



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Self-Cleaning Solar Evaporation System Based on Engineered Wood for Sustainable Desalination

Behzad Naghdi, Farid Mahjoub, Farzaneh Arabpour Roghabadi *

Process Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

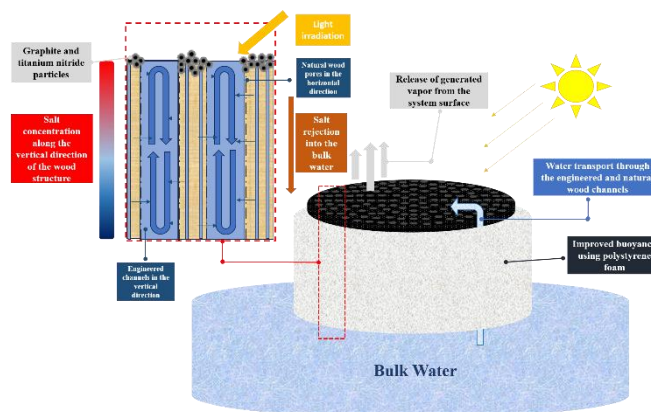
ARTICLE INFO

Received 2026-01-10
Revised 2026-01-19
Accepted 2026-01-24
Available online 2026-09-01
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Seawater Desalination
Solar Steam Generation System
Hydraulic Conductivity
Self-Cleaning System
Engineered Wood

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Solar desalination based on interfacial evaporation has emerged as a promising strategy for mitigating global freshwater shortages due to its high solar-to-vapor conversion efficiency, low environmental footprint, and suitability for remote or off-grid deployment. However, salt accumulation at the evaporation interface, particularly from highly soluble species, significantly reduces vapor generation and undermines long-term system stability. Therefore, developing self-cleaning structures capable of maintaining continuous water transport while preventing salt crystallization is essential for practical field operation.

Research approach: This study develops a self-cleaning solar evaporator based on engineered sycamore wood and systematically evaluates its desalination performance. For this purpose, four systems are designed and fabricated, including a reference sample without artificial channels and three systems incorporating vertical channels with diameters of 1.0, 1.5, and 2.0 mm, which are evaluated under controlled one-sun irradiation using NaCl solutions representative of seawater (3.5 wt.%) and highly saline water (20 wt.%). Water transport behavior, ion migration mechanisms, and condensate quality are assessed through continuous evaporation experiments and ion concentration analyses for Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , and Ca^{2+} . Additionally, operational stability is examined through multi-cycle repeatability tests.

Main results: The WSE-1.5 device exhibits the highest steady evaporation rates, achieving 2.48 and $2.04 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ in 3.5 wt.% and 20 wt.% NaCl solutions, respectively. This favorable performance is attributed to the ion exchange between the natural microchannels of the wood, which contain higher concentrations of salt ions, and the drilled millimeter-scale channels with lower concentrations. The difference in hydraulic conductivity between these pathways drives salt migration from the millimeter-scale channels to the microchannels and subsequently into the bulk water. The engineered structure also maintains timely water replenishment at the evaporation surface, ensuring stable vapor production. The condensate quality meets World Health Organization (WHO) and Environmental Protection Agency (EPA) potable water standards, with significantly reduced concentrations of Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , and Ca^{2+} . Repeatability tests confirm that WSE-1.5 retained its performance after 15 cycles with negligible degradation. Overall, the proposed wood-based evaporator offers an efficient, robust, and cost-effective solution for desalinating saline waters in challenging environments.

* Corresponding author: arabpour@modares.ac.ir – ORCID: 0000-0003-2856-680X



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی- پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

سامانه تبخیر خودتمیز شونده خورشیدی بر پایه چوب مهندسی شده برای نمک‌زدایی پایدار

بهزاد نقدی، فرید محجوب، فرزانه عربپور رق‌آبادی*

گروه مهندسی فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: نمک‌زدایی خورشیدی مبتنی بر تبخیر سطحی به دلیل بازده بالای انرژی خورشیدی به بخار، اثرات زیست‌محیطی کم و قابلیت استفاده در مناطق دورافتاده، به عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با بحران جهانی کمبود آب مطرح است. با این حال، تجمع نمک‌های محلول در سطح تبخیر، به ویژه نمک‌های با حلالیت بالا، موجب کاهش نرخ تبخیر و مختل شدن عملکرد پایدار سامانه‌های موجود می‌شود. بنابراین توسعه سامانه‌هایی با قابلیت خودتمیزشوندگی و انتقال مؤثر آب برای جلوگیری از رسوب نمک امری ضروری است.

روش تحقیق: در این پژوهش، سامانه تبخیر خورشیدی خودتمیز شونده مبتنی بر چوب چنار مهندسی شده توسعه داده شده، عملکرد آن در فرایند نمک‌زدایی به طور منظم ارزیابی می‌شود. برای این منظور، چهار سامانه شامل یک نمونه مرجع بدون مجاری مصنوعی و سه سامانه با مجاری عمودی به قطر ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر طراحی، ساخته و تحت تابش کنترل شده یک خورشید مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون‌ها با محلول‌های نمکی نماینده آب دریا (۳/۵ wt.%) و آب بسیار شور (۲۰ wt.%) انجام می‌گیرد. رفتار انتقال آب، سازوکار مهاجرت نمک و کیفیت آب تقطیر شده با استفاده از سنجش یون‌های Na^+ ، Mg^{2+} ، K^+ و Ca^{2+} ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، پایداری عملیاتی سامانه طراحی شده از طریق آزمایش‌های تکرارپذیری چندچرخه‌ای بررسی می‌شود.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد سامانه WSE-1.5 بالاترین نرخ تبخیر پایدار را ارائه داده، به طوری که در محلول‌های $NaCl$ ۳/۵ wt.% و ۲۰ wt.% به ترتیب به نرخ تبخیر ۲/۴۸ و $2/04 \text{ kg.m}^{-2}.h^{-1}$ دست یافته است. این عملکرد خوب به تبادل یونی بین ریز مجاری طبیعی چوب، حاوی غلظت‌های بالاتر یون نمک و مجاری حفر شده در مقیاس میلی‌متری با غلظت‌های پایین‌تر نسبت داده می‌شود؛ به طوری که تفاوت در رسانایی هیدرولیکی بین این مسیرها، مهاجرت نمک را از مجاری میلی‌متری به میکرومتری و سپس به توده آب هدایت می‌کند. همچنین ساختار مهندسی شده، انتقال پیوسته آب به سطح را تضمین کرده، تولید بخار را حتی در آزمون‌های طولانی مدت حفظ می‌کند. آب جمع‌آوری شده دارای غلظت یون‌هایی کمتر از حدود مجاز سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA) است. بررسی چرخه‌ای نیز نشان داده که عملکرد سامانه WSE-1.5 پس از ۱۵ چرخه بدون افت محسوس پایدار باقی مانده است. در مجموع، سامانه پیشنهادی راهکاری کارآمد، پایدار و کم‌هزینه برای نمک‌زدایی از آب‌های شور در شرایط محیطی سخت ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها

