

key words

Solar Steam Generation

Thermal Water Desalina-
tion

Interfacial Solar Evapora-
tion

Gold Absorber

Photothermal Materials

Water desalination using solar steam generation systems based on graphite photothermal material

Mahmoud Maleki¹, Farzaneh Arabpour Roghabadi^{*2,3}, Seyed Mojtaba Sadrameli⁴,

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

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

3- Optoelectronics and Nanophotonics Research Group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

Abstract

Research subject: Solar energy is a renewable resource that is abundant and can solve many problems of energy shortage. In order to use solar energy to desalinate water and produce high quality steam, one of the cheap and commercially proposed structures is floating solar steam generation system. In this system, water is transferred to the surface of the system in a controlled manner and is converted to steam using the heat generated in the photothermal layer. There are generally four main challenges in solar steam generation systems. These challenges include managing and preventing heat loss, structural strength, managing and transferring water within the structure, absorbing light and converting light into heat.

Research approach: In this paper, floating multilayer solar steam generation systems were fabricated in which porous polyurethane foam was used as the substrate and thermal insulation layer. Moreover, felt was used as the water-transfer layer. Photothermal materials including graphite, gold, and mixtures of graphite and gold were used as the light-absorbing layers to produce high-quality steam. Also, in order to determine the water evaporation rate and the efficiency of the systems, the amount of changes in water mass and system temperature has been measured.

Main results: Among the different solar steam generation systems studied, the system made of graphite-gold mixture absorber is able to produce steam at a rate of $1.257 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. This rate is equivalent to an efficiency of about 82%. To evaluate the performance of the systems in more real situation, they were tested using seawater. As resulted, the rate of evaporation of seawater by the graphite-gold mixture system is $1.201 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ and its efficiency is 78.4%.

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

کلمات کلیدی

تولید بخار خورشیدی

نمک‌زدایی آب حرارتی

تبخیر سطحی خورشیدی

جاذب طلا

مواد فوتوترمال

نمک‌زدایی آب با استفاده از سامانه‌های تولید بخار خورشیدی بر پایه لایه فوتوترمال گرافیتی

محمود ملکی^۱، فرزانه عرب‌پور رق‌آبادی^{۲*}، سید مجتبی صدرعاملی^۳

۱- کارشناسی ارشد، گروه فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- نویسنده مسئول و استادیار، گروه فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳- نویسنده مسئول و استادیار، گروه پژوهشی اپتواکترونیک و نانوفوتونیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴- استاد، گروه فرایند، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: انرژی خورشیدی منبعی تجدیدپذیر است، به میزان فراوان وجود دارد و می‌تواند بسیاری از معضلات کمبود انرژی را برطرف کند. به‌منظور استفاده از انرژی خورشید برای نمک‌زدایی از آب و تولید بخار باکیفیت بالا یکی از ساختارهای پیشنهادی ارزان‌قیمت که قابلیت تجاری شدن دارد، سامانه‌های تولید بخار خورشیدی شناور بر روی آب است. در این سامانه، آب به‌صورت کنترل‌شده به سطح سامانه منتقل‌شده و با استفاده از گرمای تولیدشده در لایه جاذب نور به بخار تبدیل می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد چهار چالش اصلی در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی وجود دارد که باید در تحقیقات برطرف شود. این چالش‌ها شامل مدیریت و جلوگیری از اتلاف‌های حرارتی، استحکام و پایداری ساختار، مدیریت و انتقال آب درون ساختار، جذب نور و تبدیل نور به گرما است.

روش تحقیق: در این مقاله سامانه‌های تولید بخار خورشیدی چندلایه شناور ساخته‌شده است که در آن‌ها از فوم پلی-یورتان تخلخل بسته به‌عنوان لایه عایق حرارتی و زیرلایه اصلی، نمک‌زدایی لایه انتقال‌دهنده آب و مواد فوتوترمال مختلف شامل گرافیت، طلا و مخلوط گرافیت و طلا به‌عنوان لایه جاذب نور برای تولید بخار با کیفیت بالا استفاده شده است. همچنین به‌منظور تعیین نرخ تبخیر آب و بازده سامانه‌ها، میزان تغییرات جرم آب و دمای سامانه اندازه‌گیری شده است.

نتایج اصلی: نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد در بین سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مورد مطالعه، در بهینه‌ترین حالت سامانه ساخته‌شده از جاذب مخلوط گرافیت و طلا قادر به تولید بخار با نرخ $1/257 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ است. این نرخ معادل بازده حدوداً ۸۲٪ است. همچنین نتایج آزمایش پایداری نشان داد که تغییرات نرخ تبخیر بعد از ۳۰ مرتبه تکرار ناچیز بوده و سامانه ساخته‌شده از پایداری خوبی برخوردار است. درنهایت عملکرد بهینه‌ترین سامانه در شرایط واقعی آب‌شور دریا بررسی شد. نتایج نشان داد که نرخ تبخیر آب‌شور دریا به کمک سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا، $1/201 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و بازده آن ۷۸/۴٪ است.

*مسئول مکاتبات:

arabpour@modares.ac.ir

۱ مقدمه

اهمیت آب سالم بر سلامتی و توسعه اقتصادی جهانی قابل‌اغماض نیست [۱]. تأمین آب مقرون‌به‌صرفه و با اطمینان، چالش مهم جهانی بوده و انتظار می‌رود این موضوع با افزایش جمعیت شدیدتر شود [۲]. هم‌اکنون بیش از ۶۵۰ میلیون نفر در سرتاسر جهان به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند [۳]. به‌منظور تأمین و تهیه آب‌های سالم و آشامیدنی روش‌های مختلف معرفی شده است. در میان این روش‌ها می‌توان به روش‌های پرکاربرد همچون تقطیر حرارتی [۴،۵]، اسمز معکوس [۶،۷]، الکترودیالیز [۸،۹]، تصفیه غشا [۱۰] و فوتوکاتالیستی [۱۱] اشاره کرد. هرکدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. از سوی دیگر در میان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته‌شده، انرژی خورشید فراوان‌ترین انرژی موجود بوده که در سال‌های اخیر نیز استفاده از انرژی خورشیدی برای شیرین‌سازی آب مورد توجه قرار گرفته است [۱۲،۱۳]. بنابراین یکی از راهکارهای نوین پیشنهادی برای این معضل نمک‌زدایی خورشیدی است [۱۴]. سامانه‌های تولید بخار خورشیدی عمدتاً دو نوع سامانه‌اند. نوع اول آن به‌صورت غیرمستقیم و با بهره‌گیری از برق تولیدی صفحات خورشیدی، آب را تبخیر و شیرین‌سازی می‌کند. نوع دوم و اصلی آن سامانه‌هایی است که با استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی و به‌صورت مستقیم آب را تبخیر و شیرین‌سازی می‌کند، این سامانه‌ها به سامانه‌های مستقیم معروف هستند. سامانه‌های نوین شناور تولید بخار خورشیدی را با توجه به ساختار فیزیکی آن‌ها می‌توان به سه دسته اصلی از جمله ساختارهای شناور تک‌لایه، ساختارهای شناور دولایه و ساختارهای شناور سه‌لایه تقسیم کرد.

