



Performance Enhancement of Photovoltaic-Thermal Panel Using Hybrid Nanofluids

Mohammad Mazidi Sharafabadi*¹, Shirin Taleb², Niko Faraji³, Seyed Mohammad Sadegh Mousavi Shad⁴

1. Associate Professor, Research Institute of Petroleum Industry(RIPI), Tehran, Iran.

2 M.Sc., Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

3. M.Sc, Urmia University, Urmia, Iran.

4. M.Sc, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, hybrid nanofluids have been used to enhance the performance of a photovoltaic-thermal (PVT) panel. Hybrid nanofluids consist of a combination of nanoparticles and a base fluid, offering superior thermal and conductive properties compared to conventional base fluids. In this research, different nanoparticles, such as titanium oxide and aluminum oxide, were dispersed in water as the base fluid at varying weight fractions of 0%, 3%, and 6%, and their effects on heat transfer and panel efficiency were investigated. The simulation results indicate that adding titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles at a weight fraction of 3% each resulted in thermal and electrical efficiencies of 32.92% and 14.68%, respectively. When the weight fraction was adjusted to 6% for aluminum oxide and 0% for titanium oxide, the thermal and electrical efficiencies were 32.95% and 14.68%, respectively, showing negligible variation compared to the base fluid without nanoparticles. Additionally, increasing the volume fraction of one of the nanoparticles did not lead to significant changes in the results, only slightly improving system efficiency. This study can assist designers and engineers in developing and optimizing photovoltaic-thermal panel systems, contributing to the efficient utilization of solar energy resources.

Keywords

Photovoltaic-Thermal Panel
Solar Energy
Titanium Oxide
Aluminum Oxide
Heat Transfer
Bulk Thermal Conductivity
Simulation

Received: 11.04.2024

Revised: 01.19.2025

Accepted: 01.20.2025

*Corresponding Author

Mohammad Aboonajmi

Email

mohammad_477@yahoo.com

1- Introduction

Solar energy is considered the largest available energy source. The limitations of fossil fuels and environmental concerns have led researchers to explore solar energy as a suitable alternative. The clean and unlimited nature of solar energy has attracted the attention of many countries for energy supply. Using solar collectors, sunlight can be absorbed and converted into the required form of energy. However, a crucial challenge in this technology is improving the efficiency and thermal performance of devices to generate more energy. Nanotechnology can help enhance efficiency to

some extent. Nanofluids are advanced liquids containing a small amount of nanoparticles (typically less than 100 nanometers) that are uniformly and stably suspended in the liquid. The dispersion of a small quantity of solid nanoparticles in conventional fluids, such as water, significantly alters their heat transfer characteristics. Nanofluids have been utilized to enhance the thermal performance of various engineering systems and have been employed as working fluids for heat transfer in solar collectors. [1] A study conducted by Kazem et al. [2] examined the efficiency of a



PVT cooling system, where nanofluids composed of water and ethylene glycol in a 75:25 volumetric ratio, along with SWCNTs at different weight fractions of 0.1%, 0.5%, 1%, and 2%, were utilized. The researchers performed multiple experiments to evaluate the thermophysical properties of a nanofluid formed by adding 0.5% SWCNTs to the PVT system. The results from thermal imaging and ζ potential tests revealed that the nanoemulsion exhibited a high thermal conductivity increase of 103% and significant stability for over 109 days. As a result of this addition, the generated power increased by 11.7%, and the electrical efficiency improved by 25.2% compared to a standalone PV system. A photovoltaic-thermal system was tested by Alghandi [3] using a trapezoidal flow channel that integrated copper, polycrystalline silicon, and a mixture of titanium oxide and silver nanoparticles in water. Various parameters, including volume fraction, Reynolds number, and aspect ratio, were analyzed. The results indicated that increasing the Reynolds number from 100 to 1000 reduced the cell temperature by 50% and enhanced efficiency. Additionally, it was suggested that a higher inlet height could improve system performance by allowing more fluid into the system. These findings promise an improvement in the efficiency of photovoltaic-thermal systems. Another significant study was conducted by Eglave et al. [4], focusing on the design and simulation of a microchannel heat sink integrated with a heat-generating device. This research involved a parametric evaluation considering heat flux, mass flow rate, inlet temperature, and nanofluid concentration. It was determined that the heat sink effectively reduced the device's temperature. When a 0.3% volume fraction and a mass flow rate of 8 kg/s were used, the maximum heat transfer rate reached 13,693 W/m²K at an inlet temperature of 35°C. In this study, the efficiency of a photovoltaic-thermal panel was quantitatively and numerically investigated using a hybrid nanofluid of titanium oxide/aluminum oxide with water as the base fluid, while analyzing the effects of various process parameters on the thermal and electrical performance of the PVT panel. The primary objective is to enhance electrical and thermal efficiency. The use of hybrid nanofluids can

facilitate this improvement. High temperatures in photovoltaic cells reduce efficiency; however, hybrid nanofluids, with superior heat transfer properties, lower cell temperatures and enhance overall performance.

2- Research Methods

2-1 Geometric Modeling

The arrangement of the modeled tubes in the software is shown in Figure 1. It illustrates the collector tubes for the case where the number of tubes is eight



Figure 1: Schematic of the 8-Tube Geometry

2-2 Nanofluid equations and properties

In this study, the properties of aluminum oxidized and titanium oxidized nanoparticles are utilized. The properties of the nanofluid, including density, specific heat, thermal conductivity, viscosity, and volume fraction of nanoparticles, are calculated using equations provided in reference.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \rho_{np}\phi \quad (1)$$

$$\frac{(C_p)_{nf}}{\rho_{nf}} = \frac{(1 - \phi)(C_p\rho)_b + (C_p\rho)_{np}\phi}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{2k_b + k_p 2(k_p - k_b)\phi}{-(k_p - k_b)\phi + 2k_b + k_p} \quad (3)$$

$$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{-2.5}\mu_b \quad (4)$$

$$L_{np\text{pcm}} = \frac{(1 - \phi)(\rho L)_{\text{pcm}}}{\rho_{np\text{pcm}}} \quad (5)$$

In the given study, the volume fraction of nanoparticles is represented by ϕ . The subscripts b,

np, and nf correspond to the base fluid, nanoparticles, and nanofluid, respectively.

2-3 Boundary conditions

This problem has been solved for the number of different pipes as well as the different temperature of the inlet fluid. In the modeled photovoltaic thermal system, we have heat transfer resulting from convection, radiation and heat transfer from the cell surface to the the deep sky. The intial fluid inlet temperature of the pannel is assumed the same as the ambient temperature. Also, the no-slip boundary condition is established for the modeling of the walls. A no-slip wall is a wall where the fluid velocity is zero compared to the wall velocity. thermal and Velocity boundary conditions are tabulated in Table 1 and Table 2, respectively.

Table 1: thermal boundary conditions

Boundary layer	Equations	Geometric location
Insulation	$-n \cdot q = 0$	pipe edges
Constant temperature	$-n \cdot q = \rho \Delta H u \cdot n$ $\Delta H = \int_{T_{in}}^T C_p dT$	pipe inlet
Convection heat flux	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = h_s(T_a - T_s)$ $-n_a \cdot q_a = \frac{(T_u - T_d)}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s$	All over except fluid inlet and outlet and glass surface
Thin layer	$R_s = \frac{d_s}{K}$ $K = \frac{d_s}{\sum \frac{d_{sj}}{k_j}}$ $= \sum d_{sj}$	Panel frame
Surface to ambient radiation	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4)$	PVT top surface to the sky
Radiative heat transfer	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g G$	PVT top surface

Table 2: velocity boundary conditions

Boundary layer	Equations	Geometric location
wall	$u = 0$	All pipe walls
Constant flow rate	$Q = - \int_{d\Omega_{in}} u \cdot n \, ds = 0.5 \left(\frac{l}{min} \right)$	pipe inlet
Average pressure	$p = 0$	pipe outlet

3- Discussion and Results

3-1 Basic 8-tube geometry

3-1-1 Two-dimensional temperature contour on the surface of the glass panel

This section presents the two-dimensional temperature contour. Based on the temperature contour presented for the photovoltaic thermal cell in Figure 2, it is noticeable that the surface temperature of the cell at the water inlet is cooler compared to the surface temperature at the water outlet. Subsequently, as the cell collects sun radiation through its absorbent surface, the temperature of the cell surface gradually increases. Eventually, the heat received through radiation is transferred to the tubes beneath the cell surface, leading to an increase in the temperature of the fluid flowing between the tubes. Consequently, due to this heat transfer, the temperature of the cell surface gradually decreases in comparison to the temperature of the heated fluid. It is important to note that the ambient temperature is considered to be 20°C.

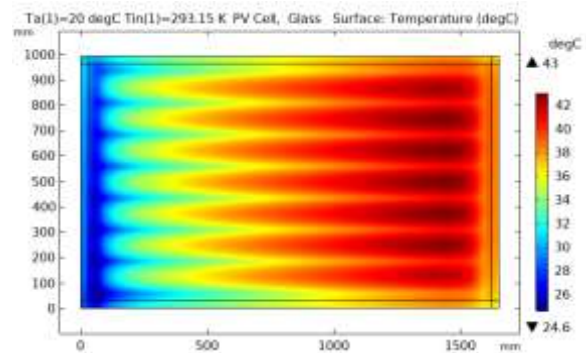


Figure 2: two-dimensional temperature contour on the glass surface of the 8-tube panel at the inlet water temperature of 20°C

3-1-2 Two-dimensional temperature contour in the middle of the tubes

In the Figure 3, it is evident that the side parts of the panel surface where the operating fluid enters have a lower temperature compared to other parts. This can be attributed to the fact that the inlet water temperature is kept as low as possible. Subsequently, as the cell surface receives radiation from the sun, the temperature of the cell surface gradually increases. This heat is then transferred to the tubes beneath the surface of the panel, causing the fluid flowing through the collector tubes to heat

up. This process continues in a cyclical manner. As observed, the temperature of the inlet water starts at 20°C. After receiving heat and circulating through the pipes, its temperature increases to above 40°C. This increase in temperature is due to the absorption of heat from the panel surface.