نمک‌زدایی آب دریا

سامانه خورشیدی تولید بخار

رسانایی هیدرولیکی

سامانه خودتمیز شونده

چوب مهندسی شده

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

دسترس آن‌لاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: arabpour@modares.ac.ir – ORCID: 0000-0003-2856-680X

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، باز نشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

بحران آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی است که روزبه‌روز ابعاد گسترده‌تری پیدا می‌کند [۱]. در میان روش‌های مختلف نمک‌زدایی، سامانه‌های خورشیدی شناور که با بهره‌گیری از آب دریا و انرژی خورشیدی آب شیرین تولید می‌کنند، از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها به شمار می‌روند [۳و۲]. در این سامانه‌ها، لایه‌ای جاذب، نور خورشید را جذب کرده، آن را به گرما تبدیل می‌کند. به‌طور هم‌زمان، آب دریا به سطح جاذب منتقل شده، در آنجا تبخیر می‌شود. بخار حاصل، با میعان، به آب شیرین تبدیل می‌شود [۴]. با این وجود، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های این سامانه‌ها، تجمع نمک بر سطح تبخیر و انسداد مجاری انتقال آب است؛ عاملی که با ایجاد بازتاب نور خورشید و اختلال در انتقال آب، موجب کاهش بازده تبخیر می‌شود [۵و۶]. از این رو، پژوهشگران با بهره‌گیری از سازوکارهای گوناگون نظیر (۱) بازگرداندن یون‌های نمک به توده‌ی آب از طریق نفوذ مولکولی، (۲) استفاده از ساختارهای ژانوس، (۳) دفع یون‌های نمک با کمک بار سطحی و (۴) تبلور موضعی نمک در لایه‌های سطح تبخیر، تلاش کرده‌اند این چالش را برطرف سازند. در روش اول، با استفاده از بسترهای فوق‌آب‌دوست و دارای تخلخل بالا، آب دریا به روش جابه‌جایی به سطح تبخیر هدایت می‌شود؛ درحالی‌که یون‌های نمک به‌واسطه‌ی نفوذ مولکولی، مجدداً به توده‌ی آب بازمی‌گردند. در این فرایند، اختلاف پتانسیل شیمیایی میان سطح تبخیر و توده آب، عامل اصلی دفع نمک به‌شمار می‌آید [۷، ۸]. برای مثال، لی و همکاران با استفاده از هیدروژل دارای مجاری انتقال آب پیوسته و مسیرهای کوتاه برای نفوذ نمک، در محلولی با شوری ۲۰٪ وزنی به نرخ تبخیر $3/8 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ دست یافتند [۹].

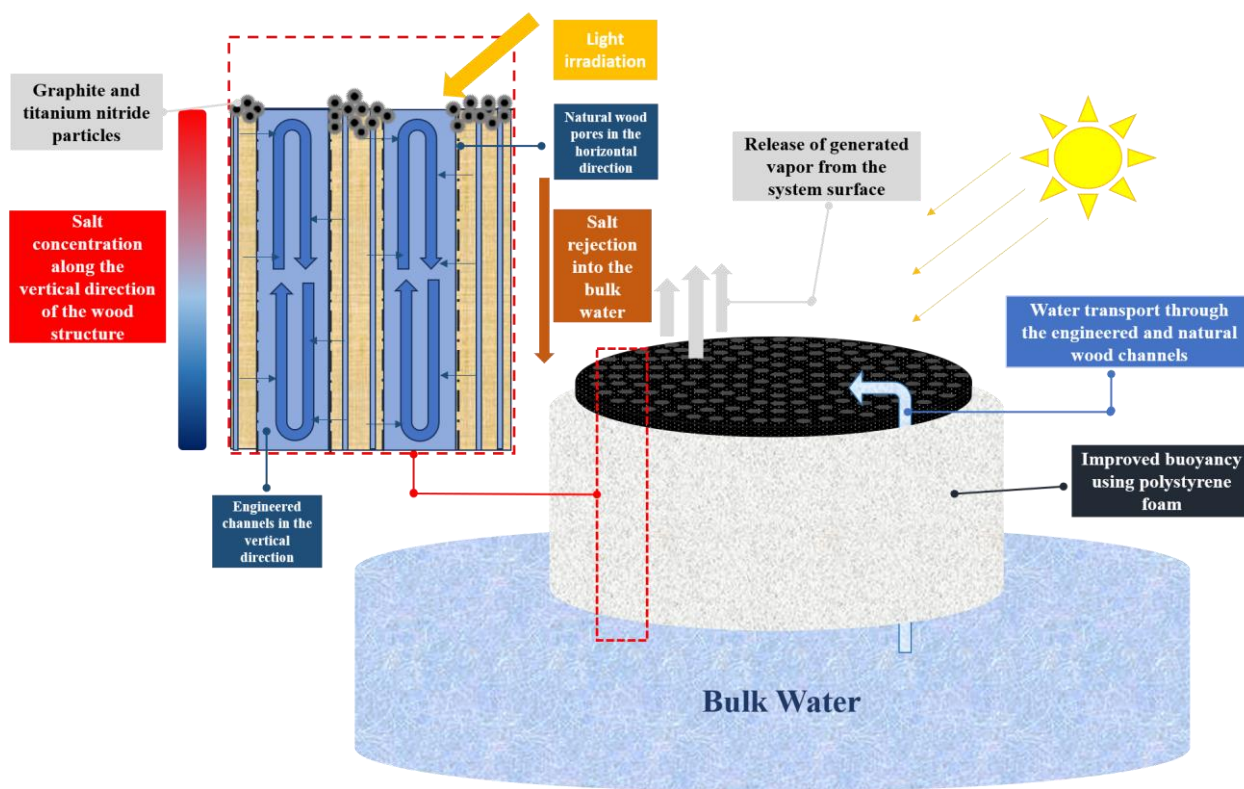
در ساختارهای ژانوس، لایه جاذب برای ممانعت از انتقال یون‌های نمک به سطح تبخیر، آب‌گریز و بستر انتقال آب کاملاً آب‌دوست در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت دیگر، یون‌های نمک در مرز مشترک این دو لایه باقی می‌مانند و به‌واسطه‌ی جریان مداوم آب، رقیق می‌شوند. در این راستا، ژو و همکاران با ادغام نانوذرات نقره با کامپوزیت کربن (AgNPs/C) و فوم ملامین به همراه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) برای بهبود چسبندگی و آب‌گریزی، ساختار ژانوسی با بازده حذف نمک بیش از ۹۹٪ ارائه کردند [۱۰]. ما و همکاران نیز غشایی شامل نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره آروکسیلیک/ژلاتین با بار سطحی منفی طراحی کردند که با استفاده از نیروهای الکترواستاتیکی جاذبه و دافعه، امکان دفع یون‌های نمک را فراهم می‌کند. به‌واسطه‌ی اثر دونان (Donnan Effect) ناشی از لایه نازک ژلاتین، هیچ‌گونه تجمع نمکی تا ۱۵ روز مشاهده نشد [۱۱]. در روش تبلور موضعی نمک، مسیر انتقال آب از توده به سطح تبخیر معمولاً به‌صورت یک‌بعدی و از مرکز به اطراف طراحی می‌شود. در این حالت، به‌دلیل فاصله بیشتر لایه‌ها از منبع آب، تبلور نمک در حاشیه‌ی سطح رخ می‌دهد و در نتیجه، علاوه بر تولید آب شیرین، برداشت نمک نیز ممکن می‌شود. سان و همکاران با بهره‌گیری از کیتوزان و طراحی مسیر انتقال یک‌بعدی، سامانه‌ای ارائه دادند که علاوه بر کاهش شوری، توانایی جذب رنگ را نیز داشت و به نرخ تبخیر $1/767 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ دست یافتند [۱۲].

