



## Experimental Investigation of Nanofluid Based on Titanium Dioxide Nanoparticles in Absorption Sunlight and Steam Generation

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Ghafurian M.M.<sup>1</sup> PhD,  
Niazmand H. \*<sup>1</sup> PhD,  
Moallemi A. E. <sup>1</sup> BSc,  
Tavakoli Dastjerd F.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Ghafurian M.M, Niazmand H, Moallemi A. E, Tavakoli Dastjerd F. Experimental Investigation of Nanofluid Based on Titanium Dioxide Nanoparticles in Absorption Sunlight and Steam Generation. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):57-65.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177948944

Phone: +98 (51) 38805103

Fax: +98 (51) 3880500

niazmand@um.ac.ir

#### Article History

Received: November 10, 2018

Accepted: May 7, 2019

ePublished: January 1, 2020

### ABSTRACT

In the present research, the steam generation performances of nanofluids containing titanium dioxide have experimentally been examined. For this purpose, a solar simulator with a xenon lamp as the radiation source, and a pyranometer as a light intensity measuring device are used. Then, the water based-nanofluids in five nanoparticle mass fractions of 0.001, 0.002, 0.004, 0.04, and 0.08% exposed to the light intensity of 3.5Suns (3.5 kW/m<sup>2</sup>) were investigated to compare their evaporation performances with water (H<sub>2</sub>O). Finally, the effects of the solar power intensity on the steam generation were examined. The results showed that the titanium dioxide nanostructures are more efficient to directly absorb the solar energy than the water so that the maximum total evaporation efficiency of 77.4% and 54% were obtained at 3.5 kW.m<sup>-2</sup> for nanofluid and water, respectively. Furthermore, it was found that light absorption increases as the nanofluid mass fraction increases. Also, increasing the light intensity from 1.5 to 3.5 kW.m<sup>-2</sup> enhances the thermal efficiency, while it reduces the evaporation efficiency.

**Keywords** Steam Generation; Nanofluid; Titanium Dioxide; Solar

### CITATION LINKS

[1] Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation [2] New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system [3] Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation [4] Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@ TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticle-based receiver [5] Solar vapor generation enabled by nanoparticles [6] Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles [7] Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study [8] Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications [9] Solar evaporation via nanofluids: A comparative study [10] Investigation of graphene nanofluid for high efficient solar steam generation [11] Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in solar fresh water production [12] Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver [13] Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid [14] Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids [15] Recyclable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CNT nanoparticles for high-efficiency solar vapor generation [16] 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [17] Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation [18] Bioinspired bifunctional membrane for efficient clean water generation [19] Effect of sonication time on the evaporation rate of seawater containing a nanocomposite [20] Performance evaluation of Ferric oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) and Graphene nanoplatelet (GNP) nanoparticles in solar steam generation [21] Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement [22] Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids [23] The beer-lambert law [24] Improving steam generation and distilled water production by volumetric solar heating

## ارزیابی تجربی نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در جذب نور خورشید و تولید بخار

محمد مصطفی غفوریان PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

حمید نیازمند PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

امیر اسماعیل معلمی BSc

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

فاطمه توکلی دستجرد PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی عملکرد نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در تولید بخار پرداخته شده است. برای این منظور از یک شبیه‌ساز نور خورشید دارای لامپ زنون به عنوان منبع تابش و یک پیرانومتر برای تعیین میزان شدت خورشیدی استفاده شد. سپس درصدهای جرمی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۸ از نانوذرات در سیال پایه آب، تحت شدت نور ۳/۵ Suns (۳/۰kW.m<sup>-2</sup>) مورد ارزیابی قرار گرفت. تا عملکرد تبخیری آن با آب معمولی (H<sub>2</sub>O) مقایسه شد. در نهایت اثر شدت توان انرژی خورشیدی در تولید بخار بررسی شد. نتایج نشان داد که نانو سیال حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> توانایی بهتری در جذب مستقیم انرژی خورشیدی در مقایسه با آب دارد؛ به طوری که بیشترین بازده کل برای نانوسیال و آب در شدت ۳/۰kW.m<sup>-2</sup>، به ترتیب ۷۷/۴٪ و ۵۴٪ به دست می‌آید. از طرفی با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه میزان جذب نور افزایش یافته و نیز افزایش میزان شدت از ۱/۵kW.m<sup>-2</sup> تا ۳/۰kW.m<sup>-2</sup> بازده محسوس را افزایش و بازده تبخیری را کاهش می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** تولید بخار، نانوسیال، تیتانیوم اکساید، خورشید

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

\*نویسنده مسئول: niazmand@um.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه کاربرد مواد نانو ساختار با خاصیت اپتیکی مناسب، توجه ویژه محققان را در پدیده‌های فتوکاتالیست و فتوولتاییک به خود معطوف نموده است. اما در دهه اخیر کاربرد نانوذرات با خاصیت جذب نور بالا در تولید بخار خورشیدی، به‌عنوان بهترین کیفیت گرما، توجه بیشتری یافته است؛ زیرا به‌کارگیری تکنولوژی استفاده از نانوذرات جهت برداشت انرژی خورشید می‌تواند یکی از موثرترین و مفیدترین روش‌های صرفه‌جویی در منابع سوخت فسیلی و کاهش آلودگی باشد. در حقیقت با تولید بخار از یک منبع انرژی تجدیدپذیر، پاک و در دسترس می‌توان بخش عمده‌ای از نیازهای مصرفی بشر را بدون تولید آلاینده زیست‌محیطی، تأمین نمود [1, 2]. از طرفی هزینه‌های اولیه، بهره‌برداری و ذخیره‌سازی این نوع انرژی، استفاده از آن را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. اصولاً در سیستم‌های

سنتی برداشت انرژی خورشید، تلفات گرمایی زیادی در مرحله برداشت انرژی و انتقال آن صورت می‌گیرد. از این رو پژوهشگران به‌دنبال راه حلی برای کاهش اتلافات و افزایش جذب و برداشت مستقیم انرژی خورشیدی هستند [3, 4].

