

## نانوساختارهای فتوترمال برای شیرین سازی آب با استفاده از انرژی خورشیدی

مأنده سیمایی<sup>۱</sup>، اعظم ایرجی زاد<sup>۱\*</sup>، علی اسفندیار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>پژوهشکده علوم و فناوری‌های همگرا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

<sup>۲</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

### چکیده

استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان پاک‌ترین و فراوان‌ترین منبع انرژی در دسترس، به عنوان یک راهکار دوستدار محیط زیست، در غلبه بر مشکل جهانی کمبود آب قابل شرب مطرح است. استفاده از مواد فتوترمال جهت برداشت و ذخیره انرژی خورشیدی در سیستم‌های تولید بخار متداول است. این مواد در سه گروه عمده شامل مواد بر پایه کربن، فلزات پلاسمونیک و نپرساناها دسته‌بندی می‌شوند. از میان آن‌ها، استفاده از نانو مواد کربنی به دلیل ویژگی‌هایی چون سطح جذب زیاد، فراوانی، قیمت مناسب و در دسترس بودن با استقبال چشمگیر محققان همراه بوده است. در این مقاله با معرفی سیستم‌های تولید بخار خورشیدی به بیان ویژگی‌ها و ساز و کار جذب نور در مواد فتوترمال، با تمرکز بر نانو ساختارهای کربنی پرداخته می‌شود. در ادامه، برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه به اختصار مرور می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، بخار آب، فتوترمال.

ایمیل نویسنده مسئول: [iraji@sharif.edu](mailto:iraji@sharif.edu)

### ۱- مقدمه

در طول چند دهه گذشته، رشد چشمگیر جمعیت، تغییر الگوهای مصرف و... سبب افزایش نیاز جوامع انسانی به آب شیرین شده است [۱]. از این‌رو، چالش جهانی کمبود آب قابل شرب به عنوان معضلی روزافزون در مقابل توسعه پایدار جوامع بشری مطرح است [۲]. دو سوم مردم جهان با جمعیت تقریبی چهار میلیاردی، حداقل یک ماه از سال را با مشکلات جدی در زمینه کمبود آب مواجه هستند. اگرچه که نیمی از جمعیت یاد شده در کشورهای هند و چین ساکن هستند؛ اما مشکلات پیش‌رو برای جمعیت نیم‌میلیاردی در سراسر جهان و در کل ماه‌های سال، قابل تامل است [۳]. با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده، مصارف آب در بخش تولیدی و خانگی به ترتیب با رشد ۴۰۰٪ و ۱۳۰٪ همراه خواهد بود. بدین ترتیب، بدیهی است که بیش از ۴۰٪ از جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ با کمبود مفرط مواجه خواهند شد [۴]. از طرفی، با وجود اینکه ۷۱٪ از سطح کره زمین توسط آب پوشیده شده است، تنها ۲/۵٪ از منابع آب‌های در دسترس، شیرین بوده و آب دریاها و اقیانوس‌ها به دلیل شوری غیرقابل استفاده هستند [۵].

بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از فناوری‌های بزرگ مقیاس و کارآمد جهت نمک‌زدایی از این منابع راهکاری امیدبخش باشد. از میان فناوری‌های موجود، روش‌های بر پایه غشا، مانند اسمز معکوس [۶ و ۷]، و روش‌های بر پایه حرارت، مانند تابش چند مرحله‌ای [۸] دارای پیشینه و رشد صنعتی هستند [۵]. با این وجود، مصرف زیاد انرژی و آسیب‌های زیست محیطی سبب شده است تا این روش‌ها نتوانند به عنوان راه حل بلند مدت و امیدبخش در نظر گرفته شوند. از این‌رو، تلاش‌های زیادی جهت تولید آب سالم با بهره‌گیری از منابع انرژی طبیعی انجام شده است [۹]، [۱۰]. روش تبخیر خورشیدی (شکل ۱)، با الهام از مشاهده پدیده تبخیر در طبیعت و استفاده از انرژی پاک خورشید به عنوان فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر، راه حلی نوید دهنده با کمترین اثر مخرب زیست محیطی است [۱۱]–[۱۳]. با توجه به جذب ضعیف نور توسط آب و اتلاف حرارتی زیاد، کاربردهای عملی روش یاد شده نیز با موانعی روبروست. از این‌رو، جهت بهبود راندمان تبدیل نور به حرارت در سیستم‌های تولید بخار خورشیدی (SSG)، نانو مواد نوری حرارتی (فتوترمال) و

سیستم‌های تبخیری با گرمایش سطحی طراحی و توسعه یافتند [۱۴]–[۲۰].



شکل ۱- نمایی از فرایند تولید آب شیرین در یک سیستم تبخیر بخار خورشیدی [۱].

