



## تحلیل عددی همرفت طبیعی نانوسیال در یک گردآورنده خورشیدی تحت خلا

### همراه با مواد تغییر فاز دهنده

سید علیرضا ناظم<sup>۱</sup>، ایمان زحمتکش<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲. دانشیار، گروه مکانیک، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

\* نویسنده مسئول: zahmatkesh5310@mshdiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

### چکیده

انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی ابدی و گسترده، چگالی پایینی دارد و شدت آن به طور پیوسته در حال تغییر است. عدم دسترسی به انرژی خورشیدی در شب و شکاف بین زمان تابش و مصرف آن، نقاط ضعف اصلی آن به شمار می‌روند. در کاربردهایی از قبیل آب گرم مصرفی (DHW<sup>۱</sup>)، مواد تغییر فاز دهنده (PCM<sup>۲</sup>)، با ظرفیت گرمایی بالا و دمای ثابت در طول فرآیند تغییر فاز می‌توانند این چالش مهم را برطرف سازند. با این وجود، کوچک بودن ضریب رسانش گرمای آب، عملکرد گردآورنده خورشیدی لوله خلا را کم می‌کند. البته با به کارگیری نانوسیالات می‌توان رسانش گرمای آب را به میزان چشمگیری افزایش داد. این مقاله به تحلیل عددی همرفت طبیعی نانوسیال در یک گردآورنده خورشیدی تحت خلا همراه با مواد تغییر فاز دهنده می‌پردازد. نانوذرات بررسی شده شامل اکسید مس، اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و اکسید گرافن می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که به ازای همه نانوذرات بررسی شده، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار دمای خروجی از گردآورنده کاهش می‌یابد. مشخص می‌شود که بیشترین دما در هنگام استفاده از نانوذرات اکسید گرافن رخ می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال، مواد تغییر فاز دهنده، گردآورنده خورشیدی، لوله خلا، تحلیل عددی.

### مقدمه

انرژی خورشیدی به عنوان شکل مهمی از انرژی‌های تجدیدپذیر، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. از این رو، افزایش بازده گردآورنده‌های خورشیدی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. به عنوان نمونه، هوشمند و همکاران [۱] به بهبود عملکرد گرمایی گردآورنده‌های خورشیدی جذب مستقیم از طریق استفاده از نانوذرات و محیط متخلخل پرداختند. بهترین عملکرد زمانی حاصل شد که نانوذرات و محیط متخلخل به طور همزمان مورد استفاده قرار گرفتند. بهبود بازده گرمایی در اثر اضافه کردن نانوذرات برابر با ۳۷ درصد و به علت قرارگیری محیط متخلخل برابر با ۱۴ درصد گزارش شد. استفاده از نانوسیالات در گردآورنده‌های خورشیدی جذب مستقیم پیشتر نیز توسط چن و همکاران [۲]، هونگ و همکاران [۳] و خسروجردی و همکاران [۴] مورد مطالعه قرار گرفته بود. همه این پژوهش‌ها، تأثیر مثبت افزودن نانوذرات اکسید گرافن بر عملکرد گرمایی گردآورنده‌های خورشیدی جذب مستقیم را گزارش کرده بودند. عیدان و همکاران [۵] اثر استفاده از نانوسیال را در بهبود عملکرد گرمایی گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلا بررسی کردند. آنها به کارگیری نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس، بازده گرمایی این گردآورنده‌ها را تا ۳۸ درصد بهبود دادند. همچنین، کایا و ارسلان [۶] در تحقیقات مشابه دریافتند که افزودن نانوذرات نقره به سیال پایه در یک گردآورنده خورشیدی لوله خلا، بازده آن را تا ۲۷ درصد بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، در مطالعه ایرانمنش و همکاران [۷] مشخص شد که با به کارگیری نانوذرات گرافن، بازده گردآورنده خورشیدی لوله خلا می‌تواند از ۹۰ درصد نیز فراتر رود. به کارگیری نانوسیالات در بهبود عملکرد گرمایی گردآورنده‌های