بر این اساس، مطالعات نشان می‌دهد چهار چالش اصلی در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی وجود دارد که این چالش‌ها شامل مدیریت و جلوگیری از اتلاف‌های حرارتی، استحکام و پایداری ساختار، مدیریت و انتقال آب درون ساختار، جذب نور و تبدیل نور به گرما است [۱۵].

اگرچه محققان زیادی سامانه‌های مختلفی را طراحی کرده‌اند، اما برخی از چالش‌های اساسی مانند دستیابی به جذب نور بالا، مدیریت انرژی گرمایی و جلوگیری از تلفات آن، انتقال آب به سطح سامانه برای تبخیر و طراحی یک سامانه کارآمد باقی‌مانده است. مقاومت سازه و توانایی شناور شدن روی سطح آب از دیگر مشخصات مورد نیاز این سامانه‌ها است [۱۶،۱۷]. جذب‌های نور بر اساس کربن [۷،۸]، گرافن [۱۱]، نانوذرات فلز [۱۴،۱۶]، چوب [۱۷،۱۸] و گیاهان کربنیزه [۱۹،۲۰] در سامانه‌ها با طرح‌های مختلف استفاده

شده‌اند. اولین بار در سال ۲۰۱۴ قاسمی و همکاران [۲۱] به‌منظور تولید بخار آب و تهیه آب بدون نمک از سامانه‌های تولید بخار خورشیدی استفاده کردند. آن‌ها توانستند به کمک ساختار دولایه مبتنی بر جاذب گرافیتی، بخار با بازده ۸۵٪ تولید کنند. از سوی دیگر توجه به استفاده از مواد مناسب برای زیرلایه به‌اندازه لایه جاذب دارای اهمیت است. زیر لایه با توجه به نوع ساختار و وجود اتلاف‌های گوناگون درون سامانه، شامل اتلاف حرارتی هدایتی به توده آب، اتلاف حرارتی تابشی از سطح سامانه به جو و اتلاف حرارتی جابه‌جایی از سطح سامانه به محیط باید عایق حرارتی مناسبی باشد. یکی از موادی که توسط محققان مختلف به‌عنوان عایق حرارتی معرفی شده، فوم‌های پلیمری است. شی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۷ سامانه تولید بخار خورشیدی دو لایه‌ای طراحی و ساختند که لایه جاذب آن اکسیدگرافن کاهش‌یافته و زیرلایه آن فوم پلی‌استایرنی بود. نتایج نشان داد استفاده از فوم پلی‌استایرنی به‌طور میانگین قادر به افزایش دمای سطح سامانه تا حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سامانه بدون فوم پلی‌استایرنی بود که این نشان‌دهنده قابلیت خوب فوم پلی‌استایرنی در کاهش اتلاف گرما به توده آب و متمرکزسازی گرما در سطح سامانه است. در نهایت آن‌ها گزارش کردند نرخ تبخیر سامانه معرفی شده در حدود $1/31 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ معادل با بازده ۸۳٪ است. علاوه بر مطالب بیان‌شده، همچنین زیر لایه باید انتقال‌دهنده خوبی برای آب باشد. کتان یکی از مهم‌ترین مواد انتقال‌دهنده آب بوده که توسط گروه‌ها و محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲،۲۳].

در کار حاضر به طراحی و ساخت سامانه‌های تولید بخار خورشیدی سه‌لایه پرداخته شد. در این سامانه‌ها از پلی‌یورتان بهینه‌شده به‌منظور کمینه کردن انتقال حرارت هدایتی به‌عنوان لایه عایق حرارتی استفاده شده است. همچنین به‌منظور انتقال آب درون سامانه از نمک استفاده شده که از میان لایه‌های پلی‌یورتان در سه محور عمودی انتقال آب صورت می‌گیرد. تمرکز اصلی این کار بر انتخاب و بهینه‌سازی لایه جاذب نور مناسبی است که علاوه بر جذب حداکثری نور بتواند به کمک خاصیت پلاسمونیک، متمرکزسازی گرما را افزایش دهد. در همین راستا از سه ماده شامل گرافیت، دی‌اکسید تیتانیوم و طلا به‌عنوان لایه جاذب نور خورشید استفاده شد. به‌منظور بررسی ساختار سامانه‌ها از میکروسکوپ الکترونی پویشی نشر میدانی (FSEM)، طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis) استفاده و در نهایت به‌منظور بررسی عملکرد تبخیر آب در سامانه‌های مورد مطالعه تغییرات جرم و دمای سامانه اندازه‌گیری و نرخ تبخیر و بازده آن‌ها محاسبه شد.

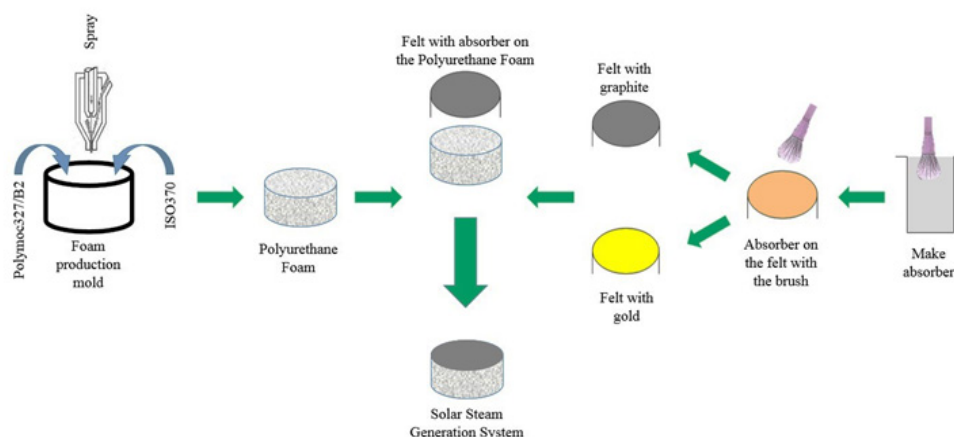
۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

برای ساخت فوم پلی‌یورتان از رزین ISO370 و عامل پخت Polymoc327/B2 استفاده شده که از گروه صنعتی مکرر در تهران، ایران تهیه شد. همچنین الیاف کتانی با ظرفیت بالای جذب آب خریداری شد. مواد شیمیایی شامل گرافیت از شرکت Sigma (St. Louis, MO) و تیتانیوم دی‌اکسید از Evonik industries AG (آلمان) خریداری شدند. همچنین از طلا با خلوص بالا برای بهبود جذب استفاده شده است. در این مطالعه، آب مورد استفاده برای ساخت و سنتز لایه‌های جاذب، آب یون‌زدوده و آب مورد استفاده برای انجام آزمایش عملکرد سامانه‌ها، آب شهری تهران با TDS معادل ۲۸۰ ppm و آب شور دریای خلیج فارس با TDS معادل ۳۴۰۰۰ ppm بود.

