

## Improving the performance of graphite-based solar water desalination system by using plasmonic nickel nanoparticles and engineering the structure

Farzaneh Zeynab Heshmati<sup>1</sup>, Farzaneh Arabpour Roghabadi<sup>\*1,2</sup>,  
Vahid Ahmadi<sup>2</sup>, Seyed Mojtaba Sadrameli<sup>3</sup>.

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

2 Optoelectronics and Nanophotonics Research Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3 Department of Engineering, German University of Technology in Oman, Muscat, Oman.

### Abstract

**Research subject:** Because of the constant deterioration of environmental conditions, the world faces energy and clean water shortage. To address the water crisis issue, the solar steam generation system has been considered as a suitable technology for seawater desalination due to its competitive features, such as no carbon dioxide emission, low energy consumption, and high efficiency. In modern solar steam generation systems, solar energy is harvested by a photothermal absorber and then converted into thermal energy to heat a certain volume of water and produce steam. Then, the generated steam condenses on the inner surface of the cover, and clean water is collected. The five key features required for solar steam generation system are: high light absorption, low heat losses and heat localization, proper water transfer, and the ability to float on the water surface.

**Research approach:** In this study, a solar steam generation system based on a graphite absorber layer is built, and its performance is improved using nickel plasmonic nanoparticles. In order to investigate the dependency of the performance on the structure, two different layers including cotton and polyester felts are used to transfer water controllable. In this study, the water evaporation rate, surface temperature, and efficiency of the devices are evaluated.

**Main results:** Thermal efficiency and evaporation rate for the system based on the pure graphite absorber is 68.17% and 0.97 kg/m<sup>2</sup>.h, which increases to 93.57% and 1.37 kg/m<sup>2</sup>.h, respectively by adding nickel nanoparticles. Using two fabrics as the water managers reveal the importance of the thermal energy and mass transfer balancing in the systems, which strongly affects the devices performance.

### key words

Water desalination

Solar steam generation

Plasmonic

Graphite and Nickel NPs

Structural engineering

\*To whom correspondence should be addressed:  
arabpour@modares.ac.ir

# ارتقای عملکرد سامانه خورشیدی نمک‌زدایی آب مبتنی بر جاذب گرافیت با استفاده از نانوذرات پلاسمونیک نیکل و مهندسی ساختار

فرزانه زینب حشمتی<sup>۱</sup>، فرزانه عربپور رق آبادی<sup>۲\*</sup>، وحید احمدی<sup>۲</sup>، سید مجتبی  
صدرعاملی<sup>۳</sup>

۱ گروه فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
۲ گروه پژوهشی اپتوالکترونیک و نانوفوتونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.  
۳ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی آلمان در عمان، مسقط، عمان.

## چکیده

**موضوع تحقیق:** با توجه به شرایط رو به وخامت محیط‌زیست و به‌طور خاص جهانی که با کمبود انرژی و آب تمیز روبه‌رو است، ویژگی‌های سامانه خورشیدی تولید بخار از جمله عدم انتشار کربن‌دی‌اکسید، مصرف انرژی پایین و بازده بالا برای نمک‌زدایی آب دریا کمک بزرگی به تأمین نیاز بشر می‌کند. در سامانه‌های مدرن نمک‌زدایی خورشیدی، انرژی خورشیدی توسط جاذب فوتوترمال دریافت و سپس به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود تا حجم مشخصی از آب را گرم کرده و بخار تولید کند؛ بخار تولیدشده به سطح داخلی پوشش که سردتر است برخورد کرده، متراکم شده و آب تمیز در مخزن جمع می‌شود. سامانه خورشیدی تولید بخار باید دارای پنج ویژگی مهم و اساسی، شامل جذب نور زیاد، اتلاف حرارتی اندک، متمرکزسازی گرما، انتقال مناسب آب و در نهایت قابلیت شناوری بر سطح آب باشد.

**روش تحقیق:** در پژوهش پیش‌رو سامانه خورشیدی تولید بخار مبتنی بر جاذب گرافیت ساخته شده و عملکرد آن با استفاده از نانوذرات پلاسمونیک نیکل ارتقا داده شده است. به‌منظور بررسی اثر ساختار، دو زیرلایه برای جاذب فوتوترمال ساخته شد که شامل فوم پلی‌یورتان (PU) تخلخل‌بسته به‌عنوان عایق حرارتی و یکی از دو نوع نمد متفاوت از جنس پنبه یا پلی‌استر به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده آب دور فوم PU پیچیده شده است. در این مطالعه مهم‌ترین پارامترها از جمله نرخ تبخیر آب، دمای سطح نمونه و بازده سامانه اندازه‌گیری شده‌اند.

**نتایج اصلی:** بازده حرارتی و نرخ تبخیر برای جاذب گرافیتی خالص به ترتیب ۶۸/۱۷٪ و  $0.197 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$  است که با اضافه کردن نانوذرات نیکل به آن، به ترتیب تا مقدار ۹۳/۵۷٪ و  $1.37 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$  افزایش یافته است. اهمیت مهندسی ساختار با استفاده از دو زیرلایه متفاوت با جاذب آب پنبه‌ای یا پلی‌استری بررسی و متناسب با شرایط جاذب فوتوترمال و موازنه جرم و انرژی، مناسب‌ترین زیرلایه همراه با انتقال‌دهنده آب پلی‌استری برای جاذب فوتوترمال گرافیت/نیکل، انتخاب شد.

پژوهش‌های کاربردی  
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای  
سال ششم، شماره ۳، نسخه ۱  
پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۸۵-۷۵

## کلمات کلیدی

نمک‌زدایی آب دریا  
سامانه خورشیدی تولید بخار  
پلاسمونیک  
نانوذرات گرافیت و نیکل  
مهندسی ساختار

\*مسئول مکاتبات:

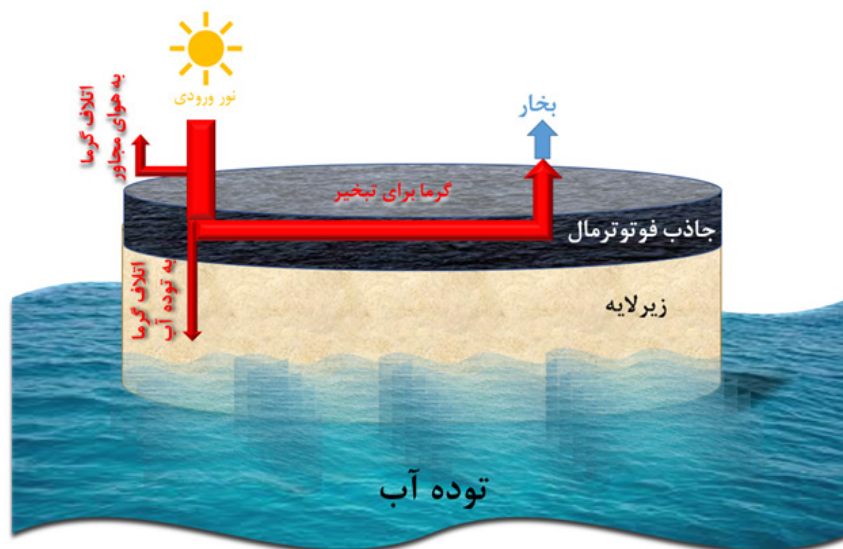
arabpour@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