چوب درختان به‌دلیل ویژگی‌هایی چون آب‌دوستی ناشی از ریزمجاری ذاتی،

سبکی ساختاری برای شناوری، استحکام مکانیکی و خاصیت عایق حرارتی برای کاهش اتلاف انرژی، گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در سامانه‌های تبخیر خورشیدی به شمار می‌آید. برای مثال، ژانگ و همکاران با عامل‌دار کردن چوب بالسا به کمک نانولوله‌های کربنی و نانولوله‌های دی اکسید منگنز کاتالیزوری، سامانه‌ای برای تبخیر خورشیدی و تجزیه آلاینده‌ها توسعه دادند. این سامانه، با بهره‌گیری از مزایای ساختاری چوب بالسا، تأمین سریع آب، عایق حرارتی، انتقال جرم مؤثر و شناوری مناسب را تضمین می‌کرد [۱۳]. در پژوهشی دیگر، نظرآباد و همکاران از چوب درخت صنوبر استفاده کرده و آن را با دی‌اکسید وانادیوم آلاینده‌شده با نقره (Ag@VO_2) و اکسیدگرافن کاهش‌یافته پوشش دادند. این سامانه به نرخ تبخیر $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ دست یافت [۱۴].

باوجودآنکه در برخی پژوهش‌های پیشین نرخ‌های تبخیر بالاتری با استفاده از چوب‌های طبیعی مشابه و مواد نورگرمایی پیشرفته گزارش شده، مزیت اصلی سامانه‌ی ارائه‌شده در این پژوهش در رویکرد سامانه‌محور آن نهفته است. در این پژوهش، به‌جای تکیه بر مواد گران‌قیمت یا ساختارهای چندلایه‌ی پیچیده، عملکرد تبخیر خورشیدی از طریق مهندسی معماری سامانه و به‌طور خاص طراحی مجاری عمودی بهینه شده است. این معماری امکان ایجاد تعادل مؤثر میان انتقال آب، محلی‌سازی گرما و مهاجرت نمک را فراهم کرده، در نتیجه، پایداری عملکرد و خاصیت خودتمیزشوندگی سامانه در محیط‌های شور بهبود یافته است. افزون بر این، استفاده از کامپوزیت گرافیت-نیتريد تیتانیوم با سهم غالب گرافیت، ضمن حفظ جذب نوری مناسب، هزینه و پیچیدگی ساخت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده، مقیاس‌پذیری سامانه را برای کاربردهای عملی افزایش می‌دهد. بنابراین، برتری این روش را می‌توان در ترکیب هم‌زمان کارایی قابل‌قبول، پایداری در برابر رسوب نمک و اقتصادی بودن سامانه دانست.

در این پژوهش، سامانه‌ی تبخیر خورشیدی مبتنی بر چوب درخت چنار طراحی و ارائه می‌شود که در آن، مجاری با قطر میلی‌متری برای تقویت تبادل یون‌های نمک حفر شده است. چوب به‌طور طبیعی دارای مجاری میکرومتری متصل‌شده با حفرات افقی است [۱۵]. مجاری میکرومتری و میلی‌متری دارای هدایت هیدرولیکی متفاوتی هستند؛ به‌گونه‌ای که تحت اختلاف فشار یکسان، شار انتقال آب در مجاری میلی‌متری بیش از میکرومتری خواهد بود. این امر منجر به غلظت نمک بالاتر در مجاری میکرومتری می‌شود که خود باعث ایجاد اختلاف غلظت بین دو نوع مجرا شده، در نتیجه، یون‌های نمک از مجاری میکرومتری به کمک حفرات افقی به مجاری میلی‌متری منتقل می‌شوند و از آنجا به توده آب بازمی‌گردند. شکل ۱ طرح‌واره سامانه نمک‌زدایی خورشیدی شناور طراحی شده را به همراه سازوکار مهاجرت یون‌های نمک به توده آب را نشان می‌دهد. این سازوکار چندجهته‌ی تبادل یون‌های نمک، امکان عملکرد پایدار سامانه معرفی شده را فراهم کرده، منجر به دستیابی به نرخ تبخیر $2/48 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ در محلول $3/5 \text{ wt.}\% \text{ NaCl}$ شد.



شکل ۱ طرح‌واره سامانه نمک‌زدایی خورشیدی شناور به همراه سازوکار مهاجرت یون‌های نمک به توده آب
Figure 1 Schematic of a floating solar desalination system along with the mechanism of salt ion migration into bulk water

شدند. فرایند اختلاط به‌وسیله‌ی دستگاه فراصوت با دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه انجام گرفت. پس از تکمیل فرایند اختلاط، محلول حاصل روی سطح نمونه‌ها پوشش داده شده، در آن با دمای 75°C به مدت ۳۰ دقیقه خشک شد. نمونه‌ی مرجع با کد WSE-0 و سایر نمونه‌ها با مجراهایی به قطرهای ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر به ترتیب با کدهای WSE-1، WSE-1.5 و WSE-2 نام‌گذاری شدند. چگالی نمونه‌ی مرجع در حالت کاملاً خشک 0.418 g.cm^{-3} و در حالت اشباع از آب 0.820 g.cm^{-3} اندازه‌گیری شد که موجب فرورفتن بیش از حد سامانه در آب شد. به همین دلیل، برای افزایش شناوری سامانه‌ها، از فوم پلی‌استایرن استفاده شد. ایجاد مجاری عمودی، جرم خشک چوب را کاهش داده، پایداری شناوری نمونه را با اصلاح هندسه ساختاری و توزیع جرم آن بهبود می‌بخشد.

