

کاربرد نانوفناوری در بهینه‌سازی سامانه‌های خورشیدی شیرین‌سازی آب: گامی به سوی توسعه پایدار برپایه انرژی‌های تجدیدپذیر

مجید میرزایی

استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

دریافت: خرداد ۱۴۰۴ بازنگری: مرداد ۱۴۰۴ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴



<https://doi.org/10.30495/JACR1.1404.1208492>

چکیده

این مقاله، به بررسی جامع نقش نانوفناوری در بهبود سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی آب برپایه انرژی‌های تجدیدپذیر، پرداخته است و بر ضرورت ادامه پژوهش‌ها برای دستیابی به فناوری‌های اقتصادی‌تر و پایدارتر تأکید می‌کند. شیرین‌سازی آب به‌عنوان راهکاری اساسی برای مقابله با بحران جهانی آب، در سال‌های اخیر، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. پیشرفت‌های فناورانه، به‌ویژه در حوزه نانوفناوری و انرژی‌های تجدیدپذیر، مسیر تازه‌ای را برای توسعه واحدهای شیرین‌سازی پایدار و کم‌هزینه آب فراهم کرده‌اند. استفاده از نانومواد و نانوسیال‌ها در سامانه‌های تقطیر و صافش موجب افزایش بازده کارایی، کاهش وابستگی به شرایط اقلیمی و ارتقای بازدهی فرایند شده است. از سوی دیگر، بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زمین‌گرمایی و زیست‌توده، جایگزینی مؤثری برای سوخت‌های فسیلی پرهزینه و آلاینده بشمار می‌رود. به‌طورویژه، نانوسیال‌ها نقش مهمی در بهینه‌سازی واحدهای تقطیر خورشیدی ایفا کرده‌اند و استفاده از نانوغشاهای طراحی‌شده با ساختارهای نانومتخلخل کارایی قابل‌قبولی در حذف املاح و تولید آب شیرین ارائه داده‌اند. با وجود دستاوردهای امیدوارکننده، چالش‌هایی مانند کاهش تدریجی کارایی غشاهای هزینه‌های اجرایی و مصرف انرژی همچنان وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: شیرین‌سازی خورشیدی، نانوفناوری، نانوذره‌ها، انرژی تجدیدپذیر، نانوسیال‌ها.

مقدمه

در دنیای امروز، منابع طبیعی به‌ویژه منابع آبی به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرهای اقلیمی قرار گرفته‌اند [۱]. آلودگی گسترده منابع آب، کاهش دسترسی به آب شیرین، و افزایش تقاضای ناشی از رشد جمعیت از چالش‌های جدی زیست‌محیطی بشمار می‌روند. در این میان، فرایند شیرین‌سازی آب به‌عنوان راهکاری حیاتی برای تأمین آب قابل مصرف، به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب، توجه جهانی را به خود جلب کرده است [۲]. با این حال، بیشتر فناوری‌های شیرین‌سازی فعلی همچنان به سوخت‌های فسیلی وابسته‌اند که منجر به افزایش قابل‌توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۳]. این موضوع، ضمن تشدید گرمایش زمین، پایداری زیست‌محیطی این فرایندها را با چالش مواجه کرده است [۴]. برای کاهش اثرهای زیست‌محیطی و ارتقاء بهره‌وری انرژی، استفاده از فناوری‌های نوین مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری نانو در فرایند شیرین‌سازی آب پیشنهاد شده است [۵]. در سال‌های اخیر، استفاده از انرژی‌های پاک مانند خورشید [۶ تا ۸] برای راه‌اندازی واحدهای شیرین‌سازی رشد چشمگیری داشته و بسیاری از کشورها برای توسعه این فناوری‌ها سرمایه‌گذاری کرده‌اند. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالای اولیه و محدودیت‌های فنی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانع بهره‌برداری گسترده از این فناوری‌ها شده است. در این میان، فناوری نانو افق‌های جدیدی را در بهینه‌سازی فرایندهای شیرین‌سازی گشوده است. توسعه نانوذره‌ها با ویژگی‌های گرمایی و فیزیکی خاص، زمینه‌ساز تولید نانوسیال‌هایی شده است که می‌توانند عملکرد سامانه‌های انتقال گرما را به‌طور چشم‌گیری بهبود دهند [۹]. این سیال‌ها، که از ترکیب ذره‌های نانومقیاس با مایع‌های پایه به‌دست می‌آیند، قابلیت ارتقاء نرخ انتقال گرما، کاهش ابعاد تجهیزات، و صرفه‌جویی در مصرف انرژی را دارند [۱۰]. نانوسیال‌ها به‌ویژه در واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی به‌کارگرفته شده‌اند تا نرخ تبخیر و میعان را افزایش داده و کارایی کلی فرایند را ارتقا

دهند. از سوی دیگر، گروه‌بندی دقیق فناوری‌های شیرین‌سازی برپایه نوع انتقال گرما و سازوکار جداسازی، مسیر پژوهش و توسعه را هدفمندتر کرده و امکان انتخاب مناسب‌ترین روش‌ها برای شرایط ویژه را فراهم آورده است. استفاده از نانوسیال‌ها به‌عنوان حاملان گرما در این فرایندها، به‌ویژه در شرایط با تابش پایین خورشیدی نیز نتیجه‌های نویدبخشی را نشان داده است. از دید شیمی، فرایندهای شیرین‌سازی آب با واکنش‌ها و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بسیاری همراه هستند که نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی و پایداری آن‌ها ایفا می‌کنند. برای مثال، در فرایندهای گرمایی، رفتار تعادلی ترکیب‌های یونی محلول، نقطه جوش محلول و تمایل به رسوب‌گذاری نمک‌ها مانند CaCO_3 و Mg(OH)_2 به‌شدت به شرایط شیمیایی محیط وابسته است. در روش‌هایی مانند اسمز معکوس، ساختار شیمیایی غشا و تعامل آن با یون‌ها، مولکول‌های آب و مواد آلی نقش کلیدی در انتخاب‌پذیری و بازده جداسازی دارد. همچنین، استفاده از نانوسیال‌ها نه تنها موجب بهبود انتقال گرما می‌شود، بلکه حضور نانوذره‌ها با ویژگی‌های سطحی خاص می‌تواند بر فرایندهای جذب، تخریب فتوکاتالیستی آلاینده‌ها، و حتی جلوگیری از رسوب‌های شیمیایی اثرگذار باشد. شناخت دقیق واکنش‌های شیمیایی بین اجزای سامانه، واپایش pH، کاهش پتانسیل خوردگی و مهار واکنش‌های ناخواسته از الزامات طراحی موفق سامانه‌های نوین شیرین‌سازی مبتنی بر فناوری نانو و انرژی تجدیدپذیر است.

با وجود پیشرفت‌های به‌دست‌آمده، تاکنون بررسی جامعی در خصوص تلفیق فناوری نانو، نانوسیال‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر در فرایندهای شیرین‌سازی منتشر نشده است. هدف، ارائه بینشی کاربردی برای طراحی نسل جدید واحدهای شیرین‌سازی با کارایی بهتر، مصرف انرژی کمتر، و سازگاری بیشتر با الزامات زیست‌محیطی است. اقدامی که در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار و تأمین آب سالم برای آینده‌ای پایدار ضروری است.

شیرین‌سازی

برای استفاده از آب دریا برای مصرف انسانی، ابتدا باید نمک‌ها و مواد معدنی آن حذف تا به آب شیرین تبدیل شود. این فرایند در قالب کارخانه‌های شیرین‌سازی عملیاتی شده است. از روش‌های متفاوتی برای تصفیه آب دریا استفاده می‌کنند. به‌طور کلی، سه روش اصلی برای شیرین‌سازی شامل روش‌های گرمایی، فشار/غشایی و شیمیایی است. در روش‌های گرمایی، فرایند برپایه تقطیر انجام می‌شود؛ آب تبخیر شده و سپس، بخار جمع‌آوری و میعان می‌شود، در حالی که نمک‌ها از آب جدا می‌شوند. روش غشایی از صافش بهره می‌گیرد که در آن آب با فشار از طریق غشاهای متخلخل عبور و نمک‌ها را صاف می‌کند. اسمز معکوس (RO^1) یکی از رایج‌ترین نمونه‌های این روش است. همچنین، روش‌های شیمیایی شامل واکنش‌های رسوب‌گذاری هستند که طی آن ذره‌های جامد و نمک‌ها ته‌نشین و از سامانه خارج می‌شوند. جامعه علمی به دنبال بهبود فناوری شیرین‌سازی است. برای مثال، غشاهای نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWNTs) با ترکیب کیتوسان یکی از نوآوری‌هایی است که برای ارتقای کارایی این فرایند مطرح شده است [۱۱].

رابطه نزدیکی میان انرژی و تأمین آب وجود دارد، زیرا تولید انرژی به آب نیاز دارد و تصفیه آب نیز به انرژی وابسته است. انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند نقش مهمی در ایجاد یک سامانه پایدار داشته باشند، زیرا آلودگی تولید نکرده و اثرهای منفی بر محیط‌زیست ندارند. اگرچه هزینه‌های اولیه این منابع ممکن است بالا باشد، ولی استفاده گسترده از آن‌ها می‌تواند با حفظ محیط‌زیست بازده اقتصادی مناسبی را فراهم کند. از فناوری‌های مرتبط با انرژی پاک، مبدل انرژی موجی برای تولید برق از امواج دریاست که بدون واسطه، به‌طور مستقیم کار می‌کند. همچنین، به استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین انرژی سامانه‌های تصفیه آب، توجه شده است.

با وجود تلاش‌های گسترده برای توسعه این فناوری‌ها، چالش اصلی در مسیر تجاری‌سازی، رقابت‌پذیری اقتصادی است. هرچند پیش‌بینی می‌شود که ساخت سامانه‌هایی در مقیاس صنعتی بزرگ بتواند هزینه‌ها را کاهش دهد. شکل ۱ مفهوم پایه‌ای شیرین‌سازی را توضیح می‌دهد. دو روش اصلی فرایندهای شیرین‌سازی شامل شیرین‌سازی گرمایی و غشایی هستند.

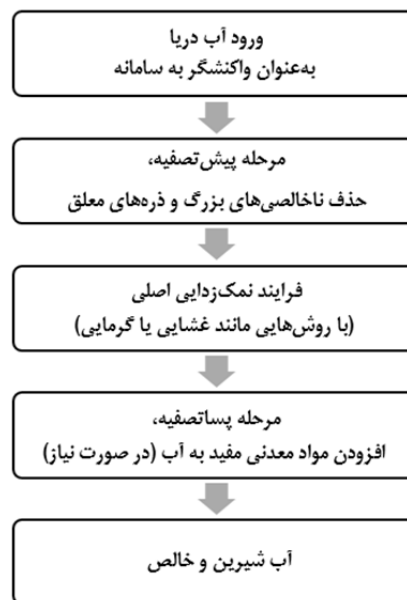
روش‌های غشایی به‌دلیل مصرف کمتر انرژی، ترجیح داده می‌شوند، ولی روش‌های گرمایی نیز با وجود مصرف بالای انرژی برای پژوهش‌های بزرگ مقیاس کارآمد محسوب می‌شوند. تقطیر چند مرحله‌ای (MSF^2) و تقطیر چند اثره (MED^3) از مهم‌ترین روش‌های گرمایی بشمار می‌روند. سایر روش‌های گرمایی شامل تقطیر خورشیدی (SD^4)، انجماد، تقطیر فشاری بخار و سامانه‌های رطوبت‌زدایی و رطوبت‌زایی (HDH^5) نیز وجود دارند.

روش‌های غشایی مانند اسمز معکوس و الکتروتراکافت (ED^6) نیز با بهره‌گیری از غشاهای نیم‌نفوذپذیر نمک‌ها را از آب جدا می‌کنند. افزون بر روش‌های گرمایی و غشایی، فناوری‌های رسوب‌گذاری همچون استخراج مایع-مایع (LLE^7)، هیدرات‌گازی ($G.Hyd^8$) و تبادل یونی ($I.Ex^9$) نیز به‌کارگرفته می‌شوند. این روش‌ها نشان‌دهنده تلاش مداوم برای بهبود کیفیت شیرین‌سازی و ارتباط متقابل آن با انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که هر دو به سمت ایجاد راه‌حل‌های سازگارتر با محیط‌زیست حرکت می‌کنند [۱۲]. شکل ۲ انواع روش‌های شیرین‌سازی را خلاصه کرده است.

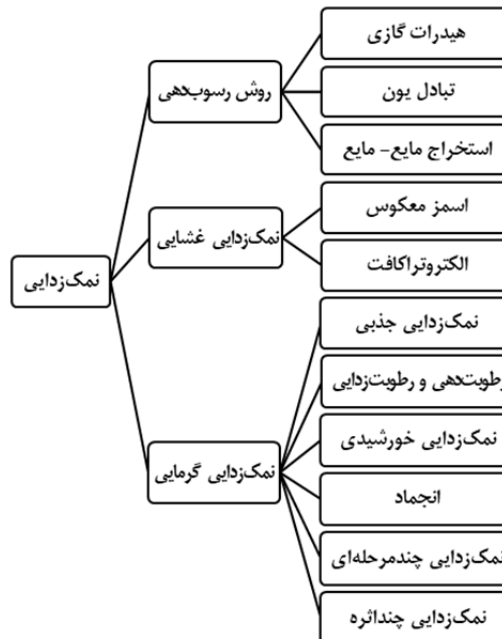
1. Reverse osmosis (RO)	2. Multi-stage flash distillation (MSF)	3. Multi-effect distillation (MED)
4. Solar distillation (SD)	5. Humidification–dehumidification (HDH) desalination	6. Electrodialysis (ED)
7. Liquid-liquid extraction (LLE)	8. Gas Hydrate (G.Hyd)	9. Ion exchange (I.Ex)

شیرین سازی غشایی

فرایند شیرین سازی آب با غشاها انجام و غشای سلولزی به عنوان گزینه ای آرمانی معرفی می شود، چرا که زیست تجزیه پذیر است و آسیب کمتری به محیط زیست وارد می کند. بررسی های متفاوتی با افزودنی های آلی و معدنی برای بهبود ویژگی های غشاها انجام شده است. برای مثال، در سال ۲۰۱۵، آزمایشی صورت گرفت که در آن سیلیکا (SiO_2) با اندازه ذره های متفاوت به محلول غشایی افزوده شد. این ترکیب شامل استات سلولز و پلی اتیلن گلیکول پایه با نسبت ۸۰ به ۲۰ بود. بهره گیری از سیلیکا موجب افزایش آب دوستی و بهبود توانایی دفع نمک غشا شد. اوج کارایی در دفع نمک زمانی مشاهده شد که ۵ درصد سیلیکا به مخلوط این دو ماده شیمیایی افزوده شد [۱۲]. در شهر بوسان کره جنوبی، که تغییرهای آب و هوایی شدید است، سامانه شیرین سازی غشایی چندمرحله ای با تماس مستقیم و انرژی خورشیدی نصب شد. این سامانه دارای گرم کن های خورشیدی و ماژول های دینامیکی وابسته به دمای ورودی خوراک بود که کارایی گرمایی و تولید آب شیرین را ارتقا داد. نتیجه ها نشان می دهد که کارایی گرمایی از ۳۵ درصد به ۴۵ درصد افزایش یافت و تولید آب شیرین بین ۳۵۰ تا ۵۵۰ مترمکعب ثبت شد [۱۳]. داده های مربوط به میزان تابش خورشیدی بین ماه های اکتبر و دسامبر گردآوری شد. فناوری جدید دیگری به نام شیرین سازی زیست تقلید^۱ نیز مطرح است که از علوم زیستی برای شیرین سازی آب بهره می گیرد. این فرایند شامل یک ساختار دو لایه دومحیط دوست^۲ با کانال های آب مصنوعی است که قابلیت بالا در صاف کردن نمک از آب شور دارد. غشاها ی زیست تقلید تا ۱۰۸ برابر کارایی انتخاب پذیری بالاتری در مقایسه با غشاها ی معمولی نشان می دهند. گرچه کارایی دفع مولکول های آب گریز آن ها ضعیف تر است، این غشاها برای شیرین سازی آب دریا مناسب هستند، ولی کارایی کمی در تصفیه مؤثر فاضلاب دارند. برای بهبود



شکل ۱ نمودار جریان مفهوم پایه ای شیرین سازی آب



شکل ۲ گروه بندی فرایندهای شیرین سازی

1. Biomimetics

2. Amphiphilic

دفع یون‌های ویژه نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کند. توسعه غشاهایی با پاسخ‌دهی شیمیایی تنظیم‌پذیر نسبت به pH یا دما، از جمله راهکارهای نوین برای بهینه‌سازی فرایندهای جداسازی در شرایط متغیر عملیاتی بشمار می‌رود. این رویکردها نشان می‌دهند که کنترل شیمی محیط پیرامونی غشا به اندازه طراحی فیزیکی آن، برای دستیابی به کارایی بالا و طول عمر بیشتر اهمیت دارد.