نور در طیف وسیع خورشیدی و ایجاد عایق حرارتی در برابر گرمایش توده آب است [۳]. رویکرد متمرکزسازی گرما در فصل مشترک مایع-بخار توسط قاسمی و همکاران [۴] و برخی مطالعات بعدی [۶]-[۸] معرفی شده که به موجب آن بستری برای تولید خورشیدی بخار کارآمد در شدت‌های نوری پایین فراهم می‌شود. سامانه تولید بخار ارائه شده توسط قاسمی و همکاران [۴] ساختاری دولایه که لایه بالایی آن از گرافیت ورقه‌ورقه‌شده (Exfoliated Graphite) به عنوان جاذب فوتوترمال (Photothermal) تشکیل شده بود و لایه زیرین آن فوم کربنی با خاصیت عایق حرارتی، شناوری بر سطح آب و انتقال آب به سطح سامانه بود. مواد فوتوترمال با جذب نور خورشید تولید گرما کرده برای گرمایش آب مصرف می‌شود. اثر فوتوترمال را می‌توان در مواد معدنی، مانند فلزات نجیب و نیمه‌هادی‌ها، و همچنین مواد آلی مانند مواد مبتنی بر کربن، رنگ‌ها و پلیمرهای مزدوج مشاهده کرد [۸]. از سوی دیگر، با استفاده از عایق حرارتی می‌توان از اتلاف‌های گرمایی و نوری مختلفی که در سامانه خورشیدی تولید بخار وجود دارد، جلوگیری کرد. این اتلاف حرارتی شامل اتلاف گرما به وسیله تابش از سطح مشترک مواد فوتوترمال-آب، اتلاف گرما به وسیله رسانش گرما به هوای بالای سامانه، اتلاف گرما به وسیله هدایت گرما به توده آب است که با کاهش این اتلاف‌ها می‌توان بازده سامانه را تا حد زیادی بهبود بخشید (شکل ۱) [۹]، [۱۰].

به طور کلی، ماده فوتوترمال خاص از طریق سازوکار واحد، نور را به گرما تبدیل می‌کند. به طور مثال، ذرات پلاسمونی با سازوکار گرمایش موضعی پلاسمونی [۱۱]، [۱۲]، نیمه‌هادی‌ها [۱۳]، [۱۴] با سازوکار ایجاد و بازگشت الکترون-حفره و مواد کربنی [۱۵]، [۱۶] با

با توجه به اینکه کمبود آب به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی زمان حال تبدیل شده است، تلاش‌های قابل توجهی برای جستجوی راه‌حل‌های فناورانه برای کمبود آب وجود دارد. امروزه نمک‌زدایی خورشیدی که آب را با استفاده از نور خورشید با حداقل اثرات مخرب زیست‌محیطی نمک‌زدایی می‌کند، به شدت مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. انرژی خورشیدی به منظور تولید بخار در طیف گسترده کاربردها از مبدل انرژی خورشیدی در مقیاس کوچک برای سامانه‌های تصفیه یا استریل کردن آب تا نیروگاه‌های برق در مقیاس بزرگ و سامانه‌های نمک‌زدایی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، پرتوهای خورشیدی در دستگاه‌هایی به نام سولار استیل (Solar Stills) به دام می‌افتد که تابش خورشید توسط آب درون حوضچه جذب و به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و در نهایت آب را تبخیر می‌کند. بخار ایجاد شده بر روی سطح داخلی پوشاننده که سردتر است، متراکم و جمع می‌شود. اما رویکردهای تبخیر خورشیدی سنتی به دلیل جذب ضعیف خورشیدی و تلفات زیاد گرما که ناشی از قرارگیری جاذب نور در کف منبع آب است، عموماً بازده حرارتی پایین ۳۰-۴۵ درصد را ارائه می‌دهند و به نوبه خود تا حد زیادی مانع از کاربرد عملی این فناوری هستند [۲]. با توسعه اخیر سامانه‌های خورشیدی تولید بخار (Solar Steam Generation)، این امکان فراهم شده است که با افزایش بازده تولید بخار از انرژی نور خورشید، عملکرد کلی سامانه بهبود یابد. عوامل متعددی برای تسهیل تولید بخار کارآمد تحت تابش خورشیدی بدون نیاز به متمرکزکننده‌های نور مصنوعی یا توان الکتریکی ارائه شده است؛ از جمله مهم‌ترین آن‌ها، جذب کافی



شکل ۱ طرح‌واره سامانه تولید بخار خورشیدی شناور  
Figure 1. Schematic of floating solar steam generation system

در مطالعه حاضر دو سری لایه جاذب گرافیتی شامل جاذب گرافیت و جاذب گرافیت-نیکل ساخته شده است. برای آماده‌سازی این جاذب‌ها، ابتدا مقدار مشخصی از جاذب فتوترمال (گرافیت یا گرافیت-نیکل) به همراه 10 mg تیتانیوم دی‌اکسید برای بهبود ترشوندگی آب یون‌زده اضافه شده و تحت فراصوت به مدت 15 دقیقه قرار گرفته است. پس از آن با کمک قلم‌مو بر روی لایه‌های زیرین جاذب از جنس نمد (به قطر 3/5 cm) قرار گرفته و به مدت 10 دقیقه در آن با دمای 80 °C خشک شدند. برای ساخت زیرلایه، از فوم پلی‌یورتان تخلخل‌پسته به‌عنوان عایق حرارتی و نمد به‌عنوان مسیر آب‌رسانی استفاده شده است. روش ساخت فوم پلی-یورتان به این صورت است که رزین و عامل پخت پلی‌یورتان ساخت شرکت مکرر، به نسبت 1 به 1 درون قالب استوانه‌ای ریخته شده و به‌صورت یکنواخت هم‌زده شده است. سپس در شرایط دما و فشار محیط به مخلوط فرصت داده شد تا به صورت فوم سرد شکل گیرد. برای ایجاد مسیر آب‌رسانی از توده آب تا لایه جاذب نور، از نمد استفاده شده است، به این صورت که نمد دور فوم پلی‌یورتان پیچیده شده و مسیری دو-بعدی برای بالا آوردن آب ساخته است. این آزمایش‌ها با دو نمد متفاوت از جنس پنبه و ضخامت 0/5 mm و نمد پلی‌استر با ضخامت 1 mm /0/1 تکرار شده است. در شکل 2 الف) اجزای سازنده سامانه خورشیدی تولید بخار نشان داده شده است. پس از اتصال لایه جاذب فتوترمال به زیرلایه، کل سامانه به‌صورت یکپارچه بر روی توده آب درون مخزن آب (بشر) قرار می‌گیرد. سپس سامانه زیر تابش نور شبیه‌سازی خورشیدی برای ارزیابی عملکرد قرار می‌گیرد.