۳-۲ مشخصه‌یابی و دستگاه‌ها

برای بررسی میزان جذب نور، از دستگاه طیف‌سنج فرابنفش-مرئی مدل AvaSpec-3648-2 ساخت شرکت Avantes هلند استفاده شد. برای مشاهده‌ی ساختار و مجاری نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری مدل LEICA ساخت کشور آلمان بهره گرفته شد. همچنین برای بررسی توپولوژی، تخلخل و زبری سطح چوب چنار، از میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope (AFM)) مدل Veeco ساخت ایالات متحده آمریکا استفاده شد. عملکرد سامانه‌ها با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز خورشیدی شرکت شریف سولار (ایران) تحت تابش نوری با شدت mW/cm^2 ۱۰۰ (اصطلاحاً یک خورشید) ارزیابی شد. علاوه‌براین، برای بررسی غلظت

۲ بخش تجربی

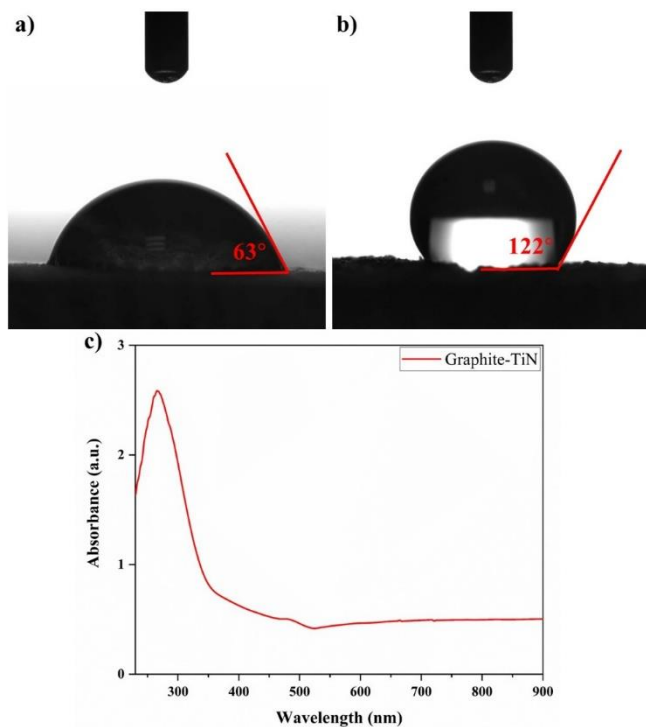
۲-۱ مواد

مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش شامل ذرات گرافیت، نانوذرات نیتريدتیتانیوم (TiN) و رزین پلی‌فام MTB است که به ترتیب از شرکت‌های Sigma، US Nano و رزین‌فام تهیه شدند. رزین MTB مورد استفاده، کاپلیمری امولسیون خودشبکه‌ای شونده و بر پایه اکریلات است که گرانیروی آن در دمای محیط $45 \pm 15 \text{ mPa.s}$ ، چگالی 1.05 g/cm^3 و pH آن برابر 6.5 ± 0.5 است. چوب مورد استفاده از ضایعات درخت چنار، که در طبیعت رها شده بود، جمع‌آوری شده و سپس با استفاده از دستگاه برش مخصوص به قطعاتی با ابعاد مشخص تقسیم شد. برای تهیه محلول‌های نمکی نیز از نمک طعام تصفیه‌شده موجود در فروشگاه‌های محلی استفاده شد.

۲-۲ آماده‌سازی سامانه‌های خودتمیزشونده‌ی شناور خورشیدی

برای ساخت سامانه‌های خودتمیزشونده خورشیدی بر پایه‌ی چوب چنار، چهار نمونه تهیه شد. یک نمونه به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد که هیچ‌گونه مجرای در آن حفر نشده است و در سه نمونه‌ی دیگر ۱۳۷ مجاری عمودی به ترتیب با قطرهای ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر ایجاد شد. پس از حفر مجاری، نمونه‌ها با آب شستشو داده شدند و سپس اجازه داده شد تا کاملاً خشک شوند. برای تهیه‌ی محلول جاذب نور، مقدار ۵۰ میلی گرم گرافیت، ۲۵ میلی گرم نیتريدتیتانیوم و ۲۰۰ میلی گرم رزین پلی‌فام (به‌منظور اتصال ذرات جاذب به سطح چوب) با ۴ گرم آب دیونیزه در ظرفی شیشه‌ای مخلوط

یکی از عوامل اصلی برای عملکرد مؤثر سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی، انتقال سریع و به‌موقع آب از توده به سطح تبخیر است. چوب به‌دلیل ماهیت طبیعی آب‌دوست خود، گزینه‌ی مناسبی برای تبخیر خورشیدی محسوب می‌شود. شکل ۳-الف و ب، زاویه‌ی تماس سطح چوب چنار را پیش و پس از پوشش با ماده‌ی نورگرمایی نشان می‌دهد. پیش از پوشش‌دهی، زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب روی سطح چوب حدود ۶۳ درجه است که نشان‌دهنده‌ی آب‌دوستی قابل توجه آن است. اما پس از اعمال پوشش جاذب، زاویه‌ی تماس به حدود ۱۲۲ درجه افزایش می‌یابد که این تغییر ناشی از ماهیت آب‌گریز ذرات نورگرمایی است. شکل ۳-ج، طیف جذب نوری کامپوزیت گرافیت-نیتريد تیتانیوم را در بازه‌ی طول‌موجی ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این کامپوزیت دارای جذب نوری بالایی در کل محدوده‌ی طیف است، که این امر موجب افزایش تبدیل انرژی خورشیدی به گرما و در نهایت، بهبود عملکرد سامانه در تولید بخار می‌شود. همچنین جذب در ناحیه‌ی مرئی تقریباً ثابت است و افزایش جذب در ناحیه‌ی فرابنفش (UV) به حضور نانوذرات نیتريد تیتانیوم نسبت داده می‌شود.