### ۱-۱- سیستم تولید بخار خورشیدی

برای بهبود راندمان در یک سیستم SSG، چهار پارامتر شامل جذب نور در پهنای باند وسیع، مدیریت اتلاف حرارتی، انتقال پیوسته آب به سطح تبخیر و خروج بخار مورد توجه قرار می‌گیرد. از میان عوامل یاد شده، توسعه جاذب‌های نور با طراحی ساختاری مناسب، بواسطه پتانسیل قابل توجه در بهبود راندمان، مورد استقبال پژوهشگران قرار گرفته است. این مواد، به سه زیرگروه اصلی شامل فلزات با خواص پلاسمونیک، نیمه هادی‌ها و مواد کربنی تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد برپایه کربن با داشتن ویژگی‌هایی چون قیمت کم، تجدیدپذیری و راندمان تبدیل فوق‌العاده، به عنوان گروهی جذاب در طراحی و ساخت مواد جاذب نور به کار می‌روند [۲۲].

بررسی عملکرد یک سیستم SSG با توجه به راندمان تبخیر ( $\eta$ ) قابل ارائه است. این پارامتر، به صورت نسبت انرژی گرمایی در تولید بخار به شار خورشیدی تابشی ( $\eta = \frac{\dot{m}h_{lv}}{q}$ ) تعریف می‌شود؛ که در آن،  $\dot{m}$ ، نرخ تبخیر ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )،  $h_{lv}$ ، آنتالپی تبخیر کل (مجموع گرمای محسوس<sup>۱</sup> و آنتالپی تغییر فاز با مقدار  $2/257 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  در فشار یک اتمسفر) و  $q$ ، شار نور برخوردی ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) است [۲۲]–[۲۴].

### ۲-۱- سازوکار تولید بخار در سیستم SSG

دریافت و ذخیره انرژی خورشیدی از طریق سه فرایند نوری الکتریکی (فتوولتائیک)، نوری شیمیایی (فتوشیمیایی) و فتوترمال به صورت‌های انرژی الکتریکی، شیمیایی و حرارتی انجام می‌شود. از این میان، فرایند فتوترمال، یک فرایند مستقیم با بیش‌ترین میزان بهره‌وری است که در آن، تهییج فوتونی منجر به تولید انرژی گرمایی (حرارت) می‌شود. اثر فتوترمال در مواد معدنی مانند فلزات نجیب، نیمه‌هادی‌ها و مواد آلی، شامل مواد برپایه کربن، رنگ‌ها و پلیمرهای مزدوج دیده شده است. استفاده از نانوساختارها برای تولید حرارت با بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در کاربردهای مختلف مانند شیرین‌سازی، تقطیر، خالص‌سازی و ... با استقبال زیادی مواجه شده است. یکی از مهم‌ترین دلایل برای این استقبال، توانایی نانوساختارهای فتوترمال در محدودسازی حرارت به فضایی در مقیاس نانومتری و در نتیجه عدم اتلاف حرارتی است. از طرفی، ویژگی‌های نوری و الکتریکی منحصر به فرد نانوساختارها سبب ایجاد رزونانس پلاسمون سطحی متمرکز، اثر محدودیت کوانتومی و ... می‌شود. این ویژگی‌ها در کنار عواملی چون مساحت سطحی زیاد و قابلیت مهندسی ساختار سبب بهبود عملکرد در نانوساختارهای فتوترمال شده است. در طراحی مواد جاذب دو عامل جذب نور و راندمان تبدیل نور به حرارت، در میزان کارایی فتوترمال موثر است. براساس برهم‌کنش‌های متفاوت تابش الکترومغناطیس با ماده، سه ساز و کار با نام‌های حرارت موضعی پلاسمونیک در فلزات، آسایش غیرتابشی در نیمه‌هادی‌ها و ارتعاشات گرمایی مولکول‌ها در مواد کربنی مطرح هستند [۲۶].

### ۲- طراحی جاذب بر پایه نانو مواد کربنی سیستم

تاکنون، مواد کربنی متفاوتی مانند کربن سیاه (CB)، گرافیت، گرافن (GO)، نانولوله کربنی (CNT) و ... در سیستم‌های تولید بخار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مواد نامبرده، به عنوان مبدل نور به حرارت عمل کرده و سبب تسریع در فرایند تبخیر در تابش‌های کوتاه مدت می‌شوند [۲۲]. خلاصه‌ای از برخی مطالعات انجام شده با استفاده از جاذب‌های کربنی در جدول ۲-۱، دسته‌بندی شده است.