شیرین‌سازی با جذب

روش شیرین‌سازی با جذب به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های بهینه معرفی شده است که تنها به گرمای زائد به‌عنوان ورودی نیاز دارد. در این روش، گازهای خروجی صنایع و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند گرما موردنیاز را تأمین کنند که موجب کاهش مصرف برق و انرژی گرمایی می‌شود. این فناوری برای محیط‌زیست امن‌تر است، زیرا استفاده‌ای از مواد شیمیایی در آن صورت نمی‌گیرد و انتشار کربن دی‌اکسید در واحدهای برجذب (AD) بسیار ناچیز است. استفاده از انرژی زمین‌گرمایی برای نیروگاه‌های هم‌تولید (AD+MSF یا AD+MED) در کشورهای حاشیه خلیج فارس گزینه مطلوبی بشمار می‌رود، چرا که تولید هم‌زمان برق و آب را فراهم می‌کند [۱۶]. میترا و همکارانش [۱۷] در مطالعه‌ای، فرایند شیرین‌سازی با برجذب را با بهره‌گیری از جمع‌کننده‌های خورشیدی بررسی کردند. در این روش، با استفاده از پدیده تبخیر و میعان، انرژی بهینه‌سازی شد و سامانه‌ای مبتنی بر آب و ژل سیلیکا طراحی شد. این سامانه شامل چهار بستر در یک مرحله بود که شرایط بهینه آن با تغییر دما و زمان تعیین شد. به جای فشرده‌سازی مکانیکی از روش فشرده‌سازی گرمایی بهره گرفته شد که منجر به کاهش میزان انرژی ورودی شد. همچنین، از جمع‌کننده‌های غیرمتمرکز برای فراهم‌کردن گرما با درجه پایین استفاده شد. این فناوری امکان شیرین‌سازی و خنک‌سازی را هم‌زمان فراهم می‌کند و برای مناطق خشک مناسب است.

کارایی، غشاهای زیست‌تقلید ساخته‌شده از MoS_2 نشان‌دهنده نفوذپذیری بالاتر آب و افزایش توانایی دفع نمک هستند. پژوهشگرانی مانند اوپروه از مدل میدان نیروی واکنشی (ReaxFF^1) برای شبیه‌سازی رفتار این غشاها و تحلیل ویژگی ترمودینامیکی آن‌ها استفاده کرده‌اند [۱۴]. یافته‌ها بیانگر پتانسیل بالای غشاهای MoS_2 در کاربردهای صنعتی شیرین‌سازی هستند؛ این غشاها می‌توانند در ضخامت‌های متفاوت و در قالب لایه‌های تک یا چندگانه طراحی شوند. غشاها همچنین، در فرایند تقطیر آب دریا کاربرد دارند. این غشاها آب‌گریز هستند. ری^۲ مدلی نوآورانه را به‌صورت یک غشای سه‌لایه برای تقطیر غشایی پیشنهاد داد. لایه مرکزی از ماده اکتادسیل‌تری‌متوکسی‌سیلان^۳ ساخته و با لایه‌هایی از مواد آب‌دوست (در پایین) و آب‌گریز (در بالا) پوشیده شده بود. این طراحی موجب ایجاد ویژگی آب‌آب‌گریز و توانایی متمایز در دفع نمک شد [۱۵]. در فرایندهای شیرین‌سازی غشایی، نگرش شیمی نقشی پایه‌ای در طراحی و کارایی پایدار سامانه دارند. حضور یون‌های چندظرفیتی مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} در آب دریا، تمایل به ایجاد رسوب‌های معدنی بر سطح غشا دارند که منجر به پدیده پوسته‌بندی^۴ و کاهش بازده می‌شود. برای مقابله با این مشکل، بیشتر از مواد پادرسوب و تنظیم‌کننده‌های شیمیایی pH استفاده می‌شود که با تغییر شرایط اشباع و گونه‌بندی یونی، تشکیل رسوب را مهار می‌کنند. از سوی دیگر، ترکیب‌های آلی محلول مانند گیاجاکی^۵ یا فولویک اسیدها می‌توانند با سطح غشا برهم‌کنش کرده و جرم‌گرفتنی^۶ زیستی یا آلی را تسریع کنند. اصلاح شیمی سطح غشا با گروه‌های عاملی مانند گروه‌های کربوکسیلیک، آمینی یا سیلان‌ها، به کاهش چسبندگی این مواد کمک می‌کند. همچنین، ویژگی‌های الکتروشیمیایی سطح غشا مانند پتانسیل زتا، می‌تواند در جذب یا

1. Reactive force field model (ReaxFF)

2. Ray

3. Octadecyltrimethoxysilane (OTMS)

4. Scaling

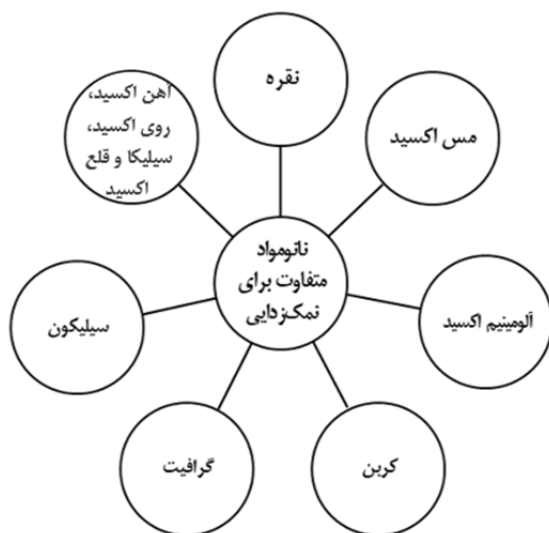
5. Humic

6. Fouling

کلی فرایند را تحت تأثیر قرار دهد. انتخاب جاذب مناسب نیز، باید با در نظر گرفتن مقاومت شیمیایی آن در برابر آلودگی‌های یونی یا آلی موجود در بخار آب همراه باشد، چرا که برخی از ناخالصی‌ها می‌توانند با برهم‌کنش‌های شیمیایی یا انسداد فیزیکی، کارایی جاذب را کاهش دهند. طراحی موفق سامانه‌های AD مستلزم آن است که نه تنها ویژگی‌های ترمودینامیکی سامانه، بلکه ویژگی‌های شیمی سطح و تعامل‌های مولکولی بین جاذب و بخار نیز با دقت ارزیابی شد.

نانوماده‌ها در واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی

استفاده از نانوذره‌های گوناگون می‌تواند ظرفیت ارتقاء کارایی واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی را برای تولید آب افزایش دهد. در شکل ۳، نانومواد استفاده‌شده در این واحدهای شیرین‌سازی به تصویر کشیده شده‌اند.



شکل ۳ نانوذره‌های متفاوت مورد استفاده در واحدهای تقطیر خورشیدی

کاربرد Al_2O_3 در شیرین‌سازی خورشیدی

از دیدگاه شیمی، کارایی نانوذره‌های آلومینا (Al_2O_3) در سامانه‌های تقطیر خورشیدی متأثر از ویژگی فیزیکوشیمیایی

یکی از چالش‌های این روش، افزایش دمای چگالنده بود که می‌توانست به تخریب سریع سامانه منجر شود. ژل سیلیکا به دلیل هزینه پایین و قابلیت بالای جاذب بخار آب، یکی از جاذب‌های مؤثر است که این ویژگی به سطح بزرگ و توزیع یکنواخت حفره‌های ریز آن نسبت داده می‌شود. تا^۱ و همکارانش [۱۸] در مطالعه‌های خود ویژگی ترموفیزیکی انواع ژل‌های سیلیکا را آزمایش کردند. آن‌ها سه نوع ژل سیلیکا موجود در بازار را انتخاب کردند. ژل سیلیکای نوع A^{++} ژاپنی به دلیل سطح جاذب بالاتر و حجم بیشتری از حفره‌ها به عنوان بهترین نمونه انتخاب شد. در سنگاپور، نسخه پیشرفته‌ای از سامانه‌های AD آزمایش شد که در آن تبخیرکننده و چگالنده درون یک واحد کپسولی قرار داده شدند تا ضمن انتقال گرما، اتلاف انرژی به کمینه مقدار برسد. بازیابی گرمایی مستقیم موجب افزایش دمای تبخیرکننده و فشار بخار جاذب شد که نتیجه آن افزایش سه برابری نرخ تولید آب بود [۱۹]. نوع دیگری از فناوری AD که از آب داغ با دمای پایین بهره می‌گیرد، سامانه برجذب چنداثره (MEAD)^۲ است. این فناوری با بیشینه بهره‌برداری از انرژی داخلی گرمایی، حتی در دماهای پایین، کارایی بالایی دارد. موفقیت این روش به دلیل نبود تخلیه مایع و امکان پردازش آب تغذیه با غلظت بالا بسیار چشمگیر بوده است [۲۰]. از دید شیمی، کارایی فرایند شیرین‌سازی از راه برجذب ارتباط تنگاتنگی با ویژگی‌های سطحی، ساختار مولکولی و ویژگی شیمیایی جاذب‌ها دارد. ژل‌های سیلیکا، به دلیل برخورداری از ساختار آریخت، مساحت سطح بالا، و شبکه‌ای از حفره‌های نانومتری، قادرند مولکول‌های آب را از طریق پیوندهای هیدروژنی و جاذب فیزیکی سطحی در خود جای دهند. ترکیب شیمیایی این جاذب‌ها، به‌ویژه نسبت $Si-OH$ به $Si-O-Si$ ، نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت جاذب و پایداری گرمایی آن‌ها دارد. در شرایط کارکردی، تغییر دما و فشار بخار می‌تواند تعادل جاذب-واجذب را به‌صورت دینامیکی تغییر دهد و در نتیجه بازده

1. Thu

2. Multi-effect adsorption desalination (MEAD)

آن‌ها از جمله ساختار بلوری، گروه‌های سطحی و رفتار ترمودینامیکی در محیط آبی است. نانوذره‌های آلومینا به دلیل رسانندگی گرمایی بالا و پایداری شیمیایی، انتقال انرژی گرمایی را در نانوسیال‌ها تسریع می‌کنند. در مجاور تابش خورشیدی، افزایش دمای موضعی اطراف ذره‌ها به دلیل جذب فوتون‌ها، منجر به افزایش نرخ تبخیر آب می‌شود. از دید واکنش‌پذیری شیمیایی، سطح نانوذره‌های آلومینا دارای گروه‌های هیدروکسیل (OH-) است که می‌توانند با مولکول‌های آب پیوند هیدروژنی برقرار کرده و نرخ برجذب را افزایش دهند. این برهم‌کنش‌ها به توزیع یکنواخت انرژی گرمایی در سیال کمک کرده و موجب بهبود بازده تبخیر می‌شوند. افزون‌براین، استفاده ترکیبی از Al_2O_3 با مواد تغییر فاز (PCM^۱) موجب بهبود ذخیره گرمایی نهان سامانه می‌شود و با تنظیم شیو^۲ گرمایی، پایداری ترمودینامیکی در فرایند تبخیر و میعان را افزایش می‌دهد. همچنین، افزودن نانوذره‌های آلومینا به رنگ‌های جاذب خورشید، با بهبود جذب طیف مرئی و فروسرخ، بازده نورگرمایی سامانه را ارتقا داده و واکنش‌های سطحی در فصل مشترک جامد-مایع را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نکته‌ها نشان می‌دهند که کاربرد نانوذره‌های Al_2O_3 در شیرین‌سازی خورشیدی، نه تنها از دید گرمایی بلکه با توجه به رفتار شیمیایی و میان‌سطحی آن‌ها قابل تحلیل و بهینه‌سازی است. کابیل و همکارانش [۲۱] مطالعه‌ای برای ارزیابی تأثیر نانوسیال‌های آلومینا-آب بر کارایی واحد تقطیر خورشیدی با شیب واحد انجام دادند که در حضور و عدم حضور یک چگالنده خارجی بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که با وجود چگالنده خارجی، نانوسیال نرخ تولید آب را به ۱۱۶ درصد افزایش می‌دهد، در حالی که بدون چگالنده خارجی، این نرخ به ۷۶ درصد ارتقا پیدا کرد. در پژوهش دیگری، مورالیدهاران^۳ و همکارانش [۲۲] با افزودن لنز کانونی فرنسل، لوله تخلیه و مبدل گرمایی، کارایی انتقال گرما در یک سامانه تقطیر خورشیدی را بهبود بخشیدند و ۰/۱ درصد

آلومینا را به ترمینول-۵۵ افزوده کردند. به‌طور مشابه، کارتیکین^۴ و همکارانش [۲۳] به بررسی کارایی طراحی سامانه‌های تقطیر با مواد جاذب متفاوت پرداختند و از یک توپ شیشه‌ای به‌عنوان ماده جاذب بهره بردند. آن‌ها دریافتند که نانوذره‌های آلومینا بالاترین مقدار تولید را در مقایسه با سایر مواد جاذب داشتند. استفاده از سنگ‌ریزه‌ها و نانوذره‌های آلومینا در مقایسه با دیگر مواد جاذب، تولید آب را افزایش داد. پژوهش‌های یادشده [۲۱ تا ۲۳] نشان می‌دهند که نانوذره‌های آلومینا قابلیت قابل‌توجهی برای افزایش کارایی واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی دارند و می‌توانند به طراحی و توسعه واحدهای تقطیر خورشیدی به‌طور موثرتری کمک کنند و به مقابله با کمبود آب جهانی یاری رسانند. در یک مطالعه، افزوده شدن نانوسیال‌های آلومینا-آب نرخ تولید آب را به‌ترتیب به ۷۶ درصد و ۱۱۶ درصد با و بدون چگالنده خارجی افزایش داده است. مطالعه دیگری تأثیر آلومینا به‌عنوان ماده جاذب را بررسی کرده و نشان داده است که این ماده بالاترین مقدار تولید دارد. گنجاندن نانوذره‌های آلومینا در حلقه مبدل گرمایی نیز موجب‌شده است نرخ تولید آب در حدود ۵/۳ برابر بیشتر از واحدهای تقطیر سنتی شود. افزون‌براین، استفاده از نانوذره‌های آلومینا و مواد تغییر فاز در واحدهای شیرین‌سازی نیز مطالعه شده است. در یکی از این مطالعه‌ها، افزودن این مواد کارایی تولید آب را برای مواد جاذب FWCW و CW به‌ترتیب ۵۶/۷ و ۷۹/۳ درصد افزایش داده است [۲۴]. همچنین، پژوهشی دیگر نشان داده است که گنجاندن نانوذره‌های آلومینا در رنگ سیاه و مایع پایه یک واحد تقطیر خورشیدی می‌تواند دما و نرخ تبخیر آب را افزایش دهد [۲۵].

کاربرد نانوماده‌های کربنی در شیرین‌سازی خورشیدی

از منظر شیمیایی، نانولوله‌های کربنی به دلیل ساختار آروماتیک و پیوندهای π مزدوج، دارای رسانندگی گرمایی و پایداری شیمیایی بسیار بالایی هستند که آن‌ها را به انتخابی

1. Phase change material (PCM)

2. Gradient

3. Muraleedharan,

4. Karthikeyan

نانوسیال‌های حاوی ۰/۱۲، ۰/۰۸ و ۰/۰۴ درصد نانوماده، با استفاده از یک مدل گرمایی پیشنهادی، می‌توان به بیشینه کارایی در واحد شیرین‌سازی خورشیدی دست یافت؛ به ویژه، مشاهده شد که تولید آب به مقدار ۱/۵۲ تا ۱/۵۸ درصد افزایش پیدا کرد.