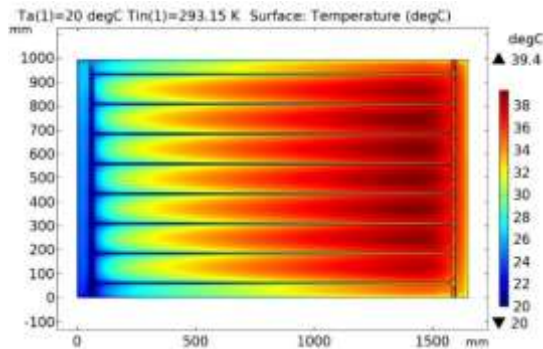


Figure 3: two-dimensional temperature contour in the middle of the tubes (8-tube panel) at the inlet water temperature of 20°C.

3-1-3 Two-dimensional velocity contour in the middle of the tubes

In the Figure 4, it is evident that the velocity in the side parts of the panel surface, where the working fluid enters, is lower compared to other parts. As the fluid circulates and its temperature increases, the velocity gradually increases. As observed, the velocity is lower in the main inlet part on the left side. The velocity is higher in the middle pipes due to the smaller diameter of the pipe. During heating, it is possible that the velocity slightly increases through the heating path in the middle tube due to the growing of the velocity boundary layer.

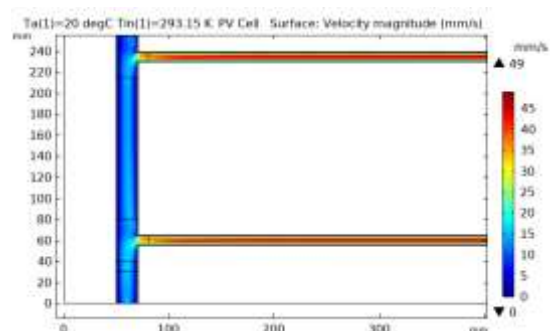
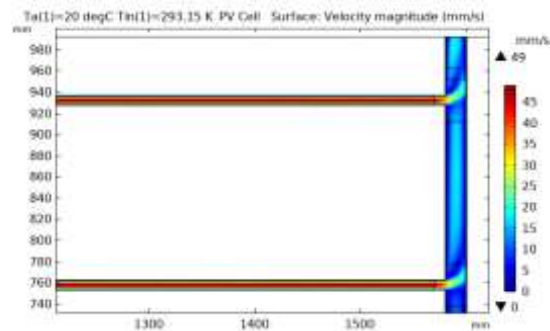
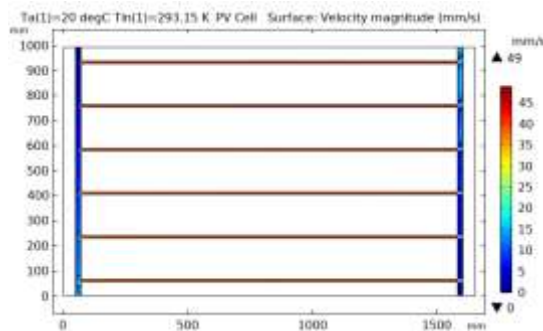


Figure 4: Two-dimensional velocity contour in the middle of the tubes (8-tube panel) at the inlet water temperature of 20°C.

4- Conclusion

In this study, the thermal performance of a photovoltaic-thermal (PVT) panel was investigated using a combination of titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles with different weight percentages of 0%, 3%, and 6% in water as the base fluid. The results indicate that the addition of the hybrid nanofluid achieves the highest efficiency compared to the single nanofluid and even with an increase in the volumetric percentage of the selected nanofluid. Numerical results show that at ambient temperatures of 20°C and 30°C, the thermal and electrical efficiencies are (32.641 and 32.437) and (14.674 and 14.119), respectively. As the ambient temperature increases, leading to a higher absorber surface temperature, the system's thermal efficiency decreases. This trend also affects the inlet pressure of the fluid, as at ambient temperatures of 20°C and 30°C, the inlet pressure values are (26.83 and 22.33), respectively. Furthermore, analyzing the effect of nanoparticle volume fraction in the system under ideal conditions reveals that at an ambient temperature of 20°C, with a 3% weight fraction of titanium oxide and aluminum oxide nanoparticles, the thermal and electrical efficiencies reach (32.926 and 14.688), and the inlet fluid pressure is 29.809.

5- References

- [1] M. J. Muhammad *et al.*, "Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 6–15, 2016. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005)
- [2] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli, and K. Sopian, "Investigation of a nanofluid-based photovoltaic thermal system using single-wall carbon nanotubes: An experimental study," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 10285–10303, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.6522](https://doi.org/10.1002/er.6522)
- [3] M. Alghamdi, A. A. Memon, T. Muhammad, and M. R. Ali, "A numerical investigation of a photovoltaic thermal system contained a trapezoidal channel with transport of silver and titanium oxide using the water as base fluids," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, p. 103056, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.csite.2023.103056](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103056)
- [4] K. R. Aglawe, R. K. Yadav, and S. B. Thool, "Fabrication, experimentation and numerical simulation of micro channel heat sink for enhancing thermal performance of electronic devices," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1–16, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1007/s12008-023-01130-4](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01130-4)



بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی با به کارگیری نانو سیال های ترکیبی

محمد مزیدی شرف آبادی^{۱*}، شیرین طالب^۲، نیکو فرجی^۳، سیدمحمدصادق موسوی شاد^۴

۱- دانشیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله، برای بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی، از نانو سیال های ترکیبی استفاده شده است. نانو سیال های ترکیبی شامل ترکیبی از نانو ذرات و سیال عامل است که خواص حرارتی و هدایت حرارتی بهتری نسبت به سیال پایه دارند. در این تحقیق، نانو ذرات مختلفی نظیر اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم با درصد های وزنی مختلف ۰٪ و ۳٪ و ۶٪ درون آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است و تأثیر آن ها بر انتقال حرارت و بهره وری پنل بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزودن نانو ذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۳٪ و ۳٪ برای هر نانوذره بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب ۳۲/۹۲ و ۱۴/۶۸ با درصد وزنی ۶٪ برای اکسید آلومینیوم و ۰٪ برای اکسید تیتانیوم بازده حرارتی و الکتریکی ۳۲/۹۵ و ۱۴/۶۸ به دست آمده و تغییر آن چنانی نسبت به حالت بدون نانو سیال نداشته است و لذا با افزایش درصد حجمی یکی از نانو ذرات نیز نتایج تغییر به خصوصی نکرده است و فقط مقدار بسیار اندکی بازده سیستم افزایش یافته است. این تحقیق می تواند به طراحان و مهندسان در توسعه و بهبود سیستم های پنل فتوولتائیک حرارتی کمک کند و در استفاده بهینه از منابع انرژی خورشیدی مؤثر باشد.

کلمات کلیدی

پنل فتوولتائیک حرارتی
انرژی خورشیدی
اکسید تیتانیوم
اکسید آلومینیوم
انتقال حرارت
هدایت حرارتی توده ای
شبیه سازی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

*نویسنده مسئول

محمد مزیدی شرف آبادی

ایمیل

mohammad_477@yahoo.com

۱- مقدمه

سیال ها، به مایع های پیشرفته ای اطلاق می شود که دارای مقداری کمی از نانوذره ها (در اکثر موارد کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است که به طور یکنواخت و پایدار در مایع معلق هستند. پراکندگی مقدار کمی از نانوذره های جامد در مایع های معمولی مانند آب میزان انتقال گرما آن ها را به طرز چشمگیری تغییر می دهد. از نانو سیال ها برای افزایش عملکرد گرمایی بسیاری از سامانه های مهندسی استفاده شده است، از نانو سیال ها به عنوان سیال عامل برای انتقال گرما در جمع کننده های خورشیدی استفاده شده است [۱]. ماهیان و همکاران [۲]، با استفاده از نانو سیال حاوی دی اکسید تیتانیوم در آب و ناخالصی های شیشه ای، میزان جذب انرژی خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی

انرژی خورشیدی بزرگ ترین منبع انرژی موجود در دسترس به شمار می رود. محدود بودن سوخت های فسیلی و ملاحظه های زیست محیطی باعث شده که پژوهشگران برای استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان یک جایگزین مناسب تلاش کنند، چراکه پاک و نامحدود بودن انرژی خورشیدی از جمله عامل هایی هستند که توجه بیشتر کشورها را برای تأمین انرژی به خود جلب نموده است. با استفاده از جمع کننده های خورشیدی، انرژی خورشید را می توان جذب کرد و به انرژی مورد نیاز خود تبدیل کرد، اما مسئله مهم در این فناوری، بالا بردن کارایی و عملکرد گرمایی دستگاه ها برای تولید انرژی بیشتر است. با استفاده از فناوری نانو می توان بازده مورد نظر را تا حدودی افزایش داد. نانو



که این افزایش جذب با افزایش ناچیز هزینه (تنها ۰/۰۴ دلار بر لیتر) همراه است.

در همین راستا، زمزمیان و همکاران [۸] در یک مطالعه تجربی، اثر استفاده از مخلوط اتیلن گلیکول و نانو ذرات مس به عنوان سیال عامل را بر روی بازده جمع کننده‌های خورشیدی صفحه تخت مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت وزنی نانو ذرات مس، بازده جمع کننده خورشیدی افزایش می‌یابد. این مطالعات نشان می‌دهند که نانو سیال‌ها می‌توانند به عنوان راهکاری کارآمد برای بهبود جذب انرژی خورشیدی و در نتیجه افزایش بازده سیستم‌های انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند.

آلخاندرو دل آمو و همکاران [۹] سیستم PV/T نوع هوا را با و بدون پره طراحی کرد و تأثیر دستورالعمل‌های محیطی، ابعادی و عملیاتی را بر عملکرد سیستم تحلیل کرد. نتایج حاکی از افزایش بازده حرارتی و کاهش بازده الکتریکی با کمک پوشش‌های شیشه‌ای بود. پارامترهایی مانند شدت تابش خورشیدی، نرخ جریان جرمی هوا و عمق کانال نقش مهمی در نوع هوای PV/T دارند.

