

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(7) (2021) 1049-1052 DOI: 10.22060/mej.2020.18326.6800

Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system

F. Yazdanifard¹, M. Ameri^{1,*}, R. Taylor²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran ²School of Mechanical and Construction Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia

ABSTRACT: The photovoltaic/thermal system is capable of generating both heat and electricity simultaneously. The purpose of using spectral filters is to make full use of the solar radiation spectrum and thermal separation of photovoltaic and thermal units. The purpose of this paper was to investigate a new hybrid spectral filter consisting of phase change material and nanofluid to achieve a filter close to the ideal spectral filter. In this regard, the photovoltaic/thermal system with a combined nanofluid-phase change material spectral filter was simulated using energy balance equations in MATLAB software and its performance was compared with two conventional and nanofluid-based spectral splitting photovoltaic/ thermal systems from energy and exergy viewpoints. Also, the optical properties of nanofluid and phase change material were simulated and the models were validated with the experimental data available in the literature. The results showed that by using a combined filter the photovoltaic temperature can be reduced by up to 50% and the output fluid temperature can be increased by twice. The exergy efficiency of the system with the combined filter was about 14% and 22% higher than conventional and nanofluidbased spectral splitting photovoltaic/thermal systems, respectively. The system also achieved the highest exergy efficiency at concentration ratios greater than 15.

Review History:

Received: Apr. 27, 2020 Revised: Jun. 01, 2020 Accepted: Aug. 18, 2020 Available Online: Aug. 24, 2020

Keywords:

Phase change material Nanofluid Photovoltaic/thermal system Energy Exergy

1. INTRODUCTION

Photovoltaic/thermal systems are a combination of solar collectors and photovoltaic technology which convert solar energy into both electricity and heat. One way to improve the performance of photovoltaic/thermal systems is to use spectral splitters. Spectral splitters divide the solar radiation spectrum into different bands and direct each spectral band to its appropriate receiver. Therefore, they thermally decouple the PV and thermal components, to enable them to operate separately at significantly different temperatures. Liquid absorption filters are a type of spectral splitters that can be used as both the spectral filter and heat transfer fluid [1]. The feasibility of using nanofluids as liquid absorptive filters is demonstrated in previous works [2].

Besides, there are studies in the literature that evidenced the capability of phase change materials to serve as spectral absorption filters. Manz et al. [3] measured the transmittance of Calcium Chloride Hexahydrate as a part of an external building wall. They found that their investigated phase change material transmits a significant portion of radiation in the visible and near-infrared spectrum at liquid state. Goia et al. [4] studied the optical properties of a paraffin-filled double glazed window. They showed that paraffin has a nearly constant transmittance in the visible band and selective behavior in the near-infrared spectrum. However, the use of phase change materials as spectral filters in photovoltaic/

thermal systems has not been investigated so far.

In the present study, a numerical model is proposed for a concentrated spectral splitting photovoltaic/thermal system with a novel optical filter composed of phase change material and nanofluid. The performance of the system is investigated from energy and exergy viewpoints. In the proposed spectral filter, the nanofluid is used to absorb UV and visible radiation and the phase change material is used to absorb some part of the infrared spectrum.

2. METHODOLOGY

In the present work, three different configurations of concentrated photovoltaic/thermal system including conventional (A), nanofluid based spectral splitting (B) and nanofluid/phase change material based spectral splitting (C) photovoltaic/thermal systems, which are shown in Fig. 1, are modeled through conducting the energy equation for components of the system and one-dimensional heat diffusion equation for phase change material. The explicit scheme of finite difference method is used to solve differential equations of system components and the simulation is done using MATLAB software.

In configuration (B), Ag/water nanofluid is used as a spectral filter, while a combination of Ag/water nanofluid and Calcium Chloride Hexahydrate (CaCl,.6H,O or S27) phase change material is used as a spectral splitting unit in configuration (C). A concentration of 0.05 wt. % and

*Corresponding author's email: ameri mm@uk.ac.ir





Fig. 1. Concentrated photovoltaic/thermal system configurations

nanoparticles diameter of 10 nm is considered for nanofluid. For simulating configurations (B) and (C), it is necessary to determine the optical properties of nanofluid and phase change material. Rayleigh scattering method has been used to calculate the transmittance of nanofluid. This method can be used when the particles are very small. Also, the absorptance and transmittance of the phase change material in solid and liquid states can be evaluated by using the refractive and extinction indices of the phase change material at different wavelengths.

3. VALIDATION

The mathematical model was validated by comparing PV temperature, electrical efficiency and thermal efficiency of nanofluid based spectral splitting photovoltaic/thermal system with experimental data of Cui and Zhu [5]. Cui and Zhu [5] used a MgO/water nanofluid with 10 nm nanoparticle diameter, 0.02 wt. % concentration, 6 lit/h flow rate and 1

 Table 1. Comparison between numerical results of present study and the experimental results of Cui and Zhu [5].

Parameter	Present study	Cui and Zhu [5]	Difference (%)
PV temperature (°C)	27	27.3	1.1%
Temperature increase of nanofluid (%)	7.2	7.5	4
Electrical efficiency (%)	14.5	14.7	1.4
Thermal efficiency (%)	46.5	47.2	1.5



Fig. 2. The transmittance of nanofluid/phase change material spectral splitting unit.

cm thickness as a spectral filter. During their experiment, the radiation, ambient temperature and wind velocity were 870 W/m², 15.5 °C and 0.5 m/s, respectively. Table 1 represents the comparison results which shows the accuracy of the present simulation.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 displays the transmittance of the nanofluid/phase change material spectral splitting unit. When the phase change material is liquid, the filter transmittance in the spectral window of photovoltaic cells is greater than 0.8 and outside this range, the transmittance is much lower. However, when the phase change material becomes solid, the transmittance decreases in the whole radiation spectrum.

Fig. 3 shows the effect of the concentration ratio on photovoltaic temperature, nanofluid outlet temperature, total energy efficiency and total exergy efficiency. By increasing the concentration ratio, the temperatures rise due to the increase in received radiation. The photovoltaic temperature of configuration (A) and nanofluid outlet temperature of configuration (C) are higher because the radiation directly hits the photovoltaic cells in configuration (A) while in conFiguration (C) it first passes through the spectral filter. According to Fig. 4, configuration (C) can achieve up to 50% lower photovoltaic temperature and nanofluid outlet temperature can be increased by twice compared



Fig. 3. Variation of (a) photovoltaic temperature, (b) optical fluid temperature, (c) total energy efficiency and (d) total exergy efficiency for A, B and C configurations.

to the conFiguration (A). The total energy efficiency of a configuration (A) is higher than configurations (B) and (C). While the exergy efficiency of configuration (C) is greater than conFigurations (A) and (B). As a result, it can be concluded that the photovoltaic/thermal system with a nanofluid/phase change material filter is a good option from an exergy viewpoint for concentration ratios greater than 15. At a concentration ratio of 30, photovoltaic temperatures of configuration (C) are reduced by about 47% compared to a conventional photovoltaic/thermal system with a nanofluid filter. The output temperature of the nanofluid in configuration (C) is about 75% higher than the configuration (B). The total energy efficiency of configuration (C) is about 7 and 2% lower than configurations (A) and (B), respectively, whereas its total exergy efficiency is about 14 and 22% higher than configurations (A) and (B), respectively.

5. CONCLUSIONS

In this paper, a photovoltaic/thermal system with nanofluid/ phase change material spectral unit along with conventional and nanofluid based spectral splitting photovoltaic/thermal systems were modeled and compared in terms of energy and exergy. Also, the optical properties of nanofluid and phase change material were simulated. According to the results of the present study, the following remarks were drawn:

· Nanofluid/phase change material spectral filter can be considered as an effective step to approach the ideal spectral filter.

• Photovoltaic/thermal system with nanofluid/phase change material spectral filter showed the lowest photovoltaic temperature and the highest output fluid temperature.

• From the energy viewpoint, the conventional photovoltaic/thermal system had the best performance, while from the exergy viewpoint, the system with the nanofluid/ phase change material spectral filter was the best.

 \cdot Using a nanofluid/phase change material spectral filter in concentration ratios greater than 15 is recommended.

• Using a hybrid spectral filter instead of a nanofluid filter at a concentration ratio of 30 reduces the photovoltaic temperature by about 25%, increases the spectral filter temperature by about 75%, and increases the exergy efficiency by about 22 %.

REFERENCES

- [1] X. Ju, C. Xu, X. Han, X. Du, G. Wei, Y. Yang, A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology, Applied energy, 187 (2017) 534-563.
- [2] R.A. Taylor, T. Otanicar, G. Rosengarten, Nanofluidbased optical filter optimization for PV/T systems, Light: Science & Applications, 1(10) (2012) e34-e34.
- [3] H. Manz, P. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM– PCM external wall system for solar space heating and daylighting, Solar energy, 61(6) (1997) 369-379.
- [4] F. Goia, M. Zinzi, E. Carnielo, V. Serra, Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit, Energy and Buildings, 87 (2015) 302-312.
- [5] Y. Cui, Q. Zhu, Study of photovoltaic/thermal systems with MgO-water nanofluids flowing over silicon solar cells, in: 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2012, pp. 1-4.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Yazdanifard, M. Ameri, R. Taylor, Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 1049-1052.

DOI: 10.22060/mej.2020.18326.6800



This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۷، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۴۲۹ تا ۴۴۵۴ DOI: 10.22060/mej.2020.18326.6800

بررسی استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییر فازدهنده در سیستم فتوولتاییک/ حرارتی

فریده یزدانی فرد'، مهران عامری*٬۱ ، رابرت تیلور

^۱گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران ۲ دانشکده مهندسی مکانیک و ساخت، دانشگاه نیو سوت ولز، سیدنی، استرالیا

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸ ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

کلمات کلیدی: ماده تغییرفازدهنده نانوسیال سیستم فتوولتاییک/حرارتی اگزرژی خلاصه: سیستم فتوولتاییک/حرارتی با ترکیب تکنولوژیهای فتوولتاییک و کلکتور حرارتی خورشیدی قادر به تولید همزمان حرارت و الکتریسیته است. فیلترهای طیفی به منظور استفاده کامل از طیف تابش خورشیدی و جداسازی حرارتی سلولهای فتوولتاییک و سیال انتقال حرارت در سیستم فتوولتاییک/حرارتی به کار گرفته میشوند. هدف از این مقاله بررسی فیلتر طیفی ترکیبی جدیدی متشکل از ماده تغییرفازدهنده و نانوسیال به منظور دستیابی به فیلتری نزدیک به فیلتر طیفی ایدهآل است. در این راستا، سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده با استفاده از معادلات موازنه انرژی در نرمافزار متلب شبیهسازی شد و عملکرد آن از دیدگاه انرژی و اگزرژی همچنین، خواص نوری نانوسیالات و ماده تغییرفازدهنده مدلسازی شد و عملکرد آن از دیدگاه انرژی و اگزرژی در پژوهشهای گذشته اعتبارسنجی معمولی و سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی مقایسه گردید. می توان دمای فیلتر طیفی ترکیبی در ان مان از این بررسی نشان داد که با استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی می توان دمای فتوولتاییک/حرارتی معمولی و سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی مقایسه گردید. به میتوان دمای فیلیتر طیفی ترکیبی در نستیم مدل سازی شدند و مدل های ارائهشده با داده های ترزژی می توان دمای فتوولتاییک را تا ۵۰٪ کاهش داد و دمای سیال خروجی را تا بیش از دو برابر افزایش داد. بازده اگزرژی سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی در نسبت تمرکز ۳۰ به ترتیب ۱۴ و ۲۲ درصد بیشتر و اگزرژی تلفشده آن به ترتیب به میزان ۵ و ۷ درصد کمتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی و سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیالی بدست آمد.