<sup>1</sup> Domestic Hot Water

<sup>2</sup> Phase Change Material

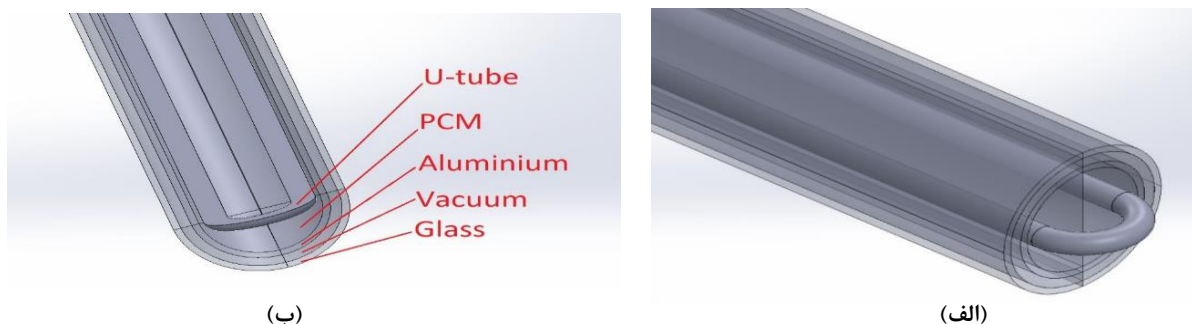


خورشیدی صفحه تخت توسط تعدادی از محققان انجام شده است. احمدی و همکاران [۸] بیش از ۱۸ درصد بهبود در عملکرد گرمایی این دسته از گردآورنده‌ها را در اثر استفاده از نانوذرات گرافن گزارش کردند. میبیدی و همکاران [۹] با بررسی استفاده از نانوذرات اکسید سیلیسیوم در گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت دریافتند که این نانوذرات با وجود رسانش گرمای کم، قادرند بازده گرمایی گردآورنده را بهبود بخشند. پژوهش یوسفی و همکاران [۱۰] نشان داد که سورفکتنتی که برای پایداری نانولوله‌های کربنی به نانوسیال اضافه می‌شود، خود می‌تواند بازده گرمایی گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت را افزایش دهد. تاثیر مثبت نانوذرات مس در بهبود عملکرد گرمایی گردآورنده‌های خورشیدی صفحه تخت توسط زمزمیان و همکاران [۱۱] گزارش شد. علاوه بر این موارد، کیم و همکاران [۱۲] به مطالعه اثر استفاده از نانوذرات در گردآورنده‌های خورشیدی با لوله U شکل پرداختند. در پژوهش آنها تا بیش از ۲۴ درصد بهبود در بازده این دسته از گردآورنده‌ها گزارش شد. در پژوهش‌هایی دیگر، لو و چن [۱۳] از مواد متخلخل جهت بهبود کارایی یک گردآورنده خورشیدی لوله خلا استفاده کردند. آنها ضریب تخلخل مناسب برای این دسته از گردآورنده‌ها را ۰/۹ گزارش کردند. مواد تغییر فازدهنده می‌توانند انرژی گرمایی را به دو صورت محسوس و نهان در خود ذخیره کنند. در ذخیره انرژی محسوس، انرژی گرمایی از طریق افزایش دمای جسم جامد یا مایع در آن ذخیره می‌شود. میزان انرژی محسوس ذخیره شده در جسم تابعی از دما، گرمای ویژه و اندازه جسم می‌باشد. در مقابل، ذخیره انرژی گرمایی توسط جسم به صورت نهان به هنگام تغییر فاز جسم از حالت جامد به مایع یا مایع به گاز یا جامد به جامد صورت می‌گیرد. مواد تغییر فاز دهنده، انرژی گرمایی را به صورت گرمای نهان ذوب ذخیره می‌کنند. الفیان و همکاران [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی فرآیندهای ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده در گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلا پرداخته‌اند. در پژوهش آنها به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده، یک افزایش چشمگیر در بازده گرمایی روزانه را نشان داد؛ که ناشی از فرآیند تخلیه طولانی در شب می‌باشد. علاوه بر این پژوهش، پوار و سبحان سربندی [۱۵] یک تحلیل عددی برای فرآیندهای ذوب و انجماد مواد تغییر فاز دهنده در گردآورنده‌های خورشیدی لوله خلا ارائه کردند؛ که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.

پیدا است که در پژوهش‌های پیشین استفاده همزمان از نانوسیالات و مواد تغییر فاز دهنده در گردآورنده‌های خورشیدی تحت خلا مورد مطالعه نبوده است. از این رو، این پژوهش به تحلیل عددی همرفت طبیعی نانوسیال در یک گردآورنده خورشیدی تحت خلا همراه با مواد تغییر فاز دهنده پرداخته شده است.