سانی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۱، با انجام تحقیقی نظری، به بررسی پتانسیل استفاده از محلول‌های کربن دار مانند نانولوله‌های کربنی در جمع کننده‌های خورشیدی پرداختند. آن‌ها با استفاده از نانولوله‌های کربنی در اتیلن گلیکول به عنوان سیال عامل، نشان دادند که نانو سیال‌های کربن دار می‌توانند به عنوان ناقل حرارت مناسبی برای انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایی، به ویژه جمع کننده‌های خورشیدی، عمل کنند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که خواص فیزیکی و ساختار نانولوله‌های کربنی با افزایش قدرت انتقال حرارت مرتبط هستند. در نتیجه، این نوع سیالات می‌توانند در مقایسه با سیالات پایه در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در جمع کننده‌ها، نتایج بهتری از نظر بازده، اقتصاد و زیست‌محیطی ارائه دهند.

گوپتا و همکاران [۱۱] بازده گرمایی جمع کننده خورشیدی را با استفاده از نانو سیال آب-اکسید آلومینیم به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها با استفاده از نانوذره اکسید آلومینیم با قطر ۲۰ نانومتر و تهیه نانو سیال با چهار کسر حجمی ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۵، عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی را مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتیجه‌های به دست آمده نشان‌دهنده افزایش در بازده گرمایی جمع کننده به ترتیب ۱/۶، ۲۲/۲۴، ۳۹/۶ و ۱۱۸/۷۵٪ نسبت به حالتی که تنها از سیال پایه استفاده می‌شود، شد.

پژوهش، یافتن بهترین ترکیب برای افزایش حداکثری جذب انرژی خورشیدی بود. ابتدا، آن‌ها اثر غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم را در نانو سیال بررسی کردند. با تغییر درصد وزنی نانو ذرات در آب (۰/۱)، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴٪، مشاهده شد که جذب انرژی خورشیدی در غلظت ۰/۲٪ وزنی به بالاترین حد خود می‌رسد. در مرحله بعد، برای افزایش بیشتر جذب انرژی، ناخالصی‌های شیشه‌ای با درصد وزنی‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ به نانو سیال حاوی ۰/۲٪ وزنی دی‌اکسید تیتانیوم اضافه شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن ۰/۳٪ ناخالصی شیشه به نانو سیال، منجر به بالاترین میزان جذب انرژی خورشیدی می‌شود.

وانگ و همکاران [۳] به محاسبه هدایت حرارتی مؤثر نانو ذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم سوسپانسیون شده درون سیالات پایه‌ای چون آب، اتیلن گلیکول، روغن پمپ خلأ و روغن موتور پرداختند. نتایج آزمایش‌های این گروه نشان داد که حضور نانو ذرات در سیال پایه موجب افزایش هدایت حرارتی می‌شود، البته با افزایش قطر نانو ذرات هدایت حرارتی کاهش می‌یابد؛ زیرا سطح تماس سیال و نانوذره کمتر شده و تعداد برخوردهای کمتر می‌شود.

ژانگ و دنگ و همکاران [۴] مکان‌های فعال فلزی منفرد متصل به اتم‌های N را در صفحه پایه گرافن ترکیب کرد و مجموعه‌ای از کامپوزیت‌های GN₄/MN براساس فلزات مختلف (M=Fe, Co, Ni و Cu) ساخت که در آن GN₄/CoN به عنوان یک CE در DSSC ها به دلیل انرژی جذب مناسب و تعادل خوب بین جذب و دفع، ۸/۴۰٪ PCE را به همراه داشت، در حالی که GN₄/FeN تنها یک ۶/۶۰٪ PCE را نسبت به Pt (۷/۹۸٪) ارائه کرد.

الامین سلیمانی و همکاران [۵] برای مطالعه عملکرد حرارتی و الکتریکی سیستم PV/T نوع هوا، چهار پیکربندی مختلف مانند ماژول تک فتوولتائیک، یک-هوا-PV/T معمولی، یک PV/T تک گذر لعاب‌دار و یک PV/T دو گذر نیمه شفاف را بررسی و مقایسه کرد. میانگین روزانه بالاترین بازده کلی ۷۴٪ توسط PV/T دو گذر به دست آمد.

اوشکسرای و همکاران [۶] چهار جمع کننده خورشیدی PV/T دووجهی طراحی کرد و مطالعات تجربی را در شرایط حالت پایدار انجام داد. نتایج نشان داد که جریان موازی مسیر دوم ۶۷-۵۱ درصد بالاترین بازده انرژی کل را نشان داد.

به عنوان مثال، الجوردی و همکاران [۷] با استفاده از مدل‌سازی عددی، نشان دادند که نانو سیال گرافیت با جزء حجمی ۰/۰۰۵٪، بیش از ۵۰٪ تابش ورودی را جذب می‌کند. نکته قابل توجه این است

لیو و همکاران [۱۲] با استفاده از حل عددی و روش تجربی به بررسی تأثیر استفاده از نانو سیال گرافن بر پایه سیال یونی بر عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی جذب مستقیم در دمای کاری بالا پرداختند. نتیجه‌های آن‌ها حاکی از آن بود که نانو سیال با کسر وزنی ۰/۰۰۵ از گرافن و ارتفاع ۵ سانتیمتر از جمع کننده و تحت تابش، $W/m^2 220000$ بازده گرمایی جمع کننده خورشیدی را تا ۷۰٪ افزایش می‌دهد.

علی یارداش و همکاران [۱۳] عملکرد گرمایی جمع کننده خورشیدی با لوله‌های خلأ (ETSC) را در حضور نانو سیال‌های گوناگون مورد بررسی قرار داده و با استفاده از دینامیک سیالات محاسبه‌ای تأثیر هندسه و مشخصه‌های فنی جمع کننده در عملکرد گرمایی و هیدروپنایمیکی دستگاه بهینه‌سازی نموده است. در این مطالعه از آب و نانو سیال‌های مبتنی بر سیال عامل آب به‌عنوان سیال انتقال گرما در جمع کننده خورشیدی با ۲۴ لوله گرمایی با شیب ۳۰ درجه استفاده شد. در این مطالعه از ترکیب‌های نانولوله‌های چند جداره کربنی SiO_2 ، TiO_2 ، MWCNT و مس به‌عنوان نانوذرها با نسبت‌های گوناگون حجمی در سیال عامل آب استفاده شد.

بلکاسمی و همکاران [۱۹] به‌طور عددی اثرات نانو سیالات را بر عملکرد کلکتور خورشیدی تخت بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که میانگین بهبودهای ۴۴/۴٪، ۲۷/۴٪ و ۴/۲۱٪ در بازده حرارتی را می‌توان به ترتیب با استفاده از نانو سیالات مس/آب، اکسید مس/آب و آلومینا/آب به دست آورد.

فیلیپووی سی و همکاران [۲۰] هر دو مطالعه تجربی و عددی را برای ارزیابی بازده حرارتی کلکتور خورشیدی پلیمری انجام دادند. آن‌ها دریافتند که راندمان حرارتی کلکتور پلیمری ۴۴/۷۷٪ است که در مقایسه با کلکتورهای صفحه تخت ۳۰٪ کمتر است. این راندمان کم با استفاده از صفحه جذب بزرگ قابل جبران است.

در یک مطالعه عددی، هاواش و همکاران [۲۱] از نانو سیال برای بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حداکثر بهبود در راندمان ۳۲/۲٪ برای اختلاف دمای پایین در کسر حجمی ۰/۱ درصد است. علاوه بر این، راندمان کلکتور با افزایش کسر حجمی جامد نانو ذرات آلومینا تا رسیدن به ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر در کسر حجمی جامد منجر به کاهش بازده حرارتی می‌شود.

سولمون و همکاران [۲۲] بازده حرارتی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت را به‌طور تجربی با استفاده از نانو ذرات تک جزئی Al_2O_3

و CuO و نانو ذرات ترکیبی Al_2O_3-CuO در آب بررسی کردند. درصد جرمی مورداستفاده در تجزیه و تحلیل به ترتیب ۰/۰۴۸٪، ۰/۰۹۶٪، ۰/۱۴۴٪، ۰/۱۹۲٪ و ۰/۲۴٪ بود. آزمایش‌ها با نرخ جریان ۰/۰۰۸ کیلوگرم بر ثانیه برای نانو ذرات تک جزئی و ترکیبی انجام شد. متیب الغامدی و همکاران [۲۳]، یک بررسی عددی از همرفت اجباری در یک سیستم فتوولتائیک حرارتی (PV/T) را ارائه می‌دهد که هدف آن کاهش دمای ناشی از تابش خورشیدی است، عاملی که می‌تواند تولید انرژی الکتریکی را کاهش دهد. این مطالعه از دو نوع نانوذره، دی‌اکسید تیتانیوم و نقره، در ترکیب با آب به‌عنوان سیال پایه استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ می‌تواند دمای سلول را تا ۵۰٪ کاهش و راندمان سلول را تا ۴/۴٪ افزایش دهد. به‌طور مشابه، تغییر نسبت ابعاد از ۰/۴ به ۱ می‌تواند درصد دمای سلول را به دلیل دمای ورودی تا ۲۶/۲٪ کاهش و راندمان سلول را تا ۱/۶٪ افزایش دهد.

سانگیتا و همکاران [۲۴] آزمایشی برای بررسی تأثیر نانو مایعات با مقادیر متفاوت نانو ذرات ($MWCNT$ ، CuO ، Al_2O_3) در آب بر عملکرد سیستم‌های PVT انجام دادند. غلظت‌های انتخابی آن‌ها شامل ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد حجمی بود. نتایج نشان داد که استفاده از نانو امولسیون‌های تولیدشده باعث بهبود عملکرد سیستم PVT شد، زیرا کارایی سیستم‌ها در مقایسه با زمانی که فقط با آب خنک می‌شدند، افزایش یافت. داده‌ها نشان دادند که MWCNT ها خنک‌کنندگی مؤثرتری برای سیستم‌های PV/T نسبت به ذرات Al_2O_3 و CuO ارائه دادند.