۱– مقدمه

سیستم فتوولتاییک/حرارتی که ترکیبی از فتوولتاییک و دریافتکنندههای حرارتی است میتواند مشکل پایینبودن بازده این دو سیستم به صورت مجزا را برطرف کند. در سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی معمولی، نور خورشید به سلولهای فتوولتاییک برخورد میکند، بخشی به الکتریسیته و بخشی به حرارت تبدیل میشود. حرارت تولیدشده با استفاده از سیال انتقال حرارت که در مجاورت سلولهای فتوولتاییک جریان دارد بهعنوان انرژی مفید حمل میشود. عیب اصلی این روش اتصال حرارتی بین سلول فتوولتاییک *نویسنده عهدهدار مکاتات: ameri_mm@uk.ac.ir

و سیال است، به این معنی که بهدست آوردن حرارت با دمای بالا از جزء حرارتی عملکرد سلول را به خطر می اندازد. به عبارت دیگر، بهدست آوردن سیال خروجی با دمای بالا به قیمت افزایش دمای فتوولتاییک و کاهش بازده آن تمام می شود. برای رفع این مشکل، تقسیم طیفی نور خورشید پیشنهاد شده است تا دو جزء سلول های فتوولتاییک و سیال انتقال حرارت را به صورت حرارتی از هم جدا کند. با استفاده از تقسیم طیفی می توان نور خورشید را به نوارهای طیفی مختلف تجزیه کرد. سپس هر نوار تابش را به بهترین گیرنده برای آن نوار طیفی هدایت کرد که می تواند سلول فتوولتاییک یا جذب کننده حرارتی باشد. با استفاده از این روش، فتوولتاییک و

کی با موافق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کا با و در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

جاذب حرارتی از یکدیگر جدا میشوند و دمای عملیاتی دریافت *ک*ننده حرارتی میتواند به میزان قابل توجهی به بالاتر از دمای سلولهای فتوولتاییک افزایش یابد. انواع مختلفی از فیلترهای طیفی شامل فیلترهای تداخلی، فیلترهای جذبی مایع، فیلتر هولو گرافیک، فیلتر پخشی، فیلتر فلورسنت و فیلتر فتوولتاییک در سیستم فتوولتاییک/ حرارتی به صورت عددی یا آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتهاند. از بین این فیلترها، فیلترهای جذبی مایع معمولا مقرون به صرفه هستند و میتوانند به طور همزمان به عنوان فیلتر جداکننده طیفی و مایع انتقال حرارت استفاده شوند. یکی از انواع فیلترهای طیفی مایع نانوسیالات هستند که میتوان با تغییر ضخامت، غلظت، نوع، اندازه و شکل نانوذرات و نوع سیال پایه خواص نوری آنها را تنظیم کرد.

جو و همکاران [۱] مروری جامع درزمینه سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده را که از تکنولوژی تقسیم طیفی استفاده می کردند ارائه دادهاند. آنها مزایا و معایب فیلترهای طیفی مختلف را مقایسه کردند و راههای بهبود عملکرد این سیستمها را بررسی نمودند. کریسوتومو و همکاران [۲] به کارگیری فیلترهای جذبی نانوسیالی را در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده بهصورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها از نانوسیال حاصل از پراکندن نانوذرات نقره با پوشش سیلیکون در آب بهعنوان فیلتر طيفي استفاده كردند. ميزان عبور نور از نانوسيال مورد مطالعه آنها بسیار نزدیک به حالت ایدهآل بود، اما برخی نورهای با طول موج کوتاه که مطلوب نبود را نیز عبور میداد. هجریلد و همکاران [۳] از نانودیسکهای نقره با پوشش سیلیکون (برای جذب نور مرئی) و نانوذرات طلا (برای جذب نور فروسرخ) در آب بهعنوان فیلتر طیفی در یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده استفاده کردند. آنها نشان دادند که استفاده از فیلتر طیفی برای سلولهای خورشیدی سیلیکونی و گالیم آرسنیدی به دلیل باریکبودن قله طیفی بازده تبدیل آنها مناسب است. هجریلد و همکاران در تحقیق دیگری [۴] پایداری نانوسیال نقره با پوشش سیلیکون در گلیسرول را بهعنوان فیلتر طیفی در دمای بالا و اشعه ماوراءبنفش مورد آزمایش قرار دادند. آنها نشان دادند که این نانوسیال در دمای بالا پایداری قابلقبولی دارد، اما با قرارگیری در معرض اشعه ماوراءبنفش، پایداری به شدت تنزل پیدا می کند. جین و جینگ [۵] نانوسیال حاصل از تعليق نانوذرات اكسيد آهن در سيال پايه آب-اتيلن گليكول را ساخته

و بهعنوان فیلتر طیفی مورد آزمایش قرار دادند. آنها نشان دادند که این فیلتر در تابش اشعه ماوراءبنفش ثبات دارد، اما پایداری در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد. برک [۶] و همکاران دو پیکربندی جداشده (کانالهای مجزا با نانوسیال بهعنوان فیلتر و گلیسرول بهعنوان خنک کننده) و متصل (کانال دوطرفه با نانوسیال بهعنوان فیلتر و خنک کننده) از سیستم فتوولتاییک/حرارتی با متمرکزکننده را مدلسازی کردند. آنها نشان دادند که سیستم جداشده و سلولهای خورشیدی گالیم آرسنیدی منجر به بازده اگزرژی بیشتری در مقایسه با سیستم متصل و سلولهای خورشیدی سیلیکونی می شوند. اتانیکار و همکاران [۷] یک سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکننده سهموی خطی را که از سلولهای سیلیکونی ساخته شده بود و از نانوذرات طلا و اکسید ایندیوم قلع در دوراترم اس (سیال انتقال حرارت بر پایه سیلیکون) به عنوان فیلتر نوری استفاده مىكرد أزمايش كردند. سيستم أزمايشى أنها عملكرد پايينترى نسبت به نتایج عددی داشت که علت آن اتلافات نوری و حرارتی غیرمنتظره بیان شد. هازو و همکاران [۸] خواص نوری نانوسیال اکسید روی/آب و اکسید روی/گلیکول را بهعنوان فیلتر طیفی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با استفاده از نظریه پراکندگی می ٔ همراه با روش ردیابی پرتو مونت کارلو^۳ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تغییر قطر و غلظت نانوذرات بر ضریب عبور طیفی نانوسیال در طول موجهای فرابنفش-مرئی مؤثر است. دیو و همکاران [۹] استفاده از نانوسیال حاصل از تعلیق نانوذرات هسته-پوسته تیتانیوم اکسید-نقره در آب بهعنوان فیلتر طیفی و پوشش شیشهای آئروژل را در یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای متمرکزکننده بهصورت عددی بررسی کردند و با سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولي مقايسه نمودند. سيستم مورد مطالعه آنها به راندمان اگزرژي بالاتری با مقدار ۱۲/۴۶ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتاییک/ حرارتی معمولی و سیستم فتوولتاییک دست یافت. هی و همکاران [۱۰] با تعليق نانوذرات هسته-يوسته نقره-تيتانيوم اكسيد در محلول اتیلن گلیکول-آب و بررسی این نانوسیال بهعنوان فیلتر طیفی نشان دادند که با افزایش غلظت نانوذرات در فیلتر طیفی، راندمان الکتریکی دچار كاهش مىشود، درحالىكه بازده حرارتى افزايش مىيابد. هان و

¹ Duratherm S

² Mie scattering theory

³ Monte Carlo ray tracing (MCRT) method

همکاران [۱۱] از نانوسیال حاصل از پراکندگی نقره در محلول کبالت سولفات بهعنوان فیلتر طیفی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای تمرکز تابش استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال نقره/ کبالت سولفات در طول موجهای اشعه ماوراءبنفش و مرئی جذب بیشتری در مقایسه با نانوسیال نقره/آب دارد و به راندمان الکتریکی پایینتر و راندمان حرارتی بالاتری دست پیدا می کند.

در کنار استفاده از نانوسیالات چه بهعنوان خنک کننده سلولهای فتوولتاییک و چه بهعنوان فیلتر طیفی، تحقیقات متعددی برای به کارگیری روشهای خنک کننده منفعل صورت گرفته است. یکی از این روشها استفاده از مواد تغییرفازدهنده ٔ است. مواد تغییر فازدهنده تركيبات آلى يا معدنى هستند كه قابليت جذب و ذخيره مقادیر زیادی از انرژی را بهصورت گرمای نهان در طی فرآیند تغییر فاز دارند. هدف از استفاده از مواد تغییرفازدهنده کاهش نوسانات حرارتی مایعات انتقال حرارت و ذخیره انرژی گرمایی برای تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی است. در سیستمهای انرژی خورشیدی، همیشه عدم تطابق بین عرضه و تقاضای انرژی وجود دارد، بنابراین ذخيره مؤثر انرژی میتواند به تأمين انرژی مداوم کمک کند. تحقیقات نشان دادهاست که سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی بر پایه مواد تغییرفازدهنده ۳۳ درصد (حداکثر ۵۰ درصد) پتانسیل ذخیره حرارت بیشتری نسبت به سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی دارند و مدتزمان در دسترسبودن حرارت را حدود ۷۵ تا ۱۰۰ درصد افزایش میدهند. همچنین کاهش دمای فتوولتاییک در سیستم فتوولتاییک/حرارتی بر پایه مواد تغییرفازدهنده بیشتر از سیستم فتوولتاييك/حرارتي معمولي است [١٢].