نانوذرات با جذب انرژی نور و محلی‌سازی آن باعث افزایش دمای سیال اطراف و در صورت تداوم انرژی مناسب، باعث تولید بخار خواهند شد. این ادعا توسط محققانی نظیر نیومن و همکاران [5, 6]، با عنوان تولید بخار خورشیدی با استفاده از نانوتکنولوژی اثبات شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که برای تولید بخار مستقیم با بازدهی ۲۴٪ در اطراف نانوذرات طلا، انرژی چند برابر انرژی خورشید نیاز است. هر چند تأمین این انرژی بسیار مشکل است، اما در صورت بهینه‌سازی سیستم برداشت انرژی، می‌توان بخش اعظمی از اتلافات انتقال انرژی را کاهش داد.

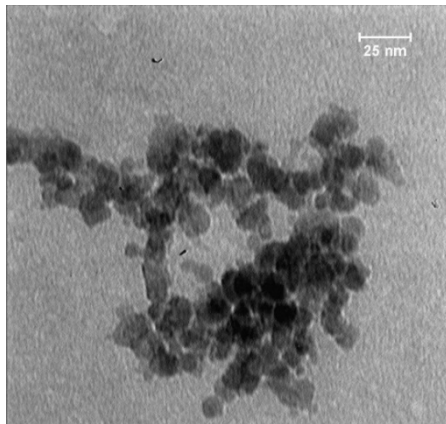
از جمله پژوهش‌های دیگر انجام‌شده در این زمینه می‌توان به پژوهش جین و همکاران [7] اشاره نمود. آن‌ها با مطالعه آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که استفاده از نانوسیال طلا با غلظت ۵/۸ppm سبب بهبود راندمان تبدیل نور به گرما به میزان ۶۰٪ نسبت به آب خالص در شدت یکسان می‌شود. همچنین مورچیانو و همکاران [8] و زینی و همکاران [9] در پژوهش خود با اشاره به قیمت بالای نانوسیال طلا (که برای ۲۰ میلی‌لیتر محلول آبی نانوذره طلا با غلظت ۱۰<sup>-۱۴</sup>×۱/۸ ذره در میلی‌لیتر، برابر با ۱۸۵ دلار آمریکا است)، بهره‌گیری از آن را در تولید بخار خورشیدی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر ندانستند. به‌طوری که مقایسه عملکرد نانوسیال طلا با دیگر نانوسیال‌ها نظیر کربن سیاه، نشان داد که قیمت تولیدشده توسط نانوذرات طلا ۳۰۰ برابر بخار تولیدشده با کربن سیاه است. از این رو توجه محققان به نانوذرات ارزان‌قیمت با قابلیت جذب نور بالا متمرکز شد. به‌عنوان نمونه لئو و همکاران [10] و غفوریان و همکاران [1, 11] به‌ترتیب نانوذرات اکسید گرافن کاهش یافته، اکسید گرافن و کربن نانوتیوب را به‌منظور بررسی اثر غلظت نانوسیال و شدت تابش نور ورودی بر نرخ تبخیر، بازده تبخیری و نیز بازده تبدیل نور به گرما به‌کار گرفتند. این سه تحقیق نیز عملکرد بالای نانوسیال‌های کربنی را حتی در غلظت‌های پایین (۲۰ تا ۸۰ppm [10]) و ۰/۰۰۴ [1, 11] درصد وزنی)، در مقایسه با آب خالص گزارش نمودند. نی و همکاران [3]، در یک مطالعه مقایسه‌ای، اثر نانوسیال‌های کربن سیاه، کربن سیاه گرافیتی‌شده و گرافن در تولید بخار خورشیدی مورد ارزیابی قرار دادند و در این میان به بازده مطلوب ۶۹٪ دست یافتند.

از دیگر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه می‌توان به جین و همکاران [12]، وانگ و همکاران [13]، فو و همکاران [14] و شی و همکاران [15] اشاره کرد که مطالعاتی روی نانوذرات کربنی، طلا، نانولوله کربنی تک‌دیواره و چند دیواره اصلاح‌شده با عامل کربوکسیلی و گرافن در جهت تولید بخار خورشیدی انجام داده‌اند [12-15]. آن‌ها بازده کل ۸۰/۳٪، مربوط به شدت بالای ۲۰Suns و مبتنی بر نانوسیال طلا را گزارش نمودند [12]. درحالی که بازده

یک سنسور نیز برای گزارش دمای محیط در بیرون پشیر تعبیه شده است. در هر تست مقدار ۶۰ml از سیال مورد نظر در بشر ریخته می‌شود و بعد از قرارگرفتن در محفظه ترازو و تحت تابش مستقیم، کاهش جرم، دمای چهار سنسور به‌همراه زمان تست در دیتالاگر ثبت خواهند شد. به‌منظور تعیین شدت تابش از پیرانومتر استفاده شده و با تغییر ارتفاع و نیز به کمک لنز فوکل، سیستم برای شدت‌های بالا کالیبره می‌شود.

### ۲-۱- آماده‌سازی نانوسیال

به‌منظور آماده‌سازی نانوسیال‌های TiO<sub>2</sub> در چهار درصد جرمی ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱ در گام نخست نانوذرات از شرکت VCN خریداری شدند. شکل ۲ تصویر TEM مربوط به این نانوذرات را نشان می‌دهد. این تصویر با دستگاه میکروسکوپ الکترونی (مدل LEO-1450VP) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی گرفته شده است.



شکل ۲) تصویر TES از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>)

سپس نانوذرات در سیال پایه آب دیونیزه توسط دستگاه آلتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه پراکنده می‌شوند. شکل ۳ تصویر واقعی این نانوسیال را به‌همراه مشخصات درصد جرمی نانوذرات نشان می‌دهد. پایداری نانوسیال توسط پارامتر پتانسیل زتا تعیین می‌شود. این پارامتر با استفاده از دستگاه ZetaCompact اندازه‌گیری و میانگین آن در سه مرحله و در pH=۶ مقدار ۳۶/۳۴mV- محاسبه شد.