<sup>1</sup> Sensible heat

**جدول ۱-۲: دسته‌بندی جاذب‌های کربنی برطبق برخی مطالعات انجام شده [۲۱].**

| مرجع | راندمان (%) | نوع سیستم | مواد کربنی                   |
|------|-------------|-----------|------------------------------|
| [۲۷] |             | شناور     | دانه‌های کربنی توخالی        |
| [۲۸] | ۶۹±۴        | معلق      | کربن سیاه                    |
| [۲۹] |             | شناور     | نانو ذرات کربن/اکسید آهن     |
| [۲۸] | ۶۸±۴        | معلق      | گرافن                        |
| [۳۰] | ۸۳          | شناور     | گرافن اکساید احیا شده        |
| [۳۱] |             | شناور     | تور آبگریز بر پایه کربن سیاه |
| [۳۲] | ۸۶/۵        | شناور     | غشایی از صفحات گرافنی        |
| [۱۷] | ۳۸          | شناور     | گرافن اکساید احیا شده        |
| [۳۳] | ۸۰          | معلق      | گرافن آلانیده با نیترژن      |
| [۳۴] | ۸۱          | شناور     | گرافن اکساید احیا شده        |
| [۳۵] | ۷۲          | شناور     | چوب سوخته                    |
| [۳۶] | ۶۴          | معلق      | گرافیت لایه‌ای با فوم کربن   |
| [۳۷] | ~۸۳         | شناور     | آنروژل گرافن                 |
| [۳۸] | ~۹۸         | شناور     | پارچه گرافنی                 |

انتقال آب به سطح تبخیر توسط نیروهای موئینگی از موارد بسیار مهم جهت دستیابی به یک سیستم بخار خورشیدی کارآمد است. فوم‌های کربن [۲۸ و ۲۹] و سایر ساختارهای سه‌بعدی کربن [۳۰ و ۳۱] با توسعه حفره‌های باز آبدوست و ساختارهای توخالی درونی سبب کاهش چگالی و همچنین پمپاژ پیوسته آب توسط نیروهای موئینگی می‌شوند. این ویژگی‌ها مواد کربنی را به گزینه‌ای مطلوب برای جذب نور در ساختارهای جاذب خورشیدی تبدیل کرده است [۴۴].

به طور کلی، استفاده از مواد کربنی در سیستم‌های SSG، به دو گروه طبقه‌بندی می‌شود. گروه اول، سیستم معلق است که مواد جاذب در یک مایع توزیع شده‌اند. این سیستم، به عنوان یک نانوسیال نیز شناخته می‌شود. گروه دوم، سیستم شناور یا سیستم مرزی است. در سیستم‌های شناور، مواد جاذب یا کامپوزیت‌ها، به طور خودآرا بر روی سطح مایع شناور می‌مانند. سیستم شناور به دو نوع شناوری آزاد و شناوری با کمک یک نگهدارنده تفکیک می‌شود.

## ۲-۱ گرافن

از میان مواد کربنی، گرافن با ویژگی‌هایی چون مساحت سطحی زیاد، وزن کم، حرارت ویژه مولی کم، دمای ذوب زیاد، جذب نور فوق‌العاده و هدایت نوری قابل تنظیم بوسیله آلایش شیمیایی، در سیستم‌های SSG مورد توجه است. استفاده از گرافن در سه مسیر قابل بهره‌مندی است. مسیرو اول، استفاده از یک سیستم نانو سیال با اهمیت آبدوستی مواد به کار رفته است. مسیر دوم، استفاده از یک سیستم شناور است. در حالت خود شناوری، آبدوستی و چگالی کم، مورد توجه است. برای مثال، آیروژل گرافن، علاوه بر تبدیل نور به حرارت زیاد از قابلیت خودشناوری نیز برخوردار است [۲۲]. در حالت شناوری به کمک یک نگهدارنده، معمولاً از چوب استفاده می‌شود، زیرا، انزوای حرارتی و نیروهای موئینگی در چوب به ترتیب منجر به موضعی کردن گرمای فنتوثرمال و همچنین تسهیل انتقال آب از بالک به سطح فعال، می‌شود. سومین مسیر، استفاده از یک عایق حرارتی برای بهبود تولید بخار خورشیدی است. در این مسیر نیز ترشوندگی مناسب مورد نیاز است. برای مثال، استفاده از گرافن عاملدار با یک گروه آبدوست، می‌تواند سبب بهبود راندمان تولید بخار

از دیدگاه میکروسکوپی یک مواد کربنی شبه گرافنی از تعداد زیادی شبکه بر پایه حلقه‌های شش ضلعی تشکیل شده‌اند. در این مواد، الکترون‌های غیر پیوندی به صورت خود به خودی منجر به تشکیل پیوندهای  $\pi$  غیرمستقر می‌شوند. این الکترون‌ها که تعدادشان زیاد اما از لحاظ قدرت پیوندی ضعیف هستند؛ می‌توانند به راحتی با برخورد فوتون با انرژی مناسب، از بالاترین اوربیتال مولکولی پر شده (HOMO) به پایین‌ترین اوربیتال مولکولی پر نشده (LOMO) برانگیخته و در مرحله آسایش الکترونی منجر به تولید حرارت شوند [۳۹]. از دیدگاه مزوسکوپی و ماکروسکوپی ناهموازی‌های سطحی و ساختارهای داخلی مانند حفرات و شکاف‌ها و ... با افزایش پراکندگی نور، سبب بهبود جذب و کاهش عبور نور می‌شوند [۴۰]. از طرفی، تمرکز حرارت در سطح با بهره‌گیری از ویژگی خودشناوری و جریان پیوسته