یک مطالعه انجام‌شده توسط کاظم و همکاران [۲۵] کارایی یک سیستم خنک‌کننده PVT را بررسی کرد که در آن نانو مایعاتی متشکل از آب و گلیکول اتیلن به نسبت حجمی ۷۵ و ۲۵٪ به همراه SWCNT ها با نسبت‌های وزنی مختلف ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۲٪ ترکیب شده بودند. دانشمندان چندین آزمایش انجام دادند تا خواص ترموفیزیکی یک نانو مایع ایجادشده از افزودن ۰/۵٪ SWCNT ها به سیستم PVT را ارزیابی کنند. نتایج تصاویر دوربین و آزمایش‌های پتانسیل نشان داد که نانو امولسیون دارای هدایت حرارتی بالای ۱۰۳٪ و پایداری قابل توجهی بیش از ۱۰۹ روز بود. به‌عنوان نتیجه این افزودن، توان تولیدشده به میزان ۱۱/۷٪ افزایش یافت و کارایی الکتریکی ۲۵/۲٪ نسبت به یک سیستم PV مجزا بهبود یافت.

یک سیستم فتوولتائیک حرارتی توسط الغامدی [۲۳] با استفاده از یک کانال جریان دوزنقه‌ای آزمایش شد که مس و سیلیکون چند

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی پنل مورد مطالعه

در این مطالعه از یک سیستم پنل فتوولتائیک حرارتی، جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. در جدول ۱، جدول ۲، جدول ۳ و جدول ۴ مشخصات هندسی، گرمایی و الکتریکی، مشخصات ترموفیزیکی لایه‌ها و همچنین ضخامت و ضرایب انتشار و جذب پنل مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات گرمایی و مکانیکی [۱۴]

مقدار	کمیت	مشخصات
۹۰/۳	دمای رکود (°C)	حرارتی
۱۲	فشار آزمایشی (Bar)	
۴	شار کاری (Bar)	
۸۰	حداکثر دمای عملیاتی (°C)	
۸ x ۰/۵	ضخامت و قطر لوله داخلی (mm)	مکانیکی
۲۲ x ۰/۸	ضخامت و قطر لوله جمع کننده (mm)	
۱/۴۸	سطح جذب (m ²)	مکانیکی
۱/۶۳	سطح کل (m ²)	
۲۲	وزن (kg)	
۴۰ x ۹۹۲ x ۱۶۴۰	ابعاد (mm)	

جدول ۲: مشخصات الکتریکی [۱۴]

مقدار	کمیت	مشخصات
۲۵۰	حداکثر توان (W)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۸/۸۱	جریان اتصال کوتاه (A)	
۳۷/۶۸	ولتاژ مدارباز (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۸/۳۳	نرخ جریان (A)	
۳۰/۰۳	نرخ ولتاژ (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۱۵/۰۷	بازده مازول (%)	
۱۸۱/۹	حداکثر توان (W)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۶/۹۲	جریان اتصال کوتاه (A)	
۳۵/۱	ولتاژ مدارباز (V)	پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد
۰/۴۴	نرخ جریان (A)	
۲۸/۲	نرخ ولتاژ (V)	

بلور و مخلوطی از نانو مواد اکسید تیتانیوم و نقره در آب را ادغام کرده بود. در این مطالعه، پارامترهای مختلفی از جمله کسر حجمی، عدد رینولدز و نسبت ابعاد بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ دمای سلول را ۵۰٪ کاهش داده و کارایی را افزایش می‌دهد. همچنین پیشنهاد شد که ارتفاع ورودی بیشتر می‌تواند عملکرد سیستم را با اجازه دادن به مایع بیشتر به داخل سیستم بهبود بخشد. این نتایج نوید بهبود کارایی سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی را می‌دهند.

تحقیق قابل توجه دیگری توسط اگلوه و همکاران [۲۶] انجام شده است که بر طراحی و شبیه‌سازی یک دستگاه سینک حرارتی میکرو کانال ادغام شده با یک دستگاه تولید حرارت تمرکز داشت. این مطالعه شامل ارزیابی پارامتریک با در نظر گرفتن شار حرارتی، جریان جرمی، دمای ورودی و غلظت نانو مایعات بود. مشخص شد که سینک حرارتی به‌طور کارآمد دمای دستگاه را کاهش می‌دهد. هنگامی که از کسر حجمی ۰/۳٪ و نرخ جریان ۸ کیلوگرم بر ثانیه استفاده شد، حداکثر نرخ انتقال حرارت به $13.693W/m^2K$ در دمای ورودی ۳۵ درجه سانتی‌گراد رسید.

در تحقیقی که توسط یوسفی و همکاران [۲۸] انجام شد، سیستمی با مقاومت خارجی ارزیابی شد که شامل ماده تغییر فاز با فوم‌های مسی بود. این پیکربندی (مورد ۳) انتشار حرارتی سریع‌تری نشان داد که مقاومت حرارتی کلی را کاهش داده و شار حرارتی از طریق ماده تغییر فاز را بهبود می‌بخشد. مورد ۳ به‌طور مؤثری دمای طرف گرم و سرد را به ترتیب تا ۸٪ و ۷٪ کاهش داد، بدون اینکه ولتاژ خروجی تحت تأثیر قرار گیرد. این راه‌حل برای سیستم‌های خودمختار کاربردی است و بدون نیاز به خنک‌کننده و با ایمنی بهبودیافته در مواجهه با منابع حرارتی پویا امکان‌پذیر است.

در این مطالعه، کارایی یک پنل فتوولتائیک حرارتی، با استفاده از نانو سیال ترکیبی اکسید تیتانیوم/اکسید آلومینیوم بر پایه آب به‌عنوان سیال پایه و تأثیر سایر پارامترهای فرآیندی بر عملکرد حرارتی و الکتریکی پنل فتوولتائیک حرارتی به‌صورت کمی و عددی بررسی شده است.

هدف اصلی افزایش راندمان الکتریکی و حرارتی است. استفاده از نانو سیال‌های ترکیبی می‌تواند به این امر کمک کند. دمای بالای سلول‌های فتوولتائیک راندمان را کاهش می‌دهد، اما نانو سیال‌های ترکیبی، با خواص انتقال حرارت بهتر، دمای سلول‌ها را کاهش داده و راندمان را بهبود می‌بخشند.

جدول ۳: مشخصات ترموفیزیکی لایه‌های مختلف [۱۴]

لایه	گرمای ویژه (J/Kg.K)	چگالی (Kg/M3)	رسانایی گرمایی (W/m.K)
شیشه	۵۰۰	۳۰۰۰	۱/۸
اتیلن وینیل استات	۲۰۹۰	۹۵۰	۰/۳۱۲
سلول پنل	۷۰۰	۲۳۳۰	۱۴۹
تدلار	۱۲۵۰	۱۲۰۰	۰/۲
صفحه آلومینیوم	۸۸۷	۲۷۰۰	۲۰۶
لوله مسی	۳۸۱	۸۹۷۸	۳۸۷/۷
آب‌خنک کن	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	۰/۶

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho 1 + \kappa] + F \quad (2)$$

در اینجا u میدان سرعت و F نیروی حجمی سیستم است که به معادله تکانه فوق افزوده شده است. پارامتر κ تانسور تنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I \quad (3)$$

که در رابطه فوق μ ویسکوزیته دینامیکی سیستم است.

۳-۳- معادله انرژی

این معادله اضافی، همان معادله انرژی یا قانون اول ترمودینامیک (قانون پایستگی انرژی) است. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل و فرض دوبعدی بودن جریان به فرم کلی معادله انرژی به شکل زیر خواهیم رسید:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (4)$$

C_p ظرفیت گرمایی جامد در فشار ثابت ($J/kg \cdot k$) ضریب هدایت حرارتی جامد بر حسب ($w/m \cdot k$) است، u میدان سرعتی است که توسط گره مش متحرک تعریف می‌شود.

زمانی که بخش‌هایی از مدل در قاب ماده در حالی که حرکت هستند. همچنین Q نیز شار منبع حرارتی بر حسب وات بر مترمربع می‌باشد.

۳-۴- بازده حرارتی

بازدهی حرارتی یک سیستم جمع‌کننده خورشیدی عبارت است از نسبت انرژی حرارتی مفید به تابش خورشیدی به سطح جمع‌کننده که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{GA} = \frac{\int \rho c_p n \cdot u T (d\Omega_{out} - d\Omega_{in})}{GA} \quad (5)$$

در این رابطه A مساحت سطح جاذب جمع‌کننده و G تشعشع خورشیدی است. انرژی حرارتی مفید، حاصل تفاضل انرژی ورودی و خروجی سیال می‌باشد.

۳-۵- بازده الکترونیکی

عملکرد الکتریکی پنل‌های فتوولتائیک موجود در سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی توسط بازده الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۴: ضریب جذب و انتشار و ضخامت لایه‌های مختلف [۱۵]

لایه	قابلیت انتقال	قابلیت جذب	قابلیت انتشار	ضخامت
شیشه	۰/۹۱	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۳/۲
اتیلن وینیل استات	۰/۹۳	۰/۰۰۵	-	۰/۵
قسمت فتوولتائیک	۰/۰۹	۰/۸	-	۰/۳
سطح رو به پایین	۰/۹۱	۰/۰۰۵	-	۰/۵
آینه	۰/۹۵	۰/۹۵	-	-
باکس	-	-	۰/۳۱	۰/۷
لوله مسی	-	-	-	۲

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادله پیوستگی

قانون پایستگی (بقا) جرم که جزو قوانین پایه‌ای و بنیادی مکانیک سیالات است به دودسته پایستگی جرم و پیوستگی جرم تقسیم‌بندی می‌شود. قابل ذکر است که پایستگی مربوط به سیستم‌های بسته و پیوستگی مربوط به سیستم‌های باز می‌باشد.

معادله پیوستگی سیستم مورد نظر به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۶].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = \sigma \quad (1)$$

که در رابطه فوق چگالی جامد ($\rho (kg/m^3)$) و t زمان است.

۳-۲- معادله بقای مومنتوم

نکته مورد توجه این‌که حالت جریان ضعیف تراکم‌پذیری انتخاب می‌شود چون چگالی ما به دما وابسته است و با دما تغییر می‌کند، معادله‌های آن در ذیل مشخص شده است [۱۷].