شکل ۳ تصاویر زاویه تماس (الف) قبل از پوشش ذرات جاذب و (ب) بعد از پوشش با ذرات جاذب (ج) طیف جذب نور کامپوزیت گرافیت-نیتريد تیتانیوم در محدوده طول‌موجی ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر

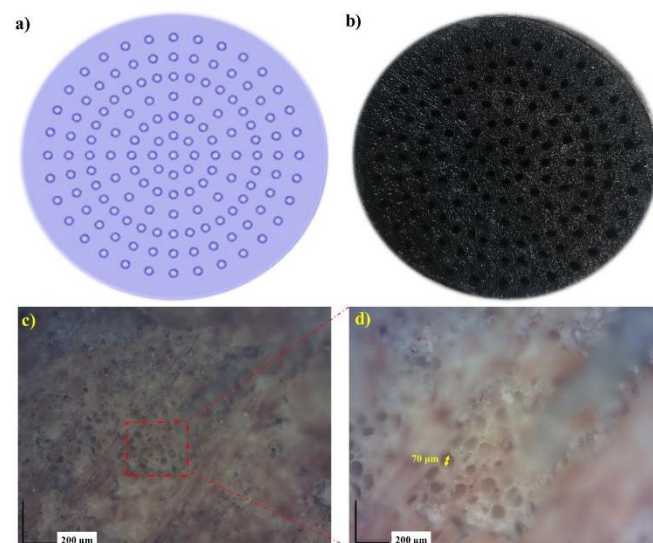
Figure 3 Contact angle images: a) before applying the photothermal particles and b) after coating with the photothermal particles c) UV-Vis absorption spectrum of the graphite-titanium nitride composite in the wavelength range of 200-900 nm

حفر مجاری عمودی در ساختار چوب، باعث کاهش جزئی در مساحت سطح تبخیر برای جذب نور می‌شود. به‌طور خاص، در سامانه‌ی WSE-1.5، جذب نور حدود ۹٪ کمتر از نمونه‌ی فاقد کانال (WSE-0) است. دلیل این کاهش، نفوذ بخشی از پرتوهای عمودی به درون توده‌ی آب از طریق مجاری حفر شده است که دیگر در سطح جاذب جذب نمی‌شوند. شکل ۴، تصویر

یون‌های اصلی نمک موجود در آب دریای خزر پیش و پس از فرایند نمک‌زدایی، از آزمون طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)) مدل DRC 9000 بهره گرفته شد. در نهایت، به‌منظور اندازه‌گیری دمای سطح نمونه‌ها و تحلیل پروفیل دمایی سامانه‌ها، از دوربین گرمانگاری مدل OLIP ThermoCam P200 ساخت کشور انگلستان استفاده شد و تصاویر به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار IR Reporter تحلیل شدند.

۳ نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سامانه‌های خورشیدی خودتمیزشونده بر پایه‌ی چوب درخت چنار با حفر مجراهایی در راستای الیاف چوب طراحی و ساخته شدند. شکل ۲-الف تصویر الگوی مجاری حفرشده و شکل ۲-ب، نمای واقعی سامانه‌ی معرفی‌شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲-ج و شکل ۲-د، چوب چنار به‌طور طبیعی دارای مجراهایی با قطر تقریبی ۵۰ تا ۷۰ میکرومتر است که با مجاری افقی به یکدیگر متصل شده‌اند. بر اساس قانون Hagen-Poiseuille رسانایی هیدرولیکی C در لوله با شعاع r با رابطه‌ی $C = \frac{\pi r^4}{8\mu L}$ تعریف می‌شود که در آن r شعاع مجرا، μ گرانیوی دینامیکی سیال و L طول مجرا است [۱۶]. متناسب با این قانون، رسانایی هیدرولیکی مجاری میلی‌متری حفرشده به‌طور تقریبی ۳۹۰/۰۰۰ برابر بیشتر از مجاری طبیعی میکرومتری چوب است. این اختلاف قابل توجه، منجر به رقت سریع‌تر نمک در مجاری میلی‌متری در مقایسه با مجاری میکرومتری طی فرایند نمک‌زدایی خورشیدی می‌شود. به‌عبارتی، تحت اختلاف فشار یکسان، شار انتقال آب در مجاری میلی‌متری بیشتر بوده، بنابراین غلظت نمک در آن‌ها کمتر از مجاری میکرومتری خواهد بود. این اختلاف غلظت، باعث انتقال یون‌های نمک از مجاری میکرومتری (با غلظت بالاتر) به مجاری میلی‌متری (با غلظت پایین‌تر) از طریق ریزمجره‌های افقی می‌شود و سپس نمک از آنجا به توده‌ی آب بازمی‌گردد.

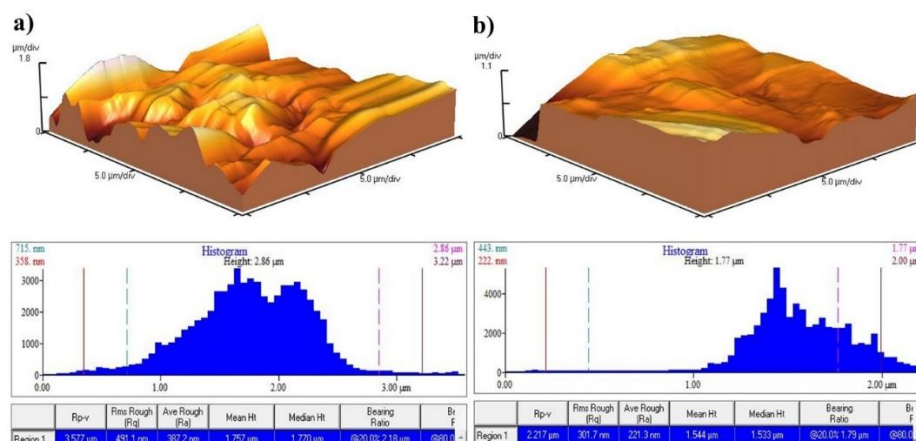


شکل ۲ الف) الگوی مجاری حفرشده و ب) تصویر واقعی سامانه. تصویر میکروسکوپی نوری سطح چوب با بزرگ‌نمایی (ج) ۵۰ برابر و (د) ۱۰۰ برابر

Figure 2 a) Pattern of the drilled channels and b) the actual photograph of the system. Optical microscopy images of the wood surface at magnifications of c) 50× and d) 100×

ناهمواری‌های زیستی سطح چوب را پر کرده، لایه‌ی مؤثر نسبتاً یکنواختی ایجاد می‌کنند که در مقیاس میکروسکوپ نیروی اتمی منجر به کاهش اختلاف ارتفاع ثبت‌شده می‌شود. این زبری به‌همراه ساختار متخلخل چوب، نهایتاً انتقال و مدیریت مؤثر آب را در درون ساختار فراهم می‌سازد، بلکه سطح فعال بیشتری برای جذب نور فراهم می‌کند.