شود. این بهبود، یک اثر اصلاح سطحی است که با تحت تاثیر قرار دادن پروفایل آب در فصل مشترک بخار- مایع از طریق اثر موئینگی، حاصل می‌شود. این مسئله منجر به تشکیل لایه‌های نازکتر آب در محل نزدیک به خط تماس سه فاز با بیشینه دمای سطحی می‌شود. با توجه به مقاومت ناچیز لایه‌های نازک آب در مقابل تبخیر عملکرد سیستم بهبود می‌یابد. افزون بر این، ادغام راهکار عاملدار کردن گرافن با استراتژی استفاده از عایق حرارتی سبب بهبود راندمان تبدیل نور به حرارت می‌شود [۲۲]. استفاده از نانولوله‌های کربنی نیز در سیستم‌های نانوسیال نیز مورد توجه است. با توجه به آبریزی نانولوله‌های کربنی، استفاده از پوشش پایه و یا عامل‌دار کردن موثر واقع می‌شود. از طرفی، زغالی شدن مواد طبیعی مانند چوب، دانه‌ها، قارچ‌ها و غیره، نیز برای تولید مواد جاذب با راندمان تبدیل نور به حرارت مطلوب، مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲].

### ۳- روش‌های تولید جاذب در سیستم‌های SSG

این جاذب‌ها معمولاً به صورت نانوسیال، غشای کربنی و یا ساختارهای شبکه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲]. نانوسیالات معمولاً برای سیستم‌های معلق مناسب هستند. در این روش، مواد کربنی می‌بایست به خوبی در محلول پخش شوند. با توجه به ویژگی آبریزی مواد کربنی، این هدف نیازمند اصلاح سطحی و یا استفاده از سطح فعال‌ها است. در مورد اصلاح، مواد کربنی با پوشش‌های پایه [۴۵]، پلاسما [۴۶] و یا سطح فعال سدیم دو سیل سولفات (SDS) عمل می‌شوند. استفاده از امواج فراصوت نیز برای تولید نانو سیالات کربن [۲۸] و نانوسیالات نانو هیبریدی [۳۴] مورد استفاده قرار گرفته است [۴۷]. غشاهای کربنی برای سیستم‌های شناور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تولید یک غشای کربنی چندین مسیر شامل، فیلتراسیون خلا، غوطه‌وری، ریخته‌گری قطره‌ای، ریخته‌گری انجمادی و چاپ وجود دارد. فیلتراسیون خلا، فرایندی ساده با صرفه اقتصادی برای تولید غشای کربنی است. غشای کربنی را می‌توان بر روی زیرلایه‌هایی چون سلولز و استرهای سلولزی مرکب [۴۸] پوشش داد. در روش‌های غوطه‌وری و ریخته‌گری قطره‌ای، زیرلایه در محلول کربنی غوطه‌ور و یا محلول کربنی بر روی زیرلایه

ریخته و در نهایت خشک می‌شود. بسترهای پایه در این روش‌ها، چوب و کاغذ [۱۲ و ۳۹ و ۴۰]، فوم کربن [۳۶] و آلومینیوم [۵۱] هستند [۲۲]. در روش تولید ساختارهای سه بعدی به منظور بهبود راندمان SSG از قالب با دو نوع قالب نرم و سخت استفاده می‌شود. بهترین روش برای دستیابی به ساختارهای شبکه‌ای مصنوع بدون استفاده از هرگونه قالب، ادغام روش خشک کردن انجمادی و پخت حرارتی است؛ که یک فرایند دو مرحله‌ای است. استفاده از این روش برای ساختن گرافن سه بعدی از گرافن اکساید گزارش شده است. در مرحله اول، خشک کردن انجمادی محلول GO و در مرحله دوم، فرایند احیای GO به RGO از طریق پخت [۵۲] و یا تابش [۳۷] انجام می‌شود [۲۲]. علاوه بر این، می‌توان از روش چاپ نیز برای تولید ساختارهای سه‌بعدی استفاده کرد. در این روش، جوهر کامپوزیتی تهیه شده با استفاده از یک روبات رومیزی قابل برنامه‌ریزی، الگوی مورد نظر را بر روی ویفر سرامیکی مسطح، چاپ می‌کند. در ادامه، جهت خروج حلال از خشک کردن انجمادی استفاده می‌شود. در نهایت، طریق فرایند حرارتی در دمای  $140^{\circ}\text{C}$ ، تحت گاز آرگون جهت تثبیت فرایند انجام می‌شود [۵۳].