۲-۲ ساخت سامانه تولید بخار خورشیدی

به‌منظور ساخت سامانه‌ها ابتدا فوم پلی‌یورتان آماده شد. در گام اول به منظور جدا شدن راحت‌تر فوم پلی‌یورتان از قالب، لایه داخلی قالب مورد نظر به کمک افشانه به پوشش نانو آب‌گریز آغشته شد. پس از آن مقدار ۳۰ g از رزین ISO370 درون قالب تزریق شد. بلافاصله، مقدار ۱۸ g از عامل پخت Polymoc327/B2 به قالب اضافه‌شده و با یک همزن با دور ۱۵۰۰ rpm و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند تا مخلوط رزین‌ها کمی ویسکوز شود. قالب به مدت ۶۰ دقیقه در جریان هوای آزاد قرار گرفت تا فوم پلی‌یورتان تشکیل و سفت شود، در نهایت نیز به آرامی فوم پلی‌یورتان از قالب جدا شد. لایه بعدی لایه انتقال‌دهنده آب است که برای استفاده از آن الیاف کتانی یک مرتبه با آب مقطر و سپس با استون شسته شد. در نهایت لایه جاذب نور خورشید ساخته شد. برای ساخت لایه جاذب نور



شکل ۱ طرح‌واره کلی فرایند ساخت سامانه‌های تولید بخار خورشیدی

Figure 1 Schematic representation of the process of manufacturing solar steam generation systems

جدول ۱ جزئیات سامانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش

Table 1 Details of the systems studied in this article

Sample Name	Structure	Insulator Layer	Water Transport Layer	Absorber Layer	
				Type	Amount
Felt	Cubic-Shape	Polyurethane	Cotton fiber	-	-
Felt+Gr	Cubic-Shape	Polyurethane	Cotton fiber	TiO ₂ Graphite	20 (mg) 200 (mg)
Felt+Au	Cubic-Shape	Polyurethane	Cotton fiber	Au	20 (nm)
Felt+Gr+Au	Cubic-Shape	Polyurethane	Cotton fiber	TiO ₂ Graphite Au	20 (mg) 200 (mg) 20 (nm)

قرار گرفته شدند. همچنین به‌منظور اندازه‌گیری دمای سامانه‌ها از دوربین دمانگاری (Thermography) OLIP مدل ThermoCam P200 ساخت کشور انگلستان استفاده شده و تصاویر به کمک نرم‌افزار IR Reporter تحلیل شد. در شکل ۲ می‌توان جزئیات مربوط به فرآیند را مشاهده کرد.

به‌منظور اندازه‌گیری بازده سامانه تولید بخار خورشیدی و مقایسه بهتر بین نمونه‌های آزمایش‌شده از رابطه ۱ استفاده‌شده است [۲۱]:

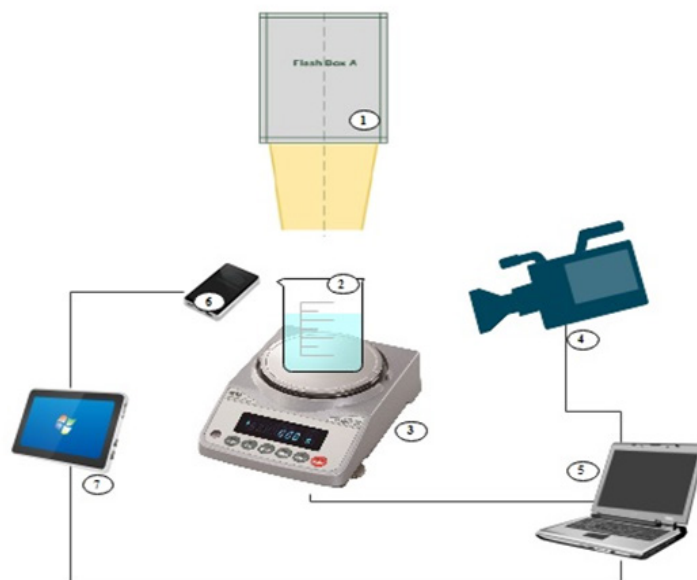
$$\eta = \frac{\dot{m}h_{fg}}{C_{op}P} \quad (1)$$

در رابطه فوق η بازده بخار تولیدی، m میزان شار

خورشید ابتدا جاذب‌های مختلف به‌صورت تعلیقی تهیه شدند، سپس به کمک قلم‌مو به‌طور یکنواخت بر روی الیاف کتان‌ی نشانده شدند. درنهایت به مدت ۲۰ دقیقه در آون با دمای 110°C خشک شدند. فرآیند ساخت سامانه‌های تولید بخار خورشیدی در شکل ۱ و نام و جزئیات مواد و نمونه‌ها را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

۲-۳ مشخصه‌یابی سامانه تولید بخار خورشیدی

ساختار کلیه لایه‌های عایق حرارتی، لایه انتقال‌دهنده آب و جاذب نور، توسط میکروسکوپ الکترونی پویشی نشر میدانی (FESEM (MIRA3TESCAN- و میکروسکوپ نوری مدل LEICA DMLM بررسی شده است. همچنین از طیف‌سنج فرابنفش-مرئی آوانتس برای بررسی میزان جذب نور استفاده شد.



شکل ۲ طرحواره روش بررسی عملکرد سامانه‌های تولید بخار خورشیدی، (۱) شبیه‌ساز خورشیدی، (۲) ظرف نگهدارنده آب و سامانه‌ها، (۳) ترازوی دیجیتالی، (۴) دوربین دمانگاری، (۵) کامپیوتر ثبت‌کننده داده‌ها، (۶) توان سنج نور، (۷) صفحه نمایش دهنده توان سنج

Figure 2 Schematic of the method for evaluating the performance of solar steam generation systems, 1) Solar simulator, 2) Container for water and systems, 3) Digital scale, 4) Thermographic camera, 5) Computer data recorder, 6) Power meter, 7) Power meter display

جرمی بخار برحسب $\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ است. همچنین h_{fg} آنتالپی تغییر فاز برحسب kJ.kg^{-1} کیلوژول بر کیلوگرم و C_{op} غلظت نوری خورشید (بدون واحد) است. درنهایت p شدت تابش نور برحسب kW.m^{-2} بوده که در کار حاضر 1 kW.m^{-2} است.