شکل ۳) تصویری از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) با دردهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب

تبخیری، برای دیگر نانوسیال‌ها ۶۶% [4]، ۶۰% [15]، ۶۹% [3] و ۴۵% [13] و در شدت بالای ۱۰ Suns گزارش شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد علی‌رغم جدید بودن موضوع چالش‌های زیادی نظیر پارامترهای مؤثر بر خواص اپتیکی نانوذرات و بررسی نانوذرات مختلف، بررسی عملکرد جذب نور، تبخیر در شدت‌های پایین و نیز ارزیابی عملکرد پارامترهای مؤثر بر آن در ادبیات این موضوع مشهود است. یکی از نانوذراتی که دارای خاصیت اپتیکی و آنتی‌باکتریال بوده و قابلیت‌های ویژه‌ای در جذب نور و همچنین پایداری مناسبی در محلول پایه آب دارد، تیتانیوم اکساید است. تاکنون اثر این نانوذره در تصفیه و زودون رنگ از آب مورد بررسی قرار گرفته است [16-18]. اما در میان منابع بررسی‌شده عملکرد این نانوذره در تولید بخار خورشیدی کمتر مشاهده می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تجری برداشت انرژی خورشید با استفاده از نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید پرداخته می‌شود. در این مطالعه برداشت انرژی به‌صورت بهترین کیفیت انرژی یعنی تولید بخار خورشیدی، با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی صورت می‌گیرد و پارامترهای مؤثر بر نرخ تبخیر نظیر شدت نور و غلظت بررسی خواهند شد. انتظار می‌رود که با این پژوهش بتوان عملکرد این نوع نانوسیال را در تبخیر خورشیدی ارزیابی نمود.

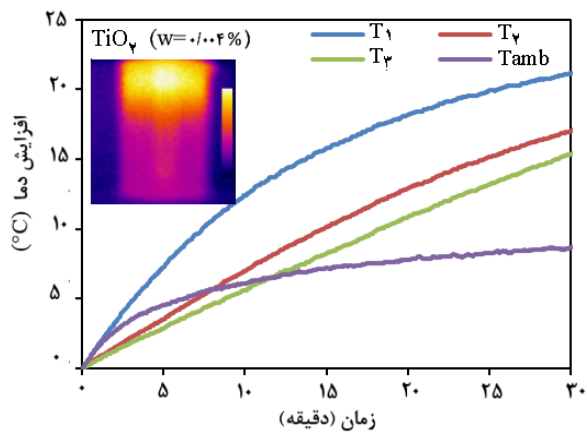
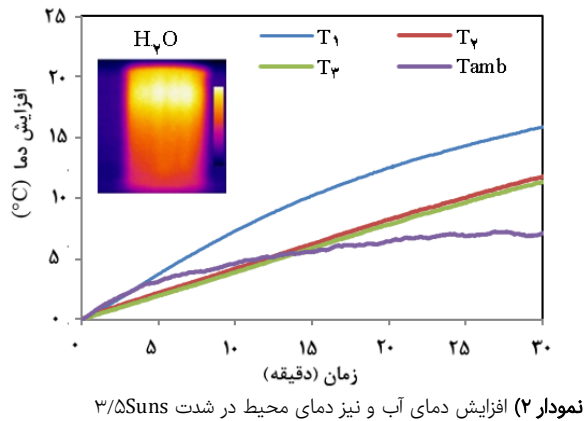
### ۲- بخش آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی برای سیستم تولید بخار خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزاء اصلی این مجموعه شامل یک شبیه‌ساز خورشیدی (یک لامپ زنون ۱۶۰۰وات با دمای تابش ۶۰۰۰K)، محفظه شیشه‌ای حاوی نانوسیال، سنسورهای دما، ترازو دیجیتالی (کرنل با دقت ۰/۰۰۰۱، آلمان)، شدت‌سنج CMP (از شرکت Kipp & Zonen با دقت ۱W.m<sup>-2</sup> با گستره طول موجی ۲۰۰ تا ۲۸۰۰nm) و سیستم جمع‌آوری اطلاعات (دیتالاگر ساخت شرکت مهندسی یگانه تجهیز ویرا (VIRA) است که سه سنسور به‌منظور گزارش دمای سیال در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر از کف بشر ۵۰ml قرار داده شده است.



شکل ۱) نمای کلی از مجموعه آزمایشگاهی به‌همراه شبیه‌ساز خورشیدی (A)، ترازو (B) و محفظه شیشه‌ای به‌همراه سنسورها (C)

نقش قابل توجه نانوذرات در بهبود عملکرد جذب نور و افزایش دمای سیال است. از طرفی با مقایسه تصویر حرارتی موجود در این دو نمودار می‌توان دریافت که نانوذرات جذب نور را در سطوح بالایی محفظه محلی‌سازی کرده‌اند زیرا که در سطح بالایی و محدوده باند کمی، بیشترین دما مشاهده می‌شود.

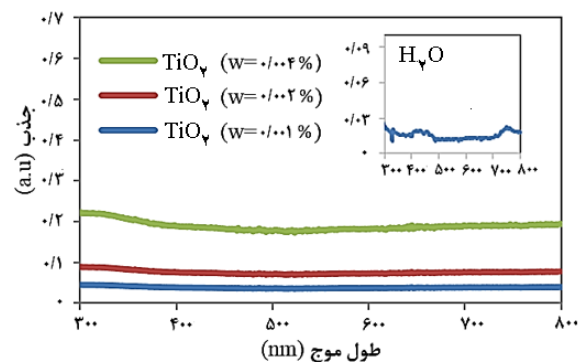


نمودار ۴ جرم تبخیرشده توسط نانوسیال را در مقایسه با آب در مدت زمان ۳۰ دقیقه برای شدت ۳/۵Suns نشان می‌دهد. جرم تبخیرشده به کمک ترازوی دقیق اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود نانوذرات در آب باعث افزایش تبخیر شده است؛ به‌طوری که با افزودن نانوذرات تا درصد جرمی ۰/۰۰۴، نرخ تبخیر محلول تیتانیوم اکساید (۱/۲kg.m<sup>-2</sup>.hr<sup>-1</sup>) تا ۱/۵۴ برابر نرخ تبخیر آب (۰/۷۸kg.m<sup>-2</sup>.hr<sup>-1</sup>) افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توضیح داد که با جذب نور توسط نانوذره دمای آن بالا می‌رود. این افزایش دمای محلی ممکن است برای تبدیل مایع مجاور نانوذرات به بخار، کافی باشد. در نور ثابت، پوشش بخار در سطوح رشد کرده و با فرض حرکت این حباب به سطح مایع، به‌دلیل اختلاف فشار جزیبی آب در سطح و در هوای بالای آن، حباب آزاد شده و منجر به تولید بخار می‌شود.