### ۴- نمک‌زدایی در سیستم‌های SSG

با توجه به اینکه مهم‌ترین کاربرد یک سیستم SSG، شیرین‌سازی خورشیدی است؛ لازم است تا مسئله گرفتگی نمک در طراحی سیستم مورد توجه قرار گیرد. اگرچه که تجمعات نمک به صورت فیزیکی و یا با شست‌وشوی ساده قابل حذف هستند؛ اما این روش‌ها با اختلال در تولید پیوسته آب و در نتیجه افزایش هزینه و کاهش راندمان همراه هستند [۵۴]. بنابراین، ویژگی خود نمک‌زدایی در این سیستم‌ها بسیار مورد توجه است. با توجه به تعامل ذاتی بین ترشوندگی سطحی و نمک‌زدایی در مواد کربنی، به نظر می‌رسد دستیابی به ویژگی دفع نمک در سیستم‌های با جاذب‌های کربنی کار ساده‌ای ناست. از این‌رو محققان از روش‌های مهندسی ساختار برای پاسخگویی به این چالش استفاده می‌کنند [۴۴]؛ که در ادامه برخی از آن‌ها بیان می‌شود. یکی از دلایل رسوب نمک بر روی سطح تبخیر، افزایش محلی غلظت نمک است. این پدیده با کنترل شیب غلظت نمک جهت توزیع یکنواخت مرتفع می‌شود. بهبود جریان همرفتی نیز بین آب



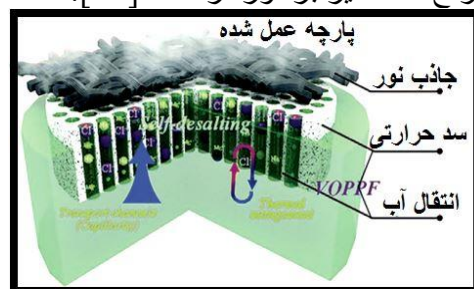
## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با بیان معضل جهانی کمبود آب قابل شرب، به طرح روش‌های موجود برای غلبه بر این مشکل پرداخته شد. از میان روش‌های موجود، استفاده از سیستم‌های تبخیر خورشیدی با بهره‌مندی از انرژی پاک و در دسترس خورشیدی به عنوان روشی امید بخش با استقبال چشمگیری مواجه شده است. در این سیستم، انرژی خورشیدی با استفاده از مواد فتوترمال جذب و به حرارت تبدیل می‌شود. استفاده از ساختار با انزوای حرارتی مناسب می‌تواند با تمرکز حرارت در سطح سبب بهبود راندمان تبدیل خورشیدی شود. ترشوندگی مناسب سطح تبخیر و نرخ مناسب انتقال آب از بالک نیز برای پیوستگی فرایند تبخیر ضروری است. در بین مواد فتوترمال، مواد بر پایه کربن به دلیل ویژگی‌هایی مانند قیمت مناسب، فراوانی و جذب در بازه طول موجی وسیع از نور خورشید بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. مکانیزم تبدیل نور به حرارت در این مواد، ارتعاشات گرمایی در مولکول‌ها است. افزایش دمای شبکه در اثر این ارتعاشات بیانگر اثر فتوترمال است. استفاده از گرافن با ویژگی‌های منحصر به فرد چون جذب نور زیاد و هدایت نوری قابل تنظیم منجر به طراحی و ساخت سیستم‌های SSG با بازده حرارتی مناسب شده است. رسوب نمک بر روی سطح تبخیر به ویژه در کاربردهای مقیاس بزرگ به عنوان چالش سیستم‌های تولید بخار خورشیدی مطرح است. برای رفع این معضل می‌توان از روش‌های مهندسی ساختار مانند بهبود جریان همرفتی، پوشش‌های جانوس و کنترل فضایی رسوبات نمک استفاده کرد. در روش کنترل فضایی رسوبات، استخراج و جداسازی نمک در کنار تولید آب شیرین قابل دست‌یابی است.