## بیان مسأله

شکل (۱-الف) مدل حاضر متشکل از یک لوله U شکل است که حامل نانوسیال می‌باشد. اطراف این لوله، یک محفظه استوانه‌ای شکل نصب شده است؛ که درون آن، مواد تغییر فاز دهنده قرار دارد. در پیرامون این فضا نیز سه لایه به صورت استوانه‌ای شکل قرار گرفته‌اند. لایه اول به صورت جسم جامد و از جنس آلومینیوم است و به عنوان لایه جاذب، گرمای ناشی از تابش خورشید را جذب می‌کند. لایه بعدی به صورت خلا بوده و لایه آخر، شیشه‌ای می‌باشد. شکل (۱-ب) نشان‌دهنده مدل هندسی گردآورنده خورشیدی با وجود لایه‌های شیشه، آلومینیوم و مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد.



شکل ۱: مدل هندسی گردآورنده خورشیدی در حضور لایه‌های شیشه، آلومینیوم و مواد تغییر فاز دهنده



ساز و کار سامانه حاضر به این گونه است که گرمای ناشی از تابش خورشید از لایه شیشه‌ای عبور کرده و لایه میانی را گرم می‌کند. این گرما به لایه جاذب منتقل می‌شود تا در آن جذب شود و از طریق آن به فضای حاوی مواد تغییر فاز دهنده منتقل شده و سبب تغییر فاز این مواد شود. در این جا، تغییر فازی که در مواد تغییر فاز دهنده رخ می‌دهد، امکان ایجاد سرمایش یا گرمایش در لوله U شکل را فراهم می‌آورد. در طول روز که تابش خورشید وجود دارد و هوا گرم است، مواد تغییر فاز دهنده گرما را از طریق لایه جاذب دریافت می‌کنند که صرف تغییر فاز این مواد می‌شود. در ادامه، در طول شب، مواد تغییر فاز دهنده با تغییر فاز مجدد یعنی فرآیند انجماد، گرمای نهان ذخیره شده در خود را به جریان نانوسیال درون لوله U شکل منتقل می‌کنند و سبب گرمایش آن می‌شوند.

### مدل سازی هندسی

برای شبیه‌سازی عددی مسأله موردنظر، ابتدا لازم است تا مدل هندسی آن ایجاد شود. در این مقاله، مدل موردنظر به صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین مدلر<sup>۱</sup> طراحی شده است. طول لوله برابر با ۱/۵ متر، قطر لوله برابر با ۴۷ میلی‌متر و قطر لوله داخلی برابر با ۶/۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین، قطر لایه‌های دیگر به ترتیب از داخل به خارج برابر با ۳۳، ۳۷، ۴۳ میلی‌متر هستند.

### معادلات حاکم

معادلات حاکم برای جریان آرام و پایای سیال تراکم‌ناپذیر نیوتنی در محفظه سه‌بعدی حاضر در دستگاه مختصات استوانه‌ای شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی می‌باشد:

معادله پیوستگی:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

معادله اندازه حرکت در جهت r:

$$\rho_{nf} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta u_r)}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + \frac{\partial (u_z u_r)}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت در جهت θ:

$$\rho_{nf} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r u_\theta)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta u_\theta)}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} + \frac{\partial (u_z u_\theta)}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

معادله اندازه حرکت در جهت z:

$$\rho_{nf} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r u_z)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta u_z)}{\partial \theta} + \frac{\partial (u_z u_z)}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{nf} \left[ \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

<sup>1</sup> DesignModeler



معادله انرژی:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (ru_r T)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (u_\theta T)}{\partial \theta} + \frac{\partial (u_z T)}{\partial z} = \frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

در این جا،  $u_r$  مؤلفه سرعت مماسی،  $u_\theta$  مؤلفه سرعت شعاعی،  $u_z$  مؤلفه سرعت محوری،  $P$  فشار،  $T$  دما،  $k_{nf}$  ضریب رسانش گرمای نانوسیال و  $\mu_{nf}$  گرانروی نانوسیال می‌باشند. در این پژوهش، خواص نانوسیال از روابط زیر تعیین می‌شوند:

ضریب رسانش گرما:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (6)$$

که در آن،  $k_p$ ،  $k_f$ ،  $k_{nf}$  و  $\phi$  به ترتیب ضریب رسانش گرمای نانوسیال، ضریب رسانش گرمای سیال پایه، ضریب رسانش گرمای نانوذرات و کسر حجمی نانوذرات هستند. همچنین، زیرنویس  $p$  نشان‌دهنده خواص نانوذرات، زیرنویس  $f$  نشانگر خواص سیال پایه و زیرنویس  $nf$  بیانگر خواص نانوسیال می‌باشند.