کاربرد نانوذره‌های CuO در شیرین‌سازی خورشیدی

نانوذره‌های CuO به دلیل رسانندگی گرمایی بالا، ظرفیت گرمایی مناسب و توانایی جذب مؤثر تابش خورشیدی، یکی از گزینه‌های مناسب برای افزایش بازده سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی به حساب می‌آیند. این نانوذره‌ها در نانوسیال‌ها موجب بهبود چشمگیر انتقال گرما به آب می‌شوند و دمای لایه سطحی را در تبخیرکننده افزایش می‌دهند که منجر به تسریع فرایند تبخیر می‌شود. از سوی دیگر، پایداری شیمیایی بالا و توزیع یکنواخت این نانوذره‌ها در محلول، مانع از رسوب‌گذاری یا بسته‌شدن مسیر جریان می‌شود. همچنین، ویژگی جذب طیف گسترده‌ای از طول موج‌های نور خورشید با CuO موجب بهبود فرایند نور گرمایی می‌شود. از دیدگاه ترمودینامیکی، حضور نانوذره‌ها موجب کاهش مقاومت گرمایی در مرز بین سیال و سطح جاذب می‌شود و بازده گرمایی سامانه را افزایش می‌دهد. بنابراین، هم ویژگی گرمایی و هم رفتار سطحی نانوذره‌های CuO نقش کلیدی در ارتقای کارایی سامانه‌های تقطیر خورشیدی دارند. ادغام نانوسیال‌ها به شکل گسترده‌ای برای ارتقای کارایی واحدهای تقطیر خورشیدی بررسی شد. در این راستا، تیواری^۶ [۲۹] اثر نانوسیال‌ها بر کارایی واحدهای تقطیر خورشیدی دو شیب را مطالعه کردند و نشان دادند که به‌کارگیری نانوسیال Al₂O₃-آب حاوی ۰/۲۵ درصد نانوذره‌ها، حدود ۸۶ لیتر آب تولید کرد. در پژوهشی دیگر، نظری و همکارانش [۳۰] تأثیر نانوسیال CuO-آب را بر دمای آب و آب خنک‌کننده در واحد تقطیر خورشیدی بررسی کردند. بحیرایی^۷ و همکارانش [۳۱] نیز از یک مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی

مطلوب برای بهبود انتقال گرما در نانوسیال‌ها بدل کرده است. سطح ویژه بالای این نانومواد، به افزایش نرخ تبادل انرژی در سطح نانومقیاس کمک می‌کند و این موضوع در واکنش‌های گرمایی و جذب انرژی تابشی در واحدهای خورشیدی مؤثر است. همچنین، برهم‌کنش‌های واندروالسی میان نانولوله‌ها و مولکول‌های آب می‌تواند به افزایش فعالیت سطحی و تغییر ویژگی‌های ترمودینامیکی آب در ناحیه تبخیر منجر شود. این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، نانومواد کربنی را قادر می‌سازند تا در سامانه‌های نور گرمایی با نقش دوگانه بهبود جذب تابش و تسهیل تبخیر آب عمل کنند، که از دیدگاه شیمی فیزیکی، نشان‌دهنده تأثیر ترکیب ساختاری و الکترونی آن‌ها در بهینه‌سازی فرایندهای انتقال جرم و گرماست. کارایی واحدهای فتوولتائیک/گرمایی با استفاده از نانوذره‌های نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و چنددیواره (SWCNT و MWCNT) در آب توسط آرورا^۱ بررسی شد [۲۶]. دماهای اجزای متفاوت، عدد نوسلت و ضریب انتقال گرما در واحد تقطیر خورشیدی اصلاح‌شده حاوی ۱ درصد نانوذره‌ها نیز، بررسی شد. یک سامانه گرمایی خورشیدی ترکیبی (PV/T-CPC) برای گرم کردن آب با کمک یک مبدل گرمایی لوله‌ای حلزونی به‌کارگرفته شد. این واحد شیرین‌سازی خورشیدی افزایش تولید آب را نشان داد. شرشیر^۲ و همکارانش [۲۷] با استفاده از تابش طول موج بلند (LW) و نانوذره‌های بور نیتريد مکعبی (CBN^۴)، تولید آب در یک تقطیر خورشیدی دو مرحله‌ای را افزایش دادند. آن‌ها دریافتند که تولید آب شیرین در واحد شیرین‌سازی خورشید در دو مرحله، به‌ترتیب حدود ۵/۱۱۰ درصد و ۵۷/۸۰ درصد افزایش یافت. همچنین، ساهوتا^۵ و همکارانش [۲۸] نانوسیال‌های Al₂O₃-آب و نانولوله‌های کربنی چنددیواره-آب را برای بررسی اثرهای ترموفیزیکی آن‌ها در یک سامانه شیرین‌سازی خورشیدی سنتی با دو شیب مطالعه کردند. نتیجه‌ها حاکی از این بود که با

1. Arora

2. Sharshir

3. Long wavelength

4. Cubic boron nitride

5. Sahota

6. Tiwari

7. Bahiraei

افزایش می‌دهند و از تجمع و رسوب جلوگیری می‌کنند. این واکنش‌های سطحی منجر به بهبود همگنی گرمایی و انتقال موثر گرما در سراسر سامانه می‌شود که افزایش نرخ تبخیر و تولید آب شیرین را به دنبال دارد. بنابراین، تحلیل شیمیایی ساختار و سطح نانوذره‌ها و ارتباط آن‌ها با ویژگی گرمایی و ترمودینامیکی مواد تغییر فاز برای طراحی بهینه واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی بسیار حیاتی است. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به بررسی نقش نانوذره‌ها و مواد تغییر فاز در افزایش کارایی و تولید واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی پرداخته‌اند. در مطالعه‌ای [۳۶] تأثیر نانوذره‌های گرافیت ورقه‌ای، عمق آب، خنک‌سازی فیلم آب و نانومواد تغییر فاز بر نرخ تولید آب در یک سامانه شیرین‌سازی خورشیدی با طراحی شیب‌دار بررسی شد. نتیجه‌های پژوهش نشان داد که استفاده از نانوذره‌های گرافیت و نانوذره‌های مس اکسید به ترتیب موجب ۴۱/۱۸ و ۳۲/۳۵ درصد افزایش در تولید آب نسبت به روش‌های متعارف می‌شود. در پژوهشی دیگر [۳۷] کارایی سه نوع متفاوت از واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی شامل واحد تقطیر خورشیدی ساده، سامانه‌های مجهز به PCM و سامانه‌هایی با نانوذره‌های گرافن اکسید، مقایسه شدند. نتیجه‌ها نشان داد که سامانه‌های دارای PCM و یا گرافن اکسید به ترتیب ۲۹/۳ و ۲۱۶/۹ برابر بیشتر از سامانه‌های متعارف تولید داشتند. افزون‌براین، بررسی دیگری نشان داد که افزایش درصد نانوذره‌های TiO_2 ، CuO و GO به PCM از ۰/۳ درصد به ۰/۵ درصد، تولید آب در سامانه شیرین‌سازی خورشیدی را به طور چشمگیری افزایش داد [۳۸]. در این پژوهش، دیواره‌های سامانه با موم پارافین از هر دو طرف عایق شده بود و تولید روزانه آب در واحدهای تقطیر خورشیدی با نانوسیال‌های TiO_2 ، CuO و GO بین ۳/۶۶ تا ۵/۲۸ لیتر بر مترمربع محاسبه شد. در مطالعه‌ای دیگر [۳۹] نیز کارایی یک واحد تقطیر خورشیدی لوله‌ای که از ترکیب PCM و نانوذره‌های گرافن بهره می‌برد با یک سامانه تقطیر خورشیدی متعارف مقایسه شد. موم، به عنوان ماده تغییر فاز، در حوضچه‌های دستگاه به کار گرفته شد. برپایه

مقدار تولید آب استفاده کردند. عبدالله [۳۲] با کاهش عمق آب و افزایش دمای آن در واحد تقطیر، موفق به افزایش تولید آب شد. همچنین عبدالله و همکارانش [۳۳] گزارش دادند که با اعمال این تغییرها و استفاده از بازتابنده و PCM، تولید آب در سینی‌های آب موجود در واحد شیرین‌سازی خورشیدی آن‌ها نسبت به حالت مرجع به ترتیب ۵۷/۱۴، ۷۰/۷ و ۱۰۸ درصد افزایش داشت. آران‌کومار^۱ و همکارانش [۳۴] تأثیر استفاده از سنگ‌ریزه‌ها و اسفنج‌ها را در یک واحد تقطیر خورشیدی با طراحی شیب واحد بررسی و مشاهده کردند که افزودن نانوذره‌های CuO موجب افزایش تولید آب شیرین می‌شود. همین‌طور بهورا^۲ [۳۵] اثر غلظت‌های متنوع نانوذره‌های CuO را بر کارایی یک واحد شیرین‌سازی خورشیدی با شیب واحد برای تقطیر مخلوطی بی‌رنگ (موم) مطالعه کردند و دریافتند که افزایش غلظت این نانوذره‌ها تأثیر چشمگیری بر افزایش تولید آب دارد. در مجموع، نتیجه‌های مطالعه‌ها نشان داده است که افزودن نانوسیال‌ها و نانوذره‌ها به دستگاه‌های تقطیر خورشیدی، به‌طور چشمگیری بازده تولید آب را بهبود می‌بخشد.

کاربرد نانوماده/گرافیت در شیرین‌سازی خورشیدی

از نظر شیمیایی، نانوماده‌های گرافیت ورقه‌ای (FGN) و گرافن اکسید (GO) به دلیل ساختار لایه‌ای و گروه‌های عاملی سطحی مانند هیدروکسیل، کربونیل و اپوکسید، ویژگی‌های جذب آب و تعامل با مولکول‌های سیال را بهبود می‌بخشند. این گروه‌های عاملی قادرند با ایجاد پیوندهای هیدروژنی، تبادل انرژی میان نانوذره‌ها و مولکول‌های آب را تسهیل کنند که موجب افزایش رسانندگی گرمایی نانوسیال‌ها می‌شود. همچنین، ترکیب این نانوذره‌ها با مواد تغییر فاز که خود ظرفیت گرمایی بالایی دارند، موجب ذخیره و آزادسازی تدریجی انرژی گرمایی می‌شود و در نتیجه، تعادل گرمایی سامانه در طول شبانه‌روز حفظ می‌شود. برهم‌کنش‌های شیمیایی بین نانوذره‌ها و مواد تغییر فاز با پیوندهای فیزیکی و شیمیایی، پایداری نانوسیال‌ها را

عامل کلیدی در حفظ کارایی طولانی مدت سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی است. این ویژگی‌ها در مجموع موجب افزایش بازده گرمایی، بهبود انتقال جرم و دوام عملیاتی سامانه‌های تقطیر خورشیدی می‌شوند. نانوفناوری راهکارهای امیدوارکننده‌ای برای ارتقای کارایی و تولید واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی ارائه کرده است. در این زمینه، پژوهشگران تأثیر نانوذره‌ها و نانوسیال‌های متفاوت را بر کارایی این واحدها بررسی کرده‌اند. الانگو^۲ و همکارانش [۴۰]، تأثیر نانوذره‌های Al_2O_3 ، ZnO و SnO_2 را در واحد تقطیر خورشیدی ارزیابی کردند. نتیجه‌ها نشان داد افزودن این نانوذره‌ها توانسته است به‌طور چشمگیری مقدار تولید آب را افزایش دهد. همچنین، چن^۳ و همکاران [۴۱] رسانندگی گرمایی تقطیر خورشیدی را با بهره‌گیری از نانوذره‌های SiC بررسی کردند که برپایه یافته‌های آن‌ها، افزودن نانوسیال SiC موجب بهبود ۵/۲ درصد در رسانندگی گرمایی شد. در پژوهشی دیگر [۴۲]، تأثیر فرایند سنتز آب‌گرمایی بر نانوذره‌های ZnO تولیدشده برای کاربرد در شیرین‌سازی خورشیدی مطالعه شد. نتیجه‌ها نشان داد که استفاده از این نانوذره‌ها می‌تواند بهره‌وری گرمایی و تولید آب را به‌ترتیب ۳۸ درصد و ۳۰ درصد افزایش دهد. بالاچندران^۴ و همکارانش [۴۳] نیز به آزمایش پوشش‌دهی سطح حوضچه با استفاده از میکرو و نانوذره‌های Fe_2O_3 پرداختند تا کارایی واحد تقطیر خورشیدی با شیب واحد را بهبود بخشند. بررسی‌ها نشان داد جاذب پوشش‌دهی‌شده با نانوذره‌های Fe_2O_3 توانسته است تولید آب را تا ۳۵/۹ درصد نسبت به جاذب پوشش‌دهی‌شده با میکروذره‌ها افزایش دهد. به‌طورکلی، این پژوهش‌ها به‌روشنی نشان داده‌اند که استفاده از نانوذره‌ها و نانوسیال‌هایی مانند Al_2O_3 ، ZnO ، SnO_2 ، SiC و Fe_2O_3 می‌تواند کارایی واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی را در جنبه‌هایی مانند تولید آب، رسانندگی گرمایی و کارایی کلی تقویت کند. این یافته‌ها زمینه‌ساز توسعه واحدهای تقطیر

نتیجه‌ها، تولید واحدهای خورشیدی ترکیبی با استفاده از نانوذره‌ها در PCM، نسبت به سامانه‌های متداول، از ۳۹/۵ درصد به ۸۳/۷ درصد رسید. در مجموع، استفاده از نانوذره‌هایی مانند CuO ، TiO_2 و FGN به‌همراه PCM در واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی، قابلیت بالایی برای بهبود کارایی و افزایش تولید آب دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که این فناوری‌ها می‌توانند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای بهره‌وری سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی در مناطق دچار کمبود آب به‌کارگرفته شوند.

کاربرد نانوذره‌های ZnO ، Fe_2O_3 ، SiO_2 ، SiC و SnO_2 در شیرین‌سازی خورشیدی

از دید شیمی، ویژگی‌های ساختاری و ترکیب سطحی نانوذره‌های ZnO ، Fe_2O_3 ، SiO_2 ، SiC و SnO_2 نقش مهمی در بهبود کارایی واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی ایفا می‌کنند. برای مثال، ZnO به‌دلیل داشتن ساختاری با کاف نوار پهن^۱ و ویژگی فوتوکاتالیستی خود می‌تواند جذب نور خورشید را افزایش دهد و انتقال انرژی فوتونی به گرما را تسهیل کند. Fe_2O_3 با ساختار بلوری هماتیت و ظرفیت بالای جذب طیف مرئی، افزون بر بهبود جذب انرژی، موجب افزایش ثبات گرمایی پوشش‌های جاذب می‌شود. نانوذره‌های SiO_2 به‌عنوان مواد پایدار و دارای سطح پر از گروه‌های هیدروکسیل ($-\text{OH}$)، موجب افزایش آب‌دوستی و کنترل جذب بخار آب در سطح می‌شوند. SiC نیز به‌دلیل مقاومت بالا در برابر گرما و رسانندگی گرمایی برجسته، انتقال انرژی گرمایی را بهبود می‌بخشد. SnO_2 با ساختار بلوری روتایل، به‌دلیل قابلیت جذب طیف وسیع نوری و مقاومت شیمیایی بالا، به افزایش بازده نورگرمایی کمک می‌کند. تعامل‌های شیمیایی بین سطح نانوذره‌ها و مولکول‌های آب، با پیوندهای هیدروژنی و جذب فیزیکی، موجب بهبود انتقال گرما و تبخیر در محیط‌های نانوسیالی می‌شود. همچنین، ثبات شیمیایی و مقاومت این نانوذره‌ها در برابر اکسایش و تجمع،

خورشیدی کم‌هزینه‌تر و کارآمدتر بوده که می‌تواند گامی مهم برای حل بحران جهانی آب برداشته شود [۴۳ و ۴۴].

کاربرد نانوذره‌های سیلیکون در شیرین‌سازی خورشیدی

از دیدگاه شیمیایی، نانوذره‌های سیلیکون با ساختار نیمه‌کروی و سطح غنی از گروه‌های سیلانول (Si-OH) دارای ویژگی برجسته‌ای برای تغییر رفتار ترشوندگی و جذب آب بر سطوح شیشه‌ای هستند. این گروه‌های عاملی موجب ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب می‌شوند و ویژگی آب‌دوستی سطح را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. افزایش آب‌دوستی موجب کاهش زاویه تماس قطره‌های آب و تسهیل جریان آب و افزایش سرعت تخلیه و بازیابی سطح تبخیر می‌شود. افزون‌براین، پوشش‌های نانوسیلیکونی با ضخامت نانومتری، ضمن حفظ شفافیت نوری، می‌توانند انتقال نور خورشیدی را بهینه کنند و از جذب گرمایی مطلوبی برخوردار باشند. این عامل‌ها موجب می‌شوند پوشش‌های نانوسیلیکونی کارایی گرمایی بهتری در واحدهای تقطیر خورشیدی ارائه دهند و فرایند تبخیر را به‌طور مؤثری تسریع کنند. همچنین، پایداری شیمیایی بالای سیلیکون در برابر اکسایش و شرایط محیطی، دوام طولانی مدت این پوشش‌ها را تضمین می‌کند. در مجموع، ویژگی سطحی و ساختاری نانوذره‌های سیلیکون نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی ایفا می‌کنند و می‌توانند به‌عنوان یک فناوری موثر برای ارتقای کارایی و پایداری این سامانه‌ها به‌کار گرفته شوند. زنگنه و همکارانش [۴۵] تأثیر استفاده از پوشش نانوسیلیکون را بر کارایی یک سامانه تقطیر خورشیدی با شیب واحد بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که به‌کارگیری پوشش شیشه‌ای با نانوذره‌های سیلیکون، تولید را حدود $20/3\%$ درصد نسبت به شرایط بدون پوشش افزایش داد. همچنین، آزمایش‌های دیگری توسط زنگنه و همکارانش [۴۶] انجام شد که در آن تأثیر نانوذره‌های تیتانیوم دی‌اکسید و سیلیکون بر سطح پوشش شیشه‌ای ارزیابی شد. در این پژوهش، مشخص شد نانوذره‌های معلق بر سطح میعان تا درجه‌های متفاوتی مرطوب می‌شوند.