۳ نتایج و بحث

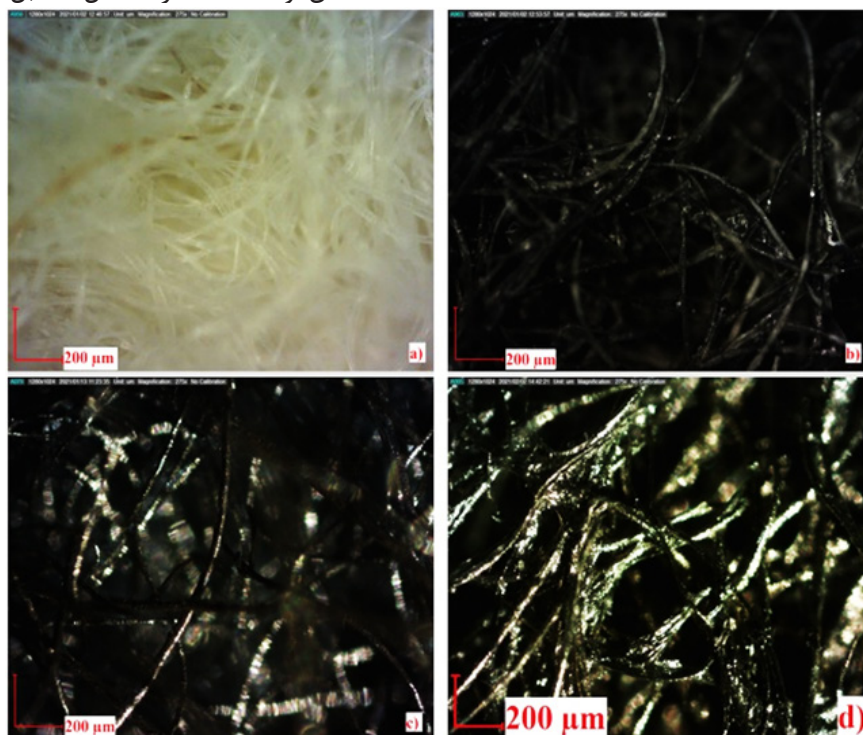
در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ مربوط به سطح کلیه نمونه‌ها آورده شده است. تصویر ۳-ا مربوط به سطح لایه انتقال‌دهنده آب بدون جاذب بوده که رنگ روشن و حفرات زیادی دارد. تصاویر مربوط به

به‌منظور بررسی توانایی عایق حرارتی نیز میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی میزان آب‌دوستی لایه‌های مختلف از دستگاه زاویه تماس (Jikan-CAG20) استفاده شده است. مهم‌ترین روش بررسی عملکرد سامانه‌های تولید بخار خورشیدی اندازه‌گیری نرخ تبخیر و بازده آن‌ها تحت تابش نور خورشیدی است. در کار حاضر از شبیه‌ساز نور خورشید با توان تابشی 100 mW.cm^{-2} SHAR-IF SOLAR مدل SIM-10 ساخت کشور ایران استفاده شده که سامانه‌های طراحی شده بصورت شناور بر روی آب درون محفظه به مدت ۳۰ دقیقه مورد آزمایش

سامانه‌ها نیز می‌شود.

اولین و مهم‌ترین پارامترهای مورد مطالعه برای بررسی عملکرد سامانه‌های تولید بخار خورشیدی اندازه‌گیری میزان تغییرات جرم آب است. مطابق شکل ۵ تغییرات جرم آب در مدت ۳۰ دقیقه و تحت تابش نور با شدت ۱ خورشید (معادل با 100 mW.cm^{-2}) برای آب خالص (به عنوان نمونه مرجع) و سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب به ترتیب تنها 0.38 g و 0.85 g اندازه‌گیری شد. همان‌گونه که در شکل ۵ قابل مشاهده است،

لایه انتقال‌دهنده همراه با جاذب نور نشان می‌دهد، افزودن جاذب نور باعث تیره شدن سطح سامانه و در نتیجه جذب نور بیشتر می‌شود. تصاویر میکروسکوپ به خوبی نشان داده که افزودن جاذب به سطح سامانه موجب گرفتگی و کاهش چشمگیر خلل و فرج نشده است و می‌توان بیان کرد که اختلالی در روند انتقال آب ایجاد نمی‌کند. همچنین تصاویر میکروسکوپ نشان‌دهنده توزیع بسیار مناسب جاذب نور در سطح لایه انتقال‌دهنده آب است.

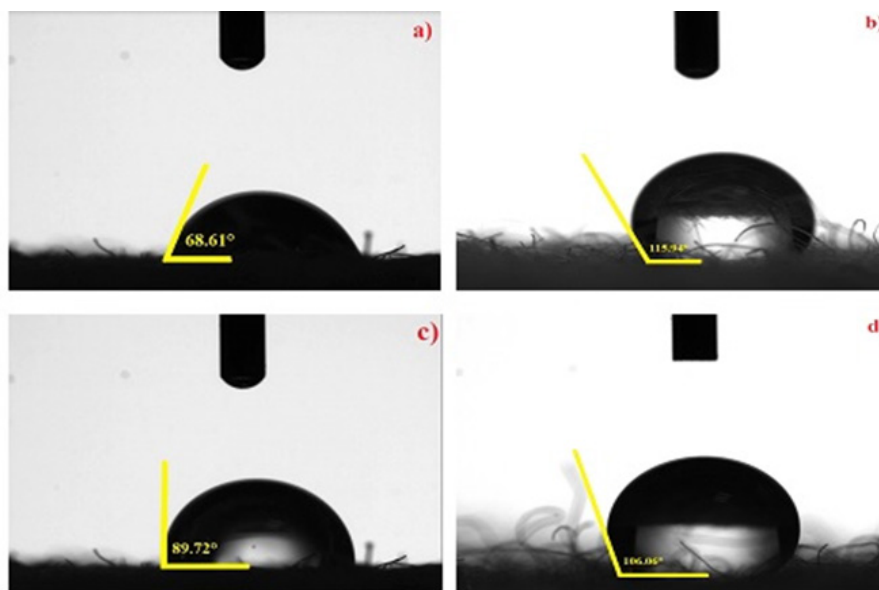


شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از سطح سامانه‌های شناور تولید بخار خورشیدی: (a) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت، (c) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب طلا و (d) سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب، (b) سامانه تولید بخار

Figure 3 Optical microscope images of the surface of solar steam generation systems: a) Solar steam generation system without absorber, b) Solar steam generation system with graphite absorber, c) Solar steam generation system with gold absorber, and d) Solar steam generation system with graphite & gold mixture absorber

سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب به دلیل کاهش اتلاف‌های حرارتی به توده آب به کمک عایق حرارتی پلی‌یورتان تخلخل‌بسته توانسته تغییرات جرم آب را در حدود $2/2$ برابر نسبت به آب خالص افزایش دهد. این مقدار برای سامانه تک-لایه با جاذب گرافیت، طلا و مخلوط گرافیت و طلا به ترتیب 2 g ، 1.88 g و $2/2 \text{ g}$ بوده که نسبت به تغییرات جرم آب در سامانه تولید بخار خورشیدی آب خالص افزایش معناداری دارد. میزان تغییرات جرم آب تبخیر شده به کمک سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا که بیشترین مقدار بین سامانه‌های مورد مطالعه بود، بیش از $5/7$ برابر است. بنابراین می‌توان گفت استفاده از عایق حرارتی مناسب به همراه جاذب نور خورشید توانسته برای تولید بخار بسیار مناسب باشد.