## ۶. منابع

- [1] Vörösmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers RB. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science* (80- ). 2000;289(5477):284–8.
- [2]. Ercin AE, Hoekstra AY. Water

بالک و سطح تبخیر منجر به کاهش غلظت قبل از فرایند رسوب‌گذاری می‌شود. طراحی سیستم‌های ویژه انتقال آب، تاثیر بسزایی در میزان جریان همرفتی دارد. در این راستا، در مطالعه‌ای، با طراحی آرایه‌ای عمودی (با انحنای کم) برای انتقال آب مشکل اختلاف غلظتی حل شد. در این طراحی (شکل ۲)، وجود فضای کافی برای عبور جریان سبب کاهش مکان‌های مناسب برای تبلور نمک می‌شود [۵۵]. افزون بر این، یکی دیگر از روش‌های امیدبخش، جلوگیری از انتقال نمک به مرز، با استفاده از اختلاف ترشوندگی بین دو سمت مرز است [۵۶]. در این طراحی، قرارگیری مرز جانوس روی سطح آب منجر به کاهش اتلاف حرارتی می‌شود. از طرفی بهبود جریان همرفتی از طریق کانال‌های زیرین منجر به رقیق شدن پیوسته غلظت در نزدیکی مرز و در نتیجه عدم رسوب نمک در سطح می‌شود. به علاوه، کنترل فضایی رسوبات نمک در نقطه خاص به جای حل کردن نمک و بازگردان آن به آب بالک نیز می‌تواند مشکل رسوبات نمک را بهبود بخشد. در این روش، هدایت مسیر عبور آب به مکان خاص، سبب توزیع فضایی رسوبات نمک می‌شود. در چنین ساختارهایی علاوه بر خروجی بخار آب، استخراج و جداسازی نمک نیز قابل دستیابی است [۴۴]. برای مثال، در یک سیستم تولید بخار، استفاده از پارچه با پوشش گرافن اکساید و کربن سیاه به عنوان جاذب نور منجر به حل شدن رسوبات نمک از روی جاذب و هدایت تجمعات بر روی جداره ظرف شد. بهره‌گیری از نیروی موئینگی در الیاف پارچه و آبدوستی نسبی پارچه در مقابل جداره، منجر به مشاهده این رفتار مطلوب در بهبود جریان همرفتی و کنترل فضایی رسوبات نمک شده است. این سیستم، با راندمان تبدیل نور به حرارت زیاد (۹۸٪) در کنار تولید آب شیرین، از قابلیت استخراج نمک نیز برخوردار است [۳۸].



شکل ۲- نمایی از فرایند کنترل توزیع حرارت در یک سیستم تبخیر بخار خورشیدی [۵۵].

Multifunctional Paper-Based rGO Composites for Solar-Driven Clean Water Generation. 2016;

[11]. Bang J, Moon IK, Oh J. Three-dimensional multimodal porous graphene-carbonized wood for highly efficient solar steam generation. *Sustain Energy Technol Assessments* [Internet]. 2023;57(March 2022):103199. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103199>

[12]. Zhu L, Gao M, Peh CKN, Ho GW. Solar-driven photothermal nanostructured materials designs and prerequisites for evaporation and catalysis applications. *Mater Horizons*. 2018;5(3):323–43.

[13]. Chang Y, Ma X, Zhao P. Solar Energy Materials and Solar Cells Flexible MoO<sub>2</sub> coated PTEF membrane for stable solar steam generation in harsh environments. *Sol Energy Mater Sol Cells* [Internet]. 2023;254(February):112240. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112240>

[14]. Zhang L, Tang B, Wu J, Li R, Wang P. Hydrophobic Light-to-Heat Conversion Membranes with Self-Healing Ability for Interfacial Solar Heating. *Adv Mater*. 2015;27(33):4889–94.

[15]. Liu Y, Yu S, Feng R, Bernard A, Liu Y, Zhang Y, et al. A bioinspired, reusable, paper-based system for high-performance large-scale evaporation. *Adv Mater*. 2015;27(17):2768–74.

[16]. Teng C, Xie D, Wang J, Zhu Y, Jiang L. A strong, underwater superoleophobic PNIPAM-clay nanocomposite hydrogel. *J Mater Chem A*. 2016;4(33):12884–8.

[17]. Yang J, Pang Y, Huang W, Shaw SK, Schiffbauer J, Pillers MA, et al. Functionalized Graphene Enables Highly Efficient Solar Thermal Steam Generation. *ACS Nano*. 2017;11(6):5510–8.

[18]. Deng Z, Zhou J, Miao L, Liu C, Peng Y, Sun L, et al. The emergence of solar thermal utilization: Solar-driven steam generation. *J Mater Chem A*.

footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environ Int* [Internet]. 2014;64:71–82. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>

[3]. Mekonnen MM, Hoekstra AY. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Sci Adv*. 2016;2(2):1–7.

[4]. Elsheikh AH, Sharshir SW, Ahmed Ali MK, Shaibo J, Edreis EMA, Abdelhamid T, et al. Thin film technology for solar steam generation: A new dawn. *Sol Energy* [Internet]. 2019;177(November 2018):561–75. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.058>

[5]. Zhu L, Gao M, Peh CKN, Ho GW. Recent progress in solar-driven interfacial water evaporation: Advanced designs and applications. *Nano Energy*. 2019;57(December 2018):507–18.