### ۲-۳ مشخصه‌یابی و دستگاه‌ها

مشخصات ماده اولیه نیکل از الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) (X-ray powder diffraction) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) (Transmission Electron Microscopy) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی میزان جذب نور از طیف‌سنج فرابنفش-مرئی آوانتس استفاده شد. به‌منظور بررسی، آزمون‌های ارزیابی بازده تولید بخار در فضای باز، پرداخته می‌شود. سامانه بر روی ظرف آب تحت تابش شبیه‌ساز خورشیدی قرار گرفت. به‌منظور این امر از دستگاه شبیه‌سازی خورشیدی ساخت شرکت شریف سولار، موجود در آزمایشگاه نانوآپتوالکترونیک استفاده شد. با استفاده از سلول خورشیدی، شدت تابش نور در 100 mW/cm<sup>2</sup> (اصطلاحاً یک خورشید) تنظیم و کالیبره شده است.

بازده حرارتی این سامانه به صورت نسبت بین گرمای تخیر در سامانه تولید بخار خورشیدی به کل انرژی نور ورودی تعریف شده است [21].

سازوکار فتوترمال مبتنی بر لرزش حرارتی مولکول‌ها تولید گرما می‌کنند. ساختارهای کربنی به‌دلیل قابلیت جذب خوب نور خورشید و قیمت مناسب بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [17]. اما مواد کربنی به‌منظور افزایش تولید بخار، گاهی اوقات به فیلم‌های گرافن و فیلم‌های نانولوله کربنی تبدیل می‌شوند که به‌طور چشمگیری پیچیدگی و هزینه مواد را افزایش می‌دهد [18]. این در حالی است که پهنای باند جذب مواد پلاسمونیک معمولاً با کنترل اندازه و شکل آن‌ها تنظیم می‌شود. رویکرد بسیار کاربردی این است که با درگیر کردن بیش از یک سازوکار فتوترمال میزان جذب نور خورشید را افزایش داده و سامانه اقتصادی ساخته شود. این امر برای ترکیبات فتوترمال هیبریدی که ترکیبی از دو یا چند جزء است و سازوکارهای مختلف فتوترمال را از خود نشان می‌دهد، صادق است [19]، [20].

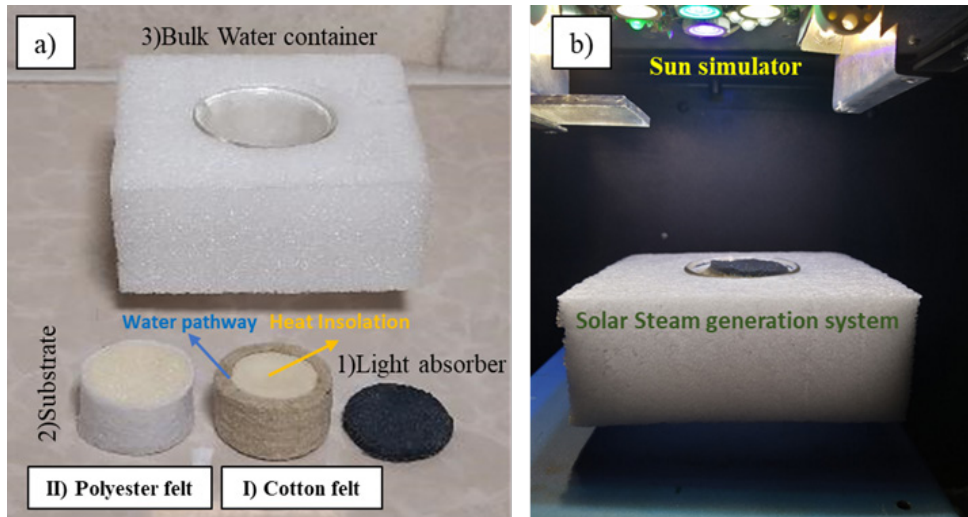
در پژوهش پیشرو سامانه تولید بخار خورشیدی مبتنی بر جاذب گرافیت ساخته شده و عملکرد آن با استفاده از نانوذرات پلاسمونیک نیکل ارتقا داده شده است. عملکرد جاذب هیبریدی فتوترمال حاصل با استفاده از نانوذرات پلاسمونیک نیکل به‌صورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است. برای این کار مقدار بهینه از ماده فتوترمال گرافیت بر روی زیرلایه ثابت (شامل نمد و فوم پلی‌یورتان) مشخص و سپس با افزودن نانوذرات نیکل به مقدار بهینه گرافیت، عملکرد سامانه بهبود داده شده است. همچنین از عایق حرارتی فوم پلی‌یورتان پیچیده‌شده در نمد به‌عنوان زیرلایه جاذب فتوترمال به‌کار برده شده است. نمد پیچیده‌شده دور فوم، مسیرهای آب‌رسانی سامانه است که از دو نمد پنبه‌ای و پلی‌استری به‌ترتیب با ضخامت 0/5 و 0/1 میلی‌متر استفاده شده است. اثرات مهندسی ساختار با استفاده از این دو زیرلایه متفاوت بررسی و متناسب با شرایط جاذب فتوترمال و موازنه جرم و انرژی، مناسب‌ترین زیرلایه انتخاب شده است.

### ۲ تجربی

#### ۲-۱ مواد

مواد شیمیایی شامل نانوذرات نیکل از شرکت US Research Nanomaterial، گرافیت از شرکت Sigma و تیتانیوم دی‌اکسید از Evonik industries AG خریداری شدند. برای ساخت فوم پلی‌یورتان، مونومر ISO370 و عامل پخت Polymoc327/B2 از گروه صنعتی مکرر در تهران، ایران تهیه شد. نمد از دو جنس پنبه و پلی‌استر برای جذب و انتقال آب خریداری شد. آب مورد استفاده برای ساخت لایه‌های جاذب، آب مقطر و برای انجام آزمون‌های عملکرد سامانه‌ها آب شهری تهران با TDS معادل 280 ppm است.