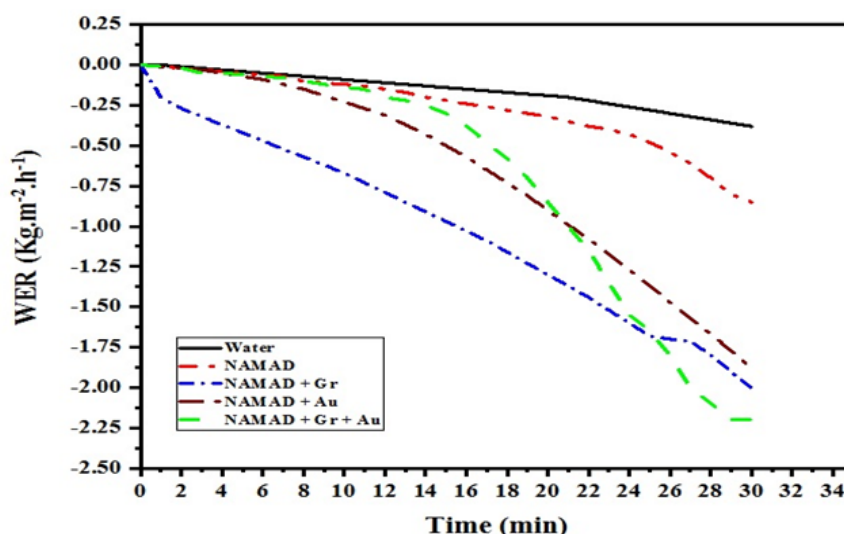
همچنین در شکل ۴ تصاویر مربوط به زاویه تماس سطح سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب (شکل ۴-۱)، سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت (شکل ۴-۲)، سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب طلا (شکل ۴-۳) و سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت و طلا (شکل ۴-۴) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود زاویه تماس سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب حدوداً $68/61^\circ$ و آب‌دوست است که با افزودن جاذب‌های مختلف تبدیل خاصیت آب‌دوستی آن‌ها مقداری کاهش می‌یابد. کاهش میزان آب‌دوستی سطح نمونه‌ها نه تنها موجب اختلال در روند انتقال آب نشده است، بلکه به دلیل اینکه در سطح خارجی سامانه بوده موجب کمک به بهبود تبخیر سطحی آب و خروج بهتر بخار از سطح



شکل ۴ تصاویر زاویه تماس از سطح سامانه‌های شناور تولید بخار خورشیدی: (a) سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب، (b) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت و طلا، (c) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا، (d) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت و طلا و آمالگام

آب خالص نشان‌دهنده توانایی کلیه سامانه‌های تولید بخار خورشیدی برای تمرکز گرما بر سطح است. همچنین وجود اختلاف دمای بین توده آب و سطح نمونه در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی نسبت به سامانه سنتی آب خالص نشان‌دهنده جلوگیری از نفوذ گرما به توده آب که در واقع کاهش اتلاف حرارتی به بالک آب محسوب می‌شود، در کلیه سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مشهود است. علاوه بر آن همان‌گونه که انتظار می‌رفت مقایسه پروفایل دمای سامانه‌های تولید بخار خورشیدی نشان داد سامانه‌های با قدرت جذب نور بالاتر توانسته‌اند تبدیل نور به

در شکل ۶ تصاویر مربوط به دوربین دمانگاری سطح سامانه سنتی آب خالص (شکل ۶-ا)، سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب (شکل ۶-ب)، سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت (شکل ۶-ج)، سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب طلا (شکل ۶-د)، سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا (شکل ۶-ه) آورده شده است. دمای اولیه مطالعات کلیه سامانه‌ها $17 \pm 0.5^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شد. پس از گذشت ۳۰ دقیقه و تحت تابش نور با شدت kW.m^{-2} ۱ دمای سامانه‌ها مجدداً توسط دوربین دمانگاری ثبت شد. مقایسه پروفایل دمایی سامانه‌ها با سامانه سنتی



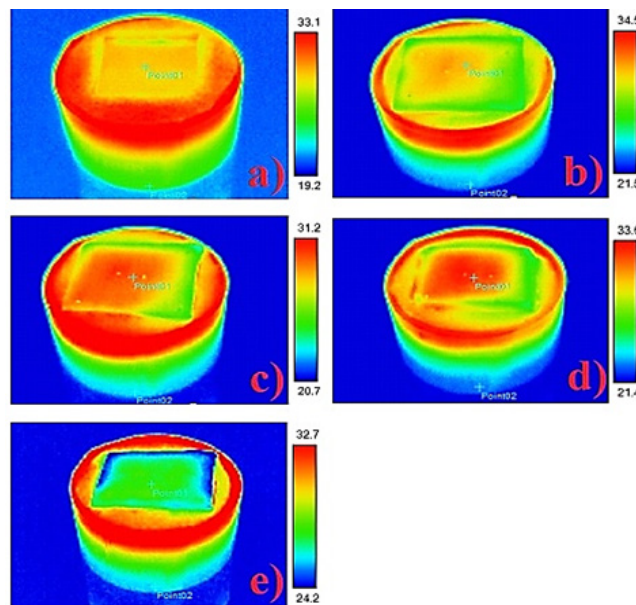
شکل ۵ نمودار تغییرات جرم آب در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مورد مطالعه
Figure 5 Graph of water mass changes in the studied solar steam generation systems

افزایش بازده با استفاده از طلا را می‌توان به خاصیت پلاسمونیک طلا نسبت داد. هنگامی که اندازه نانوذرات کوچک‌تر از طول موج نور تابیده شده به آن‌ها است، اولین اثر آن تأثیر بیشتر اتم‌های روی سطح بر خواص فلز نسبت به اتم‌ها در حجم است. به دلیل نوسان الکترون آزاد روی نانوذرات فلزی، آن‌ها در فرکانس تشدید پلازما نور را به‌خوبی جذب می‌کنند. بنابراین با جذب نور و تولید گرمای بیشتر منجر به افزایش دمای سطح سامانه‌ها شده و نرخ تبخیر آب را افزایش می‌دهند. در نتیجه بازده سامانه‌ها بیشتر می‌شود.

گرمای متمرکزسازی آن بر سطح نمونه را بهتر از سایر سامانه‌ها انجام دهند.