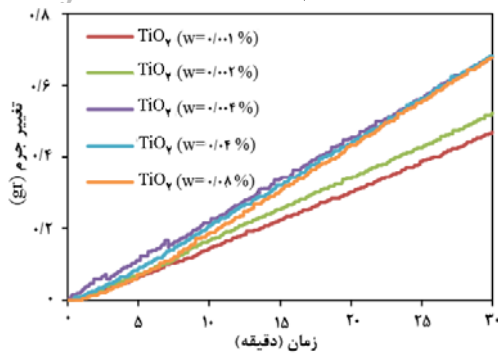
به‌طور معمول، محدوده پتانسیل زتای بالای ۳۰mV بیانگر پایداری تقریباً مناسب نانوسیال است [19, 20]. همچنین بازیدهای چشمی بیانگر پایداری مناسب کلیه نمونه‌ها در مدت زمان آزمایش (کمتر از ۱۰ ساعت) بود.

### ۳- بحث و نتایج

به‌منظور مقایسه عملکرد نانوسیال‌ها با آب در جذب نور مرئی از دستگاه Aligent-۸۴۵۳ استفاده می‌شود. این دستگاه جذب نور نمونه سیال را در محدوده طول موج ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر که ۵۵٪ انرژی خورشید را به خود اختصاص داده، نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این تست در نمودار ۱ برای نمونه‌های مختلف نانوسیال در مقایسه با آب خالص، در محدوده طول موج مرئی، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توانایی آب در جذب نور بسیار پایین است و با افزودن نانوذرات به آب، قابلیت جذب نور مرئی افزایش قابل توجهی می‌یابد. به‌طوری که میانگین جذب برای آب در گستره طول موج آزمایش ۱۵٪ و برای سیال حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> با غلظت ۰/۰۰۴٪ که بیشترین میزان افزایش جذب نور را دارد، ۳۳۶٪ است. این یعنی نانوذرات در محلول ساخته‌شده میزان جذب نور مرئی را چندین برابر آب افزایش داده‌اند. در نتیجه پیش‌بینی می‌شود این نانوسیال‌ها یک محیط جایگزین عالی برای جمع‌آوری انرژی خورشیدی و به‌ویژه تبدیلات نور به گرما باشند.



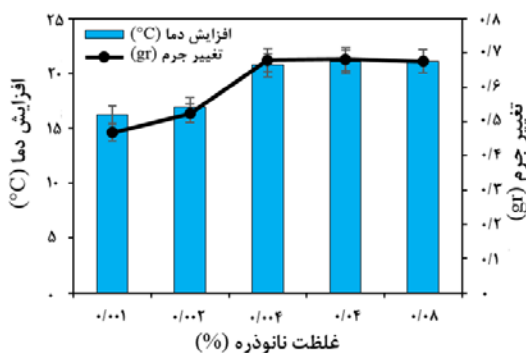
برای بررسی عملکرد تبخیری، نانوسیال مورد نظر در داخل بشر تحت نور ساطع‌شده از یک شبیه‌ساز خورشیدی با شدت ۳/۵kW.m<sup>-2</sup> آزمایش شد. نمودارهای ۲ و ۳ تغییرات دمایی آب و نانوسیال حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> و همچنین دمای محیط و شدت نور را در درصد جرمی ۰/۰۰۴ نشان می‌دهند. T<sub>1</sub> دمای بالاترین سنسور در داخل سیال (در ارتفاع ۵۰mm)، T<sub>2</sub> دمای پایین‌ترین سنسور (در ارتفاع ۱۰mm) و T<sub>amb</sub> دمای محیط (در بیرون بشر و در ارتفاع ۲۵mm) را در مدت زمان تست نشان می‌دهند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، بالاترین سنسور (T<sub>1</sub>) در نانوسیال بعد از ۳۰ دقیقه ۲۱°C در آب ۱۵°C دما را گزارش می‌کنند. این درحالی است که دمای محیط به‌طور یکسان ۷°C افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده



**نمودار ۶** جرم تبخیرشده نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در درصدهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب و تحت شدت ۳/۵Suns

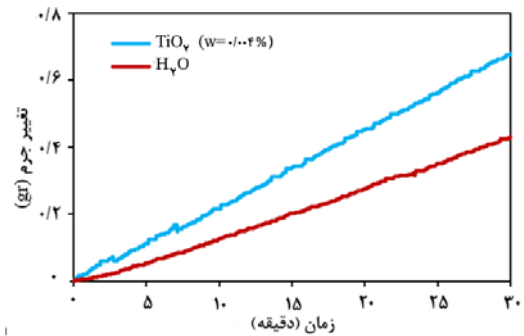
از طرفی دیگر بررسی نمونه‌ها در شکل ۳ نشانگر تیره‌تر بودن نمونه‌ها با درصد وزنی بالا است که باعث شده بیشتر نور خورشید توسط قسمت بالایی نانوسیال جذب شود و میزان عبور نور در نمونه کاهش یابد. درحالی که برای رنگ شفاف‌تر نانوسیال، میزان عبور نور خورشید بیشتر است و قسمت عمده انرژی خورشیدی صرف گرم کردن توده سیال می‌شود. پایداری مطلوب‌تر نمونه می‌تواند غلظت ذرات را در سطح افزایش دهد (زیرا ته‌نشینی ذرات کمتر می‌شود). در نتیجه مطابق قانون بیر- لامبرت [23, 24]، اکثر نور در لایه‌های بالایی نانوسیال پایداری، جذب خواهد شد که این امر برای تبخیر سطحی بسیار مناسب است.