نتیجه‌های مقایسه‌ای نشان دادند که سامانه‌های دارای پوشش نانوسیلیکون توانسته‌اند حدود 20% درصد آب بیشتری نسبت به سامانه‌های بدون پوشش تولید کنند. در پژوهش دیگری، راهبرد استفاده از نانوپوشش برای افزایش مقدار تولید آب از راه تغییر ویژگی ترشوندگی سطح شیشه‌ای مطالعه شد [۴۷]. در این پژوهش، محلولی از نانوسیلیکون برای سطح میعان استفاده شد و آب تولیدی از واحد تقطیر خورشیدی در یک مخزن مجهز به دستگاه گرمایش الکتریکی و مبدل گرمایی، گرم شد. یافته‌ها نشان دادند که محلول نانوسیلیکون توانسته است تولید آب شیرین را در زاویه شیشه 50° درجه تا 23% درصد افزایش دهد. به‌طور کلی، گنجاندن نانوذره‌ها در واحدهای تقطیر خورشیدی تأثیر مثبت خود را در بهبود کارایی و افزایش تولید نشان دادند. چنین یافته‌هایی نمایانگر قابلیت‌های بالای فناوری نانو در توسعه سامانه‌های تقطیر خورشیدی کارآمد و پایدار هستند.

کاربرد نانومواد نقره در شیرین‌سازی خورشیدی

از نظر شیمیایی، نانوذره‌های نقره به‌دلیل اندازه بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، ویژگی بی‌همتایی در انتقال گرما و جذب نور از خود نشان می‌دهند. این ذره‌های فلزی با قابلیت پلاسمون سطحی قوی (LSPR) قادرند طیف گسترده‌ای از نور خورشیدی را جذب و به گرما تبدیل کنند که موجب افزایش دمای نانوسیال و بهبود فرایند تبخیر می‌شود. همچنین، سطح فعال و واکنش‌پذیر نانوذره‌های نقره، به بهبود انتقال گرما با کاهش مقاومت گرمایی بین فازهای مایع و جامد کمک می‌کند. ویژگی پادمیکروبی طبیعی نانوذره‌های نقره نیز موجب جلوگیری از رشد باکتری‌ها و تشکیل رسوبات زیستی در سامانه‌های شیرین‌سازی می‌شود و طول عمر تجهیزات را افزایش می‌دهد. افزون‌براین، پراکندگی یکنواخت نانوذره‌ها در مایع پایه موجب حفظ پایداری گرمایی و جلوگیری از تجمع ذره‌ها می‌شود. این ویژگی‌ها به‌طور هم‌زمان موجب افزایش بازده انرژی و تولید آب شیرین در واحدهای تقطیر خورشیدی

حضور گروه‌های هیدروکسیل، موجب جذب و تثبیت مولکول‌های آب بر سطح پوشش می‌شود که فرایند تبخیر را تسریع می‌کند. افزون‌براین، ویژگی خودتمیزشوندگی TiO_2 با تخریب ترکیب‌های آلی و جلوگیری از تجمع رسوب‌ها، عمر مفید پوشش‌های تقطیر خورشیدی را افزایش می‌دهد. ساختار نانومتری و پراکندگی یکنواخت TiO_2 موجب افزایش مساحت سطح مؤثر و بهبود انتقال گرما در لایه‌های پوششی می‌شود. همچنین، ترکیب TiO_2 با سایر اکسیدها مانند Cr_2O_3 می‌تواند اثر هم‌افزایی داشته و ویژگی گرمایی و مکانیکی پوشش را ارتقاء دهد. این ویژگی‌ها در مجموع موجب بهبود بازده گرمایی واحدهای تقطیر خورشیدی و افزایش تولید آب شیرین می‌شوند. استفاده از نانوذره‌های TiO_2 در طراحی پوشش‌های گرمایی، گامی مهم برای توسعه فناوری‌های پایدار و با بازدهی بالا برای شیرین‌سازی خورشیدی بشمار می‌آید. شانموگان^۲ و همکارانش [۵۰] لایه داخلی حوضچه را با ترکیبی از نانوذره‌های TiO_2 و Cr_2O_3 پوشش دادند تا کارایی واحدهای تقطیر خورشیدی را ارزیابی کنند. نتیجه‌ها نشان داد که واحد شیرین‌سازی خورشیدی توانسته است در تابستان به‌طور روزانه ۷/۸۹ لیتر و در زمستان ۵/۳۹ لیتر آب تولید کند. ساهوتا^۳ و همکارانش [۵۱] نیز مطالعه‌ای تجربی انجام دادند و از ترکیب روش‌های گرمایی و فتوولتائیک خورشیدی برای بهبود کارایی واحدهای تقطیر خورشیدی استفاده کردند. مساحت واحد آن‌ها ۲ مترمربع بود و هر دو روش به افزایش تولید آب در این سامانه‌ها کمک کردند. همچنین، کبیل [۵۲] در پژوهشی اولیه یک واحد تقطیر خورشیدی با طراحی هرم شکل را که با رنگ سیاه و نانوذره‌های TiO_2 پوشش داده شده بود برای بهبود انتقال گرما بررسی کردند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که افزودن نانوذره‌های TiO_2 به پوشش رنگ سیاه، مقدار تولید آب را تا ۶/۱ درصد افزایش داد. این مطالعه‌ها تأیید می‌کند که بهره‌گیری از نانوذره‌ها در طراحی

مجهز به نانوسیال نقره می‌شوند و قابلیت بالایی برای کاربرد در فناوری‌های پایدار و کم‌هزینه شیرین‌سازی آب دارند. پارسا و همکارانش در مطالعه‌ای [۴۸] به بررسی کارایی سه طراحی متفاوت از واحدهای تقطیر خورشیدی پرداختند. در طرح اول، از نانوسیال نقره-آب و یک سطح گرمایی گرم استفاده شده بود که حوضچه تقطیر را به سمت گرم واحد، متصل می‌کرد. طرح دوم شامل نانوسیال و سطح گرمایی خارجی متصل به حوضچه بود. در طرح سوم، به کمک یک چگالنده خارجی و سامانه خنک‌کننده گرمایی شیشه، فرایند میعان تسریع یافت. نتیجه‌ها نشان داد که ترکیب نانوسیال و چگالنده با واحد تقطیر خورشیدی، موجب افزایش ۲۶/۷ درصد در کارایی گرمایی و ۱۰۰/۵ درصد در مقدار تولید آب خورشیدی شد. این بهبود به‌طور عمده به دلیل افزایش دمای نانوسیال بوده است. همچنین، مشخص شد حدود ۲۶/۳ درصد از کل تولید آب را می‌توان به تأثیر خنک‌کننده‌های گرمایی و آبی نسبت داد. در مطالعه دیگری پارسا و همکارانش [۴۹] از نانوسیالی با غلظت ۰/۰۴ درصد نقره-آب در یک واحد شیرین‌سازی خورشیدی استفاده کردند. نتیجه‌ها نشان داد که انرژی و بازده انرژی^۱ واحد تقطیر خورشیدی مجهز به نانوسیال نقره، به‌ترتیب ۱۹۶ درصد و ۱۰۶ درصد بیشتر از واحدهای خورشیدی سنتی بوده است. این پژوهش‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانوفناوری در واحدهای تقطیر خورشیدی می‌تواند منجر به بهبود چشمگیر کارایی و افزایش تولید آب شود. با ادامه پژوهش‌ها و توسعه در این زمینه، این فناوری پتانسیل دارد تا به یکی از ابزارهای کلیدی برای رفع بحران جهانی کمبود آب تبدیل شود.

کاربرد نانوذره‌های TiO_2 در شیرین‌سازی خورشیدی

از دیدگاه شیمیایی، نانوذره‌های تیتانیوم دی‌اکسید به دلیل ساختار بلوری آناتاز و روتایل، ویژگی‌های فوتوکاتالیستی و جذب نور چشمگیری دارند که به افزایش جذب انرژی خورشیدی و تبدیل آن به گرما کمک می‌کند. سطح فعال این نانوذره‌ها با

واحدهای تقطیر خورشیدی می‌تواند موجب بهبود کارایی و تولید آن‌ها شود. پژوهش‌های بیشتر در این زمینه می‌تواند به توسعه روش‌های مؤثرتر و پایدارتر برای تأمین آب آشامیدنی سالم منجر شود.

جدیدترین نانومواد مؤثر برای سم‌زدایی آب شامل زئولیت‌ها، نانولوله‌های کربنی، گرافن و آکوپورین است. این مواد افزون بر سم‌زدایی، در کاربردهایی مانند یون‌زدایی ظرفیتی، جاذب‌ها و ابرخازن‌ها نیز استفاده می‌شوند. نانولوله‌های کربنی و گرافن به دلیل رسانندگی الکتریکی و گرمایی بالا، سطح وسیع، تخلخل و استحکام مکانیکی بالایی که دارند، مزایای ویژه‌ای را ارائه می‌دهند. زئولیت‌ها نیز با داشتن کانال‌ها و حفره‌های متخلخل، توانایی حذف یون‌های نمک‌های آبدار را دارند. آکوپورین نیز زمانی که در غشاهای فسفولیپیدی سلولی قرار گیرد، یون‌های نمک را صاف می‌کند و از نفوذپذیری اسمزی ویژه‌ای برخوردار است [۵۳]. ترکیب این نانومواد با بسپارهای مصنوعی می‌تواند به بهبود کارایی غشاها کمک کند. همچنین، نانوپسازها برای رفع چالش‌های فعلی و آتی در فرایند شیرین‌سازی آب طراحی شده‌اند. یکی از مشکل‌های عمده که با کمک این نانومواد قابل حل است، گرفتگی غشاهاست. این مواد افزون‌براین، امکان ارتقاء کارایی سامانه‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی برای فرایندهای شیرین‌سازی را فراهم می‌کنند [۵۴].

در مطالعه‌های صورت گرفته توسط دائر^۱ و همکارانش [۵۵]، جنبه‌های اقتصادی استفاده از نانومواد بررسی و اطلاعات کارخانه‌هایی که از این مواد بهره می‌برند، جمع‌آوری شده است. در این پژوهش‌ها، سه نوع اصلی از نانومواد شامل زئولیت‌ها، نانولوله‌های کربنی و گرافن به عنوان گزینه‌های اقتصادی، فراوان و در دسترس معرفی شده‌اند. جدول‌های ۱ و ۲ توصیف مختصری از نانومواد استفاده شده در روش‌های گوناگون شیرین‌سازی را ارائه می‌دهند.

این روش‌ها کاربردهای بسیاری در تصفیه آب دریا و سم‌زدایی فاضلاب دارند. از جمله صافش، جذب، ضدعفونی، فتوکاتالیست و حسگرهای هوشمند. انواع متفاوتی از نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن، نقاط کوانتومی، نانوالیاف، زئولیت‌ها و نانوذره‌های فلزهای گرانبها یا سیلیکای دوپه‌شده قابل استفاده هستند. برای مثال، نانولوله‌های کربنی برای جداسازی سریع نمک و جریان بالای آب بسیار مناسب هستند. همچنین، زئولیت‌ها به‌طور مؤثری یون‌های نمک را از آب شور حذف می‌کنند و آکوپورین نیز در غشاهای زیستی نقش کلیدی در بهبود نفوذپذیری اسمزی دارد.

مطالعه‌های تئو^۲ و همکارانش نیز به بررسی قابلیت کاربرد نانومواد در صنعت شیرین‌سازی پرداخته است. این مواد می‌توانند به عنوان جاذب‌های جایگزین در فرایندهای متفاوت استفاده شوند. ابرخازن‌ها و الکترودهای یون‌زدایی ظرفیت که بخشی از این سامانه‌ها هستند، بر پایه اجزای نانو ساختاری طراحی شده‌اند. نمونه‌هایی از آن شامل ابرخازن‌های مبتنی بر ورق‌های گرافن یا سامانه‌های یون‌زدایی ظرفیتی با استفاده از نانوپسازهای گرافنی است.

این مواد نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند، بلکه هزینه نگهداری پایین‌تر و کارایی بهتری نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهند. نانومواد همچنین، قابلیت حذف یون‌های فلزهای سنگین و رنگ‌ها را از راه غشاهای شیرین‌سازی دارند. جاذب‌هایی که ساختارهای نانومتری دارند، تأثیر بسیاری در حذف آلاینده‌ها از فاضلاب داشته‌اند و خطرهای زیست‌محیطی کمتری را در آینده ایجاد می‌کنند.

جدول ۱ تنوع نانومواد مورد استفاده برای شیرین سازی آب

نوع نانوماده	شکل و اندازه	روش سنتز	یافته‌های مهم	کارایی نمک زدایی	مرجع
نانو کامپوزیت سیلیکون/سلولز استات/پلی اتیلن گلیکول	۰/۰۰۷ میکرومتر، ۰/۰۲ میکرومتر و ۶۰ میکرومتر	رسوب دهی غوطه‌وری	افزایش آب دوستی غشاها	بهترین نتیجه‌ها با اندازه سیلیکا ۰/۰۲ میکرومتر	[۱۲]
MoS ₂	۱-۴ لایه (ضخامت هر لایه = ۱ نانومتر)	سامانه‌های غشای بیومیمتیک	غشاهای نمک زدایی نانوحفره‌ای قابل کنترل	نفوذپذیری بالا برای آب و حذف نمک بیشتر	[۵۶]
روی اکسید (ZnO)	۲۰-۱۳۰ نانومتر، ۴۰ نانومتر	رسوب دهی (ZnO-P) یا آب گرمایی (ZnO-H)	تخریب فنل	تخریب کل در ۶ ساعت واکنش	[۵۷]
مزوسیلیکا (OMS)	۵۰-۵۰۰ نانومتر، اندازه حفره‌ها ۲-۲۰ نانومتر	روش سل-ژل	حذف CO ₂ از طریق جذب	جذب انتخابی آلانینده	[۵۴]
مش فولاد زنگ‌زن پوشش داده شده با تفلون (PTFE)	ذکر نشده	فرایند تزریق زیستی	دارای سطح فوق آب‌گریز	جداسازی آب و روغن	[۵۴]
نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) / غشای پلی آمید نازک	۰/۸۳ تا ۱/۰۸ نانومتر	ذکر نشده	افزایش اسمز مستقیم	افزایش ۲/۵ برابری شار آب	[۵۵]
زئولیت + آلومینا	اندازه حفره ۰/۳ تا ۰/۸ نانومتر	کلینوپتیلولیت طبیعی	حذف نمک ۹۷-۹۹٪	جداسازی بسیار خوب	[۵۵]
۱۰٪ GO / پلی سولفون سولفوناته شده	اندازه حفره ۱ تا ۱/۲ نانومتر	ذکر نشده	افزایش شار آب	کارایی حذف نمک ۹۷ درصد	[۵۵]
ترکیب پلی وینیل الکل / کیتوسان	اندازه ۱۰۱۵ نانومتر	الکترواسپینینگ و کراس لینکینگ	توانایی حذف رنگ از فاضلاب	ظرفیت جذب رنگ بالا (افزایش با کاهش pH)	[۵۸]
نانوذره‌های مغناطیسی (NPs / Fe ₃ O ₄) با هم‌بستار	≤ ۱۵ نانومتر	روش شیمیایی کلونیدی /بستار هم‌بستار	محلول کششی برای اسمز پیش‌رونده	شار آب کمتر از ۲ Lmh ^۲	[۵۹]
گرافن لایه لایه شده	۲/۵ × ۲/۵ نانومتر مربع	ترکیب ورقه‌های گرافن و نانولوله‌های کربنی	اسمز معکوس برای نمک زدایی	حذف نمک ۱۰۰ درصد	[۶۰]
نانولوله‌های کربنی عمودی	اندازه حفره ۴/۸ نانومتر	رسوب دهی بخار شیمیایی	مقاومت در برابر گرفتگی ۱۵ درصد	شار آب ۳ برابر بیشتر از فراصافش	[۶۱]
نیکل هگزاسیانوفریت (NiHCF)	۲-۷ نانومتر	رسوب دهی	نمک زدایی الکتروشیمیایی	جذب نمک بیشتر در هر چرخه	[۶۲]