مطابق شکل ۶ برای سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب، با جاذب گرافیت، با جاذب طلا و با جاذب مخلوط گرافیت و طلا اختلاف دمای سطح و انتهای سامانه به ترتیب $7/1^{\circ}$ ، $9/2^{\circ}$ ، $10/8^{\circ}$ و $8/1^{\circ}$ بود.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بررسی عملکرد سامانه‌های تولید بخار خورشیدی نشان می‌دهد نرخ تبخیر آب در این نوع سامانه‌ها به‌طور میانگین تا $3/6$ برابر آب خالص بوده است. همچنین



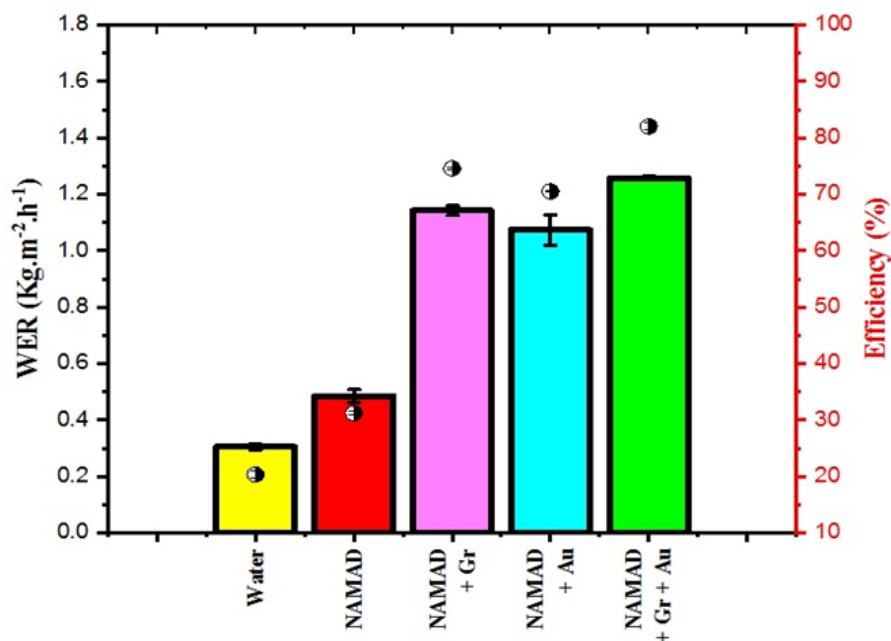
شکل ۶ تصاویر دوربین دمانگاری از سطح سامانه‌های شناور تولید بخار خورشیدی: (a) سامانه سنتی آب خالص، (b) سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب، (c) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت، (d) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب طلا و (e) سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا

Figure 6 Thermographic camera images of the surface of solar steam generation systems: a) Traditional pure water system, b) Solar steam generation system without absorber, c) Solar steam generation system with graphite absorber, d) Solar steam generation system with gold absorber, and e) Solar steam generation system with graphite & gold mixture absorber

به‌منظور بررسی عملکرد سامانه‌های خورشیدی ساخته شده تحت غلظت‌های نوری بیشتر، سامانه‌ها تحت تابش ۳ خورشید نیز مورد مطالعه قرار گرفته که نتایج در شکل ۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده با افزایش غلظت نوری، نرخ تبخیر آب نیز افزایش می‌یابد. نرخ تبخیر آب برای سامانه‌های تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت، جاذب طلا و جاذب مخلوط گرافیت و طلا به ترتیب $2/901 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ، $2/770 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و $3/3557 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ است. این در حالی است که نرخ تبخیر آب برای سامانه بدون جاذب و آب خالص تنها $1/158 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و $0/699 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ است.

به‌منظور بررسی پایداری و قابلیت تکرارپذیری

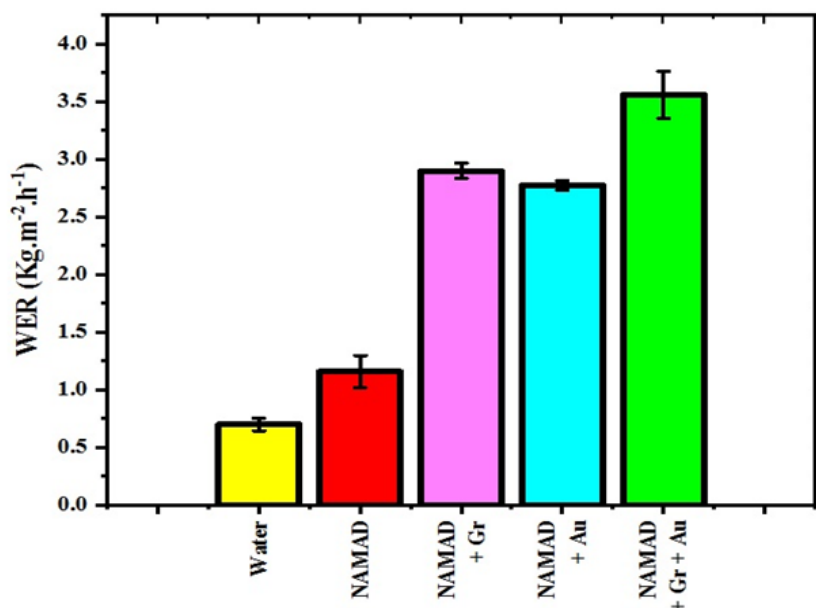
نتایج نشان داد استفاده از سامانه تولید بخار خورشیدی بدون جاذب توانسته از طریق کاهش اتلاف حرارتی به توده آب، نرخ تبخیر آب نسبت به سامانه سنتی آب خالص را حدوداً ۶۰٪ و بازده را بیش از ۱۰٪ افزایش دهد. این در حالی است که سامانه‌های تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیت، جاذب طلا و جاذب مخلوط گرافیت و طلا به ترتیب دارای نرخ تبخیر $1/142 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ، $1/074 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و $1/257 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ بوده که به‌طور میانگین حدوداً ۳۸۰٪ نرخ تبخیر آب نسبت به آب خالص افزایش یافته است. همچنین با توجه به نتایج، میزان بازده بهینه‌ترین سامانه (سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا) معادل با ۸۲٪ اندازه‌گیری شده و این در حالی است که بازده سامانه سنتی آب خالص تنها ۲۰/۳٪ است. دلیل



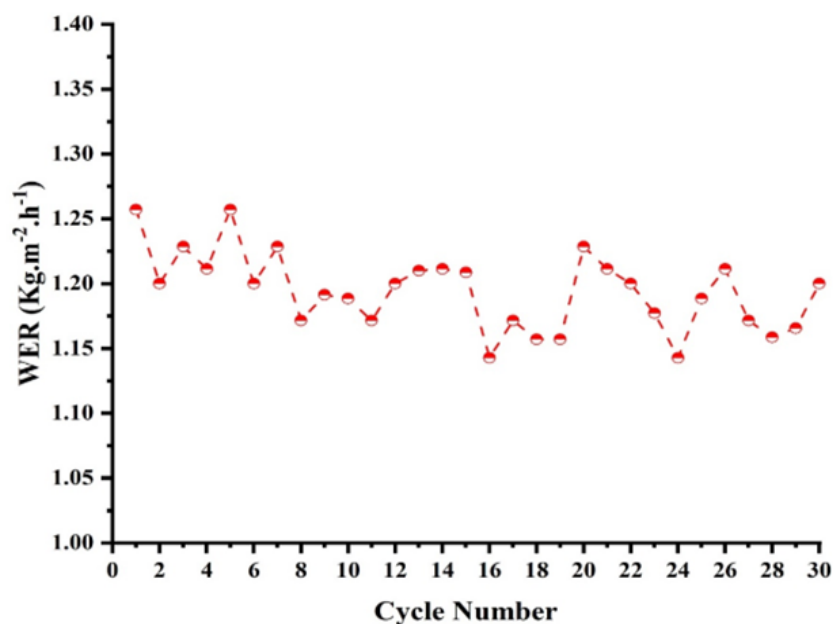
شکل ۷ نمودار نرخ تبخیر آب و بازده در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مورد مطالعه تحت تابش ۱ خورشید
Figure 7 Graph of water evaporation rate and efficiency in the studied solar steam generation systems under 1 sun