قانون بیر- لامبرت بین عبور (جذب) نور و غلظت ذرات در کلوئید به صورت  $A = \log_{10}(I/Tr) = abc$  ارتباط برقرار می‌کند، به طوری که  $A$  میزان جذب اندازه‌گیری شده،  $Tr$  ضریب عبور،  $a$  ضریب خاموشی مولی،  $b$  غلظت و  $c$  عمق نفوذ است. مشاهده می‌شود بین میزان نور عبوری و عمق نفوذ نور رابطه عکس وجود دارد. به منظور مشاهده متمایزتر اثر غلظت نانوذرات، نمودار جرم تبخیری و دمای نانوسیال در بالاترین سطح برحسب غلظت نانوذرات در پایان مدت ۳۰ دقیقه تست، در نمودار ۷ ارائه شده است.



**نمودار ۷** جرم تبخیرشده و افزایش دمای بالاترین سنسور بعد از ۳۰ دقیقه تست نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در درصدهای جرمی متفاوت تحت شدت ۳/۵Suns

همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه مستقیمی بین افزایش دمای بالاترین سنسور و میزان جرم بخار شده محلول وجود دارد؛ اما با دقت بیشتر در این نمودار می‌توان دریافت که افزایش غلظت از ۰/۰۱ تا



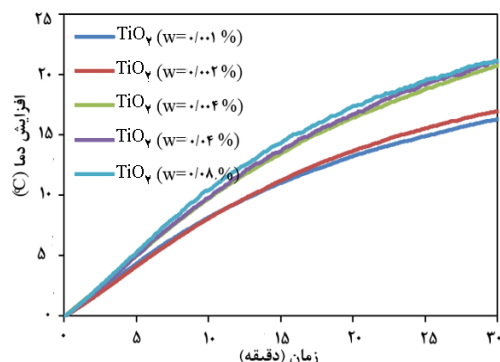
**نمودار ۴** جرم تبخیرشده در شدت ۳/۵Suns برای آب و نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در درصد جرمی ۰/۰۴

شایان توجه است که حباب‌های تشکیل شده در عمق‌های پایین‌تر به علت تبادل حرارت با سیال اطراف خود، تقطیر خواهند شد و انرژی آنها صرف افزایش دمای بالک سیال می‌شود. قرارگرفتن طولانی‌تر در معرض نور خورشید، باعث افزایش کارآمد و پایدار تولید بخار بر پایه نانوذرات و کاهش مؤثر گرمایش بالک سیال شده و سرانجام منجر به تولید بخار و جوشش بالک سیال می‌شود. قابل توجه است که نانوذرات نه تنها در فاز بخار پراکنده نشده، بلکه در فرآیند تولید بخار از بین نمی‌رود.

#### بررسی غلظت در نرخ تبخیر

به منظور بررسی اثر غلظت نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) بر کارایی تولید بخار خورشیدی، آزمایش‌هایی با پنج درصد جرمی ۰/۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱۶ از نانوذرات، تحت توان متوسط خورشیدی ۳۵۰ W.m<sup>-2</sup> (معادل ۳/۵Suns)، انجام شد. نتایج مربوط به تأثیر غلظت نانوذرات بر دما و جرم تبخیرشده در نمودارهای ۵ و ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش غلظت نانوذرات از ۰/۰۱ تا ۰/۰۸% در مدت ۳۰ دقیقه، دمای بالاترین سنسور را از ۱۶/۹ به ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد این درحالی است که جرم تبخیرشده از ۰/۴۶ به ۰/۶۸ گرم افزایش خواهد یافت. دلیل این امر را می‌توان به جذب بالای نور توسط نانوذرات ارتباط داد. زیرا نتایج این بخش با نتیجه نمودار ۱ که طیف جذبی را با درصدهای جرمی مختلف نشان می‌دهد و نیز با نتیجه دیگر محققان [21, 22] مطابقت دارد.



**نمودار ۵** افزایش دمای بالاترین سنسور نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (TiO<sub>2</sub>) در شدت ۳/۵Suns و درصدهای جرمی متفاوت در مقایسه با آب

محسوس محاسبه شوند تا کارایی نانوسیال در مقایسه با آب در شدت‌های مختلف مشخص شود.

### بازده تبخیری، محسوس و کل

بهمانطور ارزیابی بهتر برداشت انرژی خورشید، می‌توان از تعاریف بازده تبخیری، گرمایی (محسوس) و بازده کل استفاده نمود. بازده تبخیری از تقسیم انرژی نهان تبخیر در فرآیند تولید بخار به کل انرژی تابش ورودی به سیال، تعریف می‌شود [4, 9]:

$$\eta_{\text{تبخیری}} = \frac{\dot{m} h_{fg}}{I \times A} \quad (1)$$

که  $\dot{m} \left(\frac{kg}{hr}\right)$  نمایانگر شار تبخیر آب،  $h_{fg}$  آنتالپی تغییر فاز  $(2357 kJ/kg)$  در فشار اتمسفر برای آب،  $I (W.m^{-2})$  شدت تابش و  $A (m^2)$  سطح تابش است. لازم به ذکر است که در این مقاله، مانند مراجع مختلف [1, 4, 20] انرژی نهان تبخیر نانوسیال برابر سیال آب فرض شده است.

بازده گرمایی محسوس از تقسیم انرژی مربوط به افزایش دما بر کل انرژی تابش ورودی به سیال برای مدت زمان مشخص  $t$  به صورت زیر تعریف می‌شود [4, 9]:

$$\eta_{\text{گرمایی}} = \frac{M \times C \times \Delta T / t}{I \times A} \quad (2)$$

که  $M (kg)$  جرم نانوسیال،  $C_p (kJ.kg^{-1}.K^{-1})$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال و  $t (s)$  مدت زمان افزایش دمای سیال به اندازه  $\Delta T$  است. شایان توجه است برای اندازه‌گیری دمای متوسط سیال در  $\Delta T$ ، از میانگین‌گیری دمای سه سنسور داخل سیال و برای  $C_p$  از ظرفیت گرمای ویژه آب در فشار ۱ bar استفاده شده است. بازده کل نیز مطابق رابطه ۳ از مجموع دو بازده تبخیری و گرمایی به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\eta_{\text{کل}} = \eta_{\text{تبخیری}} + \eta_{\text{گرمایی}} \quad (3)$$