[6]. Verbeke R, Gómez V, Vankelecom IFJ. Chlorine-resistance of reverse osmosis (RO) polyamide membranes. *Prog Polym Sci* [Internet]. 2017;72:1–15. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.05.003>

[7]. Elimelech M, Phillip WA. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* (80- ). 2011;333(6043):712–7.

[8]. Khawaji AD, Kutubkhanah IK, Wie JM. Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*. 2008;221(1–3):47–69.

[9]. Huang J, He Y, Wang L, Huang Y, Jiang B. Bifunctional Au@TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticle films for clean water generation by photocatalysis and solar evaporation. *Energy Convers Manag* [Internet]. 2017;132:452–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.053>

[10]. Lou J, Liu Y, Wang Z, Zhao D, Song C, Wu J, et al. Bioinspired



- Energy Environ Sci. 2019;12(3):841–64.
- [27]. Zeng Y, Wang K, Yao J, Wang H. Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement. Chem Eng Sci [Internet]. 2014;116:704–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.057>
- [28]. Ni G, Miljkovic N, Ghasemi H, Huang X, Boriskina S V., Lin C Te, et al. Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation. Nano Energy. 2015;17:290–301.
- [29]. Zeng Y, Yao J, Horri BA, Wang K, Wu Y, Li D, et al. Solar evaporation enhancement using floating light-absorbing magnetic particles. Energy Environ Sci. 2011;4(10):4074–8.
- [30]. Liu Y, Chen J, Guo D, Cao M, Jiang L. Floatable, Self-Cleaning, and Carbon-Black-Based Superhydrophobic Gauze for the Solar Evaporation Enhancement at the Air-Water Interface. ACS Appl Mater Interfaces. 2015;7(24):13645–52.
- [31]. Zhang Y, Sivakumar M, Yang S, Enever K, Ramezani-pour M. Application of solar energy in water treatment processes: A review. Desalination [Internet]. 2018;428(October 2017):116–45. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.020>
- [32]. Ito Y, Tanabe Y, Han J, Fujita T, Tanigaki K, Chen M. Multifunctional Porous Graphene for High-Efficiency Steam Generation by Heat Localization. Adv Mater. 2015;27(29):4302–7.
- [33]. Wang G, Fu Y, Guo A, Mei T, Wang J, Li J, et al. Reduced Graphene Oxide-Polyurethane Nanocomposite Foam as a Reusable Photoreceiver for Efficient Solar Steam Generation. Chem Mater. 2017;29(13):5629–35.
- [34]. Xue G, Liu K, Chen Q, Yang P, Li J, Ding T, et al. Robust and Low-Cost Flame-Treated Wood for High-Performance Solar Steam Generation. ACS Appl Mater Interfaces. 2017;9(17):15052–7.
- 2017;5(17):7691–709.
- [19]. Li X, Li J, Lu J, Xu N, Chen C, Min X, et al. Enhancement of Interfacial Solar Vapor Generation by Environmental Energy. Joule [Internet]. 2018;2(7):1331–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.004>
- [20]. Shang W, Deng T. Solar steam generation: Steam by thermal concentration. Nat Energy [Internet]. 2016;1(9):1–2. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/nenergy.2016.133>
- [21]. Zhou L, Tan Y, Wang J, Xu W, Yuan Y, Cai W, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination. Nat Photonics. 2016;10(6):393–8.
- [22]. Dao V-D, Choi H-S. Carbon-Based Sunlight Absorbers in Solar-Driven Steam Generation Devices. Glob Challenges [Internet]. 2018;1700094:1700094. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/gch2.201700094>
- [23]. Tao P, Ni G, Song C, Shang W, Wu J, Zhu J, et al. Solar-driven interfacial evaporation. Nat Energy [Internet]. 2018;3(12):1031–41. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/s41560-018-0260-7>
- [24]. Zhang X, Yang L, Dang B, Tao J, Li S, Zhao S, et al. Nature-inspired design: p-toluenesulfonic acid-assisted hydrothermally engineered wood for solar steam generation. Nano Energy [Internet]. 2020;78(July):105322. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105322>
- [25]. Lu Y, Fan D, Xu H, Min H, Lu C, Lin Z, et al. Implementing Hybrid Energy Harvesting in 3D Spherical Evaporator for Solar Steam Generation and Synergic Water Purification. Sol RRL. 2020;4(9):1–11.
- [26]. Gao M, Zhu L, Peh CK, Ho GW. Solar absorber material and system designs for photothermal water vaporization towards clean water and energy production.