#### ۲-۲ ساخت سامانه خورشیدی تولید بخار



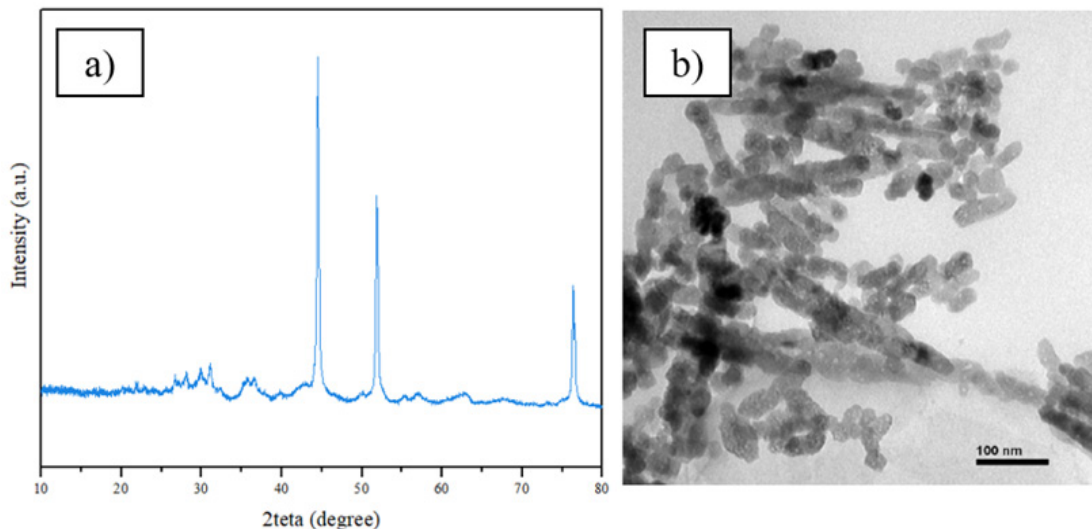
شکل ۲ الف) تصویر اجزای سازنده سامانه خورشیدی تولید بخار، شامل (۱) جاذب فتوترمال، (۲) زیرلایه به صورت فوم پلی‌یورتان پیچیده شده در نمد و (۳) مخزن توده آب. زیرلایه همراه با (I) نمد پنبه‌ای و (II) نمد پلی‌استری. ب) تصویر سامانه زیر تابش نور شبیه‌ساز خورشیدی  
 Figure 2. a) Illustration of the solar steam generation system, including the 1) photothermal absorber, 2) polyurethane foam covered by felt as a substrate, and 3) bulk water mass container. A substrate with I) cotton felt and II) with polyester. b) Image of the system under the light of the solar simulator

### ۳ نتایج و بحث

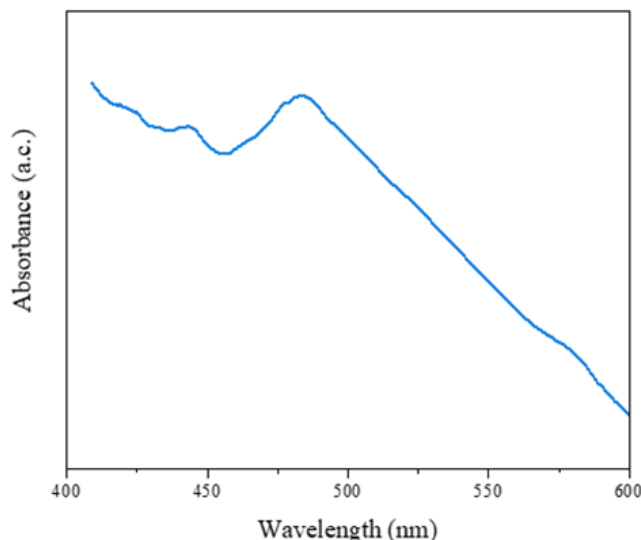
همان‌طور که بیان شد، در این پژوهش، سامانه خورشیدی تولید بخار مبتنی بر جاذب گرافیت و نانوذرات نیکل ساخته و اثرات هم‌افزایی نانوذرات پلاسمونیک نیکل با جاذب گرافیت مشاهده شده است. شکل ۳ الف) الگوی پراش پرتوی ایکس رسوب (XRD) را در محدوده  $2\theta$  های ۱۰ تا ۸۰ و شکل ۳ ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (TEM) را برای نانوذرات نیکل نشان می‌دهد. با توجه به شکل XRD قله‌های الگو با صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) تطابق دارد که مربوط به داده‌های استاندارد JCPDS #۰۴-۰۸۵۰ نانوذرات نیکل است [۲۴]. هیچ قله پراش

$$\eta = \frac{\dot{m} h_e}{Q_s A} \quad (1)$$

$\dot{m}$  میزان نرخ آب تبخیرشده بر حسب کیلوگرم بر ساعت،  $h_e$  کل آنتالپی حرارت مورد نیاز برای تغییر فاز آب از مایع به بخار (مجموع گرمای محسوس و تغییر فاز) بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم،  $Q_s$  شدت نور خورشیدی (۱ کیلووات بر مترمربع) و  $A$  سطح مقطع (مترمربع) است [۲۲]، [۲۳]. برای اندازه‌گیری دمای سطح نمونه از دوربین ترموگرافی (Thermography) مدل ThermoCam P۲۰۰ ساخت کشور انگلستان استفاده شده و تصاویر به کمک نرم‌افزار IR Reporter تحلیل شد.



شکل ۳ نانوذرات نیکل به‌عنوان ماده فتوترمال پلاسمونیک، الف) الگوی XRD و ب) تصویر TEM  
 Figure 3. Nickel nanoparticles as a photothermal plasmonic material, a) XRD pattern b) TEM image



شکل ۴ طیف جذب مرئی-فرابنفش نانوذرات نیکل  
Figure 4. UV-VIS absorption spectrum of nickel nanoparticles

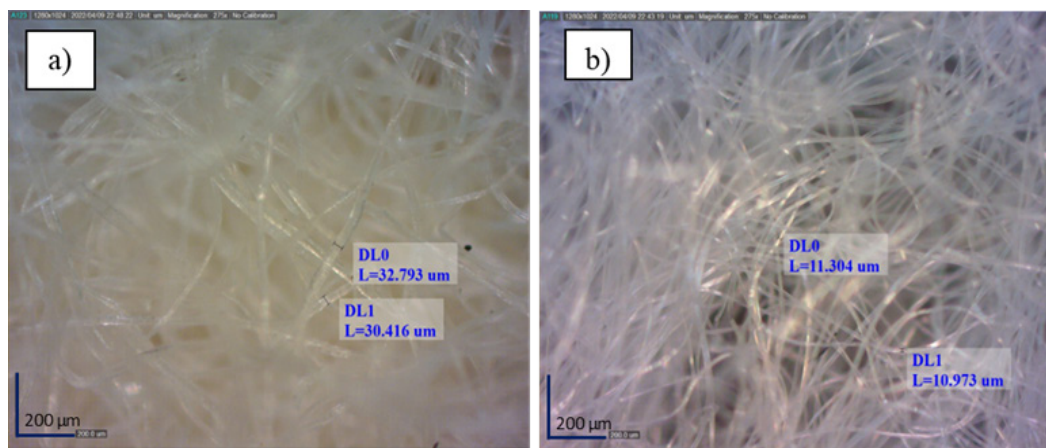
حرارتی فوم پلی‌یورتان تخلخل‌بسته ساخته‌شده در این پژوهش در حالت خشک و مرطوب به ترتیب ۰/۰۳۷ و ۰/۰۳۹ وات بر مترکلوین است. همچنین چگالی کم آن، که در حالت خشک و مرطوب به ترتیب برابر با ۰/۴۳۸ و ۰/۴۷۳ گرم بر سانتی‌مترمربع است، باعث شناور ماندن لایه جاذب فوتوترمال بر روی آب مخزن می‌شود [۲۵]. به موجب منافذ بسته این فوم، تنها ۱۰ درصد از ارتفاع فوم در آب فرو رفته است که در کنار دو مزیت کاهش رسانایی حرارتی و شناور کردن ساختار موجب محدود کردن جریان آب به سطح نیز می‌شود، زیرا نمذ پیچیده‌شده دور فوم می‌تواند آب را از طریق مسیر دوبعدی به کمک نیروی موئینگی و آبدوستی جذب کند و به‌طور مداوم و محدود آب را از توده آب بر روی سطح تبخیر منتقل کند.