توپوگرافی سطح چوب چنان را که با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی به‌دست آمده، قبل (شکل ۴-الف) و بعد (شکل ۴-ب) از پوشش‌دهی با ذرات جاذب نمایش می‌دهد. زبری سطح چوب در حدود ۴۹۱ نانومتر است که پس از پوشش‌دهی با ذرات جاذب به ۳۰۱ نانومتر کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش این است که ذرات جاذب نور، بخش قابل‌توجهی از فرورفتگی‌ها و



شکل ۴ تصویر توپوگرافی از سطح چوب چنار الف) قبل و ب) بعد از پوشش‌دهی با ذرات جاذب نور

Figure 4 Topographical image of the sycamore wood surface a) before and b) after coating with light-absorbing particles

ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی دارد. بیشترین نرخ تبخیر متعلق به سامانه WSE-1.5 با مقادیر $2/48$ و $2/04 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ به‌ترتیب در محلول‌های شور $3/5$ و 20 درصد است. عملکرد مطلوب سامانه WSE-1.5 به تبادله خودبه‌خودی یون‌های نمک از طریق ریزمجاری افقی موجود در ساختار طبیعی چوب نسبت داده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که یون‌ها از نواحی با غلظت نمک بالاتر به سمت مجراهای میلی‌متری با غلظت پایین‌تر حرکت می‌کنند. این پدیده ناشی از تفاوت در رسانایی هیدرولیکی آن‌هاست. جدول ۱ نرخ تبخیر سامانه‌های گزارش‌شده در این پژوهش را در محلول‌های NaCl wt.% ۳/۵ و ۲۰ wt.% برای مقایسه بهتر ارائه می‌کند.

جدول ۱ نرخ تبخیر سامانه‌های بررسی‌شده در محلول‌های NaCl wt.% ۳/۵ و ۲۰ wt.%

Table 1 WER of the systems using 3.5 wt.% and 20 wt.% NaCl solutions as the source water

WSE-2	WSE-1.5	WSE-1	WSE-0	
2.24	2.48	2.2	2.1	wt. % 3.5 NaCl
1.78	2.04	1.58	1.37	wt. % 20 NaCl

شکل ۶-ب و ج تصاویر سامانه WSE-1.5 را پس از ۳۰ دقیقه آزمایش تحت تابش نور خورشید نشان می‌دهند. در محلول NaCl wt.% ۳/۵، تقریباً هیچ رسوب نمکی روی سطح مشاهده نمی‌شود، درحالی‌که در محلول wt.% ۲۰ NaCl ، تشکیل رسوبات نمک به‌دلیل غلظت بالای محلول قابل‌انتظار است. شکل ۶-د و ه نیز تصاویر ترموگرافی از سطح سامانه را پس از آزمایش نشان می‌دهند. میانگین دمای سطح سامانه به‌ترتیب در محلول‌های $3/5$ و 20 درصد، برابر با $34/25$ و $40/3$ درجه سانتی‌گراد است. نواحی زردرنگ در

برای بررسی عملکرد خودتمیزشوندگی سامانه‌های مبتنی بر چوب درخت چنار، از محلول‌های NaCl با غلظت‌های وزنی $3/5$ درصد (میانگین شوری آب دریاها و اقیانوس‌ها) و 20 ٪ (نماینده آب‌های بسیار شور) استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سامانه WSE-0 به‌عنوان مرجع برای مقایسه با سایر سامانه‌ها انتخاب شد. این سامانه در محلول‌های شور $3/5$ و 20 درصد به‌ترتیب دارای نرخ تبخیر $2/1$ و $1/37 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ طی مدت ۳۰ دقیقه است. شکل ۵ مشکل رسوب نمک در سامانه WSE-0 را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در محلول wt.% ۳/۵ NaCl بخش زیادی از سطح تبخیر سامانه کاملاً خشک شده و عملکرد آب‌رسانی پیوسته مختل می‌شود. افزون بر این، در محلول wt.% ۲۰ NaCl سطح تبخیر سامانه WSE-0 با بلورهای نمک پوشیده شده است که منجر به کاهش جذب نور خورشید و در نتیجه کاهش عملکرد سامانه می‌شود.



شکل ۵ تصویر واقعی سطح سامانه WSE-0 پس از ۳۰ دقیقه نمک‌زدایی خورشیدی در محلول NaCl wt.% ۳/۵

Figure 5 Actual photograph of the WSE-0 system surface after 30 minutes of solar desalination in a 3.5 wt.% NaCl solution

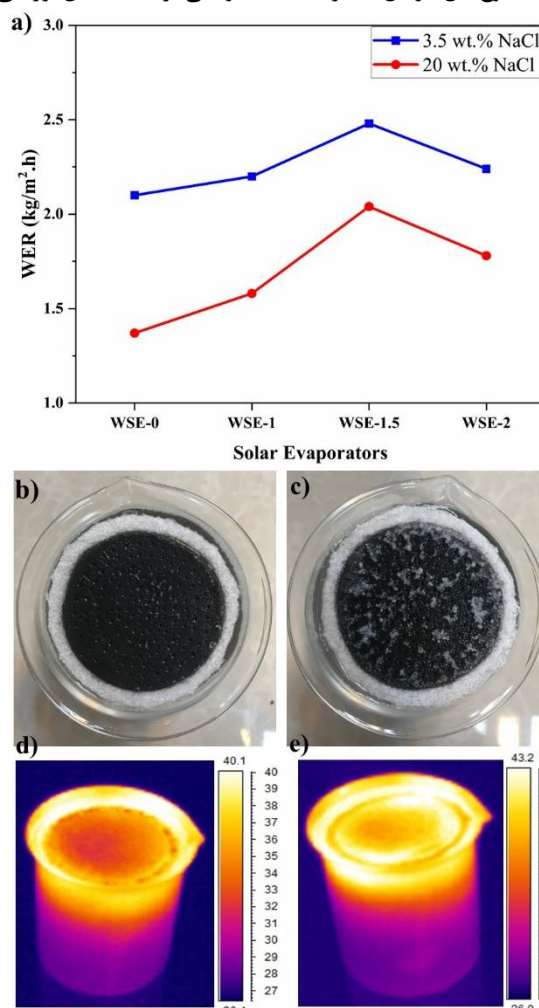
شکل ۶-الف نمودار نرخ تبخیر سامانه‌های آماده‌شده را در بازه زمانی ۳۰ دقیقه نمایش می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، نرخ تبخیر

به کاهش نرخ تبخیر در سامانه WSE-2 می‌شود. همچنین، تأثیر افزایش قطر مجراها از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر در بهبود نرخ تبخیر در محلول ۲۰ درصد وزنی نسبت به محلول ۳/۵ درصد، بیش‌تر است. در واقع، شیب نمودار در محلول بسیار شور رشد بهتری را نشان می‌دهد که بیانگر تأثیرگذاری بیشتر رسانایی هیدرولیکی در محیط‌های با شوری بالا نسبت به محلول‌های رقیق‌تر است.