مطالعاتی که تاکنون درزمینه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی صورت گرفته بر ادغام یک لایه ماده تغییرفازدهنده یا استفاده از دوغاب^۲ ماده تغییرفازدهنده برای خنککردن سلولهای فتوولتاییک و ذخیره انرژی متمرکز شدهاند [۱۳]. استفاده از ماده تغییرفازدهنده در سیستمهای فتوولتاییک/ حرارتی با متمرکزکننده دارای فیلتر طیفی چه بهعنوان بخشی از واحد خنککننده و چه بهعنوان بخشی از واحد تقسیم طیفی، مورد بررسی قرار نگرفتهاست. اما به نظر میرسد ذخیره انرژی در این سیستمها

¹ Passive cooling

² Phase Change Material (PCM)

³ Slurry

به علت تمركز تابش از اهمیت بیشتری برخوردار است. مهمتر از آن، شواهدی وجود دارد که توانایی مواد تغییرفازدهنده را در انتقال تابش خورشیدی نشان میدهد. مانز و همکاران [۱۴] با اندازه گیری میزان انتقال تابش ماده تغييرفازدهنده كلسيم كلريد هگزاهيدرات نشان دادند که این ماده بخش قابل توجهی از تشعشع در طیف مرئی و نزدیک مادونقرمز با طول موج کوتاهتر از ۱۴۰۰ نانومتر را در حالت مایع انتقال میدهد. بودی و شارما [۱۵] با انجام آزمایشهایی دریافتند که میزان انتقال تابش توسط ماده تغییرفازدهنده اسید استئاریک نسبت به یک نمونه شیشهای با ضخامت یکسان بیشتر است. همچنین آنها مشاهده کردند که با تغییرفاز اسیداستئاریک از مایع به جامد، انتقال تابش کاهش می یابد و وقتی کاملا جامد می شود به حداقل مقدار خود می سد. گویا و همکاران [۱۶] خصوصیات نوری یک واحد دوجداره شیشهای پرشده با ماده تغییرفازدهنده پارافین را برای استفاده در ساختمان اندازه گیری کردند. آنها نشان دادند که مواد تغييرفازدهنده آلى به دليل ساختار شيميايي خود، انتقال تقريبا ثابتي در طیف تابش مرئی دارند و در طیف مادون قرمز رفتار انتخابی^۴ نشان میدهند. بر اساس مطالعات بیان شده و مطالعات مشابهی که وجود دارد مى توان نتيجه گرفت كه مواد تغييرفازدهنده قادرند به عنوان فیلتر طیفی در سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی به کار بردهشوند. بنابراین، هدف از این پژوهش استفاده از ماده تغییرفازدهنده بهعنوان بخشی از فیلتر طیفی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی است که بر اساس مراجع موجود تاکنون مورد بررسی قرارنگرفتهاست. در مطالعه حاضر، مدل عددی جامعی برای یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با تمركز تابش كه داراى فيلتر طيفى متشكل از ماده تغييرفازدهنده و نانوسیال است، ارائه گردیده و عملکرد این سیستم از دیدگاه انرژی و اگزرژی با سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی مقایسه شدهاست. در فیلتر طيفى تركيبى پيشنهادى، نانوسيال براى جذب اشعه ماوراءبنفش و مرئی تابش خورشیدی و ماده تغییرفازدهنده برای جذب بخشی از تابش مادونقرمز استفاده می شود. فیلتر طیفی ترکیبی پیشنهادی قادر است که ما را هر چه بیشتر به فیلتر طیفی ایدهآل نزدیک کند و درنتیجه باعث کاهش درجه حرارت فتوولتاییک، بهبود بیشتر در راندمان الكتريكي و افزايش طول عمر سلول هاى فتوولتاييك شود.

⁴ Selective behavior

بهعلاوه، انرژی حرارتی میتواند با استفاده از مواد تغییرفازدهنده بهطور مؤثر ذخیره شود و در زمانهایی که تابش خورشید در دسترس نیست مورد استفاده قرار بگیرد.

۲– مدلسازی ۲–۱– معادلات حاکم

سه پیکربندی مختلف از سیستم فتوولتاییک/حرارتی تحت تابش متمرکز شامل الف) سیستم فتوولتاییک/حرارتی متداول، ب) سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و ج) سیستم دارای فیلتر طیفی مرکب از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده در شکل ۱ نشان دادهشدهاند. برای مدلسازی، معادلات موازنه انرژی برای اجزای مختلف سیستم بهجز ماده تغییرفازدهنده نوشته شدهاست. برای ماده تغییرفازدهنده از معادله هدایت حرارتی استفاده می شود.

فرضیات مورد استفاده برای مدلسازی عبارتاند از: - انتقال حرارت یکبعدی و ناپایا است. - ماده تغییرفازدهنده همگن و ایزوتروپیک است. - از انتقال حرارت جابجایی درون لایه ماده تغییرفازدهنده صرفنظر شدهاست. - از تبادل تابش بین سطوح شیشهای کانال حاوی ماده

تغییرفازدهنده و نانوسیال صرفنظر شدهاست. - خواص ترموفیزیکی همه اجزا بهجز نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده مستقل از دما در نظر گرفته شدهاست.

- خواص حرارتی و نوری ماده تغییرفازدهنده با تغییر حالت آن، تغییر می کنند.

معادلات حاکم با توجه به فرضیات ذکرشده بهصورت زیر نوشته میشوند.



شکل ۱. پیکربندی های الف) سیستم فتوولتاییک/حرارتی متداول، ب) سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی نانوسیالی و ج) سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی مرکب از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده

Fig .1. (a) Conventional photovoltaic/thermal, (b) nanofluid based spectral splitting photovoltaic/thermal and (c) nanofluid/phase change material based spectral splitting photovoltaic/thermal configurations

$$\rho_{pv}c_{p,pv}\delta_{pv}\frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C\alpha_{pv}(1-\eta_{pv}^{*})I_{0} + (h_{rad,pv-s} + h_{conv,pv-a})(T_{a} - T_{pv}) + h_{cond,pv-abs}(T_{abs} - T_{pv})$$

در رابطه فوق، ρ چگالی، $_{p}^{c}$ ظرفیت گرمایی، δ ضخامت، T دما برحسب کلوین، t زمان، C نسبت تمرکز، α ضریب جذب تابش، h_{rad} بازده فتوولتاییک تنظیم شده، I_{o} نسبت کور شیدی دریافتی، η_{pv}^{*} ضریب انتقال حرارت تابشی، h_{conv} ضریب انتقال حرارت جابجایی، abs و s pv ضریب انتقال حرارت هدایتی و زیرنویس های q s pv و absبه ترتیب نشان دهنده فتولتاییک، آسمان، هوای اطراف و جاذب هستند. نحوه محاسبه بازده فتوولتاییک تنظیم شده (η_{pv}^{*}) در جدول ۲ به اختصار ارائه شده است.

در روابط ارائهشده در جدول ۱، K' و n و n پارامترهای تجربی هستند و به ترتیب ۱/۱۵ ، ۰/۰۳ و v/۹۶ در نظر گرفته شدهاند. پارامترهای T دمای سلول، k_B ثابت بولتزمن، E_g گاف انرژی سلول

فتوولتاییک، λ_{g}^{k} طول موج تابش خورشیدی متناظر با گاف انرژی سلول فتوولتاییک، e بار الکترون، QE_{λ} بازده کوانتومی طیفی، A^{*} فاکتور دیود، C نسبت تمرکز و F_{λ} چگالی شار فوتون هستند. · جاذب حرارتی:

$$\rho_{abs}c_{p,abs}\delta_{abs}\frac{\partial T_{abs}}{\partial t} = h_{cond,pv-abs}\left(T_{pv} - T_{abs}\right) + h_{c,cf-abs}\left(T_{cf} - T_{abs}\right) \quad (\Upsilon)$$

$$\rho_{cf}c_{p,cf}\delta_{cf}\frac{\partial T_{cf}}{\partial t} = h_{c,cf-abs}\left(T_{abs} - T_{cf}\right) + h_{c,cf-bp}\left(T_{bp} - T_{cf}\right) - \frac{\dot{m}_{cf}c_{p,cf}}{w}\frac{dT_{cf}}{dy}$$
(*)

که در آن m دبی جرمی، w عرض، h_c ضریب انتقال حرارت ترکیبی (هدایت و جابجایی حرارتی) و زیرنویس bp نشاندهنده صفحه فلزی پشتی است. • صفحه فلزی پ

جدول ۱. معادلات حاکم برای مدل سازی الکتریکی [۱۸, ۱۸] Table 1. Governing equations for electrical modeling [18, 17]

رابطه	پارامتر محاسبەشدە	گام
$J_{00} = K' T^{3/n} \exp\left(\frac{-E_g}{mk_B T}\right)$	(J_{oo}) چگالی جریان اشباع تاریک	١
$J_{sc} = \int_{280}^{\lambda_{g}} eQE_{\lambda}\tau_{\lambda}F_{\lambda}d\lambda$	(J_{sc}) چگالی جریان اتصال کوتاہ	٢
$V_{oc} = \frac{A'k_BT}{e}\ln\left(\frac{CJ_{sc}}{J_{00}} + 1\right)$	(V_{oc}) ولتاژ مدار باز	٣
$\exp\left(\frac{eV_m}{k_BT}\right)\left(1+\frac{eV_m}{k_BT}\right) = \frac{CJ_{sc}}{J_{00}} + 1$	$\left(V_{m} ight)$ ولتاژ نقطه حداکثر توان	۴
$FF = \frac{V_m}{V_{oc}} \left[1 - \frac{exp\left(\frac{eV_m}{k_BT}\right) - 1}{exp\left(\frac{eV_{oc}}{k_BT}\right) - 1} \right]$	ضریب پری (FF)	۵
$\eta_{_{PV}} = \frac{V_{_{oc}}J_{_{sc}}FF}{I}$	$(\eta_{_{pv}})$ بازده فتوولتاييک	۶
$\eta_{pv}^* = \frac{V_{oc}J_{sc}FF}{I\tau_{g1}\tau_{of}\tau_{g2}\tau_{pcm}\tau_{g3}}$	$(\eta^*_{_{pv}})$ بازده فتوولتاييک تنطيم $_{lpha}$ شده ,	۷

$$\rho_i c_{p,i} \delta_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = h_{cond, bp-i} \left(T_{bp} - T_i \right) + h_{c,i-a} \left(T_i - T_a \right) \tag{(a)}$$

$$\rho_{g1}c_{p,g1}\delta_{g1}\frac{\partial I_{g1}}{\partial t} = C\alpha_{g,1}I_{0} +$$

$$\left(h_{conv,g1-a} + h_{rad,g1-s}\right)\left(T_{a} - T_{g1}\right) + h_{c,of-g1}\left(T_{of} - T_{g1}\right)$$
(9)

$$\rho_{of}c_{p,of}\delta_{of}\frac{\partial T_{of}}{\partial t} = C\tau_{g,1}\alpha_{of}I_0 + h_{c,of-g_1}\left(T_{g_1} - T_{of}\right) + h_{c,of-g_2}\left(T_{g_2} - T_{of}\right) - \frac{\dot{m}_{of}c_{p,of}}{w}\frac{dT_{of}}{dy}$$
(Y)

که در آن، *۲* ضریب عبور تابش و زیرنویس g2 نشاندهنده کاور شیشهای ۲ است.

$$\rho_{g3} c_{p,g2} \delta_{g2} \frac{\partial T_{g2}}{\partial t} = C \tau_{g,1} \tau_{of} \alpha_{g,2} I_0 + h_{c,of-g2} \left(T_{of} - T_{g2} \right) + (h_{rad, pv-g2} + h_{conv, pv-g2}) \left(T_{pv} - T_{g2} \right)$$

• سلولهای فتوولتاییک:

$$\rho_{pv}c_{p,pv}\delta_{pv}\frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C\tau_{g,1}\tau_{of}\tau_{g,2}\alpha_{pv}(1-\eta_{pv}^{*})I_{0} + (h_{rad,pv-g2} + h_{conv,pv-g2})(T_{g2} - T_{pv}) + h_{cond,pv-abs}(T_{abs} - T_{pv})$$
(9)

معادلات حاکم بر جاذب حرارتی، سیال خنک کننده، صفحه فلزی پشتی و عایق به ترتیب مشابه با روابط (۲) تا (۵) یعنی معادلات بیانشده برای اجزای نظیر در سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی هستند.