جدول ۲ مقایسه کارایی مواد الکترودی متفاوت در یون‌زدایی خازنی

نوع نانوماده	درصد یا مقدار حذف نمک	مراجع
نیکل هگزاسیانوفریت (NiHCF)	۵۹/۹ میلی گرم بر گرم	[۶۲]
rGO/AgNPs rGO/NaTi ₂ (PO ₄) ₃	۱۰۵ میلی گرم بر گرم	[۶۳]
ساختار سه‌بعدی گرافن/SiC	۰/۵ میلی گرم بر سانتی‌متر مربع	[۶۴]
پلی‌کتونیک-g-Na-استایرن-سولفونات	۰/۴۳ میلی معادل بر گرم	[۶۵]
کربن فعال گرانونلی	حذف ۱۰ تا ۳۰ درصد یون نیترات	[۶۶]
صفحات گرافن لایه‌برداری شده	حذف ۸۵ درصد سرب (Pb)	[۶۷]
پلی‌سولفوناته‌شده (پلی‌اتر اتر کتون)، پلی‌سولفون‌های آمینه	۹۲ تا ۱۰۰ درصد	[۶۸]
الکترودهای کربنی متخلخل	۱۵ میلی گرم بر گرم	[۶۹]
الکترودهای مرکب (الکترودهای کربن متخلخل با اکسید فلز)	۲۰ میلی گرم بر گرم	[۶۹]
کربن فعال پودری TiO ₂ +	حذف ۶/۶۷ میلی گرم بر گرم NaCl	[۷۰]

مقدار بیشتر آب در سامانه شیرین‌سازی مفید است و می‌توان با افزایش دمای آن‌ها، تولید آب را به شکل چشمگیری افزایش داد. ترکیب نیروگاه گرمایی با روش‌های شیرین‌سازی، مانند تقطیر چندمرحله‌ای و اسمز معکوس یا ترکیب این واحدها، قادر به تولید هم‌زمان برق و آب شیرین است. به‌کارگیری روش تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای (MSF^۳) زمانی مناسب است که تقاضای آب کمتر از ۸۰۰۰ مترمکعب در ساعت باشد، در حالی که اسمز معکوس وقتی کاربرد دارد که تقاضا بیشتر باشد [۷۳]. در جزایر جنوبی یونان، با منابع محدودی از آب و انرژی، مدل یکپارچه‌ای توسط منتیس^۴ پیشنهاد شد که در آن شیرین‌سازی و انرژی تجدیدپذیر برای تأمین آب ادغام می‌شود. در ابوظبی، کمبود آب و فراوانی انرژی گرمایی می‌تواند با یک رویکرد پیوندی مدیریت شود. هماهنگی میان تقاضای آب و انرژی تاکنون چالش‌هایی را ایجاد کرده بود، ولی راهکارهایی برای همسویی زیرساخت‌ها در نظر گرفته شد [۷۴]. یک مطالعه موردی در ابوظبی، ضرورت استفاده از رویکرد یکپارچه در مدیریت منابع در سرزمین‌های عربی را بیان کرد. چالش کمبود آب در مقابل فراوانی انرژی گرمایی با بهره‌گیری از این رویکرد

فرایندهای نوآورانه و کم‌انرژی شیرین‌سازی یکپارچه با انرژی تجدیدپذیر

انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی، می‌تواند در کاهش مصرف انرژی در کارخانه‌های شیرین‌سازی مؤثر باشند. در مطالعه‌ای که توسط کابیل^۱ و عبدالقائد^۲ انجام شد، ترکیب واحد شیرین‌سازی اسمز معکوس با پنل‌های خورشیدی، انرژی باد یا سامانه‌های بازیابی انرژی مانند توربین‌ها و پمپ‌های هیدرولیک بررسی شد [۷۱]. نتیجه‌ها نشان داد که هزینه آب تقطیرشده به منبع انرژی تجدیدپذیر استفاده‌شده وابسته است. برآورد شده است که با به‌کارگیری سامانه اسمز معکوس مبتنی بر انرژی خورشیدی، بادی و همچنین، استفاده از سامانه‌های بازیابی انرژی، هزینه تصفیه آب تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. گرما اتلافی نیروگاه‌های گرمایی می‌تواند در تولید آب شیرین‌کاری مؤثر داشته باشد. بخار تولیدشده از توربین‌ها و گازهای خروجی برای تبدیل آب به بخار و گرمایش آب در این فرایند نقش کلیدی دارد [۷۲]. همچنین، نصب جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌تواند مصرف انرژی و نیازهای گرمایی را کاهش دهد. سرعت جریان گازهای داغ نیز در تولید

1. Kabeel

2. Abdelgaied

3. Multi-stage flash

4. Mentis

است که کارامدی آن در شیرین‌سازی آب ثابت شده است. انرژی گرمایی خورشیدی مناسب‌ترین منبع برای این فرایند است، اگرچه تجهیزات مورد نیاز برای استفاده از این انرژی ممکن است هزینه اولیه بالایی داشته باشند. با این حال، هزینه‌های عملیاتی این سامانه‌ها پس از بهره‌برداری چندان چشمگیر نیست. آفتاب‌گیرها به دلیل سادگی و هزینه کم نگهداری، به‌ویژه در مناطق روستایی دورافتاده با تقاضای آبی محدود، انتخاب مقرون به صرفه‌ای هستند. برای افزایش کارایی آفتاب‌گیرها، می‌توان تغییرهای متنوعی در طراحی آن‌ها اعمال کرد و افزودنی‌هایی مانند مواد تغییر فاز، برکه خورشیدی، چگالنده، جمع‌کننده صفحه‌ای، آینه‌ها، باله‌ها، مخازن ذخیره، مکعب‌های اسفنجی و آفتاب‌گیرهای مقرر یا لوله‌ای را به آن‌ها افزود. مطالعه‌ها نشان داده‌اند که با این افزودنی‌ها تولید سالانه تا ۶۰ درصد افزایش یافته است [۷۶]. برای مثال، استفاده از آینه‌ها موجب بازتاب تابش خورشید به داخل سامانه می‌شود و دما را در سطح بالایی حفظ می‌کند که منجر به افزایش نرخ تبخیر می‌شود. در مقابل، برخی عامل‌ها مانند افزودن استخراج‌کننده هوا می‌تواند تولید را کاهش دهد. علت این موضوع اثر خنک‌کنندگی ناشی از جریان هوای خارجی اطراف استخراج‌کننده است. پژوهش‌ها همچنین، نشان داده‌اند که تبخیر آب شور با آفتاب‌گیرها کارایی بالاتری دارد و حدود ۳۵ درصد تولید بیشتری نسبت به سامانه‌های فاقد آفتاب‌گیر ارائه می‌دهد. یکی از فناوری‌های بهینه‌سازی، استفاده از مواد تغییر فاز است که به‌عنوان منبع گرمایی در مواقع عدم دسترسی به تابش خورشیدی (شب یا روزهای ابری) عمل می‌کند. افزون‌براین، جمع‌کننده خورشیدی خارجی نیز می‌تواند برای گرم کردن آب در حوضچه‌ها به‌کار رود. نرخ تولید آب شیرین به‌طورمستقیم تحت تأثیر جریان آب داغ و دمای محیط قرار دارد، ولی بررسی‌ها حاکی از آن است که خروجی تجربی اغلب کمتر از خروجی نظری بوده است، که به‌طورعمده به‌دلیل مشکلاتی مانند نشت یا نادیده‌گرفتن شیو دما رخ می‌دهد. هرچند آفتاب‌گیرها هزینه کمی در نگهداری دارند، ولی تولید

جامع قابل مدیریت است. در سال‌های اخیر، از گرما اتلافی تولیدشده توسط پالایشگاه‌های نفت و صنایع برای تولید آب سرمایه‌گذاری شده است. برای کاهش هزینه‌های انتقال و اتلاف گرما، کارخانه‌های شیرین‌سازی باید در نزدیکی مراکز تولید انرژی مستقر شوند. به‌دلیل نبود هماهنگی کافی میان تقاضای آب و انرژی در ابوظبی، تلاش‌هایی برای همگام‌سازی زیرساخت‌های مرتبط با هر دو بخش انجام شده است [۷۵]. پیش‌بینی می‌شود در آمریکای مرکزی و جنوبی، همه فرایند شیرین‌سازی تنها با انرژی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۳۰ انجام شود. استفاده از سدها یا نیروگاه‌های آب‌گرمایی به‌عنوان باتری‌های مجازی و تبدیل انرژی خورشیدی و بادی گزینه‌های مناسبی برای این منطقه هستند. این تغییر نه تنها به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند، بلکه از دید زیست‌محیطی نیز سالم‌تر است، چرا که هیچ انتشاری نخواهد داشت.

کاربرد انرژی خورشیدی در فرایندهای تصفیه آب

تابش خورشیدی یکی از منابع انرژی فراوان و در دسترس بشمار می‌رود و به‌ویژه برای مناطق خشک و بیابانی از اهمیت بیشتری برخوردار است. این مناطق بیشتر با مشکل‌های کمبود آب نیز مواجه هستند و استفاده از انرژی خورشیدی برای کاربردهایی مانند شیرین‌سازی آب در چنین شرایطی بهترین گزینه است. از این راه می‌توان به تأمین هم‌زمان نیازهای آبی و انرژی این مناطق پرداخت. سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان به کمک سلول‌های فتوولتائیک (PV) برق تولید کرد و از راه جمع‌کننده‌های خورشیدی نیز انرژی گرمایی بهره‌برداری کرد. افزون‌براین، تابش مستقیم خورشید را می‌توان با آفتاب‌گیرها برای فرایند شیرین‌سازی آب به‌کارگرفت. با وجود مزایای سلول‌های PV، هزینه بالای آن‌ها و نیاز سامانه‌های گرمایی خورشیدی به مقدارهای زیاد آب از چالش‌های این روش‌ها است. در مقابل، آفتاب‌گیرها روشی ساده و مقرون به صرفه هستند و به‌طورمعمول برای تصفیه آب شور به‌کار می‌روند. برای مثال، آفتاب‌گیری که در شکل ۳ نشان داده شده، یکی از مدل‌هایی

روزانه آن‌ها به‌طور معمول کمتر از ۱۰ مترمکعب است که کاربرد آن‌ها را برای واحدهای بزرگ مقیاس غیرعملی جلوه می‌دهد. با این وجود، هزینه زیست‌محیطی بسیار پایینی دارند و از نظر حفظ محیط‌زیست گزینه‌ای مطلوب هستند، ولی نرخ پایین تولید موجب می‌شود تا از دید اقتصادی و تجاری کمتر توجیه‌پذیر باشند. از سوی دیگر، پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردارند. این پنل‌ها امکان استفاده همراه با واحدهای شیرین‌سازی اسمز معکوس را دارند. سامانه PV-RO متشکل از دو بخش مجزا است که به‌صورت هم‌زمان انرژی پایدار و آب شیرین را فراهم می‌کند. چنین تنظیماتی از دید اقتصادی و تجاری به‌طورکامل قابل توجیه است.

شیرین‌سازی میکروبی

روش‌های زیستی نسبت به روش‌های شیمیایی برای حذف نیتروژن و فسفر از آب قابل اعتمادتر هستند زیرا انتشار آلاینده‌ها را کاهش می‌دهند [۷۷]. حذف نیتروژن و فسفر در فرایندهای زیستی به‌طورعمده از راه واکنش‌های بیوشیمیایی انجام می‌شود که شامل نیترات‌سازی و نیترات‌زدایی برای نیتروژن و فرایند جذب و رسوب‌گذاری برای فسفر است. در نیترات‌سازی، باکتری‌های نیترات‌ساز آمونیاک را به نیترات تبدیل می‌کنند. سپس، در مرحله نیترات‌زدایی، باکتری‌های بی‌هوازی نیترات به گاز نیتروژن تبدیل و در اتمسفر آزاد می‌شود. در این فرایندها، آنزیم‌های ویژه مانند آمونیاک اکسیداز و نیتريت اکسیداز به عنوان کاتالیزت استفاده می‌شوند. فسفر بیشتر به‌صورت فسفات در آب وجود دارد و می‌تواند از راه واکنش‌های شیمیایی با کلسیم، آهن و آلومینیم به ترکیب‌های نامحلول تبدیل شود. این ترکیب‌ها به‌صورت رسوب ته‌نشین و از فاز آبی حذف می‌شوند. در تصفیه زیستی، باکتری‌های ویژه‌ای می‌توانند فسفات را جذب و به‌صورت پلی‌فسفات در سلول‌های خود ذخیره کنند که پس از حذف زیستی این سلول‌ها، فسفر از سامانه خارج می‌شود. افزون‌براین، در برخی

سامانه‌های الکتروشیمیایی زیستی، واکنش‌های اکسایش و کاهش در الکترودها موجب تبدیل ترکیب‌های نیتروژن و فسفر به حالت‌های قابل جداسازی می‌شوند. این واکنش‌ها بیشتر با ریزاندامگان‌های الکتروکاتالیست انجام می‌شوند و مصرف انرژی سامانه را کاهش می‌دهند. توجه به عامل‌های شیمیایی مانند pH، دما و غلظت اکسیژن محلول، در بهینه‌سازی فعالیت‌های میکروبی و واکنش‌های شیمیایی نقش حیاتی دارد. تغییر این عامل‌ها می‌تواند سرعت واکنش‌های نیترات‌سازی و نیترات‌زدایی را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه بر کارایی حذف مواد مغذی اثرگذار باشد. در پژوهشی که در سال ۲۰۱۶ در ترکیه انجام شد، از فرایند باردنفو^۱ پنج مرحله‌ای برای حذف کربن و مواد مغذی اضافی از فاضلاب شهری استفاده شد. این یک کارخانه تصفیه در مقیاس پایلوت در محل بود که در آن کل فرایند مطالعه و بررسی شد. حذف مؤثر مواد مغذی با این فرایند انجام شد. گونه‌های باکتری برای حذف نیتروژن و فسفر استفاده شدند. جامعه میکروبی با روش PCR^۲ تحت نظارت قرار گرفت. کارایی رضایت‌بخش بود و پژوهش‌ها و بررسی‌های بیشتری توصیه شد [۷۸]. تخلیه فاضلاب با غلظت‌های بالای نمک و مواد مغذی در مقیاس بزرگ منجر به هورپرور^۳ می‌شود. ولی می‌توان آن را با به‌کارگیری تأسیسات تصفیه فاضلاب زیستی مدیریت کرد. در هند، گروهی از پژوهشگران کارایی سامانه‌های الکتروشیمیایی زیستی (BES^۴)، سلول سوخت میکروبی، سلول برق‌کافت و سلول شیرین‌سازی را ارزیابی کردند. ترکیب دو یا چند واحد نیاز به انرژی را کاهش داد و آب و برق پاک فراهم کرد. کیفیت آب بازیابی‌شده به ترکیب سامانه‌های به‌کارگرفته‌شده بستگی داشت. بهترین نتیجه‌ها از ترکیب BES با سلول‌های شیرین‌سازی میکروبی به‌دست آمد. بازیابی مواد مغذی لازم چشمگیر بود که آب با کیفیت بالایی را فراهم کرد. گرفتگی غشا در درازمدت چالش

1. Bardenpho

2. Polymerase chain reaction (PCR)

3. Eutrophication

4. Bioelectrochemical systems (BSE)

دو کاربرد کلیدی برای فناوری گرمایی خورشیدی هستند، مطالعه شدند. نانوسیال‌ها با افزودن نانوذره‌ها به سیال‌های پایه، به‌طور چشمگیری ویژگی ترموفیزیکی مانند رسانندگی گرمایی، ظرفیت گرمایی و گرانروی را تغییر می‌دهند که این تغییرها منجر به بهبود انتقال گرما در فرایندهای شیرین‌سازی گرمایی می‌شود. نانوذره‌ها با سطح ویژه بسیار بالا، امکان جذب و انتقال انرژی گرمایی را افزایش و موجب تسریع فرایند تبخیر می‌شوند. افزون‌براین، واکنش‌های سطحی بین نانوذره‌ها و مولکول‌های آب، پدیده‌هایی مانند افزایش رسانندگی گرمایی مایع را تقویت می‌کنند. از نظر شیمیایی، پایداری نانوسیال‌ها به تعادل بین نیروهای جاذبه و دافعه بین نانوذره‌ها مرتبط است که تحت تأثیر عامل‌هایی مانند pH، غلظت نمک و حضور عامل‌های سطح‌فعال قرار دارد. افزایش غلظت نمک در آب، می‌تواند موجب تجمع و ته‌نشینی نانوذره‌ها شود که کارایی سامانه را کاهش می‌دهد. نانوسیال‌ها که شامل اکسیدهای فلزی مانند SiC یا Fe_3O_4 هستند، افزون بر انتقال بهتر گرما، توانایی جذب نور خورشیدی در گستره طول موج‌های متفاوت را افزایش می‌دهند و با سازوکارهای نورگرمایی، انرژی تابشی را به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند. این اثرها موجب افزایش کارایی کلی سامانه‌های شیرین‌سازی خورشیدی می‌شود. افزون بر ویژگی گرمایی، پدیده‌های شیمیایی مانند واکنش‌های اکسایش سطح نانوذره‌ها می‌توانند بر پایداری نانوسیال‌ها تأثیرگذار باشند و در برخی موارد موجب تغییر در ترکیب شیمیایی سیال و ذره‌ها می‌شوند که این موضوع نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. همچنین، گرانروی بالاتر نانوسیال‌ها در غلظت‌های زیاد می‌تواند مقاومت جریان را افزایش دهد و مصرف انرژی پمپ‌ها را بیشتر کند. بنابراین، شناسایی غلظت بهینه نانوذره‌ها برای حفظ تعادل بین انتقال بهتر گرما و مصرف انرژی پایین، از اهمیت زیادی برخوردار است. پژوهش‌های اخیر در زمینه استفاده از نانوسیال‌های خورشیدی نشان داده‌اند که

عمده‌ای بود. در ایران، نتیجه‌های آزمایش‌های ۱۱ ماهه نشان داد که آلودگی آب یک مشکل بسیار جدی در کشورشان است. آب آلوده به‌عامل‌های عفونی باکتریایی و ویروسی با تصفیه‌کننده‌های آب خانگی (HWP^1) فیلتر شد. دستگاه‌ها یا صافی‌های متفاوتی که استفاده شدند شامل صافی‌های غشایی، سامانه‌های پادعفونی UV، صافی تبادل یونی، صافی‌های کربن فعال و واحدهای تقطیر بودند. عامل‌هایی مانند کدورت، مواد جامد محلول کل (TDS^2)، pH، سختی و نشانه‌های میکروبی اندازه‌گیری شدند. ۳۰ نمونه از نقاط متفاوت شهر بندرعباس گرفته شد. کارایی این صافی‌ها ۴۰ تا ۵۵ درصد بود، ولی کارایی این HWP به‌تدریج در نیمه سال کاهش یافت. این به دلیل کیفیت پایین مواد و تجمع کلونی‌های میکروبی در داخل صافی‌ها بود [۷۹]. سلول شیرین‌سازی میکروبی (MDC^3) می‌تواند برای تصفیه فاضلاب با ورودی انرژی کم استفاده شود. همچنین، توصیه می‌شود که از آن برای پیش تصفیه آب ورودی در اسمز معکوس استفاده شود. این کار انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. مشکل رشد جلبک‌ها با استفاده از MDC حل می‌شود. حالت‌های متفاوت کارایی در MDC قابل مقایسه نیستند و هر کدام طراحی‌های بی‌همتای خود را دارند. رامیرز-مورنوی دو روش MDC (یکی با کاتد هوایی و دیگری با کاتولیت مایع) را در مقیاس آزمایشگاهی برای آب شور و آب دریا به‌طور جداگانه آزمایش کرد. آب شور تا ۹۰ درصد با هر دو روش شیرین‌سازی شد و مواد آلی به‌طور بسیار مؤثری حذف شدند [۸۰].