- 2014;105:82–90. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.013>
- [43]. Huxtable ST, Cahill DG, Shenogin S, Xue L, Ozisik R, Barone P, et al. Interfacial heat flow in carbon nanotube suspensions. 2003;(1):731–4.
- [44]. Wang G, Fu Y, Ma X, Pi W, Liu D, Wang X. Reusable reduced graphene oxide based double-layer system modified by polyethylenimine for solar steam generation. Carbon N Y [Internet]. 2017;114:117–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.071>
- [45]. Sajadi SM, Farokhnia N, Irajizad P, Hasnain M, Ghasemi H. Flexible artificially-networked structure for ambient/high pressure solar steam generation. J Mater Chem A. 2016;4(13):4700–5.
- [46]. Zhang P, Li J, Lv L, Zhao Y, Qu L. Vertically Aligned Graphene Sheets Membrane for Highly Efficient Solar Thermal Generation of Clean Water. ACS Nano. 2017;11(5):5087–93.
- [47]. Yan D, Li Y, Huo J, Chen R, Dai L, Wang S. Defect Chemistry of Nonprecious-Metal Electrocatalysts for Oxygen Reactions. Adv Mater. 2017;29(48):1–20.
- [48]. Zhang Y, Xiong T, Nandakumar DK, Tan SC. Structure Architecting for Salt-Rejecting Solar Interfacial Desalination to Achieve High-Performance Evaporation With In Situ Energy Generation. Adv Sci. 2020;7(9).
- [49]. Zhang Q, Yang H, Xiao X, Wang H, Yan L, Shi Z, et al. A new self-desalting solar evaporation system based on a vertically oriented porous polyacrylonitrile foam. J Mater Chem A. 2019;7(24):14620–8.
- [50]. Yang Y, Zhao H, Yin Z, Zhao J, Yin X, Li N, et al. A general salt-resistant hydrophilic/hydrophobic nanoporous double layer design for efficient and stable solar water evaporation distillation. Mater Horizons. 2018;5(6):1143–50.
- [35]. Ghasemi H, Ni G, Marconnet AM, Loomis J, Yerci S, Miljkovic N, et al. Solar steam generation by heat localization. 2014;1–7.
- [36]. Qu R, Zhang W, Liu N, Zhang Q, Liu Y, Li X, et al. Antioil Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Nanoparticle/Polydopamine/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sandwich Structure for Complex Wastewater Treatment: Dynamic Catalysis under Natural Light. ACS Sustain Chem Eng. 2018;6(6):8019–28.
- [37]. Simayee M, zad AI, Esfandiar A. Synergistic effect of reduced graphene oxide and carbon black as hybrid light absorber for efficient and antifouling texture-based solar steam generator. Sol Energy [Internet]. 2022;238(March):226–37. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.042>
- [38]. Chen C, Kuang Y, Hu L. Challenges and Opportunities for Solar Evaporation. Joule [Internet]. 2019;3(3):683–718. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.023>
- [39]. Hao W, Chiou K, Qiao Y, Liu Y, Song C, Deng T, et al. Crumpled graphene ball-based broadband solar absorbers. Nanoscale. 2018;10(14):6306–12.
- [40]. Guan W, Guo Y, Yu G. Carbon Materials for Solar Water Evaporation and Desalination. Small. 2021;17(48):1–17.
- [41]. Karami M, Bahabadi MAA, Delfani S, Ghosatloo A. Solar Energy Materials & Solar Cells A new application of carbon nanotubes nano fluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. Sol Energy Mater Sol Cells [Internet]. 2014;121:114–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.004>
- [42]. Hordy N, Rabilloud D, Meunier JL, Coulombe S. High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors. Sol Energy [Internet].



## Photothermal nanostructures for solar-driven desalination of saline water

M.Simae<sup>1</sup>, A.Irajizad<sup>1\*</sup>, A.Esfandiar<sup>2</sup>

1.Center for nanoscience and nanotechnology, Institute for convergence science and technology (ICST), Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2.Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract:

The harvesting of solar energy as the cleanest and most abundant power source of energy is considered an environmentally- friendly solution, to overcome the global challenge of potable water limitation. In solar steam generation systems,, the absorption and conversion of sunlight into heat are followed by photothermal materials. These materials are classified into three main groups, including carbon-based materials (such as graphene, carbon black,...), plasmonic metals (eg. Cu, Ag,...), and semiconductors structures (black titanium oxide,...). Among them, the use of carbon-based nanomaterials due to superior properties such as wide absorption bands of solar irradiation spectrum, availability, cost-effectively, and abundancy has greatly attracted researchers in this field, In this paper, the fundamental scientific base of solar-driven evaporators has been introduced. In addition, solar-to-thermal conversion mechanisms of the applied photothermal structures focused on carbon nanomaterials are discussed. In the following, some of the studies on new photothermal absorbers for solar desalination

**Keywords:** Nanocoatings, Iron nanoparticles, Magnetic graphene oxide, Corrosion, Epoxy