معادلات حاکم بر کاور شیشهای (۱) و نانوسیال به ترتیب مشابه با روابط (۶) تا (۷) هستند. · کاور شیشهای ۲:

$$\rho_{g2}c_{p,g2}\delta_{g2}\frac{\partial T_{g2}}{\partial t} = C\tau_{g,1}\tau_{of}\alpha_{g,2}I_{0} + h_{c,of-g2}(T_{of} - T_{g2}) + h_{cond,pcm-g2}(T_{pcm} - T_{g2})$$
(1.)

در رابطه فوق، زیرنویس *pcm* نشان دهنده ماده تغییرفازدهنده

است.
ماده تغییرفازدهنده (فیلتر طیفی)

$$\rho_{pcm}c_{p,pcm} \frac{\partial T_{pcm}}{\partial t} = k_{pcm} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial I}{\partial x}$$
(۱۱)

در رابطه (۱۱)، k هدایت حرارتی و I تابش خورشید است.

$$\rho_{g3}c_{p,g3}\delta_{g3}\frac{\partial T_{g3}}{\partial t} = C\tau_{g,1}\tau_{of}\tau_{g,2}\tau_{pcm}\alpha_{g,3}I_{0} + (17)$$

$$h_{cond, pcm-g3}(T_{pcm} - T_{g3}) + (h_{rad, pv-g3} + h_{conv, pv-g3})(T_{pv} - T_{g3})$$

$$\sum k c_{1} \sum k c_{2} \sum k c_{3} \sum k c_{3}$$

$$\rho_{pv}c_{p,pv}\delta_{pv}\frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C\tau_{g,1}\tau_{of}\tau_{g,2}\tau_{pcm}\tau_{g,3}\alpha_{pv}(1-\eta_{pv}^{*})I_{0} + (\eta_{rad,pv-g3}^{*}+h_{conv,pv-g3})(T_{g3}-T_{pv}) + h_{cond,pv-abs}(T_{abs}-T_{pv})$$

معادلات حاکم بر جاذب حرارتی، سیال خنک کننده، صفحه فلزی پشتی و عایق در این پیکربندی نیز به ترتیب مشابه با روابط (۲) تا (۵) هستند. نحوه محاسبه ضرایب انتقال حرارت مورد استفاده در روابط (۱) تا (۱۳) در جدول ۲ ارائه شدهاست.

برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر اجزای هر یک از پیکربندیهای مورد مطالعه در این مقاله، از روش تفاضل محدود استفاده شدهاست و شبیه سازی با استفاده از نرمافزار MATLAB صورت گرفته است. الگوریتم حل مساله در شکل ۲ نشان داده شدهاست. پارامترهای مورد استفاده برای مدل سازی در جدول ۳ ارائه شده است.

در روابط ارائهشده در جدول ۲، عدد ناسلت (Nu) برای جریان سیال و لایه هوا به ترتیب به صورت زیر محاسبه می شوند [۲۱-۲۳]:

رابطه	ضريب انتقال حرارت
$h_{c,g(i)-a} = \frac{1}{\frac{\delta_{g(i)}}{2k_{g(i)}} + \frac{1}{h_{wind}}}$	انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و هدایت بین کاور شیشهای (یا عایق) و هوا
$h_{wind} = 3v_w + 2.8$	انتقال حرارت جابجایی در اثر وزش باد
$h_{rad,g-s} = \frac{\varepsilon_g \sigma \left(T_g^4 - T_s^4\right)}{\left(T_g - T_a\right)}$	انتقال حرارت تابشی بین کاور شیشهای ۱ و آسمان
$h_{conv,of(cf)-g(abs,bp)} = \frac{\mathrm{Nu}_{f}k_{f}}{\delta_{f}}$	انتقال حرارت جابجایی فیلتر طیفی (نانوسیال) یا سیال خنککن با جدار شیشهای یا جدار فلزی
$h_{r,g-pv} = \frac{\sigma(T_g^2 + T_{pv}^2)(T_g + T_{pv})}{(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{pv}} - 1)}$	انتقال حرارت تابشی بین فتوولتاییک و کاور شیشهای
$h_{conv, pv-g} = rac{\mathrm{Nu}_a k_a}{\delta_a}$	انتقال حرارت جابجایی در لایه هوا میان فتوولتاییک و کاور شیشهای
$h_{cond} = \frac{2k}{\delta}$	انتقال حرارت هدایتی درهر یک از اجزا
$h_{r,g-pv} = \frac{\sigma \left(T_g^2 + T_{pv}^2\right) \left(T_g + T_{pv}\right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{pv}} - 1\right)}$ $h_{conv,pv-g} = \frac{\mathrm{Nu}_a k_a}{\delta_a}$ $h_{cond} = \frac{2k}{\delta}$	انتقال حرارت تابشی بین فتوولتاییک و کاور شیشهای انتقال حرارت جابجایی در لایه هوا میان فتوولتاییک و کاور شیشهای انتقال حرارت هدایتی درهر یک از اجزا

جدول۲. روابط مورد استفاده برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت [۲۹, ۲۰] Table 2. Relations used for evaluating heat transfer coefficients [20, 19]



شكل ٢. الگوريتم حل مساله Fig. 2. Problem-solving algorithm

واحد	مقدار	پارامتر	جزء
mm	٣	ضخامت	کاور شیشهای
kg/m ³	۲۵۰۰	چگالی	
J/kg.K	٨۴٠	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	•/٩۶	رسانایی حرارتی	
-	•/٩	ضريب گسيل	
-	٠/٩۵	ضريب عبور	
mm	۱.	ضخامت	ماده تغييرفازدهنده
kg/m ³	جامد: ۱۷۰۰، مایع: ۱۵۳۰	چگالی	
J/kg.K	جامد: ۱۵۰۰، مایع: ۲۲۲۰	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	جامد: ۰/۷۹، مایع: ۰/۴۸	رسانايي حرارتي	
kJ/kg	١٩٠	گرمای ویژه	
°C	۲۷	دمای ذوب	
mm	۱.	ضخامت	نانوسیال به عنوان فیلتر طیفی
vol%	•/••۵	غلظت	
kg/s	• / • • ٣	دبی جرمی	
μm	۵۰۰	ضخامت	فتوولتاييك
kg/m ³	۲۳۲۰	چگالی	
J/kg.K	۶۷۸	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	۱۰۰	رسانایی حرارتی	
-	•/٩	۔ ضریب گسیل	
-	•/٩۵	ضريب جذب	
mm	٢	ضخامت	جاذب و صفحه پشتی
kg/m ³	7891	چگالی	
J/kg.K	971	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	778	رسانایی حرارتی	
mm	۱.	ضخامت	آب به عنوان خنککن
kg/s	• / • 1	دبی جرمی	
mm	۳.	ضخامت	عايق
kg/m ³	٣٠	چگالی	
J/kg.K	٨	ظرفیت گرمایی ویژه	
W/m.K	• / • ٣	رسانایی حرارتی	
W/m ²	٨٠٠	تابش خورشيد	ساير
°C	۲۳	دمای محیط	
-	• /٨	بازده پمپ	
m	١	طول سيستم	
m	• / \	عرض سيستم	
mm	۲۵	فاصله فيلتر طيفي و فتوولتاييک	

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده برای مدل سازی Table 3. Parameters used in the simulation

$$c_{p,m} = c_{p,s} \frac{T_{pcm,l} - T_{pcm,m}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}} + c_{p,l} \frac{T_{pcm,m} - T_{pcm,s}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}} + \frac{2h_{pcm}}{T_{pcm,l} - T_{pcm,s}}$$
(1A)
. (1A)

۲–۳– خواص نوری ماده تغییرفازدهنده

با داشتن تغییرات شاخص انکساری (ضریب شکست) و شاخص خاموشی ماده تغییرفازدهنده در طول موجهای مختلف میتوان میزان جذب و عبور ماده تغییرفازدهنده را در حالت جامد و مایع بهدست آورد. زمانی که ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع قرار دارد ضریب جذب و عبور تابش توسط روابط (۱۹) و (۲۰) بهدست میآید [۲۷]:

$$\tau_{\lambda,pcm} = \frac{(1 - r_{g-pcm})(1 - r_{pcm-g})t_{pcm}}{1 - r_{g-pcm}r_{pcm-g}t_{pcm}^2}$$
(19)

$$\alpha_{\lambda, pcm} = \frac{(1 - r_{g-pcm})(1 + r_{pcm-g}t_{pcm})(1 - t_{pcm})}{1 - r_{g-pcm}r_{pcm-g}t_{pcm}^2}$$
(Y •)