تصاویر میکروسکوپی از نمدهای مورد استفاده در شکل ۵ آورده شده است. نیروی موئینگی و در نتیجه آن جذب آب، به غیر از آنکه به خاصیت ذاتی مواد نمذ بستگی دارد، به میزان تراکم ایاف نمذ مرتبط

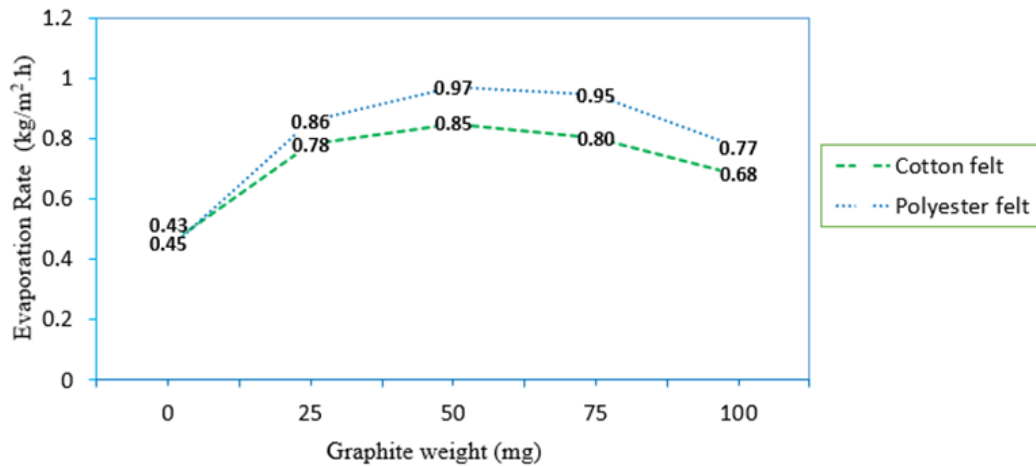
دیگری مشاهده نشده است که احتمال وجود هرگونه ناخالصی را از بین می‌برد. مشاهدات TEM نمونه نشان می‌دهد که شکل ذرات Ni تقریباً کروی است و قطر متوسط ذرات در حدود ۴۰ نانومتر است. همچنین مقدار مشخصی از تجمع ذرات مشاهده می‌شود که ممکن است ناشی از تعامل مغناطیسی باشد.

امکان جذب نور زیاد در کل طیف خورشیدی و تبدیل نور به گرما با بازده بالا، اولین قدم در ساخت دستگاه نمک‌زدایی خورشیدی با بازده بالا است. طیف جذب مرئی-فرابنفش (UV-Vis) نانوذرات نیکل ۴۰ نانومتری در محیط آب در شکل ۴ نشان داده شده است. قله ظاهر شده در ناحیه مرئی در نزدیکی ۴۷۵ نانومتر، نشان‌دهنده خاصیت پلاسمونیک این نانوذرات است.

جاذب‌های فوتوترمال برای مهار اتلاف حرارت به توده آب بر روی زیرلایه‌ای از پلی‌یورتان پیچیده‌شده در نمذ، ثابت شده است. انرژی متمرکزشده بر روی جاذب همراه با سرعت جریان آب محدود منجر به افزایش دمای فاز بخار تولیدشده می‌شود [۴]. هدایت



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری از الف) نمذ پنبه‌ای و ب) نمذ پلی‌استری  
Figure 5. Optical microscope images; a) cotton felt and b) polyester felt



شکل ۶ نمودار نرخ تبخیر آب بر اساس مقدار جاذب فوتوترمال گرافیت  
Figure 6. The plot of evaporation rate vs. graphite photothermal absorber weight

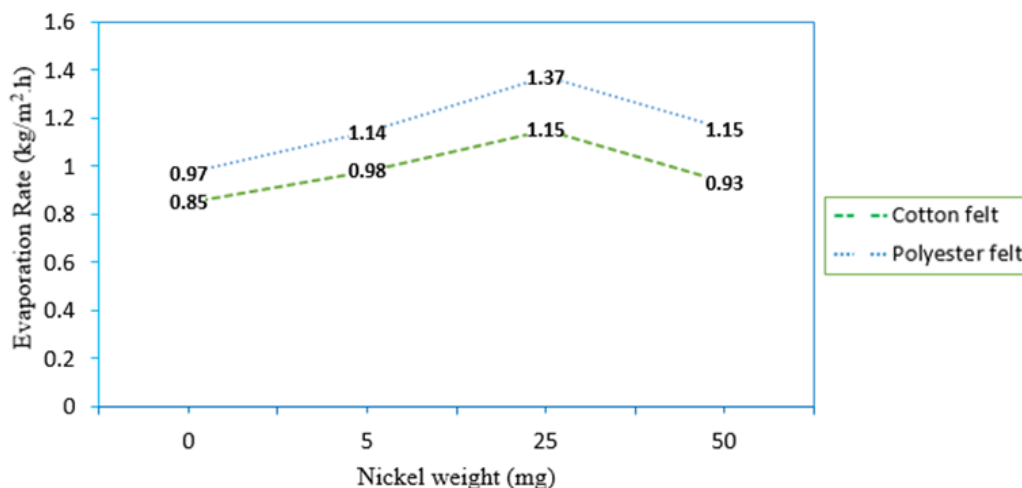
جاذب از نوع نانوذرات نیکل باعث افزایش نرخ تبخیر می‌شود. مقایسه دو شکل ۶ و شکل ۷ مشخص کرد که افزودن نیکل به گرافیت (۵۰ mg) به مقدار ۲۵ mg باعث افزایش نرخ تبخیر نسبت به دو نمونه گرافیت خالص با مقدار ۵۰ mg و ۷۵ mg شده است. جاذب فوتوترمال گرافیت دارای پهنای باند وسیع و میزان جذب ضعیف است [۲۶]. این در حالی است که برداشت نور نانوذرات نیکل مانند دیگر نانوذرات پلاسمونیک، مربوط تشدید پلاسمون سطح موضعی (Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)) است [۲۷]، [۲۸]. طیف UV-Vis نانوذرات نیکل خالص دارای جذب قوی در ناحیه مرئی و فرابنفش است. در نتیجه این هم‌افزایی بین گرافیت و نیکل، می‌توان به نرخ تبخیر عالی  $1/37 \text{ h.kg/m}^2$  برای ۲۵ میلی‌گرم نیکل همراه با گرافیت با استفاده از نمذ پنبه‌ای دست یافت. نرخ تبخیر پس از افزایش مقدار نیکل بیش از ۲۵ میلی‌گرم کاهش می‌یابد؛ دلیل این امر را می‌توان به بسته شدن خلل و فرج نمود و کاهش انتقال آب به سطح تبخیر و همچنین افزایش اتلاف حرارتی و بازتاب نور به سمت بالای جاذب فوتوترمال به واسطه نانوذرات نیکل، نسبت داد.