در سامانه‌های تبخیر خورشیدی، مفهوم بازدهی به‌شدت به شرایط آزمایش، دمای سطح و نحوه محاسبه وابسته است. در بسیاری از مطالعات پیشین، بازده تبدیل انرژی خورشیدی به بخار عمدتاً بر اساس آزمایش با آب مقطر و در دماهای سطحی نسبتاً بالا گزارش شده است. در پژوهش حاضر، تمرکز بر ارزیابی عملکرد سامانه در شرایط شور و بسیار شور، همراه با بررسی پایداری عملکرد و خاصیت خودتمیزشوندگی بوده است. دستیابی به نرخ‌های تبخیر قابل‌قبول در محلول‌های با شوری بالا و در دماهای سطحی نسبتاً پایین، نشان‌دهنده‌ی کارایی مناسب سامانه از منظر انتقال مؤثر جرم و مدیریت هم‌زمان حرارت و نمک است. از این‌رو، عملکرد سامانه حاضر را می‌توان از دیدگاه کاربردی و عملی، به‌ویژه برای نمک‌زدایی در شرایط واقعی، رضایت‌بخش ارزیابی کرد.

تصاویر، دمای بالاتری دارند که به‌دلیل تجمع بلورهای نمک است. هرچند در محلول بسیار شور، سامانه WSE-1.5 دارای تجمع نمک است، اما پس از توقف تابش به‌دلیل انتقال پیوسته آب از توده به سطح و نفوذ معکوس مولکولی یون‌های نمک، رسوبات به توده آب بازمی‌گردند و امکان نمک‌زدایی مجدد فراهم می‌شود.

همان‌گونه که در نمودار نرخ تبخیر نیز مشهود است، با افزایش قطر مجاری از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر، عملکرد خودتمیزشوندگی سامانه کاهش می‌یابد. این افت عملکرد در نمونه WSE-2 را می‌توان به افزایش بیش از حد قطر مجراها نسبت داد. بزرگ‌شدن مجاری عمودی موجب افزایش تماس مستقیم آب توده‌ای با سطح نوری گرمایی شده، در نتیجه، اتلاف حرارتی و تضعیف محلی‌سازی گرما را به همراه دارد؛ به‌گونه‌ای که بخشی از انرژی خورشیدی به جای مشارکت در تبخیر سطحی، صرف گرم‌شدن توده آب می‌شود. علاوه بر این، مجراهای بزرگ‌تر می‌توانند به‌عنوان مسیرهای عبور نور عمل کرده، جذب مؤثر تابش خورشیدی توسط لایه نوری گرمایی را کاهش دهند. ازسوی دیگر، افزایش بیش از حد قطر مجراها تعادل بهینه‌ی میان انتقال آب، تبادل یونی و مهاجرت نمک را برهم زده، سازوکار خودتمیزشوندگی مبتنی بر اختلاف رسانایی هیدرولیکی را تضعیف می‌کند. مجموع این عوامل منجر

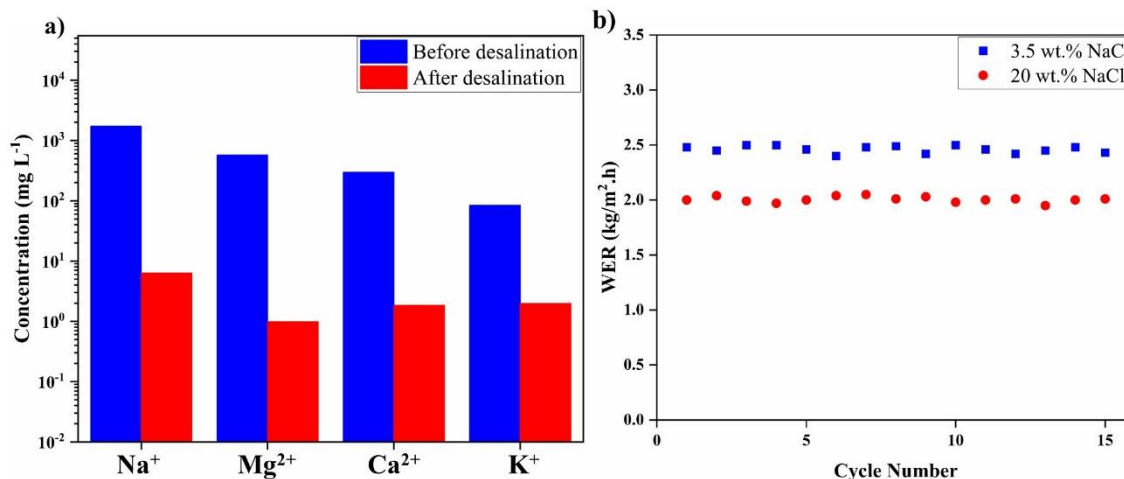


شکل ۶ الف) نمودار نرخ تبخیر سامانه‌های مهندسی‌شده در محلول ۳/۵ wt.% NaCl و ۲۰ wt.% NaCl تصاویر واقعی و دوربین حرارتی سامانه‌های مهندسی‌شده پس از ۳۰ دقیقه آزمایش: ب و د) محلول ۳/۵ wt.% NaCl و ج و ه) محلول ۲۰ wt.% NaCl

Figure 6 a) Evaporation rates of the engineered systems in 3.5 wt.% and 20 wt.% NaCl solutions. Actual photographs and thermal camera images of the engineered systems after 30 minutes of operation: b, d) 3.5 wt.% NaCl solution and c, e) 20 wt.% NaCl solution ratio, and recovery ratio [21]

به منظور بررسی قابلیت عملی سامانه WSE-1.5 برای تولید آب آشامیدنی، غلظت چهار یون اصلی موجود در آب دریاها یعنی Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و K^+ ، پیش و پس از فرایند نمک‌زدایی با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای القایی (ICP-MS) اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۷-الف مشاهده می‌شود، غلظت یون‌های نمک در آب جمع‌آوری شده بسیار پایین‌تر از حدود تعیین‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت (World Health Organization (WHO) و آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده

است که نشان‌دهنده توان عملی سامانه WSE-1.5 در تولید آب شرب است. همچنین، پایداری سامانه برای نمک‌زدایی مداوم با تکرار آزمایش‌ها بررسی شد (شکل ۷-ب). نتایج نشان داد که پس از ۱۵ بار تکرار آزمایش در محلول‌های ۳/۵ و ۲۰ درصد، کاهش محسوسی در نرخ تبخیر مشاهده نمی‌شود که مؤید پایداری سامانه برای کاربردهای عملی است.