که در آن
$$r_{i\cdot j}$$
 بازتاب در سطح اتصال ماده i و j و j_{i} میزان عبور از ماده i هستند [۲۷ ,۲۶]:

$$r_{i-j} = r_{j-i} = \frac{(n_i - n_j)^2 + (\kappa_i - \kappa_j)^2}{(n_i + n_j)^2 + (\kappa_i + \kappa_j)^2}$$
(Y1)

$$t_i = \exp\left(-\frac{4\pi\kappa_i\delta_i}{\lambda}\right) \tag{YY}$$

در روابط فوق، n شاخص انکساری، κ شاخص خاموشی و λ طول موج است. محاسبه ضریب جذب و عبور در حالت جامد کمی پیچیدهتر است. وینلدر [۲۸] ضریب پراکندگی سه نوع ماده تغییرفازدهنده را با انجام آزمایشهایی بهدست آورد و با حل معادله انتقال حرارات تابشی روابط زیر را برای ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد ارائه کرد:

$$\tau_{\lambda,pcm} = \frac{(1 - r_{g-pcm})(1 - r_{pcm-g})e^{-\chi\delta_{pcm}}}{1 - r_{g-pcm}r_{g-m-g}e^{-2\chi\delta_{pcm}}} + \frac{1 - r_{d}^{g-pcm}}{1 - t_{g}^{2}r_{d}^{g-pcm}r_{d}^{g-a}}I_{d}(\chi, +1)$$
(YY)

$$Nu_{f} = \begin{cases} Nu_{of} = 7.55 + \frac{0.024 \left(\frac{L}{\text{RePr}D_{h}}\right)^{-1.14}}{1 + 0.0358 \left(\frac{L}{\text{RePr}D_{h}}\right)^{-0.64} \text{Pr}^{0.17}} \\ \text{Re} \le 2300 \\ Nu_{of} = \frac{(f/8)(\text{Re} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12.7 (f/8)^{1/2} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \\ \text{Re} > 2300 \end{cases}$$
(1%)

$$\operatorname{Nu}_{a} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{\operatorname{Ra}\cos\theta} \right]^{1} \left(1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{\operatorname{Ra}\cos\theta} \right) + \left[\left(\frac{\operatorname{Ra}\cos\theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^{+}$$
(1 Δ)

 D_h ، در روابط (۱۴) و (۱۵)، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل θ عدد روابط (۱۴) و قطر هیدرولیکی کانال جریان، L طول کانال، Ra عدد رایلی و θ شیب هستند.

$$k = \begin{cases} k_{s} & \text{if } T_{pcm} \leq T_{pcm,s} \\ k_{s} + (k_{l} - k_{s})(T_{pcm} - T_{pcm,s}) / (T_{pcm,l} - T_{pcm,s}) & \text{if } T_{pcm,s} < T_{pcm,l} \\ k_{l} & \text{if } T_{pcm} \geq T_{pcm,l} \end{cases}$$
(19)

$$c_{p} = \begin{cases} c_{p,s} & \text{if } T_{pcm} \leq T_{pcm,s} \\ c_{p,s} + \frac{\left(c_{p,m} - c_{p,s}\right)}{\left(T_{pcm,m} - T_{pcm,s}\right)} \left(T_{pcm} - T_{pcm,s}\right) & \text{if } T_{pcm,s} < T_{pcm} \leq T_{pcm,m} \\ c_{p,l} + \frac{\left(c_{p,m} - c_{p,l}\right)}{\left(T_{pcm,l} - T_{pcm,m}\right)} \left(T_{pcm,l} - T_{pcm}\right) & \text{if } T_{pcm,m} < T_{pcm,l} \\ c_{p,l} & \text{if } T_{pcm,l} \geq T_{pcm,l} \end{cases}$$



شکل ۳. ثوابت نوری ماده تغییرفازدهنده کلسیمکلریدهگزاهیدرات. (الف) شاخصهای انکساری و خاموشی و (ب) ضریب پراکندگی [۲۸] Fig. 3. Optical constants of Calcium Chloride Hexahydrate. (a) refractive and extinction indices and (b) scattering coefficient [28]

م شدد [۲۸]

$$K = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1-\omega}{1-\omega/4}} \tag{(YA)}$$

در این پژوهش، ماده تغییرفازدهنده غیرآلی کلسیم کلریدهگزاهیدرات (CaCl₂.6H₂O) مورد بررسی قرار گرفتهاست و شاخص انکساری، شاخص خاموشی و ضریب پراکندگی آن در شکل ۳ نشان دادهشدهاند.

۲-۴- خواص نوری نانوسیال

در این پژوهش از نانوسیال نقره/آب به عنوان فیلتر طیفی نانوسیالی استفاده شده است. نانوسیال با غلظت ۲۰/۵۵ درصد وزنی شامل نانوذرات نقره با قطر ۱۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. برای محاسبه خواص نوری این نانوسیال از تخمین پراکندگی رایلی^۴ استفاده شده است. این روش زمانی قابل استفاده است که ذرات بسیار کوچک (کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر) هستند. بر این اساس ضریب انقراض نانوذرات از رابطه زیر محاسبه می شود [۳۲, ۳۲]:

$$\beta_{np} = \frac{6\pi\phi}{\lambda} Im \left\{ \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \left[\frac{1 + \frac{\pi^2 d_{np}^2}{15\lambda^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \times}{\frac{m^4 + 27m^2 + 38}{2m^2 + 3}} \right] \right\} + (\Upsilon \gamma)$$

$$\frac{4\pi^4 d_{np}^3 \phi}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

$$\alpha_{\lambda,pcm} = \frac{(1 - r_{g-pcm})(1 + r_{pcm-g}e^{-2\chi_{o}pcm})(1 - e^{-\chi_{o}o_{pcm}})}{1 - r_{g-pcm}r_{pcm-g}e^{-2\chi_{o}o_{pcm}}} + (\gamma + 1) + (1 - e^{-\chi_{o}o_{pcm}})(I_{d}(0, + 1) + I_{d, -1}(\chi, -1))$$

که در آن χ عمق نوری^۱ ماده تغییرفازدهنده، r_d^{i-j} بازتاب تابش پراکنده است، که I_d و j و j تابش پراکنده است، که بهترتیب با استفاده از روابط (۲۵) تا (۲۷) بهدست می آیند [۲۸–۳۰]:

$$\chi = \left(\sigma_s + \frac{4\pi\kappa_{pcm}}{\lambda}\right)\delta_{pcm} \tag{7}$$

$$r_{d}^{i-j} = \frac{1}{2} + \frac{(m-1)(3m+1)}{6(m+1)^{2}} + \frac{m^{2}(m^{2}-1)^{2}}{(m^{2}+1)^{3}} \ln\left(\frac{m-1}{m+1}\right) - \frac{2m^{3}(m^{2}+2m-1)}{(m^{2}+1)(m^{4}-1)} + \frac{8m^{4}(m^{4}+1)}{(m^{2}+1)(m^{4}-1)^{2}} ln(m)$$
(YF)

$$I_{d}(\chi,\mu_{i}) = \frac{5\omega\tau_{g}I_{0}(1-\rho_{g-pcm})}{32-8\omega} \left[\frac{\alpha}{1-\mu_{i}K}e^{-K\chi} + \frac{\beta}{1+\mu_{i}K}e^{K\chi} + \frac{e^{-\chi}}{1-\mu_{i}}\right] \quad (\Upsilon\Upsilon)$$

پارامتر σ_s در رابطه (۲۵) ضریب پراکندگی است. پارامتر m در رابطه (۲۶) نسبت شاخص انکساری بزرگتر به شاخص انکساری کوچکتر دو لایه مجاور i و jاست. در رابطه (۲۷)، ω تک پراکندگی آلبدو⁷ و μ_i کسینوسهای جهتی هستند. ثوابت α و β با استفاده از شرایط مرزی به دست میآیند و پارامتر K بهصورت زیر محاسبه

⁴ Rayleigh scattering approximation

¹ Optical depth

² Diffuse

³ Single-scattering albedo

$$\dot{\varepsilon}_{th} = \frac{\dot{E}x_{th}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{\dot{m}c_p \left[\left(T_{f,out} - T_{f,in} \right) - T_a \ln(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}}) \right]}{\left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}} \right] CAI}$$
(7Y)

$$\dot{\varepsilon}_{ele} = \frac{\dot{E}x_{ele}}{\dot{E}x_{sun}} = \frac{CAI\eta_{pv} - P_{pump}}{\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}}\right]CAI}$$
(\mathcal{K}\)

$$\dot{\varepsilon}_{tot} = \dot{\varepsilon}_{th} + \dot{\varepsilon}_{ele} \tag{(49)}$$

$$\dot{E}x_{loss,th} = \dot{E}x_{sun} - \dot{E}x_{th} - \dot{E}x_{ele} \tag{(...)}$$

$$\dot{E}x_{loss,fr} = \frac{\dot{m} T_a \ln\left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}}\right)}{\rho\left(T_{f,out} - T_{f,in}\right)} \Delta P \tag{(f1)}$$

$$\dot{E}x_{loss,tot} = \dot{E}x_{loss,th} + \dot{E}x_{loss,fr}$$
(°T)

۳- اعتبار سنجی ۱-۳- اعتبار سنجی مدل ارائه شده برای خواص نوری ماده تغییرفازدهنده و نانوسیال

ضریب عبور ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلریدهگزاهیدرات با ضخامت یک سانتیمتر در طولموجهای مختلف با استفاده از مدل ارائهشده در بخش ۳–۲ مدلسازی شد و با نتایج تجربی وینلدر [۲۸] برای حالت جامد و مانز و همکاران [۱۴] برای حالت مایع ماده تغییرفازدهنده مقایسه گردید (شکل ۴). همانطور که در شکل که در آن ϕ کسر حجمی نانوذرات، d_{np} قطر میانگین نانوذرات و m نسبت شاخص انکساری مختلط نانوذرات به شاخص انکساری مختلط سیال پایه است. در ضریب خاموشی سیالات پایه خالص مانند آب بخش مربوط به پراکندگی قابل صرفنظر است و میتوان نوشت [۳۳]:

$$\beta_{bf} = \frac{4\pi\kappa_{bf}}{\lambda} \tag{(...)}$$

ضریب خاموشی کل نانوسیال از جمع ضرایب خاموشی نانوذرات و سیال پایه حاصل میشود [۳۴]:

$$\beta_{nf} = \beta_{np} + \beta_{bf} \tag{(1)}$$

ضریب عبور طیفی نانوسیال با استفاده از قانون بیر-لامبرت از رابطه (۳۲) قابل محاسبه است [۳۲].

$$\tau_{\lambda,nf} = e^{-\beta_{nf}\delta_{nf}} \tag{(TT)}$$

درنهایت ضریب عبور کل نانوسیال و یا ماده تغییرفازدهنده را می توان به شکل زیر به دست آورد [۳۱]:

$$\tau = \frac{\int_{250nm}^{2500nm} \tau_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{\int_{250nm}^{2500nm} I_{\lambda} d\lambda}$$
(°°°)

۵-۲- محاسبه عملکرد سیستم از دیدگاه انرژی و اگزرژی

برای بررسی و مقایسه عملکرد سیستمهای مورد بررسی از بازده انرژی و اگزرژی استفاده شدهاست. بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی از روابط زیر بهدست میآیند [۳۵]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p(T_{f,out} - T_{f,in})}{CAI} \tag{(Tf)}$$

$$\eta_{ele} = \eta_{pv} - \frac{P_{pump}}{CAI} \tag{(4)}$$

$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{ele} \tag{(79)}$$

۴ مشخص است، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از مدلسازی حاضر برای حالت مایع ماده تغییرفازدهنده وجود دارد که صحت مدل ارائهشده را در این حالت نشان میدهد. برای ماده تغییرفازدهنده جامد در برخی از طول موجها خطای بیشتری مشاهده میشود. این خطا میتواند به دلیل صرفنظر کردن از تغییرات ضریب پراکندگی با طول موج و یا همگن و ایزوتروپیک فرض کردن ماده تغییرفازدهنده باشد. البته میزان خطای موجود با درنظر گرفتن گستره طول موجی قابل صرفنظر است و میانگین خطا در حدود ۵ درصد می باشد.