اضافه کردن مقدار دمای حجمی سیال در خروجی نیز ضروری است، یعنی $T_{bulk} = \int \vec{u} \cdot \vec{n} T d\Omega / \int \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$ که مبین دمای تجربی در خروجی است. ($\vec{u} \cdot \vec{n}$ بردار سرعت در بردار نرمال سیال خروجی است) در نتیجه اختلاف دمای سیال برابر است با:

$$DT = T_{bulk} - T_{in} \quad (۱۲)$$

همچنین در رابطه (۱۲) مقادیر $P_0 = 250$ ، $I_0 = 1000$ و $T_0 = 298.15$ می‌باشند. که دمای ورودی سیال است.

۳-۶- بازده کلی

بازده کلی مجموع بازده الکتریکی فتوولتائیک و بازده حرارتی جمع کننده می‌باشد. بازده کلی از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود و درصدی از انرژی تبدیل شده از تابش خورشیدی را تعیین می‌کند. رابطه بازده کلی به صورت زیر است:

$$\eta_t = \eta_e + \eta_{th} \quad (۱۳)$$

۳-۷- معادلات و خواص نانو سیال

در این مطالعه از خواص مربوط به نانو ذرات آلومینیوم و تیتانیوم اکسید شده استفاده شده است. خواص نانو سیال مانند چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و کسر حجمی نانو ذرات از معادلات زیر محاسبه می‌شوند [۲].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_b + \rho_{np}\phi \quad (۱۴)$$

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(C_p\rho)_b + (C_p\rho)_{np}\phi}{\rho_{nf}} \quad (۱۵)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_b} = \frac{2k_b + k_p 2(k_p - k_b)\phi}{-(k_p - k_b)\phi + 2k_b + k_p} \quad (۱۶)$$

$$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{-2.5}\mu_b \quad (۱۷)$$

$$L_{npcm} = \frac{(1 - \phi)(\rho L)_{pcm}}{\rho_{npcm}} \quad (۱۸)$$

افزایش بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی ارتباط مستقیم با افزایش میزان تشعشع جذب شده توسط پنل‌های فتوولتائیک و میزان انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری دارد.

بازده الکتریکی سیستم‌های پنل فتوولتائیک نسبت بیشینه توان خروجی محاسبه شده به تابش خورشیدی دریافتی روی سطح فعال سلول‌های خورشیدی است.

$$\eta_e = \frac{VI}{GA} \quad (۶)$$

به طوری که در این رابطه I شدت تابش خورشیدی و A مساحت سطح پنل است. با تغییرات دمای پنل توان خروجی پنل تغییر می‌کند و با افزایش دمای پنل خورشیدی بازده الکتریکی آن کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات بازده سلول خورشیدی با تغییر دمای سلول را می‌توان با رابطه زیر معین کرد.

$$\eta_e = \eta_c [1 - \beta(T_{pv,avg} - 298.15)] \quad (۷)$$

که در آن ضریب دمایی بازده سلول خورشیدی است که به صورت تجربی محاسبه می‌شود و مقدار آن 0.045 گزارش شده است. در کاتالوگ پنل فتوولتائیک حرارتی مقدار $P_{mpp} = -0.37\%K$ می‌باشد؛ در واقع انرژی الکتریکی استفاده شده توسط پنل را به صورت منبع حرارتی از قسمت انتقال حرارت کسر شده است.

$$\eta_e = p_0 - \frac{Q_0}{I_0} [1 - 0.37\%(T_{pv,avg} - 298.15)]/V_{cell} \quad (۸)$$

$$q_e = \eta_e \tau_g \alpha_{pv} G(t) \quad (۹)$$

دمای سطح پنل برابر است با انتگرال دما بر روی حجم کل پنل که در آن منظور از حجم کل سلول حاصل ضرب مساحت مؤثر در ارتفاع سلول فتوولتائیک است.

$$T_{cell} = \int \frac{T}{V_{cell}} dV \quad (۱۰)$$

$$V_{cell} = A_{eff} \times h_{pv} \quad (۱۱)$$

$$k_{Static} = k_f \left[\frac{(k_{np} + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_{np})}{(k_{np} + k_f) + \phi(k_f - k_{np})} \right] \quad (22)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f C_{p,f} \sqrt{\frac{kT}{\rho_{np} D_{np}}} g(\phi, T) \quad (23)$$

که در آن، $k = 1.3807 \times 10^{-23} J/K$ و β کسری از حجم مایعی است که با یک ذره حرکت می‌کند و مربوط به هدایت حرارتی توده‌ای است، مقدار IBI IS IBI را اگر IBI باشد عدد یک و اگر نباشد عدد صفر می‌گذاریم. در اینجا مدل اصلی l لوله حالت نانو ذرات نمی‌باشد بنابراین مقدار ISB را صفر می‌گذاریم. همچنین مقدار g از رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$g = (-6.04\phi + 0.4705)T + 1722.3\phi - 134.63 \quad (24)$$

۳-۱۰- شرایط مرزی

این مسئله برای تعداد لوله‌های مختلف و همچنین دمای متفاوت سیال ورودی حل شده است. در سیستم مدل‌سازی شده، انتقال حرارت حاصل از همرفت، تابش و انتقال حرارت از سطح سلول به آسمان عمیق وجود دارد. دمای ورودی سیال اولیه پنل با دمای محیط یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین شرایط مرزی بدون لغزش برای مدل‌سازی دیوارها برقرار است. دیوار بدون لغزش دیواری است که در آن سرعت سیال در مقایسه با سرعت دیوار صفر است. شرایط مرزی سرعت و حرارتی به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶: شرایط مرزی سرعت

موقعیت هندسی	معادلات	لایه مرزی
تمام لوله‌های دیواره	$u = 0$	دیواره
ورودی لوله	$Q = - \int_{d\Omega_{in}} u \cdot n \, ds = 0.5 \left(\frac{l}{\min} \right)$	نرخ جریان ثابت
خروجی لوله	$p = 0$	فشار میانگین

که در آن، ϕ کسر حجمی نانو ذرات می‌باشد. همچنین زیروندهای f ، np ، nf به ترتیب به سیال پایه، نانو ذرات و نانو سیال اشاره دارند. در جدول ۵ مشخصات مربوط به نانو ذرات مشخص شده است.

جدول ۵: مشخصات ترموفیزیکی نانو ذرات [۱۸]

نانو ذرات	اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	اکسید تیتانیوم (TiO_2)
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	۳۹۵۰	۴۱۰۰
گرمای ویژه ($\frac{J}{kg.K}$)	۷۶۵	۶۹۲
هدایت حرارتی ($\frac{W}{m.C}$)	۳۸/۱۲-۵	۸/۴
خلوص	۹۹/۹	۹۹/۹۹
قطر (nm)	۵۵	۲۸
رنگ	سفید	سفید
PH	۶	۵/۶-۵/۵

۳-۸- نرخ جریان حجمی

نرخ جریان کلی به همراه نانو سیال محاسبه شده است و با حالت بدون نانو سیال تفاوتی ندارد، تنها تفاوت آن این است که مقدار V_f در حالت نانو سیال صفر گذاشته می‌شود.

رابطه مربوط به نرخ جریان سیال و نانو ذرات به شرح ذیل می‌باشد:

$$Q_f = (1 - V_f) \times Q_{nf} \quad (19)$$

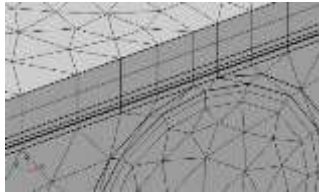
$$Q_p = V_f \times Q_{nf} \quad (20)$$

توجه شود که واحد نرخ جریان حجمی، مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. در اینجا زیروندهای f و np و p به ترتیب مربوط به سیال آب، نانو سیال و نانو ذرات می‌باشد. همچنین مقدار نرخ جریان نانو سیال (Q_{nf})، برای حالتی که فرایند ترموسیفون در نظر گرفته شود برابر 0.5 لیتر بر دقیقه می‌باشد.

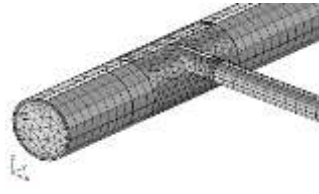
۳-۹- بررسی اثر هدایت حرارتی توده‌ای نانو سیال Brownian

در نانو سیال پارامتر هدایت حرارتی توده‌ای وجود دارد که احتمالاً ضریب انتقال حرارت رسانشی کاتوره‌ای است و به قطر نانو ذرات وابسته می‌باشد.

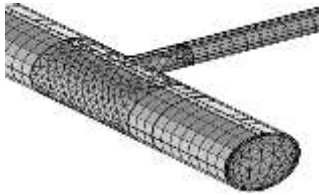
$$k_{nf} = k_{Static} + k_{Brownian} \quad (21)$$



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲: مش‌بندی هندسه مورد بررسی

جدول ۷: شرایط مرزی حرارتی

موقعیت هندسی	معادلات	لایه‌مرزی
لبه‌های لوله	$-n \cdot q = 0$	عایق‌بندی
ورودی لوله	$-n \cdot q = \rho \Delta H u \cdot n$ $\Delta H = \int_{T_{in}}^T C_p dT$	دما ثابت
همه سطوح جز ورودی و خروجی سیال و سطح شیشه	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = h_s(T_a - T_s)$	جریان حرارتی همرفتی
قاب پانل	$-n_a \cdot q_a = \frac{(T_u - T_d)}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s$ $R_s = \frac{d_s}{K}$ $K = \frac{d_s}{\sum \frac{d_{sj}}{k_j}}$	لایه‌نازک
سطح بالای پنل فتوولتائیک به آسمان	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4)$	تابش سطح به محیط
سطح بالایی پنل فتوولتائیک	$-n \cdot q = q_0$ $q_0 = \epsilon_g G$	انتقال حرارت تشعشی

۴- مدل‌سازی هندسی

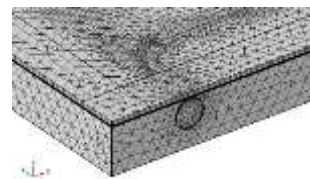
آرایش لوله‌های مدل‌سازی شده درون نرم‌افزار در شکل ۱ آورده شده است. لوله‌های جمع‌کننده برای حالتی که تعداد لوله‌ها ۸ عدد است را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک هندسه ۸ لوله‌ای

۴-۱- شبکه‌بندی

در این بخش تصاویر مربوط به شبکه‌بندی یک پنل فتوولتائیک حرارتی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است مش‌بندی در قسمت‌های انتهایی لوله و محل اتصال لوله‌ها ریزتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد.