شیرین‌سازی گرمایی با نانوسیال‌ها

تشکیل باران شباهت زیادی به فرایند تقطیر گرمایی دارد که برای حذف ناخالصی‌ها از آب دریا به‌کارگرفته می‌شود. در این راستا، نانوسیال‌ها برای بهبود ویژگی‌های گرمایی در تولید انرژی خورشیدی متمرکز و فرایندهای شیرین‌سازی گرمایی که

1. Most probable number (MPN)

2. Total dissolved solids (TDS)

3. Microbial desalination cell (MDC)

دیگری به تأثیر یک جمع‌کننده خورشیدی مبتنی بر نانوسیال بر فرایند تقطیر MSF پرداخت. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری یک آب‌گرم‌کن خورشیدی با سطح بزرگ‌تر نه تنها هزینه تولید آب را کاهش داد، بلکه افزودن نانوذره‌ها به سیال جمع‌کننده موجب افزایش خروجی آب شیرین شد. هرچند، مشکل این نوع فناوری‌ها نرخ پایین تولید و افزایش گران‌روی در غلظت‌های بالا است که می‌تواند منجر به افت کارایی شود. پژوهش‌ها همچنان روی شناسایی غلظت بهینه نانوذره‌ها برای تعادل بین کارایی و پایداری ادامه دارد. از آنجا که کارخانه‌های شیرین‌سازی انرژی زیادی مصرف می‌کنند، اهمیت منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نانوسیال‌ها افزایش یافته است. این سیال‌ها که توانایی کاهش مصرف انرژی غیرضروری را دارند، به «نگاوات» مشهور شده‌اند. کاربردهای متنوع نانوسیال‌ها در واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی در جدول ۳ خلاصه شده است.

افزون بر بهبود کارایی گرمایی، این سیال‌ها می‌توانند با کاهش مصرف انرژی و افزایش نرخ تولید آب، نقش قابل‌توجهی در کاهش اثرات زیست‌محیطی واحدهای شیرین‌سازی داشته باشند. شارشیر و همکارانش [۸۱] پژوهش‌هایی در زمینه تقویت کارایی واحدهای شیرین‌سازی خورشیدی با نانوسیال‌ها انجام دادند که شامل سه طراحی متفاوت بود. آن‌ها غلظت‌های متنوعی از ورقه‌های میکرو در نانوسیال‌های (۲، ۱ و ۰/۱ درصد) و عمق‌های متفاوت حوضچه (۰/۲۵ تا ۰/۵۰ سانتی‌متر) را ارزیابی کردند. ترکیبی از ذره‌های میکروگرافیت و ذره‌های مس اکسید با اندازه‌های معمولی به‌ترتیب ۱ و ۱/۲ تا ۱/۳ میکرون همراه با خنک‌سازی شیشه استفاده شد که منجر به افزایش تولید به‌ترتیب ۵۳/۹۵ درصد و ۴۴/۹۱ درصد شد. نانوسیال‌ها به‌دلیل قابلیت بالای خود در فرایندهای شیرین‌سازی گرمایی و جذب انرژی خورشیدی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. افزون‌براین، پژوهش

جدول ۳ مرور نانوسیال‌های متفاوت در واحد شیرین‌سازی خورشیدی

سیال پایه	نانوسیال	رسانندگی گرمایی	غلظت (درصد)	نتیجه	مراجع
آب	Al ₂ O ₃	۴۶	۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲	افزایش بهره‌وری تا ۱۶/۸۳ درصد برای غلظت ۰/۱۲ درصد	[۲۹]
آب	Al ₂ O ₃	۴۶	۰/۱-۰/۰۵	افزایش بهره‌وری تا ۲۹/۹۵ درصد	[۴۰]
آب	Al ₂ O ₃	۴۶	۰/۲	بهبود بهره‌وری واحد نمک‌زدایی خورشیدی تا ۷۳/۸۵ درصد	[۸۲]
ترکیب با رنگ مشکی	Al ₂ O ₃	۴۶	—	افزایش بهره‌وری تا ۳۸/۰۹ درصد	[۸۳]
آب	CuO	۱۷/۶	۰/۲	بهبود بهره‌وری واحد نمک‌زدایی خورشیدی تا ۸۴/۱۶ درصد	[۸۲]
آب	CuO	۱۷/۶	۰/۱۲	افزایش بهره‌وری تا ۲۲/۵ درصد	[۸۴]
آب	CuO	۱۷/۶	۲-۰/۱۲۵	افزایش بهره‌وری تا ۴۴/۹۱ درصد	[۸۵ و ۸۶]
ترکیب با رنگ مشکی	CuO ₂	۷۶/۵	۴۰-۱۰	افزایش بهره‌وری تا ۲۵ درصد	[۸۶]
آب	Fe ₂ O ₃	۶	۰/۱-۰/۰۵	—	[۸۳]
آب	پوسته‌های گرافیتی	—	۲-۰/۱۲۵	افزایش بهره‌وری تا ۵۳/۹۵ درصد	[۸۳]
آب	SnO ₂	۱/۳۴-۱/۳۸	۰/۱-۰/۰۵	افزایش بهره‌وری تا ۱۸/۶۳ درصد	[۸۳]
آب	ZnO	۲۹	۰/۱-۰/۰۵	افزایش بهره‌وری تا ۱۲/۶۷ درصد	[۸۳]

است که تا سال ۲۰۵۰، تقاضای آب در این مناطق چندین برابر شود. داده‌های جمع‌آوری شده از سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ نشان داد که اسمز معکوس آب دریا (SWRO^۲) از نظر اقتصادی معقول‌ترین گزینه به حساب می‌آید و پیشنهاد شده است [۸۹] که در ۱۴۰ کشور جهان طی ۳۰ سال آینده کارخانه‌های SWRO برای پاسخ به نیاز آبی تأسیس شوند. با این حال، عواملی مانند هزینه بالای انرژی، سیاست‌گذاری‌ها و شرایط اقلیمی می‌توانند موانعی در دستیابی به این اهداف ایجاد کنند. تحلیل مناسب بودن مکان‌های ویژه برای نصب واحدهای شیرین‌سازی مبتنی بر انرژی خورشیدی با تصمیم‌گیری چندمعیاره GIS MCDA انجام شد. این تحلیل معیارهای اقتصادی، اجتماعی و جغرافیایی را ترکیب کرد. نتیجه‌ها نشان داد که مناطقی با کمبود آب شدید و اقلیم گرمسیری یا نیمه‌گرمسیری مکان‌هایی آرمانی برای ایجاد این کارخانه‌ها هستند. برای انتخاب مناسب‌ترین روش شیرین‌سازی، معیارهای استاندارد مانند هزینه کل، نیاز انرژی، تأثیرهای زیست محیطی و شوری آب ورودی باید بررسی شوند. تحلیل نهایی نشان داد که سامانه‌های کوچک مقیاس مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر اگرچه برای مناطق وسیع مانند شهرهای بزرگ از نظر اقتصادی بهینه نیستند، ولی در مناطق دورافتاده یا بیابانی با تقاضای کم آب، انتخابی کاربردی تلقی می‌شوند. افزون‌براین، هزینه انتقال آب نیز در این مناطق زیاد بالا نمی‌رود. متداول‌ترین روش‌های شیرین‌سازی در جهان شامل اسمز معکوس (شیرین‌سازی غشایی)، MSF و MED هستند. کشورهای خلیج فارس به دلیل دسترسی فراوان به منابع نفتی تمایل بیشتری به استفاده از روش‌های گرمایی دارند در حالی که کشورهای غربی سامانه RO را به دلیل بهره‌وری بالای انرژی ترجیح می‌دهند. بنابر گزارش انجمن بین‌المللی شیرین‌سازی در سال ۲۰۱۵، بیش از ۳۰۰ میلیون نفر وابسته به آب شیرین شده برای مصارف خانگی و کشاورزی بوده‌اند. کیفیت آب به‌طور معمول با اندازه‌گیری مقدار کل مواد جامد محلول تعیین

با وجود پیشرفت‌های به‌دست‌آمده، نیاز به پژوهش‌های بیشتر برای بهبود کارایی و پایداری این فناوری مشهود است. هرچند یافته‌های کنونی نشان‌دهنده نقش مؤثر نانو سیال‌ها در افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها در فرایندهای شیرین‌سازی خورشیدی هستند.

ظرفیت و روندهای جهانی شیرین‌سازی

تحلیل مقایسه‌ای روش‌های متفاوت شیرین‌سازی نشان می‌دهد که روش‌های MSF و جذب، توانایی مؤثری در شیرین‌سازی آب دارند. با این حال، براساس نیاز انرژی، تقطیر خورشیدی (SD) به‌عنوان بهترین گزینه از نظر مصرف انرژی کمترین مقدار را به همراه دارد. البته، تولید پایین این روش، آن را به گزینه‌ای به‌نسبت پرهزینه تبدیل کرده است. در عین حال، روش‌هایی مانند تبادل یونی (I.Ex)، برجذب، و هیدرات گاز (G.Hyd) نیز از لحاظ کارایی انرژی برجسته هستند. با توجه به جنبه‌های زیست‌محیطی، بررسی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای این سامانه‌ها نشان می‌دهد که SD، I.Ex و Ads کمترین مقدار انتشار CO₂ را دارند. در نهایت، هزینه‌های عملیاتی روش‌های گرمایی و غشایی بالاست و در بین آن‌ها، تقطیر خورشیدی بیشترین هزینه را شامل می‌شود. از طرف دیگر، روش‌های شیمیایی فعال مانند LLE، G.Hyd، I.Ex، انجماد و جذب، کمترین هزینه ممکن به‌ازای هر مترمکعب آب را فراهم می‌آورند [۸۷]. در پژوهشی که در سال‌های اخیر توسط السوهیمی^۱ و همکارانش انجام شد، کاهش الکتروکاتالیستی مؤثر CO₂ بر سطح طلای چندبلوری با محلول‌های آبی NaHCO₃ و Na₂SO₄ صورت گرفت و نقش نانوذره‌های مس در این فرایند بررسی شد [۸۸]. همچنین، مطالعه‌ای توسط گائو بر قابلیت اقتصادی فرایندهای متفاوت شیرین‌سازی در کشورهای در حال توسعه نشان داد که این‌گونه مناطق، به‌ویژه کشورهایی با اقلیم خشک و ساحلی، نیاز فزاینده‌ای به منابع آبی شیرین خواهند داشت. پیش‌بینی شده

1. Alsohaimi

2. Seawater reverse osmosis (SWRO)

ترموکلاین شناخته می‌شود و کارایی MED که با این انرژی کار می‌کند، نسبت به روش‌های سنتی دو برابر شده است. این روش به‌عنوان یک راهکار سبزتر و کارآمدتر از نظر انرژی ثابت شده است [۹۱].

چشم‌انداز آینده انرژی تجدیدپذیر و نانوماده‌ها برای شیرین‌سازی

ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در صنعت شیرین‌سازی آب برای مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت فراوانی دارد. استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌تواند تأثیرهای منفی زیست‌محیطی ناشی از سامانه‌های شیرین‌سازی را کاهش دهد. با اینکه سامانه‌های شیرین‌سازی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور معمول ظرفیت پایداری دارند، ولی پتانسیل بالایی برای توسعه و بهبود از راه پژوهش‌های بیشتر دارند که می‌تواند آن‌ها را به گزینه‌هایی اقتصادی‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست تبدیل کند [۹۲]. بررسی سمی بودن فاضلاب تولیدی این واحدها می‌تواند با آزمایش‌های سمی بودن کل فاضلاب (WET) انجام شود، و پیش‌بینی خطرهای احتمالی برای گونه‌های دریایی در محل خاص پیش از بهره‌برداری میسر خواهد بود. هرچند این روش به‌دلیل محدودیت در تعداد گونه‌های بررسی‌شده و زمان‌بر بودن آزمایش‌ها با چالش‌هایی همراه است، ولی همچنان ابزاری مؤثر برای ارزیابی تأثیرهای زیست‌محیطی فاضلاب واحدهای شیرین‌سازی به حساب می‌آید [۹۳]. فناوری کارخانه‌های شیرین‌سازی آینده بر استفاده از نانومواد و انرژی خورشیدی متمرکز خواهد بود. جدول ۴، مزایا و چالش‌های ناشی از بهره‌گیری از انرژی خورشیدی، نانومواد و رویکردهای یکپارچه در فرایند شیرین‌سازی را به اختصار ارائه کرده است.

می‌شود؛ آب آشامیدنی دارای سطح نرمال TDS بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm است. آب شور به‌طورمعمول TDS بین ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ ppm دارد و آب دریای معمولی به‌طور میانگین TDS بیشتر از ۲۵۰۰۰ ppm دارد.