در شکل ۸ تصویر دوربین ترموگرافی، برای هر دو نمذ به صورت تصویر از بالا و از کنار، به منظور بررسی مهندسی ساختار، آورده شده است. به موازات جذب نور خورشید در لایه جاذب فوتوترمال و ایجاد ناحیه داغ بر روی سطح سامانه، سیال آب از طریق مسیر دوبعدی انتقال آب زیرلایه به‌طور مداوم به منطقه گرم جاذب فوتوترمال ارائه می‌شود و از گرمای تولیدی توسط جاذب فوتوترمال به‌منظور تبخیر سطحی استفاده می‌کند و به همین دلیل دمای سطح کمتر از لایه زیرین است. عایق حرارتی در زیرلایه جاذب فوتوترمال از اتلاف گرمای تولید شده، به توده آب جلوگیری می‌کند. در این سامانه سرعت تبخیر در مدت کوتاهی به حالت پایدار می‌رسد و در نتیجه سامانه شاهد تداوم متمرکزسازی نوری و حرارتی در دمای نسبتاً پایین است.

است. فاصله بین الیاف که بستری‌های آب هستند باید به اندازه کافی کم باشد، که ترکیبی از کشش سطحی (انسجام درون آب) و نیروهای چسبندگی بین مایع و الیاف برای پیشبرد آب اتفاق افتد. نمذ از جنس پنبه دارای الیافی با قطر در حدود ۳۰ میکرون و فاصله الیاف بازتر و الیاف نمذ پلی‌استری با قطر ۱۰ میکرون و تراکم تری است. این تفاوت در جنس و بافت نمدها باعث تفاوت در میزان بالا کشیدن و جذب آب در آن‌ها شده است. میزان بالا کشیدن و جذب آب در مدت ۱۰ دقیقه برای نمذ پنبه‌ای به ترتیب ۱۵ cm و ۳۶۹/۷٪ و برای پلی‌استری ۱۰ cm و ۲۰۳/۴٪ محاسبه شده است.

شکل ۶ نرخ تبخیر سامانه تولید بخار خورشیدی را برای دو سامانه گرافیت خالص و گرافیت به همراه نانوذرات نیکل برحسب افزایش مقدار جاذب نشانده شده را نمایش داده است. در شکل ۶ جاذب گرافیت با مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر روی زیرلایه نشانده شده است. با افزایش مقدار گرافیت بر روی سطح، نرخ تبخیر افزایش می‌یابد، زیرا مقدار جاذب فوتوترمال برای دریافت نور کافی نیست؛ اما پس از رسیدن به بیشترین مقدار گرافیت که نقطه بهینه جاذب است، نرخ تبخیر دوباره رو به کاهش می‌رود. هنگامی که بیش از حد گرافیت بر روی سطح وجود داشته باشد، ممکن است خلل و فرج سطح مسدوده شده، از رسیدن آب به سطح تبخیر جلوگیری شود و در نتیجه نرخ تبخیر کاهش می‌یابد. تحت تابش نور یک خورشید، بیشترین نرخ تبخیر در مقدار گرافیت ۵۰ میلی‌گرم برای دو نمذ پنبه‌ای و پلی‌استری به ترتیب  $1/97 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$  و  $0/85$  اندازه‌گیری شده است.

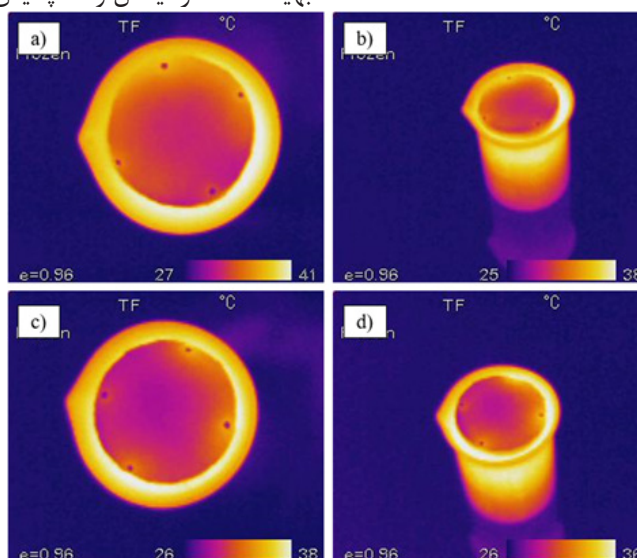
برای افزایش نرخ تبخیر، از نانوذرات نیکل استفاده شده است که با درصدهای وزنی متفاوت به نمونه با بهترین عملکرد گرافیتی اضافه شده است. برای این کار از مقدار ثابت ۵۰ mg گرافیت و مقادیر ۰، ۵، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم از نانوذرات نیکل استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش مقدار



شکل ۷ نمودار نرخ تبخیر بر اساس مقدار جاذب فتوترمال نیکل  
Figure 7. The plot of evaporation rate vs. nickel photothermal absorber weight

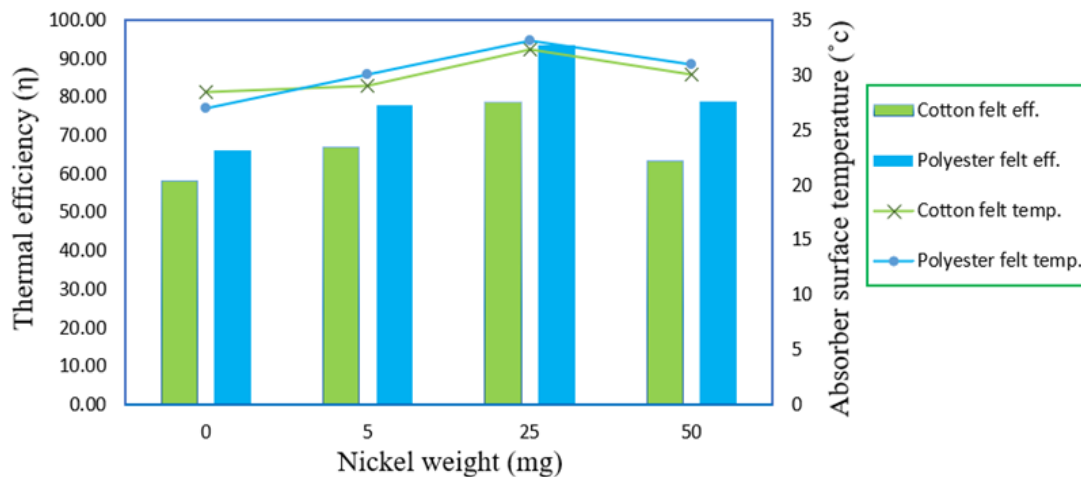
بیش از حد آب در سطح جاذب نوری موجب اختلال در تبخیر سطحی شده، گرمای ایجاد شده توان تبخیر را نداشته و از اتلاف حرارتی از سطح بالایی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین به نظر می‌رسد نم‌پنبه‌ای با آنکه آب بیشتری را جذب می‌کند اما باعث مختل شدن عملیات تبخیر سطحی شده است. در نتیجه آن بهتر است نم‌را بر اساس شرایط جاذب فتوترمال و در واقع موازنه جرم و انرژی برای هر سامانه مجزا انتخاب کرد. به‌منظور بررسی بخشی از گرمای تولیدشده که از طریق جابه‌جایی و تشعشع به هوا و هدایت به توده آب منتقل و تلف می‌شود از مفهوم بازده حرارتی ( $\eta$ ) استفاده می‌شود [۲۹]. در شکل ۹ بازده و دمای سطحی جاذب فتوترمال گرافیت/نیکل برای دو حالت استفاده از نم‌پنبه‌ای و نم‌پلی‌استری نشان داده شده است. روند این نمودار مانند نرخ تبخیر نشان‌دهنده نقطه بهینه مقدار نیکل و همچنین عملکرد بهتر با استفاده