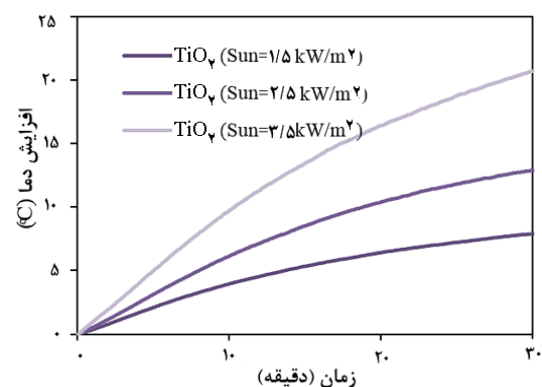
نتایج مربوط به بازده تبخیری، بازده گرمایی محسوس به‌همراه بازده کل برای نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم‌اکساید با درصد جرمی بهینه ۰/۰۰۴ و برای آب، در شدت‌های مختلف به‌ترتیب در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

با مقایسه بازده در شدت‌های متفاوت برای نانوسیال و آب مشاهده می‌شود که افزودن نانوذرات به‌طور میانگین، بازده تبخیری، بازده محسوس و در نتیجه بازده کل را نسبت به آب به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. نکته قابل توجه در این دو نمودار این است که بهترین بازده تبخیری در شدت ۱/۵Suns اتفاق افتاده است و با افزایش شدت میزان بازده تبخیری در آب و نیز نانوسیال کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان افزایش اتلافاتی (به‌علت عدم عایق در اطراف بشر) که باعث افزایش دمای بالک سیال شده دانست؛ زیرا که سطح مقطع تابش در همه آزمایش‌ها ثابت است. این موضوع باعث شده است نرخ تبخیر در صورت کسر رابطه ۱ نسبت به مقدار شدت خورشیدی در مخرج کسر، افزایش نیابد. این نتیجه در مراجع [1, 4] نیز گزارش شده است، پیش‌بینی می‌شود با کاهش اتلافات می‌توان عملکرد نانوسیال را به‌طور چشم‌گیری بهبود داد.

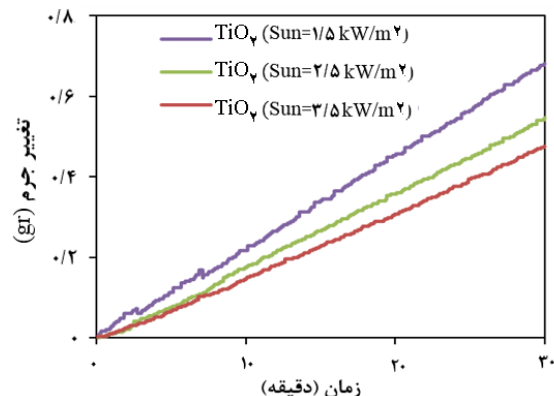
۰/۰۰۴٪ باعث افزایش محسوس نرخ تبخیری و دمای بالاترین سنسور می‌شود، اما از درصد ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۸ این تغییرات ناچیز است. پس می‌توان درصد جرمی ۰/۰۰۴ را به‌عنوان غلظت بهینه معرفی نمود.

### بررسی اثر شدت نور در نرخ تبخیر

تا این مرحله کلیه تست‌ها در شدت ۳/۵Suns انجام شد. در این بخش به بررسی اثر شدت نور بر نرخ تبخیر با سه شدت ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵Suns پرداخته می‌شود. تغییر شدت با تغییر فاصله منبع تابش از نمونه‌ها فراهم می‌شود که در نهایت توسط پیرانومتر کالیبره می‌شود. نتایج افزایش دمای بالاترین سنسور و نیز جرم تبخیر شده برای بهترین رکورد جرم تبخیری (درصد جرمی ۰/۰۰۴) به‌ترتیب در نمودارهای ۸ و ۹ ارائه شده است.



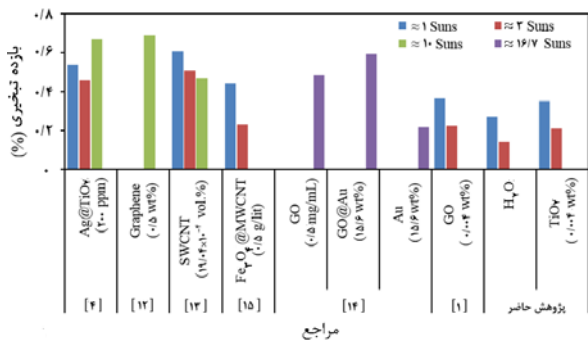
نمودار ۸) افزایش دمای بالاترین سنسور نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم‌اکساید (TiO<sub>2</sub>) در درصد جرمی ۰/۰۰۴ و شدت‌های متفاوت در مقایسه با آب



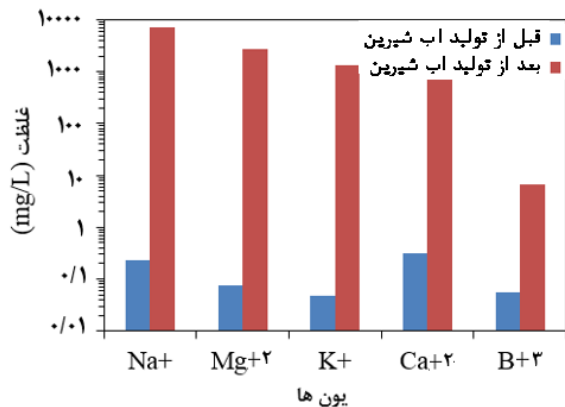
نمودار ۹) جرم آب تبخیر شده نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم‌اکساید (TiO<sub>2</sub>) در درصد جرمی ۰/۰۰۴ و شدت‌های متفاوت در مقایسه با آب

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش شدت نور از ۱/۵ به ۳/۵Suns دمای بالاترین سنسور را از ۷/۸ درجه سانتی‌گراد به‌طور قابل ملاحظه‌ای تا ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد در مدت ۳۰ دقیقه افزایش می‌دهد. این درحالی است که جرم تبخیر شده در حدود ۰/۲۱ گرم افزایش می‌یابد. در حقیقت روند افزایش جرم و دمای بالاترین سنسور با افزایش شدت پیش‌بینی می‌شد اما به‌منظور ارزیابی بهتر بین افزایش دما و جرم تبخیر شده نیاز است تا بازده تبخیری و

نام ICP برای دو حالت نانوسیال بر پایه آب دریا قبل و بعد از تست تقطیری انجام شد. نتایج آنالیز ICP برای محلول آب دریا قبل و بعد از تست در نمودار ۱۳ ارائه شده است.