همچنین تغییرات ضریب عبور نانوسیال نقره/آب با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی، قطر نانوذرات ۱۰ نانومتر و ضخامت یک سانتیمتر در

طول موجهای مختلف با استفاده از مدل ارائه شده در بخش ۴-۲ محاسبه شد و با نتایج تجربی هان و همکاران [۱۱] در شکل ۵ مقایسه گردید. با توجه به شکل ۵، نتایج عددی پژوهش حاضر در طول موجهای بزرگتر از ۴۰۰ نانومتر تطابق بسیار مناسبی با نتایج تجربی هان و همکاران [۱۱] دارد، اما شاهد خطای نسبتا زیادی در طول موجهای کمتر از ۴۰۰ نانومتر هستیم. این مسئله میتواند ناشی از به کارگیری تخمین پراکندگی رایلی باشد. در این تخمین باید اندازه نانوذره بسیار کوچکتر از طول موج برخوردی باشد و در نتیجه هر چه طول موج بزرگتر باشد، خطای تخمین پراکندگی رایلی کمتر خواهد بود. با این حال، به دلیل چگالی کم تابش خورشیدی در طول موجهای کمتر از ۴۰۰ نانومتر این میزان خطا قابل صرفنظر است.



شکل ۴. ضریب عبور ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلریدهگزاهیدرات با ضخامت یک سانتیمتر در حالت جامد و مایع. Fig. 4. The transmittance of 1cm thickness of Calcium Chloride Hexahydrate in liquid and solid states



Fig. 5. The transmittance of the Ag/Water nanofluid with 1 cm thickness

۳-۲- اعتبارسنجی مدل ارائهشده برای سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی

سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر نانوسیالی با استفاده از نتایج تجربی کوی و زو [۳۸] اعتبارسنجی شد. در سیستم مورد مطالعه کوی و زو [۳۸] نانوسیال منیزیم اکسید/آب (قطر ۱۰ نانومتر ، غلظت ۰/۰۲درصد وزنی و دبی ۶ لیتر در ساعت) با ضخامت یک سانتیمتر بر روی سلولهای فتوولتاییک جریان می یابد و جریان خنککن از زیر فتوولتاییک وجود ندارد. چون کار عددی مناسبی با پیکربندی کاملا مشابه با پیکربندی مورد بررسی در این پژوهش (پیکربندی ب) پیدا نشد، ناگزیر به اعتبارسنجی بر اساس پیکربندی کوی و زو [۳۸] هستیم. درنتیجه، معادلات مربوط به پیکربندی (ب) برای تطابق با این پیکربندی باید کمی اصلاح شوند. روابط اصلاحشده و مورد استفاده برای اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شدهاند. در آزمایش کوی و زو [۳۸] مقادیر تابش، دمای محیط و سرعت باد به ترتیب ۸۷۰ وات بر مترمربع ، ۱۵/۵ درجه سانتی گراد و ۰/۵ متر بر ثانیه بود. مقایسه بین دمای فتوولتاییک، راندمان الکتریکی و راندمان حرارتی محاسبه شده توسط مدل عددی حاضر و کار آزمایشی کوی زو [۳۸] در جدول ۵ ارائه شدهاست که صحت شبیه سازی حاضر را نشان

میدهد. با توجه به جدول ۵، حداکثر خطا ۴ درصد است که میتواند ناشی از فرضیاتی همچون انتقال حرارت یک بعدی، صرفنظر کردن از تبادل تابش بین سطوح شیشهای و مستقل از دما درنظر گرفتن خصوصیات ترموفیزیکی برخی از اجزای سیستم باشد.

همچنین، ازآنجایی که تاکنون استفاده از مواد تغییرفازدهنده بهعنوان فیلتر طیفی در سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی چه بهصورت عددی و چه بهصورت تجربی مورد بررسی قرار نگرفتهاست، امکان اعتبارسنجی سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندی شامل فیلتر طیفی ماده تغییرفازدهنده وجود ندارد. بااینحال برای نشاندادن صحت مدل ارائهشده برای ماده تغییرفازدهنده، سیستم دوجداره شیشهای حاوی ماده تغییرفازدهنده بررسی شد که در مراجع موجود برای استفاده در ساختمان مورد مطالعه قرار گرفتهاست و روابط حاکم آن مشابه با روابط (۱۰) تا (۱۲) است؛ با این تفاوت که جدارههای شیشهای بهجای تبادل حرارت با فتوولتاییک و نانوسیال با هوای محیط داخل و خارج ساختمان تبادل حرارت دارند. برای اعتبارسنجی این سیستم از نتایج تجربی گویا و همکاران [۲۵] استفاده شدهاست. تغییرات ساعتی تابش و دمای هوای بیرون و همچنین مقایسه بین دمای جدار شیشهای داخلی بهدستآمده از مطالعه حاضر

جدول ۴. روابط مورد استفاده برای اعتبارسنجی بر اساس پیکربندی مورد بررسی کوی و زو [۳۸] Table 4. Relationships used for validation based on the configuration investigated by Cui and Zhu [38]

معادله	جزء
$\rho_g c_{p,g} \delta_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = C \alpha_g I_0 + \left(h_{c,g-a} + h_{r,g-s}\right) \left(T_a - T_g\right) + h_{nf-g} \left(T_{nf} - T_g\right)$	جدار شیشهای
$\rho_{of}c_{p,of}\delta_{of}\frac{\partial T_{of}}{\partial t} = \tau_g \alpha_{nf}I_0 + h_{nf-g}\left(T_g - T_{nf}\right) + h_{nf-pv}\left(T_{pv} - T_{nf}\right) - \frac{\dot{m}_{nf}c_{nf}}{w}\frac{dT_{nf}}{dy}$	نانوسيال
$\rho_{pv}c_{p,pv}\delta_{pv}\frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = C\tau_g\tau_{nf}\alpha_{pv}\left(1-\eta_{pv}^*\right)I_0 + h_{nf-pv}\left(T_{nf}-T_{pv}\right) + h_{pv-i}\left(T_i-T_{pv}\right)$	فتوولتاييك
$\rho_i c_{p,i} \delta_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = h_{pv-i} \left(T_{pv}^t - T_i \right) + h_{i-a} \left(T_a - T_i \right)$	عايق

جدول ۵. مقایسه بین نتایج شبیهسازی پژوهش حاضر و نتایج تجربی کوی و زو [۳۸]

 Table 5. Comparison between results of present simulation and Cui and Zhu [38] experimental work

درصد خطا (./)	کوی و زو [۳۸]	پژوهش حاضر	پارامتر
١/١	۳۷/۳	۲۷	دمای فتوولتاییک (C°)
۴	V/Δ	۲/۲	افزایش دمای نانوسیال (٪)
١/۴	۱ <i>۴</i> /۷	14/0	بازده الکتریکی (٪)
١/۵	41/1	46/0	بازده حرارتی (٪)

تغيير فاز دهنده

۴-۱- ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده

شکل ۷ ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده

تغییرفازدهنده را برای حالت جامد و مایع ماده تغییرفازدهنده نشان می دهد. محدوده طیفی ایده آل فتوولتاییک که مطلوب است توسط

فیلتر طیفی بهخوبی عبور داده شود با رنگ آبی مشخص شدهاست.

هر چه فیلتر، تابشی که خارج از این محدوده طیفی قرار دارد را بیشتر

جذب کند به حالت ایدهآل نزدیکتر می شود. همان طور که در شکل

۷ مشخص است، زمانی که ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع قرار

و اندازه گیری شده توسط گویا و همکاران [۲۵] در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، توافق خوبی بین نتایج شبیه سازی حاضر و نتایج آزمایشی گویا و همکاران [۲۵] مشاهده می شود که صحت مدل حاضر را تأیید می کند.

۴- نتایج و بحث

در ادامه پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده، نتایج مدل سازی ارائه شده است. برای بررسی اثر هر پارامتر، پارامتر موردنظر تغییر داده شده است و بقیه یار امترها ثابت در نظر گرفته شده اند.

36 Radiation [25] 800 Ambient temperature [25] 34 700 Indoor glass temperature-experimental [25] Indoor glass temperature-present study 32 Radiation (W/m²) 600 Temperature (°C 30 500 28 400 26 300 24 200 22 100 0 20 8 10 12 14 18 20 22 24 2 4 6 16 0 Time (hr)

شکل ۶. تغییرات ساعتی تابش، دمای محیط و مقایسه تغییرات ساعتی دمای شیشه در محیط داخلی بدست آمده از مدل حاضر و دادههای اندازهگیریشده توسط گویا و همکاران [۲۵]

Fig. 6. The hourly variation of irradiance, ambient temperature and comparison of hourly variations of indoor glass temperature obtained from the present model and measured data [25]



شکل ۷. ضریب عبور کلی فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد و مایع Fig. 7. The transmittance of nanofluid/phase change material spectral splitting unit at solid and liquid states

دارد، فیلتر پیشنهادی در محدوده طیفی فتوولتاییک ضریب عبور بالای ۸/۸ را دارد و خارج از این محدوده میزان عبور تابش بسیار کمتر است. اما زمانی که ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد قرار دارد میزان عبور در کل طیف تابش کاهش پیدا می کند، بهطوری که در محدوده طیفی فتوولتاییک ضریب عبور به حدود ۲/۴ می سد. البته زمانی که تابش خورشید در دسترس است به دلیل تمرکز تابش ماده تغییرفازدهنده در مدت زمان کوتاهی مایع می شود. هر چه نسبت تمرکز تابش بیشتر باشد این زمان کاهش پیدا می کند.