همچنین دو سری تست با دو نوع نم‌پنبه‌ای (پلی‌استری) و پلی‌استری) برای جذب آب صورت گرفته نیز در شکل ۶ و شکل ۷ گزارش شده است. با توجه به این نتایج روند تغییرات نرخ تبخیر با دو نم‌پنبه متفاوت مشابه یکدیگر است اما نرخ تبخیر برای جاذب آب با نم‌پلی‌استری بالاتر از نم‌پنبه‌ای است. میزان جذب آب پارامتر کلیدی در تبخیر سطحی سامانه تولید بخار خورشیدی است. همان‌طور که اشاره شد، میزان جذب آب برای پنبه‌ای و پلی‌استری به ترتیب ۳۶۹/۷ و ۲۰۳/۴ درصد محاسبه شده است. می‌توان این تفاوت در آب‌رسانی را به سطح مقطع بیشتر نم‌پنبه در تماس با آب به ضخامت بیشتر آن نسبت داد. گرچه به نظر می‌رسد که نم‌پنبه‌ای از نظر جذب آب و آب‌رسانی بهتر از نم‌پلی‌استری است اما به دلیل آنکه باید آب را به صورت کنترل‌شده و متناسب با لایه جاذب فتوترمال به سطح تبخیر انتقال داده شود، زیرا افزایش



شکل ۸ تصویر دوربین حرارتی الف و ب) از بالا و کنار سامانه برای نم‌پنبه‌ای و ج و د) از بالا و کنار سامانه برای نم‌پلی‌استری  
Figure 8. Thermographic camera images, a and b) top and side views of the cotton felt system and c and d) Top and side views of the polyester felt system





شکل ۹ نمودار بازده حرارتی و دمایی سطح بر اساس مقدار جاذب فتوترمال گرافیت/نیکل برای نمدهای پنبه‌ای و پلی‌استری  
Figure 9. Thermal efficiency and surface temperature vs. graphite/nickel photothermal absorbers for cotton and polyester felts

عایق‌های حرارتی و انتقال آب (به عنوان زیرلایه) عناصر اصلی در سامانه تولید بخار خورشیدی هستند که عملکرد سامانه نمک‌زدایی خورشیدی عمدتاً توسط خواص و ابعاد آن‌ها کنترل می‌شود. استفاده از دو نوع نمدهای پنبه‌ای و پلی‌استری با خاصیت ذاتی متفاوت در نیروی موینگی و آبرسانی، منجر به تغییر در عملکرد سامانه گشته است. بنابراین، به‌طور کلی برای هر سامانه با مشخصات مخصوص نیاز به مهندسی ساختار است، چرا که متناسب با شرایط جاذب فتوترمال، موازنه جرم و انرژی نرمال گشته و مناسب‌ترین زیرلایه برای جاذب فتوترمال گرافیت/نیکل انتخاب شود.

#### قدردانی

این مقاله از رساله دوره دکتری مصوب در دانشگاه تربیت مدرس استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران در گروه پژوهشی و آزمایشگاهی اپتوالکترونیک و نانوفوتونی (NOPL) دانشگاه تربیت مدرس که ما را در انجام و ارتقای کمی و کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

از نمدهای پنبه‌ای است. بازده حرارتی و دمایی سطحی برای جاذب گرافیت بدون ماده فتوترمال نیکل برای نمدهای پنبه‌ای به ترتیب ۵۵/۰۵ درصد و  $25/5^{\circ}\text{C}$  و برای پلی‌استری به ترتیب ۶۶/۲۵ درصد و  $27/0^{\circ}\text{C}$  به دست آمده است. در صورتی که با اضافه کردن ۲۵ میلی‌گرم نیکل بازده حرارتی به مقادیر ۷۸/۵۴ درصد و  $93/57^{\circ}\text{C}$  درصد برای دو نمدهای پنبه‌ای و پلی‌استری ارتقا یافته است. دمایی سطحی در نقطه ۲۵ میلی‌گرم نیکل همراه با گرافیت با مقادیر  $32/2^{\circ}\text{C}$  و  $33/1^{\circ}\text{C}$  برای نمدهای پنبه‌ای و پلی‌استری، حدوداً تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بازده عملکرد جاذب فتوترمال مبتنی بر گرافیت به کمک هیبریداسیون آن با نانوذرات پلاسمونیک نیکل ارتقا پیدا کرده است. هنگامی که افزایش بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم گرافیت بر روی سطح سامانه باعث بهبود نرخ تبخیر و بازده حرارتی نمی‌شد، اضافه کردن مقدار کمی نیکل باعث ارتقای عملکرد سامانه شد. در نتیجه هم‌افزایی بین گرافیت و نیکل، مقادیر نرخ تبخیر  $1/37\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$  و بازده حرارتی  $93/57\%$  حاصل شد. همچنین نتایج نشان داد که در کنار مواد فتوترمال (به عنوان جاذب نور خورشیدی)، مواد