(الف)

۵- نتایج و بحث

۵-۱- استقلال از شبکه

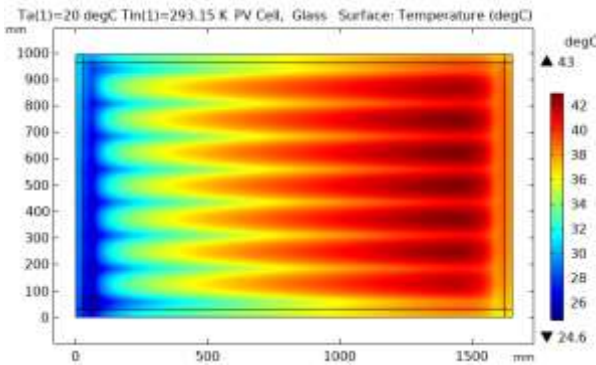
در این بخش به بررسی قابلیت استقلال از شبکه پرداخته می‌شود. استقلال نتایج حل از شبکه نیز ویژگی جدایی‌ناپذیر هر روش عددی است. در این بخش، شبکه‌بندی‌های مناسب و بهینه برای حالت‌های مختلف انتخاب می‌گردد. استقلال از شبکه سهم مهمی در صحت نتایج و همچنین صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های محاسباتی ایفا می‌کند. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود، ابتدا دو میلیون و چهارصد هزار المان، سپس سه میلیون و ششصد هزار المان و در نهایت پنج میلیون و پانصد هزار المان حل شده است. هر سه المان مشخص شده مربوطه به بازده الکتریکی بازده حرارتی و بازده کلی می‌باشند. مشاهده می‌شود درصد تغییرات هر یک از المان‌ها برای تمامی بازده‌ها به یکدیگر نزدیک می‌باشد؛ برای مثال در بازده کلی برای هر سه المان مقدار بازده ۵۳/۱۲٪، ۵۳/۱۲٪ و ۵۳/۰۲٪ است که عملاً اختلاف‌ها ناچیز می‌باشد و در نتیجه استقلال از مش نیز برقرار شده است. در اینجا بامش سه میلیون و ششصد پیش رفتیم و مش منتخب مسئله ما است.

جدول ۸: درصد تغییرات بازده حرارتی برای تعداد المان‌های مختلف

عناصر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
۲۴۳۱۳۵۰	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۳/۱۵۶
۳۶۵۵۵۵۶	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱
۵۵۱۲۸۳۴	۱۵/۱۰۹	۳۷/۹۱۱	۵۳/۰۲۱

۵-۲- صحنه‌گذاری

تابش دریافت شده طی یک فرایند انتقال حرارت به لوله‌های موجود در زیر سطح سلول منتقل شده و باعث افزایش دمای سیال جاری در بین لوله‌ها می‌شود؛ بنابراین در نتیجه‌ی این انتقال حرارت دمای سطح سلول نسبت به دمای سیال گرم شده به تدریج کمتر می‌شود. باید توجه شود که دمای محیط اطراف ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳: کانتور دمای سطح شیشه با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۶-۲- کانتور دمای دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده

۴-۲-۱- کانتور دمای دوبعدی در میانه لوله‌ها و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح در شکل ۴ مشاهده می‌شود که دمای قسمت‌های کناری سطح پنل همان‌جایی که سیال عامل وارد می‌شود سردتر از قسمت‌های دیگر است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین است. سپس دمای سطح سلول با دریافت تابش خورشید در طول مراحل به تدریج افزایش می‌یابد و این حرارت را به لوله‌های موجود در زیر سطح پنل منتقل کرده و باعث جریان یافتن سیال در لوله‌های جمع‌کننده و در نتیجه بالا رفتن دمای سیال ورودی طی این گردش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای آب ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که پس از دریافت حرارت و گردش بین لوله‌ها مقدار دمای آن به بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نسبت به سطح پنل در شکل ۳ به دلیل جذب حرارت از سطح روی پنل زودتر گرم‌تر می‌شود.

در حالت نومی‌نال توان ۸۰۰ وات را که از کاتالوگ فتوولتائیک حرارتی استخراج شده، در نظر گرفته می‌شود. دمای ورودی آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه می‌باشد. مطابق با جدول ۹ مقدار توان الکتریکی در واقع همان بازده الکتریکی در کاتالوگ مربوطه ۱۵/۰۷٪ می‌باشد اما مقدار بازده الکتریکی به دست آمده از طریق نرم‌افزار ۱۵/۱٪ است؛ بنابراین به دلیل اختلاف ناچیز بین دو مقدار اصلی کاتالوگ و مقدار به دست آمده از نرم‌افزار می‌توان گفت که اعتبارسنجی آن قابل قبول است. همچنین برای بازده نیز این صحت اعتبارسنجی برقرار شده است، چراکه مقدار بازده اصلی در کاتالوگ ۵۶٪ است که این مقدار در نرم‌افزار ۵۳/۱٪ به دست آمده و اختلاف در این بازدهی کلی ناچیز و قابل قبول است.

جدول ۹: مقایسه درصد تغییرات بازدهی به دست آمده در کاتالوگ و نرم‌افزار [۱۸]

مقادیر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
کاتالوگ	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۶
نرم‌افزار	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱

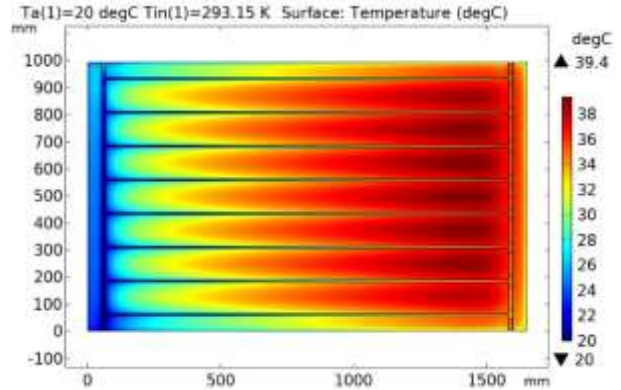
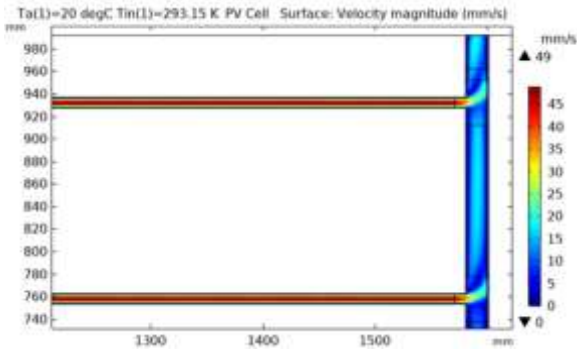
۶- بررسی اثر هندسه راه‌گاه‌های آب

مدل اصلی ۸ لوله هست که تفاوت آن با مدل نومی‌نال این است که شار ورودی در مدل اصلی ۱۰۰۰ وات می‌باشد. این‌ها همگی طوری انتخاب شده‌اند که وزن مس به کاررفته در لوله‌های مسی یکسان باشد. برای قسمت بررسی پارامتریک دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ورودی آب، Ta، Ta+10 و بار دیگر Ta+20 در نظر گرفته می‌شود.

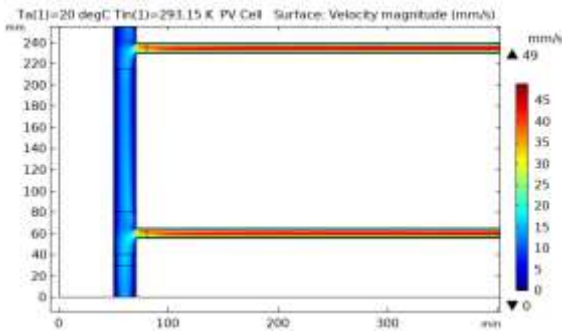
۶-۱- کانتور دمای دوبعدی در سطح شیشه پنل

۴-۱-۱- بررسی اثر تغییر دمای ورودی آب بر کانتور دمای دوبعدی در سطح شیشه

این بخش کانتور دما ثابت در حالت دوبعدی را نشان می‌دهد. مشخص است که سیال به‌واسطه مکانیزم انتقال حرارت هدایتی یا رسانش در طول محفظه به دلیل اختلاف گرادیان دما تبادل حرارت می‌کند. برای سلول فتوولتائیک حرارتی شکل ۳ به‌وضوح مشاهده می‌شود که دمای سطح سلول در ورودی آب سردتر از دمای سطح در خروجی آب است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین و خنک است. سپس دمای سطح سلول در طول مراحل به تدریج با دریافت تابش نور خورشید از طریق سطح جاذب خود افزایش می‌یابد. در نهایت



شکل ۴: کانتور دما در میانه لوله‌ها با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)



شکل ۵: کانتور سرعت در میانه لوله‌ها با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۳-۶- کانتور سرعت دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده

۱-۳-۴- کانتور سرعت دوبعدی در میانه لوله‌ها در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

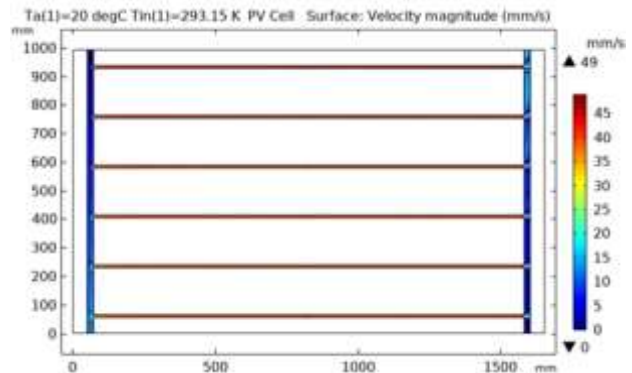
برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح مشاهده می‌شود که سرعت در قسمت‌های کناری سطح پنل همان جایی که سیال عامل وارد می‌شود کمتر از قسمت‌های دیگر است. سپس سرعت سیال جاری بین لوله‌ها با در طول گردش با گرم شدن دمای آن به تدریج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود سرعت در قسمت ورودی یا لوله‌ی اصلی ورودی در سمت چپ، کمتر است و دلیل آن این است که قطر لوله در آن قسمت بیشتر است. در لوله‌های میانی سرعت بیشتر به دلیل کوچک‌تر بودن قطر لوله، سرعت بیشتر است. در نهایت در حین گرمایش به دلیل کاهش لایه‌مرزی سرعت حتی ممکن است در حین مسیر گرمایش در لوله‌ی میانی، سرعت اندکی کاهش یابد که البته این مورد الزامی نیست و به موارد دیگر نیز وابسته است.