نمودار ۱۲) مقایسه بازده تبخیری پژوهش حاضر در شدت‌های متفاوت با نتایج گزارش شده در شدت‌ها و نانوسیال‌های مختلف

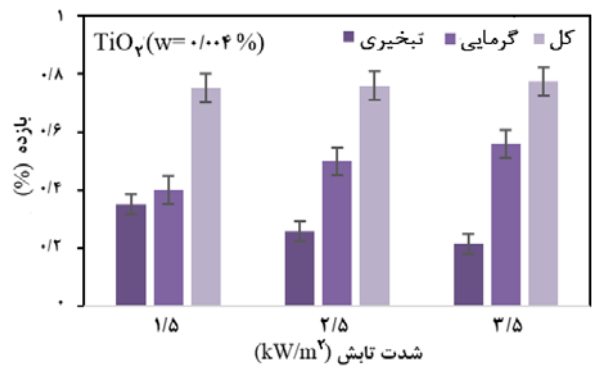


نمودار ۱۳) غلظت یون‌های موجود در محلول آب قبل و بعد از فرآیند تقطیری

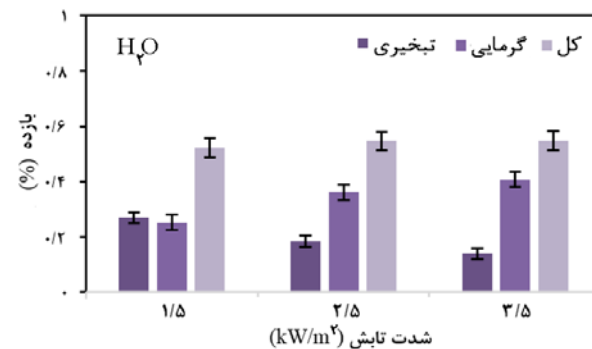
همان‌طور که مشاهده می‌شود، قبل از فرآیند تبخیری، بیشترین یون‌های موجود Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> و Ti<sup>3+</sup> با مقدار ۷۲۸۷، ۲۶۷۲، ۱۳۵۴، ۸۵۳ و ۶/۷ میلی‌گرم بر لیتر هستند که بعد از فرآیند تقطیری این مقادیر به ترتیب به ۰/۲۴، ۰/۷۵، ۰/۰۵، ۰/۳۱ و ۰/۵۶ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابند. این نشان می‌دهد که نه تنها نانوذرات در فرآیند تبخیری از محلول پایه جدا نمی‌شوند، بلکه آب تولید شده شرایط استاندارد جهانی آب آشامیدنی را به همراه خواهد داشت.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید در جذب نور خورشید پرداخته شد. پس از بررسی خواص اپتیکی این نوع نانوسیال، عملکرد آن به صورت تجربی در تولید بخار مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوسیال در غلظت جرمی ۰/۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۸% و در سه شدت (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵Suns) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این نوع نانوذرات در آب عملکرد مناسبی در جهت جذب مستقیم انرژی خورشیدی و تولید بخار دارند. همچنین بهترین غلظت آن در جذب و تولید بخار



نمودار ۱۰) بازده گرمایی، بازده تبخیری و بازده کل نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (با درصد جرمی ۰/۰۰۴) در شدت‌های متفاوت



نمودار ۱۱) بازده گرمایی، بازده تبخیری و بازده کل آب در شدت‌های متفاوت

به منظور مقایسه نتایج پژوهش حاضر با دیگر مطالعات، بازده تبخیری مربوط به نانوسیال TiO<sub>2</sub> و نانوسیال‌های گوناگون که دیگر محققین گزارش داده‌اند در نمودار ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه پژوهش‌ها اثر شدت نور مطالعه نشده است و بازده‌های بالا مربوط به نانوسیال‌های ترکیبی نظیر Ag@TiO<sub>2</sub>، Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MWCNT یا نانوذره گران‌بهای طلا است. این نشان می‌دهد تیتانیوم اکساید توانایی خوبی در تولید بخار خورشیدی در مقایسه با دیگر نانوذرات دارد و اگر به صورت ترکیبی با نانوذرات کربنی آماده‌سازی شود نقش موثرتری در جذب نور خواهد داشت.

#### عملکرد تبخیری نانوذرات TiO<sub>2</sub> با آب دریا و تولید آب شیرین

به منظور مقایسه عملکرد تبخیری نانوذرات TiO<sub>2</sub> در دو سیال پایه آب دریا و آب دیونیزه، تست تبخیری نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم بر پایه آب دیونیزه و آب دریا برای غلظت‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت چندانی در نتایج نرخ تبخیری رخ نمی‌دهد، هر چند میزان نرخ تبخیر نانوسیال بر پایه آب دریا به مقدار ۵% کمتر است که می‌توان علت آن را حضور یون‌های متفاوت در آب دریا دانست؛ زیرا عملکرد تبخیری نانوذرات TiO<sub>2</sub> را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

پس از ارزیابی عملکرد تبخیری نانوسیال حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> عملکرد تولید آب شیرین با استفاده از آب دریا و نانوذره نام برده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور بخار حاصل از قراردادن نانوسیال حاوی نانوذرات تیتانیوم اکساید (با درصد جرمی ۰/۰۰۴) با سیال پایه آب دریا تحت نور، تقطیر شد و تست آنالیز مواد تحت