گرانروی:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$$

چگالی:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi \rho (\rho c_p)_p \quad (8)$$

گرمای ویژه:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p$$

در پژوهش حاضر، برای هر یک از نانوذرات بررسی شده، سه مقدار مختلف برای درصد حجمی در نظر گرفته شده است؛ که شامل ۱، ۴ و ۷ می‌باشد. در جدول (۱) خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات به کار رفته آورده شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی نانوذرات و آب

عنوان نانوذره	چگالی ( $\rho$ ) ( $kg/m^3$ )	رسانایی گرمایی (K) ( $W/mK$ )	گرمای ویژه ( $C_p$ ) ( $J/kg.K$ )	لزجت ( $\mu$ ) ( $Pa.s$ )
اکسید مس	۶۳۲۰	۷۶/۵	۵۳۲	-
اکسید تیتانیوم	۴۲۵۰	۴۰	۶۸۶	-
اکسید آهن	۵۲۰۰	۶	۶۷۰	-
اکسید آلومینیوم	۳۹۷۰	۴۰	۷۶۵	-
اکسید گرافن	۱۹۱۰	۳۵	۷۰۰	-
آب خالص	۹۹۸/۲	۰/۶	۴۱۸۲	۰/۰۰۱۰۰۳

در این مقاله، برای تعریف ماده تغییر فاز دهنده از مدل ذوب و انجماد استفاده شده است. ماده تغییر فاز دهنده با چگالی  $910 \text{ kg/m}^3$ ، گرمای ویژه  $2100 \text{ J/kgK}$ ، ضریب رسانش گرمای  $0.5 \text{ W/mK}$  و گرانروی  $0.273 \text{ kg/ms}$  در نظر



گرفته شده است. همچنین، مقدار بیشینه دمایی که در آن دما، فاز جامد حاکم است برابر با  $302\text{ K}$  و مقدار کمینه دمایی که در آن، فاز مایع حاکم است برابر با  $310\text{ K}$  فرض شده است. گرمای نهان ذوب محلول خالص نیز برابر با  $178000\text{ J/kg}$  می‌باشد. برای ماده تغییر فاز دهنده، فرآیند ذوب و انجماد در نرم‌افزار فلوئنت<sup>۱</sup> انتخاب شده است. علاوه بر این، سرعت جریان ورودی به گردآورنده خورشیدی برابر با  $0.1\text{ m/s}$  و دمای مرز ورودی نیز برابر با  $293/15\text{ K}$  در نظر گرفته شده است. همچنین، مقدار شار تابشی برابر با  $1000\text{ W/m}^2$  فرض شده است.

## حل عددی

به منظور حل عددی مسأله موردنظر به روش حجم محدود لازم است که هندسه مدلسازی شده، شبکه‌بندی شود. این امر با استفاده از نرم‌افزار انسیس مشینگ<sup>۲</sup> انجام شده است. شبکه‌بندی به صورت سازمان‌یافته صورت گرفته است. آخرین مرحله از مدلسازی شامل حل عددی در نرم‌افزار فلوئنت است. در این نرم‌افزار از روش SIMPLE برای وابستگی میان فشار و سرعت استفاده شده است. برای درونیابی فشار نیز روش PRESTO به کار رفته است. همچنین، برای گسسته‌سازی و درونیابی معادلات اندازه حرکت و انرژی، از مدل‌های مرتبه دوم استفاده شده است. هنگامی که حل عددی همگرا شد، بازه گردآورنده با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_m - T_f)}{AI} \quad (9)$$

که در آن،  $T_m$  دمای میانگین سیال و  $T_f$  دمای هوای خارج،  $A$  مساحت سطح خارجی گردآورنده و  $I$  مقدار تابش خورشید است.

به منظور بررسی استقلال از شبکه در مدلسازی انجام گرفته، محاسبات به ازای مقادیر مختلف از تعداد المان انجام شده و نتایج بر حسب مقدار بیشینه دمای دیوار بیرونی گردآورنده در جدول (۲) ارائه شده است. پیداست که وقتی تعداد المان از  $969866$  فراتر می‌رود، مقدار بیشینه دمای دیوار بیرونی گردآورنده تغییر چندانی ندارد. از این رو، شبکه‌ای با  $969866$  المان به عنوان شبکه مناسب در انجام شبیه‌سازی‌های عددی این پژوهش انتخاب می‌شود. به منظور صحت‌گذاری حل عددی حاضر، نتایج این حل با نتایج پژوهش الفیان و همکاران [۱۴] مقایسه می‌شود. مشاهده می‌شود که به ازای نانوذررات مختلف، درصد خطا از  $5$  درصد فراتر نمی‌رود.