۶-۴- جمع‌بندی بررسی اثر دمای محیط و دمای ورودی آب بر نتایج عددی

در این بخش جدول ۱۰ برحسب شرایط دمایی متفاوت تنظیم شده است. در این نتایج عددی مقدار بازدهی حرارتی سیستم و همچنین دما و فشار ورودی سیال نیز مشاهده می‌گردد. از بررسی نتایج جداول ذیل مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع‌کننده، مقدار بازده سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه هرچه دمای محیط گرم‌تر باشد، مقدار فشار ورودی نیز کمتر می‌شود.

جدول ۱۰: نتایج عددی به‌دست‌آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل اصلی ۸ لوله‌ای

اختلاف		دمای محیط	دمای ورودی آب	بازده حرارتی الکتریکی کل	بازده بازده سطح	دمای بازده	فشار جرم	دمای محیط
درجی	درجی	(kg)	درجی	درجی	درجی	درجی	درجی	درجی
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰



۵-۶- بررسی اثر دمای محیط و دمای ورودی آب بر نتایج

عددی حاصل از افزودن نانو سیال

در این بخش جدول ۱۱ برحسب شرایط دمایی متفاوت با افزودن نانو سیال تنظیم شده است. از بررسی نتایج عددی زیر مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع کننده، مقدار بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه هرچه دمای محیط

گرم‌تر باشد، مقدار فشار ورودی نیز کمتر می‌شود. همچنین بررسی تأثیر مقدار درصد حجمی نانو ذرات در تحلیل نتایج سیستم موردنظر حائز اهمیت است.

از بررسی جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که افزودن نانو ذرات تغییر آن‌چنانی نسبت به حالت بدون نانو سیال نداشته است و لذا با افزایش درصد حجمی یکی از نانو ذرات نیز نتایج تغییر به‌خصوص نکرده است و فقط مقدار بسیار اندکی بازده سیستم افزایش یافته است.

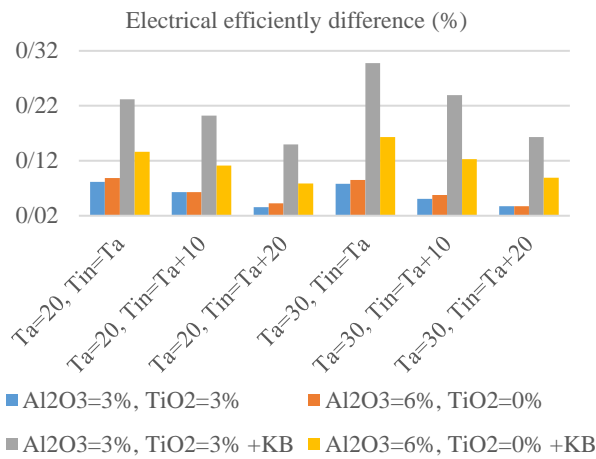
جدول ۱۱: نتایج عددی به‌دست‌آمده پنل فتوولتائیک حرارتی با افزودن نانو سیال

فشار ورودی سیال	اختلاف دمای بالک ورودی و خروجی	دمای سلول	بازده کل	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	درصد حجمی نانو ذره		دمای ورودی آب	دمای محیط
						TiO ₂	AL ₂ O ₃		
۲۶/۸۳	۱۵/۳۶۸	۳۵/۵۶۸	۴۷/۳۱۸	۳۲/۶۴۱	۱۴/۶۷۶	۰	۰		
۳۱/۳۱۶	۱۵/۷۹۵	۳۵/۳۵۷	۴۷/۶۱۵	۳۲/۹۲۶	۱۴/۶۸۸	۳	۳	۲۰	
۳۱/۳۱۳	۱۵/۷۸۹	۳۵/۳۴۲	۴۷/۶۴۷	۳۲/۹۵۸	۱۴/۶۸۹	۰	۶		
۲۳/۳۷۷	۱۱/۱۹	۴۱/۳۷۹	۳۸/۰۴۳	۲۳/۶۹۵	۱۴/۳۴۸	۰	۰		
۲۷/۲۸۶	۱۱/۴۹۹	۴۱/۲۲۷	۳۸/۲۶	۲۳/۹۰۳	۱۴/۳۵۷	۳	۳	۳۰	۲۰
۲۷/۲۸۱	۱۱/۴۹۵	۴۱/۲۱۶	۳۸/۲۸۵	۲۳/۹۲۸	۱۴/۳۵۷	۰	۶		
۲۰/۷۲۶	۶/۹۳۹۴	۴۷/۱۴۸	۲۸/۶۶۳	۱۴/۶۴۱	۱۴/۰۲۲	۰	۰		
۲۴/۱۹۵	۷/۱۳۰۳	۴۷/۰۵۴	۲۸/۸۰۱	۱۴/۷۷۳	۱۴/۰۲۷	۳	۳	۴۰	
۲۴/۱۸۸	۷/۱۲۸۷	۴۷/۰۴۷	۲۸/۸۱۸	۱۴/۷۹	۱۴/۰۲۸	۰	۶		
۲۲/۳۳	۱۵/۳۱۸	۴۵/۴۳	۴۶/۵۵۶	۳۲/۴۳۷	۱۴/۱۱۹	۰	۰		
۲۶/۰۶	۱۵/۷۴۲	۴۵/۲۳	۴۶/۸۴۵	۳۲/۷۱۵	۱۴/۱۳	۳	۳	۳۰	
۲۶/۰۵۵	۱۵/۷۳۵	۴۵/۲۱۵	۴۶/۸۷۷	۳۲/۷۴۶	۱۴/۱۳۱	۰	۶		
۱۹/۹۰۴	۱۱/۰۲۵	۵۱/۱۵۵	۳۷/۰۶۱	۲۳/۲۶۵	۱۳/۷۹۶	۰	۰		
۲۳/۲۳۲	۱۱/۳۳۴	۵۱/۰۱۷	۳۷/۲۸۴	۲۳/۴۸۱	۱۳/۸۰۳	۳	۳	۴۰	۳۰
۲۳/۲۲۵	۱۱/۳۳	۵۱/۰۰۶	۳۷/۳۰۹	۲۳/۵۰۵	۱۳/۸۰۴	۰	۶		
۱۷/۹۷	۶/۶۷۰۷	۵۶/۸۴۶	۲۷/۴۹۵	۱۴/۰۲۱	۱۳/۴۷۴	۰	۰		
۲۰/۹۸۱	۶/۸۵۳۳	۵۶/۷۵۹	۲۷/۶۲۷	۱۴/۱۴۸	۱۳/۴۷۹	۳	۳	۵۰	
۲۰/۹۷۳	۶/۸۴۵۸	۵۶/۷۴۹	۲۷/۶۳۲	۱۴/۱۵۲	۱۳/۴۷۹	۰	۶		

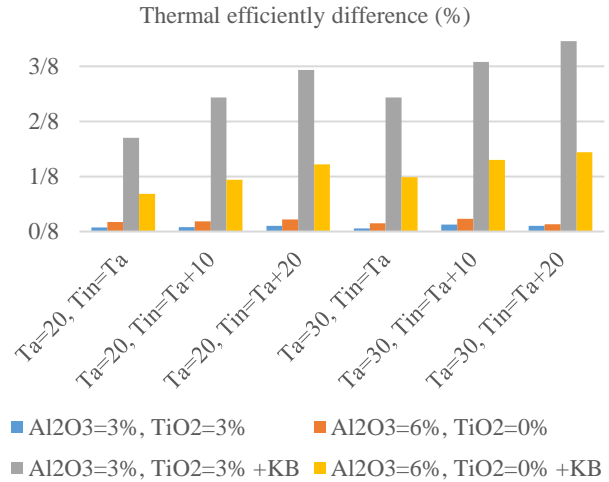
۶-۶- بررسی اثر هدایت حرارتی توده‌ای (Brownian)

اثر رسوب‌گذاری تنها برای حالتی که نانو ذرات به درون سیال افزوده می‌شود بررسی می‌گردد. پارامتر مرتبط با این پدیده هدایت حرارتی توده‌ای می‌باشد که در معادلات مشخص شده در بخش ۳ ظاهر می‌گردد. در شکل ۶ و شکل ۷ تغییرات بازده حرارتی رسم شده است و مشاهده می‌شود هنگامی که هدایت حرارتی توده‌ای در نظر گرفته شود، بازده بالاتر و در نتیجه مدل دقیق‌تری است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که درحالی که مقدار درصد حجمی نانو سیال یکسان در نظر گرفته شود که به اصطلاح به آن ترکیبی گفته می‌شود، نسبت به

