application of Capacitive Deionisation in water desalination: A review,” *Desalination*, vol. 342, pp. 3–15, Jun. 2014.
- [10] M. D. Afonso, J. O. Jaber, and M. S. Mohsen, “Brackish groundwater treatment by reverse osmosis in Jordan,” *Desalination*, vol. 164, no. 2, pp. 157–171, 2004.