جدول ۲: مقدار بیشینه دمای دیوار بیرونی گردآورنده برای تعداد المان‌های مختلف

تعداد المان	مقدار بیشینه دمای دیوار (کلوین)	درصد اختلاف
۶۳۸۵۴۹	۳۲۹/۷۲۸	
۷۵۰۹۳۴	۳۲۲/۵۲۶	۲/۱۸
۸۸۳۴۵۲	۳۱۶/۶۸۹	۱/۸۱
۹۶۹۸۶۶	۳۱۲/۷۷۴	۱/۲۴
۱۰۸۶۲۴۹	۳۱۱/۶۳۶	۰/۳۶
۱۱۹۴۸۷۳	۳۱۱/۰۱۲	۰/۲۰

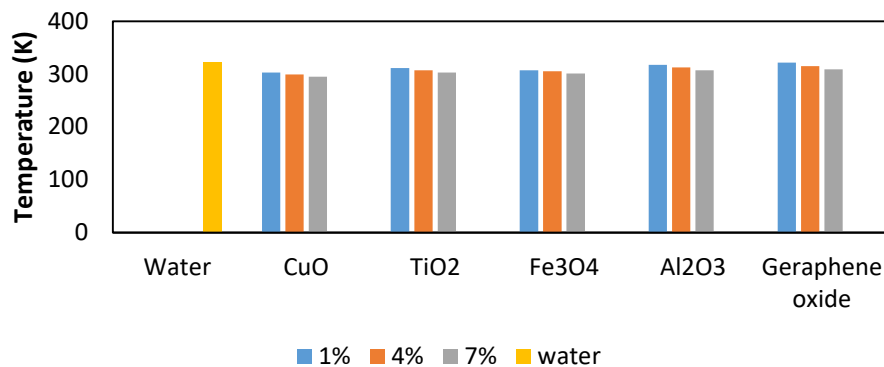
<sup>1</sup> Fluent

<sup>2</sup> Ansys Meshing



## نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ارائه می‌شوند. در شکل (۲) مقدار دمای خروجی از گردآورنده خورشیدی برای نانوسیالات مختلف و به ازای مقادیر مختلف از کسر حجمی نانوذرات آورده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای همه نانوذرات بررسی شده با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار دمای خروجی از گردآورنده کاهش می‌یابد. مشخص است که مقدار دمای خروجی از گردآورنده به ازای آب خالص نسبت به نانوسیالات بررسی شده بیشتر است. همچنین، پیدا است که بیشترین دما در هنگام استفاده از نانوذرات گرافن رخ می‌دهد.



شکل ۲: مقدار دمای خروجی از گردآورنده خورشیدی به ازای نانوسیالات مختلف

جدول (۳) بازده گردآورنده خورشیدی را برای نانوسیالات مختلف و به ازای مقادیر مختلف از کسر حجمی نانوذرات ارائه می‌کند. لازم به ذکر است که بازده گردآورنده در هنگام استفاده از آب خالص برابر با ۶۰/۱۶ به دست آمده است. پیدا است که بیشترین بازده مربوط به آب خالص بوده و کمترین بازده مربوط به نانوسیال آب-اکسید گرافن با کسر حجمی ۰/۰۷ می‌باشد. همچنین، مشخص است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، بازده گردآورنده کاهش می‌یابد.

جدول ۳: بازده گردآورنده خورشیدی در شرایط مختلف

نانوذرات/کسر حجمی	٪۱	٪۴	٪۷
اکسید مس	۴۵/۵۵	۴۴/۹۰	۴۴/۲۶
اکسید تیتانیوم	۵۴/۵۸	۴۷/۴۶	۴۱/۶۹
اکسید آهن	۴۷/۸۷	۴۷/۵۹	۴۶/۹۱
اکسید آلومینیوم	۴۳/۲۴	۴۲/۵۶	۴۱/۷۳
اکسید گرافن	۱۹/۲۹	۱۸/۸۸	۱۸/۴۸

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهره‌گیری از نانوذرات اکسید مس، اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم و اکسید گرافن در یک گردآورنده خورشیدی تحت خلا همراه با مواد تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این پژوهش شامل موارد زیر است:

- (۱) با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار دمای خروجی از گردآورنده و بازده آن کاهش می‌یابند.
- (۲) مقدار دمای خروجی از گردآورنده در هنگام استفاده از آب خالص نسبت به نانوسیالات بررسی شده بیشتر است.
- (۳) بیشترین بازده گردآورنده مربوط به آب خالص و کمترین بازده مربوط به نانوسیال آب-اکسید گرافن می‌باشد.