این سامانه‌ها می‌شود، رسوب نمک و گرفتگی راه‌های انتقال آب به سطح این سامانه‌ها است. نتایج نشان داد با توجه به افت ناچیز بازده می‌توان ادعا کرد منافذ زیادی که در لایه انتقال‌دهنده آب مورد مطالعه در این پژوهش وجود دارد دچار رسوب و گرفتگی نمک نشده و از این حیث سامانه‌های ساخته‌شده نسبت به بسیاری از سامانه‌های مورد مطالعه در این حوزه برتری دارد. در نهایت به‌منظور بررسی عملکرد بهترین سامانه‌ها در شرایط واقعی‌تر از آب‌شور دریای خلیج فارس

سامانه‌های تولید بخار خورشیدی و همچنین بررسی توانایی جلوگیری از رسوب نمک در سامانه، بهینه‌ترین سامانه (سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا)، به‌صورت متوالی و مداوم ۳۰ مرتبه مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج نرخ تبخیر آن در شکل ۹ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد تغییرات نرخ تبخیر بعد از ۳۰ مرتبه کمتر از ۱۰٪ بوده و می‌توان ادعا کرد سامانه ساخته‌شده از پایداری تکرارپذیری خوبی برخوردار بود. یکی از چالش‌های اصلی که مانع از صنعتی‌شدن



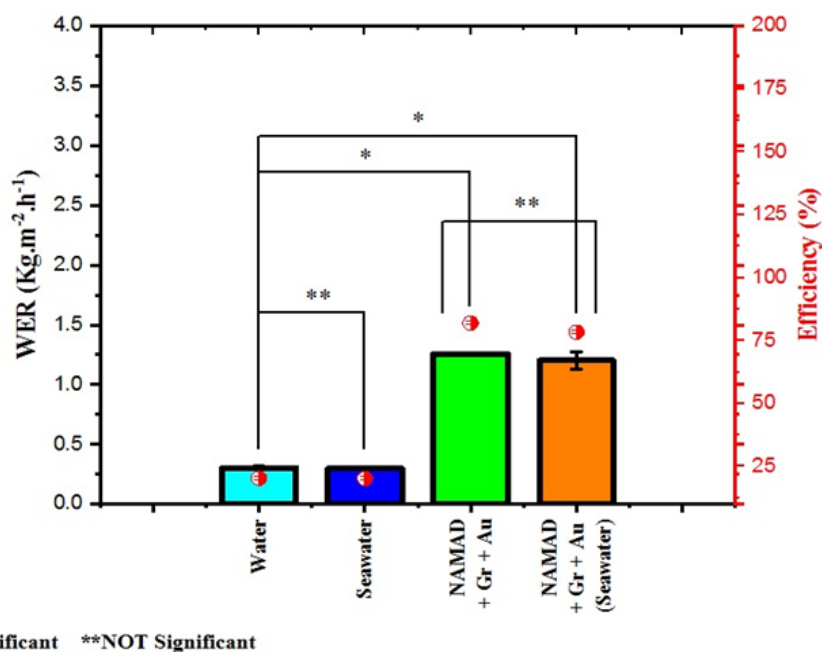
شکل ۸ نمودار نرخ تبخیر آب در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مورد مطالعه تحت تابش ۳ خورشید
Figure 8 Graph of water evaporation rate in the studied solar steam generation systems under 3 sun



شکل ۹ نمودار تکرارپذیری و پایداری سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا پس از ۳۰ مرتبه استفاده مداوم
Figure 9 Graph of repeatability and stability of solar steam generation system with graphite & gold mixture adsorber after 30 times continuous uses

انتقال آب و اختلال در روند آبرسانی می‌شود. اما نتایج نشان داد اختلاف بین تبخیر آب‌شور دریا به کمک سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا و تبخیر آب شهری به کمک سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا کمتر از ۵٪ و بی‌معنی بود.

استفاده شد. مطابق شکل ۱۰ نتایج آزمایش‌ها نشان داد نرخ تبخیر آب‌شور دریا به کمک بهینه‌ترین سامانه (سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا)، $1/201 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و بازده آن ۷۸/۴٪ بود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت آب‌شور دریا به دلیل وجود املاح بیشتر اولاً به دمای بیشتری برای تبخیر نیاز داشته، ثانیاً وجود املاح موجب کاهش سرعت



شکل ۱۰ نمودار نرخ تبخیر آب و بازده سامانه‌های تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا در آب شور دریا و آب شهری
Figure 10 Graph of water evaporation rate and efficiency of solar steam generation systems with graphite & gold mixture adsorber in seawater and tap water

۴ نتیجه‌گیری

کار حاضر بر طراحی و ساخت سامانه‌های تولید بخار خورشیدی به‌منظور تبخیر آب به کمک انرژی خورشیدی متمرکز شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از پلی‌یورتان تخلخل‌بسته در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی باعث کاهش اتلاف حرارتی به توده آب و در نتیجه افزایش بازده می‌شود. در سامانه‌های مورد مطالعه از الیاف کتانی به‌منظور لایه انتقال‌دهنده آب استفاده شده که نتایج نشان داد، الیاف کتانی به دلیل وجود تخلخل بیشتر، ظرفیت جذب بالاتر آب و ضریب انتقال حرارت پایین گزینه مناسبی برای لایه انتقال‌دهنده آب در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی بود. به‌منظور جذب و متمرکزسازی گرما روی سطح سامانه‌ها از سه جاذب گرافیت، طلا و مخلوط گرافیت و طلا استفاده شد. گرافیت به‌دلیل رنگ سیاه و جذب نور بسیار عالی همواره گزینه مطرح به‌عنوان جاذب نور در سامانه‌های تولید بخار خورشیدی بوده است. از سوی دیگر طلا به‌دلیل دارا بودن قابلیت پلاسمونیک می‌تواند تبدیل نور به گرمای بیشتری را ایجاد و متمرکزسازی گرما روی سطح را بهبود دهد.