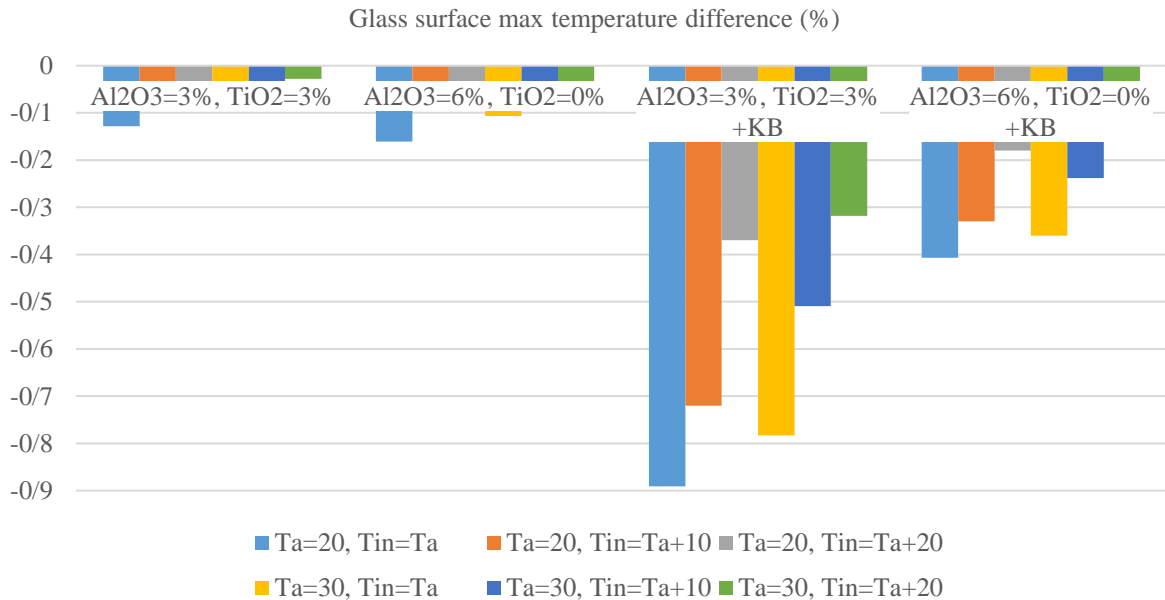
حالتی که درصد حجمی یکی از نانو سیال نادیده فرض شود و حالت ترکیبی نباشد مقدار بازده بالاتری را مشاهده کرده. از این نکته می‌توان نتیجه گرفت که نانو سیال ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به حالت تک نانو ذرات را دارد.



شکل ۷: تغییرات بازده حرارتی نسبت به مدل اصلی ۸ لوله



شکل ۶: تغییرات بازده حرارتی نسبت به مدل اصلی ۸ لوله



شکل ۸: تغییرات دمای سطح پوشش شیشه‌ای پنل نسبت به مدل اصلی ۸ لوله

۶-۷- تغییرات دمای سطح پوشش شیشه‌ای

در شکل ۸ حداکثر دمای سطح پوشش شیشه‌ای جمع کننده را نسبت به تغییرات دمای محیط و سیال ورودی و همچنین مقدار درصد حجمی نانو سیال‌های مختلف مقایسه شده است. از بررسی نمودارهای حاصل مشاهده می‌شود که استفاده از نانو سیال ۰/۹٪ از حداکثر دمای شیشه را کاهش می‌دهد

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد حرارتی یک پنل فتوولتائیک حرارتی با استفاده از ترکیب نانو ذرات اکسید تیتانیوم با اکسید آلومینیوم

درصد‌های وزنی مختلف ۰٪ و ۳٪ و ۶٪ در سیال پایه آب به‌عنوان سیال عامل قرار گرفته است. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که افزودن نانو سیال در حالت ترکیبی نسبت به حالت تک نانو سیال و حتی با افزایش درصد حجمی نانو سیال موردنظر نیز به بالاترین بازده می‌رسد. از بررسی نتایج عددی مشاهده می‌شود که در دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب (۳۲/۴۳۷ و ۱۴/۶۷۴ و ۱۴/۱۱۹) است، با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن گرم‌تر شدن سطح جاذب جمع کننده، مقدار بازده حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می‌گذارد چراکه در دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد،

photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells," *Renew. Energy*, vol. 102, pp. 279–293, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.renene.2016.10.038](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.038)

[7] S. Ladjevardi *et al.*, "Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption," *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 327–334, 2013. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solener.2013.05.021](https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.021)

[8] A. Zamzamian *et al.*, "An experimental study on the effect of Cu-synthesized/EG nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 658–664, 2014. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.renene.2014.06.003](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.003)

[9] A. del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, and J. Antoñanzas, "An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring," *Appl. Energy*, vol. 186, pp. 140–151, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.apenergy.2016.03.060](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.060)

[10] E. Sani *et al.*, "Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 11, pp. 2994–3000, 2011. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solmat.2011.06.025](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.06.025)

[11] H. K. Gupta, G. D. Agrawal, and J. Mathur, "An experimental investigation of a low temperature Al₂O₃-H₂O nanofluid based direct absorption solar collector," *Sol. Energy*, vol. 118, pp. 390–396, 2015. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solener.2015.05.040](https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.040)

[12] J. Liu *et al.*, "A combined numerical and experimental study on graphene/ionic liquid nanofluid based direct absorption solar collector," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 136, pp. 177–186, 2015. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.solmat.2014.12.027](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.12.027)

مقدار فشار ورودی به ترتیب (۲۶/۸۳ و ۲۲/۳۳) می‌شود. همچنین بررسی تأثیر مقدار درصد حجمی نانو ذرات در تحلیل نتایج سیستم موردنظر در شرایط ایده‌آل نشان می‌دهد که در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد با درصد وزنی ۳٪ برای نانو ذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب (۳۲/۹۲۶ و ۱۴/۶۸۸) فشار ورودی سیال ۲۹/۸۰۹ است.

۸- منابع

[1] M. J. Muhammad *et al.*, "Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 6–15, 2016. [Online]. Available: doi :

[10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.04.005)

[2] O. Mahian *et al.*, "A review of the applications of nanofluids in solar energy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 57, no. 2, pp. 582–594, 2013. [Online]. Available: doi :

[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037)

[3] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 13, no. 4, pp. 474–480, 1999. [Online]. Available: doi : [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)

[4] X. Cui *et al.*, "A graphene composite material with single cobalt active sites: A highly efficient counter electrode for dye-sensitized solar cells," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 55, no. 23, pp. 6708–6712, 2016. [Online]. Available: doi : [10.1002/anie.201601464](https://doi.org/10.1002/anie.201601464)

[5] M. E. A. Slimani *et al.*, "A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 133, pp. 458–476, 2017. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.enconman.2016.10.062](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.062)

[6] P. Ooshaksaraei, K. Sopian, S. H. Zaidi, and R. Zulkifli, "Performance of four air-based

- evaluation of thermal performances of a polymer solar collector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 127–139, 2019. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.rser.2019.05.054](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.054)
- [21] A. A. Hawwash, A. K. Abdel Rahman, S. A. Nada, and S. Ookawara, "Numerical Investigation and Experimental Verification of Performance Enhancement of Flat Plate Solar Collector Using Nanofluids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 363–374, 2018. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.applthermaleng.2017.11.118](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.118)
- [22] S. Mesfin, V. V. Rao, and L. S. Sundar, "Analysis of thermal efficiency of solar flat plate collector working with hybrid nanofluids: An experimental study," *Materials Research Proceedings*, vol. 43, 2024.
- [23] M. Alghamdi, A. A. Memon, T. Muhammad, and M. R. Ali, "A numerical investigation of a photovoltaic thermal system contained a trapezoidal channel with transport of silver and titanium oxide using the water as base fluids," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 47, p. 103056, 2023. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.csite.2023.103056](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103056)
- [24] M. Sangeetha, S. Manigandan, M. T. Chaichan, and V. Kumar, "Progress of MWCNT, Al₂O₃, and CuO with water in enhancing the photovoltaic thermal system," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, pp. 821–832, 2020. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.4936](https://doi.org/10.1002/er.4936)
- [25] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli, and K. Sopian, "Investigation of a nanofluid-based photovoltaic thermal system using single-wall carbon nanotubes: An experimental study," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 10285–10303, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1002/er.6522](https://doi.org/10.1002/er.6522)
- [26] K. R. Aglawe, R. K. Yadav, and S. B. Thool, "Fabrication, experimentation and numerical simulation of micro channel heat sink for enhancing
- [13] A. Yurddaş, "Optimization and thermal performance of evacuated tube solar collector with various nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 152, p. 119496, 2020. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119496](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119496)
- [14] E. Jahanshahi, A. Hosseinkhani, and S. M. H. Moahmmadi, "Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 239–248, 2017. (in Persian)
- [15] Y. Zhang *et al.*, "Application of solar energy in water treatment processes: A review," *Desalination*, vol. 428, pp. 116–145, 2018. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.desal.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.021)
- [16] Z. Shojaeian and S. M. Kashefipour, "Numerical modeling of hydraulic jump in stilling basin of Nemrood reservoir dam," *Water and Soil Science*, vol. 23, no. 2, pp. 283–295, 2013. (in Persian)
- [17] A. Alipoor and P. Abbaspour, "Thermal Performance Analysis of a Swiss-roll Micro Combustion Chamber for Micro Thermophotovoltaic Applications," *Fuel and Combustion*, vol. 17, no. 1, pp. 51–71, 2024. (in Persian)
- [18] K. Sampathkumar and P. Senthilkumar, "Utilization of solar water heater in a single basin solar still—an experimental study," *Desalination*, vol. 297, pp. 8–19, 2012. [Online]. Available: doi :[10.1016/j.desal.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.04.002)
- [19] Y. Belkassmi, K. Gueraoui, L. El Maimouni, N. Hassanain, and O. Tata, "Numerical investigation and optimization of a flat plate solar collector operating with Cu/CuO/Al₂O₃-water nanofluids," *Transactions of Tianjin University*, vol. 27, pp. 64–76, 2021. [Online]. Available: doi :[10.1007/s12209-021-00251-5](https://doi.org/10.1007/s12209-021-00251-5)
- [20] P. Filipovic, D. Dovic, B. Ranilovic, and I. Horvat, "Numerical and experimental approach for

[27] E. Yousefi, A. A. Nejad, and N. A. Sayyar, "A new approach for simultaneous thermal management of hot and cold sides of thermoelectric modules," *Applied Thermal Engineering*, vol. 233, p. 121156, 2023. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.applthermaleng.2023.121156](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121156)

thermal performance of electronic devices," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, pp. 1–16, 2023. [Online]. Available: doi :[10.1007/s12008-023-01130-4](https://doi.org/10.1007/s12008-023-01130-4)