## مراجع

- [1] Bae K., Kang G., Cho S.K., Park W., Kim K. and Padilla W.J., Flexible Thin-Film Black Gold Membranes with Ultrabroadband Plasmonic Nanofocusing for Efficient Solar Vapour Generation, *Nature Communications*, 6, 1–9, 2015.
- [2] Chen H., Wu S.L., Wang H.L., Wu Q.Y. and Yang H.C., Photothermal Devices for Sustainable Uses beyond Desalination, *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(3), 2000056, 2021.
- [3] Deng Z., Zhou J., Miao L., Liu C., Peng Y., Sun L. and Tanemura S., The Emergence of Solar Thermal Utilization: Solar-Driven Steam Generation, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(17), 7691–7709, 2017.
- [4] Gao M., Zhu L., Peh C.K. and Ho G.W., Solar Absorber Material and System Designs for Photothermal Water Vaporization towards Clean Water and Energy Production, *Energy and Environmental Science*, 12(3), 841–864, 2019.
- [5] Ghasemi H., Ni G., Marconnet A.M., Loomis J., Yerci S., Miljkovic N. and Chen G., Solar Steam Generation by Heat Localization, *Nature Communications*, 5, 1–7, 2014.
- [6] Gong H., Liu X., Liu G., Lin Z., Yu X. and Zhou L., Non-noble Metal Based Broadband Photothermal Absorbers for Cost Effective Interfacial Solar Thermal Conversion, *Nanophotonics*, 9(6), 1539–1546, 2020.
- [7] Ibrahim I., Seo D.H., McDonagh A.M., Shon H.K. and Tijing L., Semiconductor Photothermal Materials Enabling Efficient Solar Steam Generation toward Desalination and Wastewater Treatment, *Desalination*, 500, 114853, 2021.
- [8] Joo B.S., Kim I.S., Han I.K., Ko H., Kang J.G. and Kang G., Plasmonic Silicon Nanowires for Enhanced Heat Localization and Interfacial Solar Steam Generation, *Applied Surface Science*, 583, 152563, 2022.
- [9] Karami S., Arabpour Roghabadi F., Pashaei Soorbaghi F., Ahmadi V. and Sadrameli S.M., Highly Efficient Solar Steam Generators Based on Multicore@ Shell Nanostructured Aerogels of Carbon and Silica as the Light Absorber- Heat Insulator, *Solar RRL*, 5(7), 2100048, 2021.
- [10] Karami S., Roghabadi F.A., Maleki M., Ahmadi V. and Sadrameli S.M., Materials and Structures Engineering of Sun-Light Absorbers for Efficient Direct Solar Steam Generation, *Solar Energy*, 225, 747–772, 2021.
- [11] Kim C., Ryu Y., Shin D., Urbas A.M. and Kim K., Efficient Solar Steam Generation by Using Metal-Versatile Hierarchical Nanostructures for Nickel and Gold with Aerogel Insulator, *Applied Surface Science*, 517, 146177, 2020.
- [12] Li X., Ni G., Cooper T., Xu N., Li J., Zhou L., Hu X., Zhu B., Yao P. and Zhu J., Measuring Conversion Efficiency of Solar Vapor Generation, *Joule*, 3(8), 1798–1803, 2019.
- [13] Liu Y., Yu S., Feng R., Bernard A., Liu Y., Zhang Y., Duan H., Shang W., Tao P., Song C. and Deng T., A Bioinspired, Reusable, Paper-Based System For High-Performance Large-Scale Evaporation, *Advanced Materials*, 27(17), 2768–2774, 2015.
- [14] Maleki M., Arabpour Roghabadi F. and Sadrameli S.M., High-Performance Solar Steam Generator Using Low-Cost Biomass Waste Photothermal Material and Engineering of the Structure, *ACS Omega*, 7(44), 39895–39906, 2022.
- [15] Maleki M., Arabpour Roghabadi F. and Sadrameli S.M., Solar Water Desalination Using Single-Layer Solar Steam Generation Systems, *Journal of Energy Management and Technology*, 6(4), 241–246, 2022.
- [16] Menezes J.C.A., Ferreira N.S., Abraçado L.G. and Macêdo M.A., Synthesis and Characterization of Nickel Nanoparticles Prepared Using the Aquolif Approach, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(8), 5903–5910, 2014.
- [17] Mittal A., Brajpuriya R. and Gupta R., Solar Steam Generation Using Hybrid Nanomaterials to Address Global Environmental Water Pollution and Shortage Crisis, *Materials Today Sustainability*, 100319, 2023.
- [18] Murakami T., Nakatsuji H., Inada M., Matoba Y., Umeyama T., Tsujimoto M., Isoda S., Hashida M. and Imahori H., Photodynamic and Photothermal Effects of Semiconducting and Metallic-Enriched Single-Walled Carbon Nanotubes, *Journal of the American Chemical Society*, 134(43), 17862–17865, 2012.
- [19] Ni G., Miljkovic N., Ghasemi H., Huang X., Boriskina S.V., Lin C.T., Wang J., Xu Y., Rahman M.M., Zhang T.J. and Chen G., Volumetric Solar Heating of Nanofluids for Direct Vapor Generation, *Nano Energy*, 17, 290–301, 2015.

- [20] Tan K.W., Yap C.M., Zheng Z., Haw C.Y., Khiew P.S. and Chiu W.S., State-of-the-Art Advances, Development, and Challenges of Metal Oxide Semiconductor Nanomaterials for Photothermal Solar Steam Generation, *Advanced Sustainable Systems*, 6(4), 2100416, 2022.
- [21] Theerthagiri J., Sudha R., Premnath K., Arunachalam P., Madhavan J. and Al-Mayouf A.M., Growth of Iron Diselenide Nanorods on Graphene Oxide Nanosheets as Advanced Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Reaction, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(18), 13020-13030, 2017.
- [22] Wang P., Emerging Investigator Series: The Rise of Nano-Enabled Photothermal Materials for Water Evaporation and Clean Water Production by Sunlight, *Environmental Science: Nano*, 5(5), 1078-1089, 2018.
- [23] Wang Y., Liu X., Zhang Q., Wang C., Huang S., Liu Y., Yu T., Yang R., Chen G., Chaker M. and Ma D., Stable, Cost-Effective TiN-Based Plasmonic Nanocomposites with over 99% Solar Steam Generation Efficiency, *Advanced Functional Materials*, 2212301, 2023.
- [24] Wilson H.M., Ahirrao D.J., Raheman Ar S. and Jha N., Biomass-Derived Porous Carbon for Excellent Low Intensity Solar Steam Generation and Seawater Desalination, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 215, 110604, 2020.
- [25] Xu Y., Liu D., Xiang H., Ren S., Zhu Z., Liu D., Xu H., Cui F. and Wang W., Easily Scaled-Up Photo-Thermal Membrane with Structure-Dependent Auto-Cleaning Feature for High-Efficient Solar Desalination, *Journal of Membrane Science*, 586, 222-230, 2019.
- [26] Yang P., Liu K., Chen Q., Li J., Duan J., Xue G., Xu Z., Xie W. and Zhou J., Solar-Driven Simultaneous Steam Production and Electricity Generation from Salinity, Energy and Environmental Science, 10(9), 1923-1927, 2017.
- [27] Zhang L., Tang B., Wu J., Li R. and Wang P., Hydrophobic Light-to-Heat Conversion Membranes with Self-Healing Ability for Interfacial Solar Heating, *Advanced Materials*, 27(33), 4889-4894, 2015.
- [28] Zhou L., Tan Y., Wang J., Xu W., Yuan Y., Cai W., Zhu S. and Zhu J., 3D Self-Assembly of Aluminium Nanoparticles for Plasmon-Enhanced Solar Desalination, *Nature Photonics*, 10(6), 393-398, 2016.
- [29] Zielinski M.S., Choi J.W., La Grange T., Modestino M., Hashemi S.M.H., Pu Y., Birkhold S., Hubbell J.A. and Psaltis D., Hollow Mesoporous Plasmonic Nanoshells for Enhanced Solar Vapor Generation, *Nano Letters*, 16(4), 2159-2167, 2016.