شکل ۷ الف) غلظت یون‌های نمک قبل و بعد از نمک‌زدایی آب دریای خزر ب) نتایج آزمایش‌های نمک‌زدایی سامانه WSE-1.5 طی ۱۵ چرخه تکرار
Figure 7 a) Concentrations of salt ions before and after desalination of Caspian sea water. b) Desalination performance of the WSE-1.5 system over 15 repeated cycles

۴ نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که سامانه تبخیر خورشیدی مبتنی بر چوب چنار مهندسی‌شده، به‌ویژه با قطر مجرای حفرشده ۱/۵ میلی‌متر (WSE-1.5)، دارای عملکرد بهینه‌ای در فرایند نمک‌زدایی است. بهره‌گیری از تفاوت رسانایی هیدرولیکی بین مجاری مهندسی‌شده و ساختار ذاتی چوب، امکان تبادل مؤثر یون‌های نمک و جلوگیری از تجمع آن‌ها را فراهم کرده است. این ویژگی منجر به ایجاد سازوکار خودتمیزشوندگی و حفظ عملکرد پایدار سامانه در طی ۱۵ چرخه شده است. همچنین، کیفیت بالای آب تولید شده از منظر کاهش یون‌های اصلی موجود در آب شور به سطوح کمتر از استانداردهای WHO و EPA، کارایی این سامانه را برای تولید آب آشامیدنی تأیید می‌کند. بنابراین، سامانه پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهکاری پایدار، کم‌هزینه و کارآمد در نمک‌زدایی خورشیدی برای مناطق کم‌برخوردار از منابع آب شیرین مطرح شود.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان این پژوهش مراتب قدردانی خود را بابت دسترسی به امکانات آزمایشگاه نانو اپتو الکترونیک دانشگاه تربیت مدرس ابراز می‌دارند. همچنین بدینوسیله نویسندگان از زحمات داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود باعث بهبود چشمگیر ویرایش نهایی این مقاله گردیدند سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

برای نویسندگان تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

بهزاد نقدی، به عنوان پژوهشگر اصلی (مسئول ساخت و بررسی عملکرد سامانه)، با سهم ۴۵٪، فرید محجوب به عنوان همکار (مسئول انجام آزمون‌های مشخصه‌یابی و عملکردی) با سهم ۲۷/۵٪ و فرزانه عربپور با مسئولیت بررسی ایده، نتایج و ویرایش متن با سهم ۲۷/۵٪ در این پژوهش فعالیت داشته‌اند.

منابع مالی

از منابع مالی در انجام این پژوهش استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در ویرایش چکیده انگلیسی از هوش مصنوعی استفاده شده است

مراجع

1. B. Naghdi, F. A. Roghabadi, and A. Soleimani-Gorgani, Salt-resistant solar water desalination system via surface modification and configuration engineering, *Desalination*, vol. 577, p. 117390, 2024.
2. M. Farhadipour, B. Naghdi, F. A. Roghabadi, and A. S. Gorgani, Highly efficient 3D-screen printed interfacial solar water desalination system, *Desalination*, vol. 584, p. 117766, 2024.
3. F. Mahjoub, B. Naghdi, and F. A. Roghabadi, Self-cleaning solar steam generator based on engineered carbonized waste tea photothermal layer, *Clean. Mater.*, vol.17, p. 100327, 2025.
4. F. Z. Heshmati, F. A. Roghabadi, and S. M. Sadrameli, Highly efficient solar water desalination systems based on plasmonic Ni nanoparticles embedded in mesoporous TiO₂ scaffold as the photothermal material, *Sep. Purif. Technol.*, vol.360, p. 131106, 2024.
5. B. Naghdi et al., Salt precipitation challenge in floating interfacial solar water desalination systems, *Desalination*, vol. 565, p. 116868, 2023.
6. R. Niu et al., Bio-inspired sandwich-structured all-day-round solar evaporator for synergistic clean water and electricity generation, *Adv. Energy Mater.*, vol. 13, no. 45, p. 2302451, 2023.
7. K. Xu, C. Wang, Z. Li, S. Wu, and J. Wang, Salt mitigation strategies of solar-driven interfacial desalination, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31, no. 8, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1002/adfm.202007855.
8. H. Li, Z. Yan, Y. Li, and W. Hong, Latest development in salt removal from solar-driven interfacial saline water evaporators: Advanced strategies and challenges, *Water Res.*, vol. 177, p. 115770, 2020.
9. X. Li et al., 3D micro-lattice structural hydrogel evaporator with super salt resistance for solar desalination of high-salinity, *Chem. Eng. J.*, vol. 502, p. 158019, 2024.
10. J. Xu, R. Cui, C. Zhou, and S. Yang, Fabrication and performance evaluation of a Janus solar-driven steam generator using AgNPs@ C composite for sustainable water purification, *Desalination*, vol. 573, p. 117204, 2024.
11. X. Ma et al., A robust asymmetric porous SWCNT/gelatin thin membrane with salt-resistant for efficient solar vapor generation, *Appl. Mater. Today*, vol. 18, p. 100459, 2020.
12. X. Sun, X. Jia, H. Weng, J. Yang, S. Wang, and H. Song, Multiphase solar evaporator for localized salt harvesting and in-depth water purification, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 268, p. 112752, 2024.
13. T. Zhang et al., All-in-one self-floating wood-based solar-thermal evaporators for simultaneous solar steam generation and catalytic degradation, *Adv. Funct. Mater.*, vol.34 p. 2403505, 2024.
14. M. Karimi-Nazarabad, E. K. Goharshadi, F. Sadeghi, and A. Ebrahimi, Highly efficient and sustainable wood-based plasmonic photoabsorber for interfacial solar steam generation of seawater, *Wood Sci. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 213–231, 2024.
15. Y. Kuang et al., A high-performance self-regenerating solar evaporator for continuous water desalination, *Adv. Mater.*, vol. 31, no. 23, p. 1900498, 2019.
16. S. P. Suter and R. Skalak, The history of Poiseuille's law, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–20, 1993.