۴-۲- عملکرد دینامیک

مدلی که در این پژوهش ارائه شده، یک مدل دینامیک است تا تأثیر زمان و تغییر پارامترهای مختلف با زمان را بر عملکرد سیستم فتوولتاییک/حرارتی نشان بدهد. در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با

پیکربندی (ج) ماده تغییرفازدهنده بهعنوان جزئی از فیلتر طیفی وجود دارد که میتواند با توجه به شرایط محیطی در طول زمان تغییر فاز بدهد، درنتیجه میزان عبور از فیلتر طیفی و عملکرد سیستم دچار تغییر قابلتوجهی میشود. برای بررسی این تغییرات بسیار مهم بود تا فاکتور زمان در مدلسازی لحاظ شود. شکل ۸ تغییرات دمای فتوولتاییک، دمای فیلتر طیفی مایع (نانوسیال) و دمای سیال خنک کن (آب) با زمان را در طی ۱۰۰ دقیقه برای سه پیکربندی مورد مطالعه در این بررسی شامل سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی (سیستم الف)، سیستم فتوولتاییک/حرارتی با فیلتر طیفی نانوسیال نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده (سیستم ج) نشان میدهد. همان طور که از شکل ۸ مشخص است با قرار گرفتن سیستمها در معرض تابش



شکل ۸. تغییرات دمای فتوولتاییک، دمای نانوسیال (فیلتر طیفی) و سیال خنککن با زمان در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج (یا A، G و C)



محیطی شامل تابش، دمای محیط، دمای ورودی سیال و غیره ثابت در نظر گرفتهشدهاند، سیستمها به حالت پایا^۱ می سند. سیستم الف به سرعت در کمتر از ۳ دقیقه پایا می شود، درنتیجه برای سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی میتوان از مدلهای پایا به جای دینامیک استفاده کرد. تمامی اجزای سیستم ب در کمتر از ۲۰ دقیقه به حالت پایا می سند اما زمان رسیدن به پایایی در سیستم ج به علت تغییر حالت ماده تغییرفازدهنده از جامد به مایع حدود یک ساعت به طول می انجامد. دمای ماده تغییرفازدهنده با جذب تابش افزایش می یابد تا به دمای تغییر فاز خود برسد، سپس شروع به مایع شدن می کند و پس از اینکه کاملا مایع شد دمای آن تا زمانی که به حالت پایا برسد زیاد می شود. چون که در طول پروسه تغییر فاز میزان عبور تابش از ماده تغییرفازدهنده نیز تغییر می کند، دمای اجزای دیگر شامل مانوسیال، فتوولتاییک و سیال خنک کن هم متأثر از این تغییرات می شوند.

در سیستمهای ب و ج که دارای فیلتر طیفی هستند دمای فتوولتاييك بسيار كمتر از سيستم الف است. علت اين امر جذب بخشی از طیف تابش بهویژه در خارج از محدوده طیفی ایدهآل فتوولتاييك توسط فيلتر طيفى است. ميزان تابش جذبشده توسط فیلتر ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده بیشتر از فیلتر نانوسیالی است، درنتیجه دمای فتوولتاییک در سیستم ج بسیار کمتر است. هر چه دمای فتوولتاییک در طول عملکرد کمتر باشد برای تابش دریافتی يكسان توسط سلولهاى فتوولتاييك بازده الكتريكي بيشتر خواهد بود و عمر مفید سلولها نیز افزایش خواهد یافت. این مسئله بهویژه در سیستمهای دارای تمرکز تابش که دمای فتوولتاییک بسیار بالا میرود اهمیت زیادی دارد. پس از حیث دمای فتوولتاییک، سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی عملکرد بسیار خوبی دارد. همچنین با توجه به شکل ۸ دمای فیلتر طیفی مایع یا همان نانوسیال در سیستم ج پس از رسیدن به پایایی حدود ۳۵ درجه سانتی گراد بیشتر از سیستم ب است و به بیش از ۱۰۰ درجه سانتی گراد می سد. دمای سیال خنک کن آب که برای استخراج حرارت از فتوولتاییک و کاهش دمای آن در زیر فتوولتاییک جریان دارد نیز متناسب با دمای فتوولتاییک در سیستم الف بیشترین مقدار (۳۶ درجه سانتی گراد) و در سیستم ج کمترین مقدار را دارد. دمای قابل استحصال از سیال خنککن

شكل ۹ تغييرات بازده انرژى الكتريكي، حرارتي و كلى را طى ۱۰۰ دقیقه نشان میدهند. بازده انرژی الکتریکی در سیستم الف و ب به دلیل افزایش دمای فتوولتاییک ابتدا کاهش می یابد و پس از مدت کوتاهی که سیستم پایا شد ثابت باقی میماند. در سیستم ج به دلیل افزایش ضریب عبور ماده تغییرفازدهنده در طول تغییر حالت از جامد به مایع، میزان تابشی که به سلولهای فتوولتاییک میرسد افزایش مییابد، درنتیجه بازده انرژی الکتریکی نیز زیاد می شود تا جایی که ماده تغییرفازدهنده کاملا مایع می شود. پسازآن که ماده تغییرفازدهنده کاملا مایع شد ضریب عبور ثابت میماند و به دلیل افزایش دمای فتوولتاییک بازده انرژی الکتریکی کم میشود تا به حالت پایا برسد. سیستم الف بیشترین بازده انرژی الکتریکی را دارد چون فیلتر طیفی ندارد و درنتیجه میزان تابش دریافتی توسط فتوولتاییک برخلاف سیستمهای دارای فیلتر طیفی کاهش نمییابد. به دلیل عبور بسیار بالای تابش توسط ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع، اختلاف بازده انرژی الکتریکی سیستم ب و ج کم و حدود یک درصد است. بازده انرژی حرارتی به دو عامل دمای سیال و دبی جرمی وابسته است. بازده حرارتی کل در سیستمهای دارای فیلتر طیفی از مجموع بازده حرارتي بخش فيلتر طيفي وبخش خنك كننده محاسبه می شود. در اینجا دبی جرمی سیال خنککن ده برابر نانوسیال در فیلتر طیفی در نظر گرفته شده تا دمای خروجی بالایی از نانوسیال در کنار دمای پایینی از فتوولتاییک بهدست آید. درنتیجه این دبی زیاد سیال خنک کن و دمای بالاتر سیال خنک کن در سیستم الف در مقایسه با دبی بسیار کم نانوسیال در سیستم ب و ج، بازده حرارتی در

کم است و چون در تماس حرارتی با فتوولتاییک است افزایش آن به قیمت افزایش دمای فتوولتاییک تمام میشود. در سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی هر دو جنبه حرارت و الکتریسیته مهم هستند. هر چه دمای سیال خروجی از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بیشتر باشد، انرژی حرارتی باکیفیت بالاتری در اختیار خواهیم داشت که میتواند علاوه بر مصارف خانگی نیاز برخی از صنایع را نیز برطرف کند. با استفاده از فیلتر طیفی قادر خواهیم بود که به دمای خروجی بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد دست پیدا کنیم که به دلیل عدم تماس حرارتی با فتوولتاییک منجر به افزایش دمای آن نمیشود. درنتیجه سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی ازنظر دستیابی به سیال انتقال حرارت با دمای بالا عملکرد بهتری در مقایسه با سایرین دارد.

¹ Steady state

سیستم الف بیشتر از بازده حرارتی کل در سیستم ب و ج است ولی این اختلاف بعد از پایایی سیستمها بسیار کاهش مییابد و به حدود ۲٪ میرسد. بازده انرژی کلی مجموع بازده انرژی الکتریکی و حرارتی است. درنتیجه برای هر سه پیکربندی الف، ب و ج تا رسیدن به حالت پایا افزایش مییابد. سیستم الف به دلیل بازده انرژی الکتریکی و حرارتی بیشتر، بالاترین بازده انرژی را به خود اختصاص میدهد. درنتیجه از دیدگاه انرژی سیستم الف یا همان سیستم فتولتاییک/ حرارتی معمولی عملکرد بهتری دارد.

تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و اگزرژی تلفشده با گذشت زمان در شکل ۱۰ ترسیم شدهاست. تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی مشابه با بازده انرژی الکتریکی است. بازده اگزرژی حرارتی به دلیل افزایش دمای سیال خروجی تا حالت پایایی افزایش مییابد و پسازآن بدون تغییر میماند. بازده اگزرژی حرارتی برخلاف بازده انرژی حرارتی بیشتر متأثر از دمای سیال خروجی است. به همین

علت بازده اگزرژی حرارتی سیستم ج به دلیل افزایش قابل ملاحظه دمای خروجی نانوسیال در فیلتر طیفی ترکیبی پس از حدود ۲۰ دقیقه بیشتر از سایرین میشود. بازده اگزرژی کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی که از مجموع بازده اگزرژی الکتریکی و حرارتی آن به دست میآید پس از حدود ۴۰ دقیقه از بازده اگزرژی سیستمهای الف و ب پیشی میگیرد. تغییرات اگزرژی تلفشده کاملا برعکس بازده اگزرژی است و در نتیجه اگزرژی تلفشده سیستم دارای فیلتر برکیبی پس از ۴۰ دقیقه به دلیل اگزرژی حرارتی مفید بالای این سیستم کمتر از دو سیستم دیگر میشود. پس میتوان گفت که عملکرد سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی از دیدگاه اگزرژی مناسبتر است.

۴-۳- تأثیر نسبت تمرکز

80 22 Electrical energy efficiency (%) Thermal energy efficiency (%) 70 20 60 18 50 40 16 30 14 System A System A 20 System B System B 12 10 System C System C 0 10 20 40 60 80 0 100 0 20 40 60 80 100 Time (min) Time (min) 100 **Total energy efficiency** 80 60 40 System A 20 System B System C 0 80 100 0 20 40 60 Time (min)

شکل ۱۱ تأثیر نسبت تمرکز بر دمای فتوولتاییک، دمای نانوسیال

شکل ۹. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی با زمان در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج (یا A، B و C) Fig. 9. Variation of electrical, thermal and total energy efficiencies with time for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

خروجی بیش از دو برابر در مقایسه با سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی دست پیدا کند. البته باید توجه داشت که با توجه به دمای جوش آب، سیال پایه آب مورد استفاده در نانوسیال برای دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد مناسب نیست و باید با سیالات پایهای با دمای جوش بالاتر که خواص نوری مناسبی دارند، جایگزین شود.