## منابع

- 1- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia Bajestan E, Elhami Nik H. Localized solar heating via graphene oxide nanofluid for direct steam generation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019;135(2):1443-1449.
- 2- Ghafurian MM, Niazmand H. New approach for estimating the cooling capacity of the absorption and compression chillers in a trigeneration system. *International Journal of Refrigeration*. 2018;86:89-106.
- 3- Ni G, Miljkovic N, Ghasemi H, Huang X, Boriskina SV, Lin CT, et al. Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation. *Nano Energy*. 2015;17:290-301.
- 4- Li H, He Y, Liu Z, Huang Y, Jiang B. Synchronous steam generation and heat collection in a broadband Ag@ TiO<sub>2</sub> core-shell nanoparticle-based receiver. *Applied Thermal Engineering*. 2017;121:617-627.
- 5- Neumann O, Urban AS, Day J, Lal S, Nordlander P, Halas NJ. Solar vapor generation enabled by nanoparticles. *ACS Nano*. 2012;7(1):42-49.
- 6- Neumann O, Feronti C, Neumann AD, Dong A, Schell K, Lu B, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013;110(29):11677-11681.
- 7- Jin H, Lin G, Bai L, Amjad M, Bandararra Filho EP, Wen D. Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study. *Solar Energy*. 2016;139:278-289.
- 8- Morciano M, Fasano M, Salomov U, Ventola L, Chiavazzo E, Asinari P. Efficient steam generation by inexpensive narrow gap evaporation device for solar applications. *Scientific Reports*. 2017;7(1):11970.
- 9- Zeiny A, Jin H, Lin G, Song P, Wen D. Solar evaporation via nanofluids: A comparative study. *Renewable Energy*. 2018;122:443-454.
- 10- Liu X, Huang J, Wang X, Cheng G, He Y. Investigation of graphene nanofluid for high efficient solar steam generation. *Energy Procedia*. 2017;142:350-355.
- 11- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimnia Bejestan E. Performance evaluation of multi-wall carbon nanotube in solar fresh water production. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2018. Articles in Press. [Persian]
- 12- Jin H, Lin G, Bai L, Zeiny A, Wen D. Steam generation in a nanoparticle-based solar receiver. *Nano Energy*. 2016;28:397-406.
- 13- Wang X, He Y, Cheng G, Shi L, Liu X, Zhu J. Direct vapor generation through localized solar heating via carbon-nanotube nanofluid. *Energy Conversion and Management*. 2016;130:176-183.
- 14- Fu Y, Mei T, Wang G, Guo A, Dai G, Wang Sh, et al. Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2017;114:961-968.
- 15- Shi L, He Y, Huang Y, Jiang B. Recyclable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CNT nanoparticles for high-efficiency solar vapor generation. *Energy Conversion and Management*. 2017;149:401-408.
- 16- 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. *Nature Photonics*. 2016;10(6):393-398.
- 17- Lou J, Liu Y, Wang Z, Zhao D, Song Ch, Wu J, et al. Bioinspired multifunctional paper-based rGO composites for solar-driven clean water generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016;8(23):14628-14636.
- 18- Liu Y, Lou J, Ni M, Song Ch, Wu J, Dasgupta NP, et al. Bioinspired bifunctional membrane for efficient clean

خورشیدی ۰/۰۰۴ است. نتایج نشان داد که بهترین بازده تبخیری برای نانوسیال در شدت ۱/۷۵Suns، ۳۵/۲٪ به دست آمد. این درحالی است که در این شدت، بازده گرمایی و بازده کل به ترتیب ۴۰ و ۷۵/۲٪ محاسبه شد. از طرفی نتایج مربوط به تأثیر شدت نور نشان داد که افزایش شدت نور، بازده تبخیری را کاهش می‌دهد ولی باعث افزایش بازده گرمایی می‌شود؛ هر چند به طور کلی می‌توان بازده کل نانوسیال را در هر سه شدت یکسان فرض نمود. نتایج حاصل از آب تقطیرشده مربوط به محلول نانوسیال بر پایه آب دریا نیز نشان داد که با تقطیر بخار تولیدشده از نانوسیال و انرژی خورشید به راحتی می‌توان آب قابل شرب تولید نمود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان لازم می‌دانند از کارشناسان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد و شرکت مهندسی یگانه تجهیز ویرا که در تمام مراحل حامی این پژوهش بوده‌اند، تقدیر و تشکر نمایند.

**تأییدیه اخلاقی:** نتایج ارائه شده، حاصل پژوهش نویسندگان بوده که تاکنون در نشریه یا مجموعه مقالات کنفرانس دیگری چاپ نشده است و در دست بررسی نیست.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمان‌های دیگر ندارد.

**سهام نویسندگان:** محمدمصطفی غفوریان (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ حمید نیازمند (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۲۰٪)؛ امیراسماعیل معلمی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ فاطمه توکلی دستجرد (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۲۰٪)

**منابع مالی:** این پژوهش با حمایت‌های مالی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

## پی‌نوشت

A	جذب (%) و مساحت (m <sup>2</sup> )
a	ضریب خاموشی مولی
b	غلظت
C	ظرفیت گرمای ویژه (kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
c	طول عبوری
T	دما (C°)
t	زمان (s)
Tr	ضریب عبور
I	شدت نور (kW.m <sup>-2</sup> )
$\dot{m}$	نمایانگر شار تبخیر آب (kg.hr <sup>-1</sup> )
$h_{fg}$	آنتالپی تغییر فاز (kJ.kg <sup>-1</sup> )

## علائم یونانی

$\eta$	بازده (%)
W	درصد جرمی (%)

## زیرنویس

amb	محیط
-----	------



21- Zeng Y, Wang K, Yao J, Wang H. Hollow carbon beads for significant water evaporation enhancement. *Chemical Engineering Science*. 2014;116(1):704-709.

22- Amjad M, Raza G, Xin Y, Pervaiz Sh, Xu J, Du X, et al. Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids. *Applied Energy*. 2017;206:393-400.

23- Swinehart DF. The beer-lambert law. *Journal of Chemical Education*. 1962;39(7):333-345.

24- Ghafurian MM, Niazmand H, Ebrahimiina Bajestan E. Improving steam generation and distilled water production by volumetric solar heating. *Applied Thermal Engineering*. 2019;158:113808.

water generation. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016;8(1):772-779.

19- Ghafurian MM, Akbari Z, Niazmand H, Mehrkhah R, Wongwises S, Mahian O. Effect of sonication time on the evaporation rate of seawater containing a nanocomposite. *Ultrasonics Sonochemistry*. 20019. In Press.

20- Ghafurian MM, Niazmand H, , Akbari Z, Bakhsh Zahmatkesh B. Performance evaluation of Ferric oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) and Graphene nanoplatelet (GNP) nanoparticles in solar steam generation. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2019;9(2):181-196. [Persian]