نسبت کارایی جهانی (UPR)

گروهی از پژوهشگران در دانشگاه ملک عبدالله روشی استاندارد برای تحلیل همه فرایندهای شیرین‌سازی که با نیروگاه‌های گرمایی ترکیب شده‌اند، توسعه داده‌اند. آن‌ها این روش را نسبت کارایی جهانی نام‌گذاری کردند که کارایی کیفی فرایندهای متفاوت شیرین‌سازی همراه با واحدهای گرمایی را می‌سنجد. تخمین‌ها نشان می‌دهد که توزیع هزینه سوخت برای هردو بخش طراحی ترکیبی، با نیازهای ویژه آن‌ها همخوانی ندارد. روش‌های ارزیابی سنتی قادر نبودند کیفیت انرژی و سوخت مصرفی در این سامانه‌های چندمنظوره را به‌طور کامل در نظر بگیرند. اساس روش جدید ارزیابی، بر انرژی اولیه لازم برای کارایی این سامانه‌های ترکیبی متمرکز است. بررسی‌ها نشان داده که هر فرایند شیرین‌سازی که تحت ارزیابی باشد، باید نسبت کارکردی بیش از ۳۰ درصد را برای دستیابی به کارایی بالاتر و تحقق اهداف پایداری کسب کند [۹۰]. بهبود می‌تواند از ترکیب فرایندهای متفاوت شیرین‌سازی یا استفاده از غشاهای با کیفیت برای تصفیه آب ورودی به‌دست آید. برپایه گفته‌ها، نسبت کارایی جهانی در همه روش‌های شیرین‌سازی کمتر از ۱۲ درصد است، در حالی که حد ترمودینامیکی (TL) دارای مقدار آرمانی ۸۲۸ است. برای بهبود پایداری، TL باید دارای مقدار UPR بیش از ۳۰ درصد باشد. همچنین، سامانه MED که کارایی آن بررسی شده است، از شیو دما بین سطح گرم و عمق‌های سرد آب دریا استفاده می‌کند. انرژی به‌دست‌آمده از این شیو دما به‌عنوان انرژی

جدول ۴ مزایا و معایب فرایندهای شیرین سازی

مزایا	معایب	فناوری نمک زدایی
بدون هزینه محیط زیستی	هزینه نصب بالا	مبتنی بر خورشیدی
بسیار کارآمد در طول روز	بازدهی کم در شب یا هوای ابری	
مواد تغییر فاز می توانند در شب انرژی گرمایی فراهم کنند.	نرخ تولید پایین تقطیر خورشیدی	نانومواد
قابل ادغام با هر روش نمک زدایی	سلول های فتوولتائیک خورشیدی گران قیمت	
قابل تبدیل به انرژی گرمایی/الکتریکی	گرم شدن سلول های PV	
سطح تماس بالا	گرفتگی غشاها	
تخلخل گسترده	pH بر نفوذپذیری تأثیر می گذارد.	
استحکام کششی	تعاملات آبریز	
پایداری گرمایی	تجمع نمک ها/اشباع	
رسانای خوب	بازدهی با گذشت زمان کاهش می یابد.	نیم رسانا
فوتوکاتالیستی	امکان گرم شدن	
فوتوترمال	ناخالصی ها کارایی را کاهش می دهند.	
هدایت در امتداد یک صفحه	واکنش های وابسته به دما	
ذخیره انرژی الکتریکی/گرمایی	اتلاف انرژی ناشی از نشت	
قابل اعتماد برای مدت طولانی	قابل استفاده با روش های خاص	
نیاز به انرژی کمتر	هزینه سرمایه گذاری بالا	سامانه های یکپارچه
مقرون به صرفه	وابسته به مکان	
تأمین انرژی تجدیدپذیر و آب تمیز	شرایط آب و هوایی بر تولید تأثیر می گذارد.	فناوری های میکروبی
بدون اتلاف انرژی	امکان بروز خطاهای فنی	
تأثیر بسیار کم بر محیط زیست	امکان فرسودگی قطعات مکانیکی	
عدم وقوع هوپرورش	نیاز به تجهیزات گران قیمت	
از بین بردن عوامل عفونی	در بسیاری از موارد پراثری	
حذف نیترژن و فسفر	نیاز به کلونی های باکتریایی ویژه	
تولید آب با کیفیت بالا	امکان رشد باکتری در داخل سامانه	
عدم تخلیه پساب	تغییرهای pH و دما مشکلاتی ایجاد می کنند.	

نانوسیال ها و نانوذره های پیشرفته همچون SiC، توانسته است بازده گرمایی و بازدهی فرایندهای شیرین سازی خورشیدی را به طور چشمگیری افزایش دهد. استفاده از این نانوذره ها به دلیل ویژگی هایی مانند رسانندگی گرمایی بالا، دوام مکانیکی و گرمایی، و هزینه به نسبت مناسب، قابلیت چشمگیری برای ارتقاء کارایی واحدهای شیرین سازی فراهم کرده است. در آینده، واحدهای شیرین سازی مبتنی بر نانوسیال ها نه تنها قادر

چشم انداز آینده شیرین سازی آب با تکیه بر نانوفناوری و انرژی های تجدیدپذیر

در پاسخ به بحران جهانی کم آبی، توسعه راهکارهای پایدار و کارآمد در صنعت شیرین سازی آب بیش از پیش اهمیت یافته است. آینده این صنعت به طور فزاینده ای به سمت ادغام فناوری نانو و بهره گیری از انرژی های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی خورشیدی، سوق پیدا کرده است. نانوفناوری با معرفی

سامانه‌های هوشمند، پایدار و کم‌مصرف خواهد بود؛ سامانه‌هایی که در آن‌ها تلفیق نانوفناوری و انرژی تجدیدپذیر، پاسخگوی نیازهای فزاینده بشر به آب سالم، در کنار حفظ محیط‌زیست و بهره‌وری اقتصادی خواهد بود. این چشم‌انداز، نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای، سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه و سیاست‌گذاری هوشمندانه در سطح ملی و جهانی است.

نتیجه‌گیری

ادغام فناوری‌های نوین، به‌ویژه نانومواد و انرژی‌های تجدیدپذیر، نویدبخش تحولی اساسی در صنعت شیرین‌سازی آب است. بهره‌گیری از نانوسیال‌ها و غشاهای نانوپور می‌تواند بازده واحدهای خورشیدی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد و هم‌زمان انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد. این پیشرفت‌ها به‌ویژه در مناطق کم‌آب و آسیب‌پذیر، نقشی کلیدی در تأمین آب آشامیدنی ایفا می‌کنند. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه، چالش‌هایی همچون ارزیابی اثرهای زیست‌محیطی نانوذره‌ها، هزینه اولیه بالا، و محدودیت مقیاس‌پذیری، همچنان پابرجاست. در نتیجه، ادامه پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، توسعه طراحی‌های نوآورانه، و بررسی جامع پایداری این فناوری‌ها برای دستیابی به راهکارهایی مقرون‌به‌صرفه، ایمن و پایدار لازم است. آینده شیرین‌سازی آب، در گرو هم‌افزایی علم نانو، انرژی پاک و سیاست‌گذاری هوشمندانه خواهد بود.

خواهند بود آب با کیفیت بالا تولید کنند، بلکه با کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن دی‌اکسید، اثرهای زیست‌محیطی ناشی از فرایند را نیز به کمینه خواهند رساند. همچنین، توسعه غشاهای نانوپور با ویژگی فتوکاتالیستی و نفوذپذیری انتخابی، امکان جداسازی مؤثر یون‌ها و آلاینده‌ها را فراهم ساخته و زمینه را برای طراحی سامانه‌های هوشمندتر، با توان عملیاتی بالا و مصرف انرژی پایین مهیا می‌سازد. از سوی دیگر، انرژی خورشیدی به‌عنوان منبعی پایدار، پاک و قابل‌دسترس، ستون اصلی آینده شیرین‌سازی خواهد بود. ترکیب این منبع انرژی با فناوری نانو، به ایجاد واحدهایی منجر خواهد شد که نه تنها به شبکه‌های برقی متکی نیستند، بلکه در مناطق دورافتاده و محروم نیز قابلیت استقرار دارند. با توسعه واحدهای جدیدی مانند سامانه‌های خورشیدی ردیاب، آبشارها و مدل‌های نیم‌کره‌ای، طراحی‌های آینده، منعطف‌تر و متناسب با شرایط اقلیمی متفاوت خواهند بود. با این حال، آینده این فناوری‌ها نیازمند غلبه بر چالش‌هایی است. برای مثال، می‌توان به ارزیابی چرخه عمر واحدها، بررسی اثرهای احتمالی نانوذره‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست، تعیین غلظت‌های بهینه نانوذره‌ها در شرایط عملیاتی متنوع، و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، اشاره کرد. همچنین، توسعه زیرساخت‌های پایش و آزمایش‌های زیست‌محیطی همچون آزمون WET برای واپایش سمی بودن فاضلاب خروجی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در مجموع، آینده صنعت شیرین‌سازی آب در گرو حرکت به سوی

مراجع

- [1] Mirzaee M, Mohebbi T, Hamedanian M. Nanomaterials in the production of green hydrogen: Technical perspectives on the selection of nanomaterials, characteristics, production methods, and commercial applications. *Journal of Applied Research in Chemistry*. 2025;18(4):1-16. doi: 10.30495/JACR1.1403.1125887
- [2] Mirzaee M, Mohebbi T. A Review of the application of nanomaterials in biomass conversion to biofuel. *The Application of Chemistry in Environment*. 2024;15(58):27-46.
- [3] Pourkhalil M, Rashidi A, Mahmoudabadi ZS, Mirzaee M, Babakhani EG, Esmaeili M, et al. Catalytic reduction of SO₂ to elemental sulfur with methane over CuOx/γ-Al₂O₃ catalysts. *Scientific Reports*. 2025;15(1):5907. doi: org/ 10.1038/s41598-025-86972-2

- [4] Mirzaee M, Rezaei Abadchi M. Aerogels: A new generation of high-temperature thermal insulators for power plant applications. *Advanced Materials and New Coatings*. 2024;12(47):300-22. doi: **org/10.22034/amnc.2025.479068.1272**
- [5] Mohebbi T, Mirzaee M, Hamadani M. Properties of MXene and its synthesis methods. *Advanced Materials and New Coatings*. 2024;12(45):1-22. doi: **org/10.22034/amnc.2023.412789.1249**
- [6] Mirzaee M, Mohebbi T, Hamadani Khozani M, Golmohammad M. A Review of anti-soiling coatings for improving the performance of photovoltaic panels. *Advanced Materials and New Coatings*. 2024;12(47):224-44. doi: **org/10.22034/amnc.2024.454505.1264**
- [7] Mirzaee M, Rezaei Abadchi M, Rashidi A. A Review of the application of two-dimensional nanosheets as a reinforcement to increase the corrosion resistance of polymer coatings. *Journal of Studies in Color World*. 2023;13(2):95-132. doi: **org/ 20.1001.1.22517278.1402.13.2.1.5**
- [8] Mirzaee M, Mohebbi T. A review of anti-corrosion and erosion protective coatings in offshore wind power devices. *Journal of Studies in Color World*. 2024;14(2):133-59. doi: **org/10.30509/JSCW.2024.82001**
- [9] Abdi N, Rashidi A, Samipoorgiri M, Mirzaee M, Anvari A, Yousefpour A. Nano-dendritic growth by electrodeposition method for improvement of heat transfer in plate and frame heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2024;257:124260. doi: **org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124260**
- [10] Mirzaee M, Abdadchi MR, Rashidi A. Nanofluids in transformer insulation: Preparation, performance, and future prospects. *Chemistry and Nanochemistry*. 2025;3(3):70-94. doi: **org/10.71508/crn.2024.140310261196581**
- [11] Alshahrani AA, Algamdi MS, Alsohaimi IH, Nghiem LD, Tu KL, Al-Rawajfeh AE, in het Panhuis M. The rejection of mono-and di-valent ions from aquatic environment by MWNT/chitosan buckypaper composite membranes: Influences of chitosan concentrations. *Separation and Purification Technology*. 2020;234:116088. doi: **org/10.1016/j.seppur.2019.116088**
- [12] Nurkhamidah S, Rahmawati Y, Taufany F, Merta IMPA, Putra DDD, Woo EM. Effect of silica particle size in cellulose membrane for desalination process. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1699(1):020019. doi: **org/10.1063/1.4938373**
- [13] Lee J-G, Kim W-S, Choi J-S, Ghaffour N, Kim Y-D. Dynamic solar-powered multi-stage direct contact membrane distillation system: Concept design, modeling and simulation. *Desalination*. 2018;435:278-92. doi: **org/10.1016/j.desal.2017.04.008**
- [14] Oviroh PO, Akbarzadeh R, Jen T-C. Biomimetic membrane simulation for water desalination. In: *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 10: Micro- and Nano-Systems Engineering and Packaging*. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers. November 9–15, 2018. V010T13A003. ASME. doi: **org/10.1115/imece2018-86664**
- [15] Ray SS, Chen S-S, Chang H-M, Thanh CND, Le HQ, Nguyen NC. Enhanced desalination using a three-layer OTMS based superhydrophobic membrane for a membrane distillation process. *RSC Advances*. 2018;8(18):9640-50. doi: **org/ 10.1039/c8ra01043a**
- [16] Ng KC, Thu K, Kim Y, Chakraborty A, Amy G. Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method. *Desalination*. 2013;308:161-79. doi: **org/10.1016/j.desal.2012.07.030**
- [17] Mitra S, Srinivasan K, Kumar P, Murthy S, Dutta P. Solar driven adsorption desalination system. *Energy Procedia*. 2014;49:2261-9. doi: **org/ 10.1016/j.egypro.2014.03.239**
- [18] Thu K, Chakraborty A, Saha BB, Ng KC. Thermo-physical properties of silica gel for adsorption desalination cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2013;50(2):1596-602.

- doi: org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.038**
- [19] Thu K, Chakraborty A, Kim Y-D, Myat A, Saha BB, Ng KC. Numerical simulation and performance investigation of an advanced adsorption desalination cycle. *Desalination*. 2013;308:209-18. **doi: org/10.1016/j.desal.2012.04.021**
- [20] Thu K, Kim Y-D, Shahzad MW, Saththasivam J, Ng KC. Performance investigation of an advanced multi-effect adsorption desalination (MEAD) cycle. *Applied Energy*. 2015;159:469-77. **doi: org/10.1016/j.apenergy.2015.09.035**
- [21] Kabeel A, Omara Z, Essa F. Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: an experimental approach. *Energy Conversion and Management*. 2014;78:493-8. **doi: org/10.1016/j.enconman.2013.11.013**
- [22] Muraleedharan M, Singh H, Udayakumar M, Suresh S. Modified active solar distillation system employing directly absorbing Therminol 55-Al₂O₃ nano heat transfer fluid and Fresnel lens concentrator. *Desalination*. 2019;457:32-8. **doi: org/10.1016/j.desal.2019.01.024**
- [23] Karthikeyan J, Selvaraj P, Nagaraj G. Day and night yield performance analysis of solar still for saline water using energetic materials with thermocol insulation. *Materials Today: Proceedings*. 2020;33:4848-51. **doi: org/10.1016/j.matpr.2020.08.395**
- [24] Shanmugan S, Palani S, Janarthanan B. Productivity enhancement of solar still by PCM and Nanoparticles miscellaneous basin absorbing materials. *Desalination*. 2018;433:186-98. **doi: org/10.1007/978-981-10-4286-7_70**
- [25] Thakur AK, Agarwal D, Khandelwal P, Dev S. Comparative study and yield productivity of nano-paint and nano-fluid used in a passive-type single basin solar still. In: *Advances in smart grid and renewable energy: Proceedings of ETAEERE-2016*. Singapore: Springer; 2017. **doi: org/10.1007/978-981-10-4286-7_70**
- [26] Arora S, Singh HP, Sahota L, Arora MK, Arya R, Singh S, et al. Performance and cost analysis of photovoltaic thermal (PVT)-compound parabolic concentrator (CPC) collector integrated solar still using CNT-water based nanofluids. *Desalination*. 2020;495:114595. **doi: org/10.1016/j.desal.2020.114595**
- [27] Sharshir SW, Eltawil MA, Algazzar AM, Sathyamurthy R, Kandeal A. Performance enhancement of stepped double slope solar still by using nanoparticles and linen wicks: energy, exergy and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2020;174:115278. **doi: org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115278**
- [28] Sahota L, Arora S, Singh HP, Sahoo G. Thermo-physical characteristics of passive double slope solar still loaded with MWCNTs and Al₂O₃-water based nanofluid. *Materials Today: Proceedings*. 2020;32:344-9. **doi: org/10.1016/j.matpr.2020.01.600**
- [29] Sahota L, Tiwari G. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on the performance of passive double slope solar still. *Solar Energy*. 2016;130:260-72. **doi: org/10.1016/j.solener.2016.02.018**
- [30] Nazari S, Safarzadeh H, Bahiraei M. Performance improvement of a single slope solar still by employing thermoelectric cooling channel and copper oxide nanofluid: an experimental study. *Journal of Cleaner Production*. 2019;208:1041-52. **doi: org/10.1016/j.jclepro.2018.10.194**
- [31] Bahiraei M, Nazari S, Moayedi H, Safarzadeh H. Using neural network optimized by imperialist competition method and genetic algorithm to predict water productivity of a nanofluid-based solar still equipped with thermoelectric modules. *Powder Technology*. 2020;366:571-86. **doi: org/10.1016/j.powtec.2020.02.055**
- [32] Abdullah A, Essa F, Omara Z, Rashid Y, Hady-Taieb L, Abdelaziz GB, et al. Rotating-drum solar still with enhanced evaporation and condensation techniques: Comprehensive study. *Energy Conversion and Management*. 2019;199:112024. **doi: org/10.1016/j.enconman.2019.112024**