نتایج نشان داد سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا دارای نرخ تبخیر $1/257 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و بازده ۸۲٪ و پس از آن سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب گرافیتی با نرخ تبخیر $1/142 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و بازده ۷۴/۶٪ از سایر سامانه‌های تولید بخار خورشیدی مورد مطالعه دارای عملکرد بهتری بود. همچنین به‌منظور بررسی عملکرد بهترین سامانه‌ها در شرایط واقعی‌تر از آب‌شور دریا استفاده شد. نتایج نشان داد نرخ تبخیر آب‌شور دریا به کمک سامانه تولید بخار خورشیدی با جاذب مخلوط گرافیت و طلا، $1/201 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ و بازده آن ۷۸/۴٪ بود که در مقایسه با آزمایش‌های آب شهری این اختلاف کمتر از ۵٪ و بی‌معنی بود.

۵ سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های آزمایشگاه نانوآپتوالکترونیک دانشگاه تربیت مدرس و هسته پژوهشی مواد تغییر فاز به شماره IG-۳۹۷۱۰ قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] Wang Z., Han M., He F., Peng S., Darling S. B., Li Y., Versatile Coating with Multifunctional Performance for Solar Steam Generation. *Nano Energy*, 74,104886, 2020.
- [2] Chen B., Han M. Y., Peng K., Zhou S. L., Shao L., Wu X. F., Wei W. D., Liu S. Y., Li Z., Li J. S., Chen G. Q., Global Land-Water Nexus: Agricultural Land and Freshwater Use Embodied in Worldwide Supply Chains, *Science of the Total Environment*, 613(614), 931-943, 2018.
- [3] Alvarez P. J. J., Chan C. K., Elimelech M., Halas N. J., Villagrán D., Emerging Opportunities for Nanotechnology to Enhance Water Security, *Nature Nanotechnology*, 13(8),634-641, 2018.
- [4] Cai W., Mu X., Pan Y., Li Z., Wang J., Zhou X., Guo W., Hu W., Song L., Hu Y., Black Phosphorous Nanosheets: A Novel Solar Vapor Generator, *Solar RRL*, 4(4), 1900537, 2020.
- [5] Liu P. F., Miao L., Deng Z., Zhou J., Su H., Sun L., Tanemura S., Cao W., Jiang F., Zhao L. D., A Mimetic Transpiration System for Record High Conversion Efficiency in Solar Steam Generator Under One-Sun, *Materials Today Energy*, 8,166-173, 2018.
- [6] Liu K. K., Jiang Q., Tadepalli S., Raliya R., Biswas P., Naik R. R., Singamaneni S., Wood-Graphene Oxide Composite for Highly Efficient Solar Steam Generation and Desalination, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(8),7675-7681, 2017.
- [7] Shao Y., Tang J., Li N., Sun T., Yang L., Chen D., Zhi H., Wang D., Liu H., Xue G., Designing a Bioinspired Synthetic Tree by Unidirectional Freezing for Simultaneous Solar Steam Generation and Salt Collection, *EcoMat*, 2(1),1-8, 2020.
- [8] Bai H., Zhao T., Cao M., Interfacial Solar Evaporation for Water Production: From Structure Design to Reliable Performance, *Molecular Systems Design and Engineering*, 5(2), 419-432, 2020.
- [9] Liu F., Lai Y., Zhao B., Bradley R., Wu W., Photothermal Materials for Efficient Solar Powered Steam Generation, *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 13(4), 636-653, 2019.
- [10] Wang Z., Yan Y., Shen X., Jin C., Sun Q., Li H., A Wood-Polypyrrole Composite as a Photothermal Conversion Device for Solar Evaporation Enhancement, *Journal of Materials Chemistry A*, 7(36), 20706-20712, 2019.
- [11] Zhang C., Liang H., Xu Z., Wang Z., Harnessing Solar-Driven Photothermal Effect Toward the Water-Energy Nexus, *Advanced Science*, 6(18), 1900883, 2019.
- [12] Thirugnanasambandam M., Iniyan S., Goic R., A Review of Solar Thermal Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 312-322, 2010.
- [13] Wang M., Wang P., Zhang J., Li C., Jin Y., A Ternary Pt/Au/TiO₂-Decorated Plasmonic Wood Carbon for High-Efficiency Interfacial Solar Steam Generation and Photodegradation of Tetracycline, *ChemSusChem*, 12(2), 467-472, 2019.
- [14] Liu C., Huang J., Hsiung C., Tian Y., Wang J., Han Y., Fratalocchi A., High-Performance Large-Scale Solar Steam Generation with Nanolayers of Reusable Biomimetic Nanoparticles, *Advanced Sustainable Systems*, 1(1), 1600013, 2017.
- [15] Zhao F., Zhou X., Shi Y., Qian X., Alexander M., Zhao X., Mendez S., Yang R., Qu L., Yu G., Highly Efficient Solar Vapour Generation via Hierarchically Nanostructured Gels, *Nature Nanotechnology*, 13(6), 489-495, 2018.
- [16] Shi L., Wang Y., Zhang L., Wang P., Rational Design of a Bi-Layered Reduced Graphene Oxide Film on Polystyrene Foam for Solar-Driven Interfacial Water Evaporation, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(31), 16212-16219, 2017.
- [17] Guo D., Yang X., Highly Efficient Solar Steam Generation of Low Cost Tin/Bio-Carbon Foam, *Science China Materials*, 62, 711-718, 2019.
- [18] Xu J., Wang Z., Chang C., Fu B., Tao P., Song C., Shang W., Deng T., Solar-Driven Interfacial Desalination for Simultaneous Freshwater and Salt Generation, *Desalination*, 484, 114423, 2020.
- [19] Shan X., Zhao A., Lin Y., Hu Y., Di Y., Liu C., Gan Z., Low-Cost, Scalable, and Reusable Photothermal Layers for Highly Efficient Solar Steam Generation and Versatile Energy Conversion, *Advanced Sustainable Systems*, 4(5), 1900153, 2020.
- [20] Zhang P., Liao Q., Yao H., Cheng H., Huang Y., Yang C., Jiang L., Qu L., Three-Dimensional Water Evaporation on a Macroporous Vertically Aligned Graphene Pillar Array Under One Sun, *Journal of Materials Chemistry A*, 6(31),

15303-15309, 2018.

[21] Ghasemi H., Ni G., Marconnet A. M., Loomis J., Yerci S., Miljkovic N., Chen G., Solar Steam Generation by Heat Localization, *Nature Communications*, 5(1), 4449, 2014.

[22] Wu X., Gao T., Han C., Xu J., Owens G., Xu H., A Photothermal Reservoir for Highly Efficient Solar Steam Generation Without Bulk Water, *Science Bulletin*, 64(21), 1625-1633, 2019.

[23] Karami S., Arabpour Roghabadi F., Maleki M., Ahmadi V., Sadrameli S. M., Materials and Structures Engineering of Sun-Light Absorbers for Efficient Direct Solar Steam Generation, *Solar Energy*, 225, 747-772, 2021.