## مراجع

- [1] Hooshmand, A., Zahmatkesh, I., Karami, M., Delfani, S., (2021), Porous foams and nanofluids for thermal performance improvement of a direct absorption solar collector: An experimental study, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(6) p. e13684.
- [2] Chen, I., Liu, J., Fang, X., Zhang, Z., (2017), Reduced graphene oxide dispersed nanofluids with improved photo-thermal conversion performance for direct absorption solar collectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 163, pp. 125-133.
- [3] Hong, Z., Pei, J., Wang, Y., Cao, B., Mao, M., Liu, H., Jiang, H., An, Q., Liu, X., Hu, X., (2019) Characteristics of the direct absorption solar collectors based on reduced graphene oxide nanofluids in solar steam evaporation, *Energy Conversion and Management*, 199, p. 112019.
- [4] Khosrojerdi, S., Lavasani, A.M., Vakilic, M., (2017), Experimental Study of Photothermal Specifications and Stability of Graphene Oxide Nanoplatelets Nanofluid as Working Fluid for Low-Temperature Direct Absorption Solar Collectors (DASCs), *Solar Energy Materials & Solar Cells* 164, pp. 32-39.
- [5] Eidan, A.A., Al-Sahlani, B., Ahmed, A.C., Al-Fahham, D., Jalil, J.E., (2018), Improving the Performance of Heat Pipe-Evacuated Tube Solar Collector Experimentally by Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO/Acetone Nanofluids, *Solar Energy* 173, pp. 780-788.
- [6] Kaya, H., Arslan, K., (2019), Numerical Investigation of Efficiency and Economic Analysis of an Evacuated U-Tube Solar Collector with Different Nanofluids, *Heat Mass Transfer* 55, pp. 581-593.
- [7] Iranmanesh, S., Ong, H.C., Ang, B.C., Sadeghinezhad, E., Esmaeilzadeh, A., Mehrali, M., (2017), Thermal Performance Enhancement of an Evacuated Tube Solar Collector Using Graphene Nanoplatelets Nanofluid, *Journal of Cleaner Production* 162, pp. 121-129.
- [8] Ahmadi, A., Ganji, D.D., Jafarkazemi, F., (2016), Analysis of Utilizing Graphene Nanoplatelets to Enhance Thermal Performance of Flat Plate Solar Collectors, *Energy Conversion and Management* 126, pp. 1-11.
- [9] Meibodi, S.S., Kianifar, A., Niazmand, H., Mahian, O., Wongwises, S., (2015), Experimental Investigation on the Thermal Efficiency and Performance Characteristics of a Flat Plate Solar Collector Using SiO<sub>2</sub>/EG-Water Nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 65, pp. 71-75.
- [10] Yousefi, T., Veisy, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S., (2012), An Experimental Investigation on the Effect of MWCNT-H<sub>2</sub>O Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors, *Experimental Thermal and Fluid Science* 39, pp. 207-212.
- [11] Zamzamin, A., Rad, M.K., Neyestani, M.K., Jamal-Abad, M.T., (2014), An Experimental Study on the Effect of Cusynthesized/EG Nanofluid on the Efficiency of Flat-Plate Solar Collectors, *Renewable Energy* 71, pp. 658-664.
- [12] Kim, H., Kim, J., Cho, H., (2017), Experimental Study on Performance Improvement of U-Tube Solar Collector Depending on Nanoparticle Size and Concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid, *Energy* 118, pp. 1304-1312.
- [13] Lu, Y., Chen, Z., (2019), Numerical Study on Heat Transfer Performance of Vacuum Tube Solar Collector Integrated with Metal Foams, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14, pp. 344-350.
- [14] Olfian, H., Ajarostaghi, S.A., Farhadi, M., Ramiar, A., (2020), Melting and Solidification Processes of Phase Change Material in Evacuated Tube Solar Collector with U-shaped Spirally Corrugated Tube, *Applied Thermal Engineering* 182, 116149.
- [15] Pawar, V.R., Sobhansarbandi, S., (2020), CFD Modeling of a Thermal Energy Storage Based Heat Pipe Evacuated Tube Solar Collector, *Journal of Energy Storage* 30, p. 101528.