- [33] Abdullah A, Essa FA, Bacha HB, Omara Z. Improving the trays solar still performance using reflectors and phase change material with nanoparticles. *Journal of Energy Storage*. 2020;31:101744. doi: [org/10.1016/j.est.2020.101744](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101744)
- [34] Arunkumar T, Wang J, Rufuss DDW, Denkenberger D, Kabeel A. Sensible desalting: Investigation of sensible thermal storage materials in solar stills. *Journal of Energy Storage*. 2020;32:101824. doi: [org/10.1016/j.est.2020.101824](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101824)
- [35] Behura A, Gupta HK. Use of nanoparticle-embedded phase change material in solar still for productivity enhancement. *Materials Today: Proceedings*. 2021;45:3904-7. doi: [org/10.1016/j.matpr.2020.06.285](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.285)
- [36] Shelare S, Belkhode P, Nikam KC, Yelamasetti B, Gajbhiye T. A payload based detail study on design and simulation of hexacopter drone. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024;18(5):2675-92. doi: [org/10.1007/s12008-023-01269-w](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01269-w)
- [37] Kabeel AE, Sathyamurthy R, Sharshir SW, Muthumanokar A, Panchal H, Prakash N, et al. Effect of water depth on a novel absorber plate of pyramid solar still coated with TiO₂ nano black paint. *Journal of cleaner production*. 2019;213:185-91. doi: [org/10.1016/j.jclepro.2018.12.185](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.185)
- [38] Rufuss DDW, Suganthi L, Iniyan S, Davies P. Effects of nanoparticle-enhanced phase change material (NPCM) on solar still productivity. *Journal of Cleaner Production*. 2018;192:9-29. doi: [org/10.1016/j.jclepro.2018.04.201](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.201)
- [39] Thalib MM, Manokar AM, Essa FA, Vasimalai N, Sathyamurthy R, Garcia Marquez FP. Comparative study of tubular solar stills with phase change material and nano-enhanced phase change material. *Energies*. 2020;13(15):3989. doi: [org/10.3390/en13153989](https://doi.org/10.3390/en13153989)
- [40] Elango T, Kannan A, Murugavel KK. Performance study on single basin single slope solar still with different water nanofluids. *Desalination*. 2015;360:45-51. doi: [org/10.1016/j.desal.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.004)
- [41] Chen W, Zou C, Li X, Li L. Experimental investigation of SiC nanofluids for solar distillation system: Stability, optical properties and thermal conductivity with saline water-based fluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;107:264-70. doi: [org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.048](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.048)
- [42] Saleh SM, Soliman AM, Sharaf MA, Kale V, Gadgil B. Influence of solvent in the synthesis of nano-structured ZnO by hydrothermal method and their application in solar-still. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2017;5(1):1219-26. doi: [org/10.1016/j.jece.2017.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.004)
- [43] Balachandran GB, David PW, Mariappan RK, Kabeel AE, Athikesavan MM, Sathyamurthy R. Improvising the efficiency of single-sloped solar still using thermally conductive nano-feric oxide. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:32191-204. doi: [org/10.1007/s11356-019-06661-2](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06661-2)
- [44] Mahian O, Kianifar A, Heris SZ, Wen D, Sahin AZ, Wongwises S. Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger. *Nano Energy*. 2017;36:134-55. doi: [org/10.1016/j.nanoen.2017.04.025](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.025)
- [45] Zanganeh P, Goharrizi AS, Ayatollahi S, Feilizadeh M. Nano-coated condensation surfaces enhanced the productivity of the single-slope solar still by changing the condensation mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2020;265:121758. doi: [org/10.1016/j.jclepro.2020.121758](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121758)
- [46] Zanganeh P, Goharrizi AS, Ayatollahi S, Feilizadeh M, Dashti H. Efficiency improvement of solar stills through wettability alteration of the condensation surface: An experimental study. *Applied Energy*. 2020;268:114923. doi: [org/10.1016/j.apenergy.2020.114923](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114923)
- [47] Zanganeh P, Goharrizi AS, Ayatollahi S, Feilizadeh M. Productivity enhancement of solar stills by nano-coating of condensing

- surface. *Desalination*. 2019;454:1-9. doi: [org/10.1016/j.desal.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.007)
- [48] Parsa SM, Rahbar A, Koleini M, Javadi YD, Afrand M, Rostami S, et al. First approach on nanofluid-based solar still in high altitude for water desalination and solar water disinfection (SODIS). *Desalination*. 2020;491:114592. doi: [org/10.1016/j.desal.2020.114592](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114592)
- [49] Parsa SM, Rahbar A, Koleini M, Aberoumand S, Afrand M, Amidpour M. A renewable energy-driven thermoelectric-utilized solar still with external condenser loaded by silver/nanofluid for simultaneously water disinfection and desalination. *Desalination*. 2020;480:114354. doi: [org/10.1016/j.desal.2020.114354](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114354)
- [50] Shanmugan S, Essa F, Gorjian S, Kabeel A, Sathyamurthy R, Manokar AM. Experimental study on single slope single basin solar still using TiO₂ nano layer for natural clean water invention. *Journal of Energy Storage*. 2020;30:101522. doi: [org/10.1016/j.est.2020.101522](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101522)
- [51] Sahota L, Tiwari G. Energy matrices, enviroeconomic and exergoeconomic analysis of passive double slope solar still with water based nanofluids. *Desalination*. 2017;409:66-79. doi: [org/10.1016/j.desal.2017.01.012](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.012)
- [52] Kabeel A, Sathyamurthy R, Manokar AM, Sharshir SW, Essa F, Elshiekh AH. Experimental study on tubular solar still using graphene oxide nanoparticles in phase change material (NPCM's) for fresh water production. *Journal of Energy Storage*. 2020;28:101204. doi: [org/10.1016/j.est.2020.101204](https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101204)
- [53] Teow YH, Mohammad AW. New generation nanomaterials for water desalination: A review. *Desalination*. 2019;451:2-17. doi: [org/10.1016/j.desal.2017.11.041](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.041)
- [54] Dongre RS. Rationally fabricated nanomaterials for desalination and water purification. In: Kyzas GZ, Mitropoulos AC, editors. *Novel Nanomaterials - Synthesis and Applications* [Internet]. InTech; 2018. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70149>
- [55] Daer S, Kharraz J, Giwa A, Hasan SW. Recent applications of nanomaterials in water desalination: A critical review and future opportunities. *Desalination*. 2015;367:37-48. doi: [org/10.1016/j.desal.2015.03.030](https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.030)
- [56] Yan Y, Yang H, Yi Z, Xian T, Li R, Wang X. Construction of Ag₂S@CaTiO₃ heterostructure photocatalysts for enhanced photocatalytic degradation of dyes. *Desalination and Water Treatment*. 2019;170:349-60. doi: [org/10.5004/dwt.2019.24747](https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24747)
- [57] Yusoff N, Ho L-N, Ong S-A, Wong Y-S, Khalik W. Photocatalytic activity of zinc oxide (ZnO) synthesized through different methods. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(27):12496-507. doi: [org/10.1080/19443994.2015.1054312](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1054312)
- [58] Mahmoodi NM, Mokhtari-Shourijeh Z. Preparation of PVA-chitosan blend nanofiber and its dye removal ability from colored wastewater. *Fibers and Polymers*. 2015;16:1861-9. doi: [org/10.1007/s12221-015-5371-1](https://doi.org/10.1007/s12221-015-5371-1)
- [59] Zhao Q, Chen N, Zhao D, Lu X. Thermoresponsive magnetic nanoparticles for seawater desalination. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2013;5(21):11453-61. doi: [org/10.1021/am403719s](https://doi.org/10.1021/am403719s)
- [60] Mahdizadeh SJ, Goharshadi EK, Akhlagi G. Seawater desalination using pillared graphene as a novel nano-membrane in reverse osmosis process: Nonequilibrium MD simulation study. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2018;20(34):22241-8. doi: [org/10.1039/c8cp02820f](https://doi.org/10.1039/c8cp02820f)
- [61] Baek Y, Kim C, Seo DK, Kim T, Lee JS, Kim YH, et al. High performance and antifouling vertically aligned carbon nanotube membrane for water purification. *Journal of Membrane Science*. 2014;460:171-7. doi: [org/10.1016/j.memsci.2014.02.042](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.02.042)
- [62] Porada S, Shrivastava A, Bukowska P, Biesheuvel P, Smith KC. Nickel hexacyanoferrate electrodes for continuous cation intercalation desalination of brackish

- water. *Electrochimica Acta*. 2017;255:369-78. doi: [org/10.1016/j.electacta.2017.09.137](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.09.137)
- [63] Huang Y, Chen F, Guo L, Zhang J, Chen T, Yang HY. Low energy consumption dual-ion electrochemical deionization system using $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ -AgNPs electrodes. *Desalination*. 2019;451:241-7. doi: [org/10.1016/j.desal.2018.02.006](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.02.006)
- [64] Xue Y, Xie J, He M, Liu M, Xu M, Ni W, et al. Porous and high-strength graphitic carbon/SiC three-dimensional electrode for capacitive deionization and fuel cell applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018;6(39):19210-20. doi: [org/10.1039/c8ta06657d](https://doi.org/10.1039/c8ta06657d)
- [65] Kim IS, Hwang CW, Kim YJ, Canlier A, Jeong KS, Hwang TS. Synthesis of polyketone-g-sodium styrene sulfonate cation exchange membrane via irradiation and its desalination properties. *Macromolecular Research*. 2017;25:1063-9. doi: [org/10.1007/s13233-017-5145-2](https://doi.org/10.1007/s13233-017-5145-2)
- [66] Muller KR. Electrochemically mediated removal of nitrate on granular activated carbon [dissertation]. [Riverside]: University of California; 2016.
- [67] Huang Z-H, Zheng X, Lv W, Wang M, Yang Q-H, Kang F. Adsorption of lead (II) ions from aqueous solution on low-temperature exfoliated graphene nanosheets. *Langmuir*. 2011;27(12):7558-62. doi: [org/10.1021/la200606r](https://doi.org/10.1021/la200606r)
- [68] Jeon YS, Cheong SI, Rhim JW. Design shape of CDI cell applied with APSf and SPEEK and performance in MCDI. *Macromolecular Research*. 2017;25:712-21. doi: [org/10.1007/s13233-017-5064-2](https://doi.org/10.1007/s13233-017-5064-2)
- [69] Suss ME, Porada S, Sun X, Biesheuvel PM, Yoon J, Presser V. Water desalination via capacitive deionization: What is it and what can we expect from it? *Energy & Environmental Science*. 2015;8(8):2296-319. doi: [org/10.1039/c5ee00519a](https://doi.org/10.1039/c5ee00519a)
- [70] Ahmad F, Khan SJ, Jamal Y, Kamran H, Ahsan A, Ahmad M, et al. Desalination of brackish water using capacitive deionization (CDI) technology. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(17):7659-66. doi: [org/10.1080/19443994.2015.1037357](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1037357)
- [71] Kabeel AE, Abdelgaied M, editors. Minimizing energy consumption in reverse osmosis desalination using renewable energy sources: A review. In: *AIP Conference Proceedings*; Melville (NY): AIP Publishing. 2019. doi: [org/10.1063/1.5120148](https://doi.org/10.1063/1.5120148)
- [72] Elminshawy NA, Siddiqui FR, Sultan GI. Development of a desalination system driven by solar energy and low grade waste heat. *Energy Conversion and Management*. 2015;103:28-35. doi: [org/10.1016/j.enconman.2015.06.035](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.035)
- [73] Wu L, Hu Y, Gao C. Optimum design of cogeneration for power and desalination to satisfy the demand of water and power. *Desalination*. 2013;324:111-7. doi: [org/10.1016/j.desal.2013.06.006](https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.006)
- [74] Mentis D, Karalis G, Zervos A, Howells M, Taliotis C, Bazilian M, et al. Desalination using renewable energy sources on the arid islands of South Aegean Sea. *Energy*. 2016;94:262-72. doi: [org/10.1016/j.energy.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.003)
- [75] Paul P, Al Tenaiji AK, Braimah N. A review of the water and energy sectors and the use of a nexus approach in Abu Dhabi. *International journal of environmental research and public health*. 2016;13(4):364. doi: [org/10.3390/ijerph13040364](https://doi.org/10.3390/ijerph13040364)
- [76] Dhivagar R, Sundararaj S. A review on methods of productivity improvement in solar desalination. *Applied Mechanics and Materials*. 2018;877:414-29. doi: [org/10.4028/www.scientific.net/amm.877.414](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.877.414)
- [77] Mirzaee M, yousefpour a, Mohebbi T. A review of methods for controlling and monitoring microbial corrosion in power plant cooling sections. *Farayandno*. 2024;19(85):20-36. doi: [org/10.22034/farayandno.2024.2027039.1959](https://doi.org/10.22034/farayandno.2024.2027039.1959)
- [78] Demir NM, Debik E, Ozkaya B, Coskun T. Comparison of microbial community structure in a biological nutrient removal process at various stages of operation. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(50):23675-85. doi: [org/10.1080/19443994.2015.1137494](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1137494)
- [79] Afsharnia M, Kianmehr M, Narooie MR, Mehrizi EA. Chemical oxygen demand and microbial inactivation in dairy wastewater

- treatment by solar photocatalyst process. *Pollution Research*. 2017;36(3):462-73. doi: **org/10.1021/acs.langmuir.5c00454.s001**
- [80] Ramirez-Moreno M, Rodenas P, Aliaguilla M, Bosch-Jimenez P, Borràs E, Zamora P, et al. Comparative performance of microbial desalination cells using air diffusion and liquid cathode reactions: study of the salt removal and desalination efficiency. *Frontiers in Energy Research*. 2019;7:135. doi: **org/10.3389/fenrg.2019.00135**
- [81] Sharshir SW, Peng G, Wu L, Yang N, Essa F, Elsheikh A, et al. Enhancing the solar still performance using nanofluids and glass cover cooling: experimental study. *Applied thermal engineering*. 2017;113:684-93. doi: **org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.085**
- [82] Kabeel AE, Omara Z, Essa F. Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2017;75:77-86. doi: **org/10.1016/j.jtice.2017.01.017**
- [83] Sain MK, Kumawat G. Performance enhancement of single slope solar still using nano-particles mixed black paint. *Adv Nanosci Technol Int J*. 2015;1:55-65. doi: **org/10.70528/ijlrp.v6.i6.1592**
- [84] Gupta B, Shankar P, Sharma R, Baredar P. Performance enhancement using nano particles in modified passive solar still. *Procedia Technology*. 2016;25:1209-16. doi: **org/10.1016/j.protcy.2016.08.208**
- [85] World Bank. The role of desalination in an increasingly water-scarce world. Washington, DC: World Bank; 2019. doi: **10.1596/31416**
- [86] Kabeel AE, Omara ZM, Essa F, Abdullah A, Arunkumar T, Sathyamurthy R. Augmentation of a solar still distillate yield via absorber plate coated with black nanoparticles. *Alexandria Engineering Journal*. 2017;56(4):433-8. doi: **org/10.1016/j.aej.2017.08.014**
- [87] Youssef P, Al-Dadah R, Mahmoud S. Comparative analysis of desalination technologies. *Energy Procedia*. 2014;61:2604-7. doi: **org/10.1016/j.egypro.2014.12.258**
- [88] Alsohaimi IH, Awad MI, Alshammari MS, Kassem MA. On the electrocatalytic reduction of CO₂ using Cu-nanoparticles decorating Au electrode. *Desalination and Water Treatment*. 2020;184:225-31. doi: **org/10.5004/dwt.2020.25373**
- [89] Gao L, Yoshikawa S, Iseri Y, Fujimori S, Kanae S. An economic assessment of the global potential for seawater desalination to 2050. *Water*. 2017;9(10):763. doi: **org/10.3390/w9100763**
- [90] Shahzad MW, Burhan M, Son HS, Oh SJ, Ng KC. Desalination processes evaluation at common platform: a universal performance ratio (UPR) method. *Applied Thermal Engineering*. 2018;134:62-7. doi: **org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.098**
- [91] Shahzad MW, Burhan M, Ghaffour N, Ng KC. A multi evaporator desalination system operated with thermocline energy for future sustainability. *Desalination*. 2018;435:268-77. doi: **org/10.1016/j.desal.2017.04.013**
- [92] Sipahutar R, Bernas SM, Imanuddin MS. Renewable energy and hydropower utilization tendency worldwide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;17:213-5. doi: **org/10.1016/j.rser.2012.09.010**
- [93] Falkenberg LJ, Styan CA. The use of simulated whole effluents in toxicity assessments: A review of case studies from reverse osmosis desalination plants. *Desalination*. 2015;368:3-9. doi: **org/10.1016/j.desal.2015.01.014**

Application of nanotechnology in optimizing solar water desalination systems: A step toward sustainable development based on renewable energy

M. Mirzaee

Assistant prof. of Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract: This paper provides a comprehensive review of the role of nanotechnology in enhancing solar water desalination systems with a renewable energy-based approach, highlighting the need for continuous research to achieve more economical and sustainable technologies. Water desalination, as a fundamental solution to the global water crisis, has gained significant attention in recent years. Technological advancements particularly in the fields of nanotechnology and renewable energy, have opened new path for the development of sustainable and cost-effective water desalination units. The use of nanomaterials and nanofluids in distillation and filtration systems enhances operational efficiency, reduces dependency on climatic conditions, and improves overall process performance. On the other hand, the utilization of renewable energy sources such as solar, wind, geothermal, and biomass presents an effective alternative to costly and polluting fossil fuels. Specifically, nanofluids play a crucial role in optimizing solar distillation units, and nanoengineered membranes with nanoporous structures have demonstrated promising capabilities in salt removal and freshwater production. Despite these encouraging achievements, challenges such as the gradual decline in membrane performance, operational costs, and energy consumption persist.

Keywords: Solar Desalination, Nanotechnology, Nanoparticles, Renewable Energy, Nanofluids.