شکلهای ۱۲ و ۱۳ به ترتیب اثر نسبت تمرکز بر بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی را پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه نشان میدهند. با افزایش نسبت تمرکز در تمامی سیستمها، بازده الکتریکی ابتدا به علت افزایش تابش دریافتی توسط سلولهای فتوولتاییک افزایش مییابد ولی از نسبت تمرکز معینی به بعد اثر افزایش دمای فتوولتاییک براثر افزایش تابش دریافتی غلبه میکند و منجر به کاهش بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی میشود. بازده انرژی حرارتی با دما نسبت مستقیم و با نسبت تمرکز نسبت عکس دارد. تأثیر این (فیلتر طیفی مایع) و دمای سیال خنک را پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه (در حالت پایا) نشان می دهد. با افزایش نسبت تمرکز به دلیل افزایش تابش دریافتی توسط اجزای سیستم، دمای آنها افزایش می یابد. شیب منحنی دمای فتوولتاییک و سیال خنککن در سیستم فتولتاییک/ حرارتی معمولی (سیستم الف) و شیب منحنی دمای نانوسیال در سیستم دارای فیلتر ترکیبی (سیستم ج) بیشتر از بقیه است؛ زیرا در سیستم الف تابش مستقیما به فتوولتاییک برخورد میکند اما در سیستم ج ابتدا از فیلتر طیفی عبور می نماید. در نسبتهای تمرکز قابل ملاحظه ای می یابد. برای نمونه در نسبت تمرکز ۵۰ می توان به دمایی در حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد دست پیدا کرد. همچنین با توجه به شکل ۱۱ مشخص است که سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی می تواند به دمای فتوولتاییک تا ۵۰٪ کمتر و دمای سیال



شکل ۱۰. تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و اگزرژی تلفشده با زمان در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج (یا A، B و C)

Fig. 10. Variation of electrical, thermal and total exergy efficiencies and destroyed exergy with time for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

فتوولتاییک/حرارتی معمولی تا نسبت تمرکز ۱۸ افزایش مییابد و سپس به علت کاهش بازده الکتریکی، دچار افت میشود. بازده کل سیستم دارای فیلتر طیفی نانوسیال تقریبا ثابت میماند و بازده کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده دچار افزایش اندکی میشود. اما بازده اگزرژی کل هر سه سیستم به علت افزایش قابل توجه بازده اگزرژی حرارتی افزایش مییابد. بازده اگزرژی کل سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی در نسبتهای تمرکز بالا بسیار بیشتر از سیستمهای دیگر است. تغییرات اگزرژی تلفشده بالا بسیار بیشتر از سیستمهای دیگر است. تغییرات اگزرژی تلفشده افزایش مییابد. سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده در نسبتهای تمرکز بیشتر از ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده در نسبتهای تمرکز بیشتر از دو عامل سبب شده که بازده انرژی حرارتی تغییرات کمی با افزایش نسبت تمرکز داشته باشد. در سیستم الف بازده انرژی حرارتی به دلیل دمای بالای سیال خنککن خروجی دچار افزایش اندکی با نسبت تمرکز میشود که این میزان افزایش در نسبتهای تمرکز بالاتر از ۲۰ قابل صرفنظر است. در سیستم ب نیز تغییرات بازده حرارتی کمتر از ۵/۰ درصد است. در سیستم ج به دلیل افزایش قابلملاحظه دما با نسبت تمرکز بازده انرژی حرارتی افزایش مییابد و در نسبتهای تمرکز بالا شاهد افزایش شیب منحنی بازده انرژی حرارتی هستیم. در بازده اگزرژی حرارتی که توسط معادله (۳۷) محاسبه میشود اثر بازده اگزرژی حرارتی با افزایش نسبت تمرکز میشود. اختلاف بین بازده اگزرژی حرارتی سیستم ج و سیستمهای الف و ب با افزایش بازده اگزرژی کرارتی سیستم ج و سیستمهای الف و ب با افزایش



شکل ۱۱. تغییرات دمای فتوولتاییک، دمای نانوسیال (فیلتر طیفی) و سیال خنک کن با نسبت تمر کز در سیستم فتوولتاییک/حرار تی با پیکربندی الف، ب و ج (یا A، B و C)



مشابه با بازده اگزرژی با افزایش نسبت تمرکز اختلاف اگزرژی تلفشده سیستم دارای فیلتر طیفی ترکیبی با دو سیستم دیگر افزایش مییابد. دارد. در نتیجه میتوان از دیدگاه اگزرژی استدلال کرد که سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی گزینه مناسبی برای نسبتهای تمرکز زیاد (بیشتر از ۱۵) است. برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از مدلسازی، مقادیر دمای فتوولتاییک و دمای سیال خروجی به همراه بازدههای انرژی در جدول ۶ و نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی طیفی ترکیبی (پیکربندی ج) در نسبت تمرکز ۲۰ دمای فتولتاییک محود ۴۷ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی (پیکربندی الف) و حدود ۲۵ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتاییک/ حرارتی دارای فیلتر نانوسیالی (پیکربندی ب) کاهش مییابد. دمای زر جیوی نانوسیال (فیلتر طیفی) در سیستم ج حدود ۵۷ درصد بیشتر از سیستم ب است. بازده انرژی کل سیستم ج به ترتیب حدود ۷ و ۲

درصد کمتر از سیستم الف و سیستم ب میباشد و بازده اگزرژی آن به ترتیب حدود ۱۴ و ۲۲ درصد بیشتر از سیستم الف و سیستم ب است. با استفاده از سیستم ج اگزرژی تلف شده به ترتیب به میزان ۵ و ۷ درصد در مقایسه با سیستم الف و سیستم ب در نسبت تمرکز ۳۰ کاهش مییابد.

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده به همراه سیستم فتوولتاییک/ حرارتی معمولی و سیستم فتوولتاییک/حرارتی با فیلتر طیفی نانوسیال تحت تابش متمرکز مدلسازی شدند و عملکرد آنها از دیدگاه انرژی و اگزرژی با یکدیگر مقایسه گردید. ماده تغییرفازدهنده کلسیم کلرید هگزا هیدرات و نانوسیال نقره/آب در فیلتر طیفی و آب بهعنوان خنککن مورد استفاده قرار گرفتند. خواص نوری ماده تغییرفازدهنده



شکل ۱۲. تغییرات بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی با نسبت تمرکز در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج (یا A، A و) Fig. ۱۲. Variation of electrical, thermal and total energy efficiencies with concentration ratio for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system



شکل ۱۳. تغییرات بازده اگزرژی الکتریکی، حرارتی و کلی و اگزرژی تلفشده با نسبت تمرکز در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج (یا A، B و C)

Fig. 13. Variation of electrical, thermal and total exergy efficiencies and destroyed exergy with concentration ratio for configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system

جدول ۶. دمای فتوولتاییک، دمای سیال خروجی و بازده انرژی الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج در نسبت تمرکز ۳۰

Table 6. Photovoltaic temperature, outlet fluid temperature and electrical, thermal and total energy efficiencies of
configurations A, B and C at a concentration ratio of 30

η_{tot} (%)	η_{th} (%)	η_{ele} (%)	$T_{cf}(^{\circ}\mathrm{C})$	$T_{of}(^{\circ}\mathrm{C})$	T_{pv} (°C)	پيكربندى
٨٩/١	۶٩/۴	۱۹/۲	42/9	-	٩٩/۵	الف
٨۴/۵	۶۸/۱	18/4	۳۵/۹	٨٩/۵	VY/V	ب
٨٣/١	8V/V	10/4	۳•/۷	١٣٩	$\Delta \Upsilon / \Lambda$	5

جدول ۷. اگزرژی، بازده اگزرژی واگزرژی تلفشده سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پیکربندیهای الف، ب و ج در نسبت تمرکز ۳۰

Table 7. Exergy, exergy efficiency and destroyed exergy of configurations A, B and C of photovoltaic/thermal system ata concentration ratio of 30

$\dot{E}x_{loss,tot}$ (W)	$\dot{Ex}_{loss,fr}(W)$	$\dot{Ex}_{loss,th}(W)$	$\dot{E}x_{th}(W)$	$\dot{E}x_{ele}(W)$	$\dot{E}x_{in}(W)$	$\dot{\varepsilon}_{tot}(\%)$	$\dot{\varepsilon}_{th}(\%)$	$\dot{\varepsilon}_{ele}(\%)$	پيكربندى
1884/9	• / \	1884/1	۱۰۵/۱	477/2	2242/1	۲۵/۷	۴/۷	71	الف
14.1/2	• / ١	18.1/1	۱۴۷/۵	347/V	2242/1	24/2	818	۱۷/۶	ب
۱۵۸۰/۳	• / \	101.12	K9K/8	۳۶۹/۳	2242/1	۲۹/۵	۱۳	۱۶/۵	5

در دو حالت جامد و مایع و خواص نوری نانوسیال شبیهسازی شدند. نتایج زیر از مطالعه حاضر به دست آمد:

• فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده به دلیل نشان دادن عبور تابش مناسب در محدوده طیفی ایدهآل فتوولتاییک و جذب مناسب تابش در خارج از این محدوده، میتواند بهعنوان گامی مؤثر برای نزدیکشدن به فیلتر طیفی ایدهآل قلمداد شود.

• سیستم فتوولتاییک/حرارتی دارای فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده کمترین دمای فتوولتاییک و بیشترین دمای سیال خروجی را در مقایسه با دو سیستم بررسی شده دیگر به خود اختصاص داد.

· سیستم فتوولتاییک/حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی قادر است به دمای سیال خروجی بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد دست یابد درحالیکه دمای فتوولتاییک زیر ۵۰ درجه سانتیگراد نگهداشتهمی شود.

· از دیدگاه انرژی سیستم فتوولتاییک/حرارتی معمولی بهترین عملکرد را داشت، درحالیکه از دیدگاه اگزرژی سیستم فتوولتاییک/ حرارتی با فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده بهترین عملکرد را از خود نشان داد.

۰ استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی نانوسیال-ماده تغییرفازدهنده در نسبتهای تمرکز بیشتر از ۱۵ پیشنهاد می شود چون بازده اگزرژی با افزایش نسبت تمرکز افزایش قابل ملاحظهای در مقایسه دو سیستم دیگر دارد.

 استفاده از فیلتر طیفی ترکیبی به جای فیلتر نانوسیالی در نسبت تمرکز ۳۰، دمای فتولتاییک را حدود ۲۵ درصد کاهش، دمای فیلتر طیفی را حدود ۷۵ درصد افزایش، بازده اگزرژی را حدود ۲۲ درصد افزایش و اگزرژی تلف شده را حدود ۷ درصد کاهش میدهد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

- m² مساحت، A د فاکتور دیود A'
- نسبت تمرکز C
- J kg⁻¹K⁻¹، ظرفیت حرارتی \mathcal{C}_p
 - m قطر، d
 - e بار الکترون، C

P⊿ افت هد فشاری، Pa

شرايط تنظيمشده

۶ ضریب گسیل

خ بازده اگزرژی

η بازده انرژی

بازده فتوولتاييک تنظيم شده $\eta^*_{\ pv}$

- *K* شاخص خاموشی
 - ل طول موج، m
- ر طول موج تابش خورشیدی متناظر با گاف انرژی سلول λ_g فتوولتاییک، m
 - کسینوس جهتی *μ*
 - kgm⁻³ چگالی، β
 - ضريب پراکندگی $\sigma_{\!_s}$
 - τ ضريب عبور
 - شيب كلكتور heta
 - کسر حجمی نانوذرات ϕ
 - ل خامت نوری χ
 - تک پراکندگی آلبدو ω

زيرنويس

a	هوا
abs	جاذب حرارتي
bf	سيال پايە
bp	صفحه پشتی
cf	سیال خنککن
d	پراکنده
ele	الكتريكى
ſ	سيال
g	شيشه
i	عايق
l	مايع
nf	نانوسيال
np	نانوذره
00	مدار باز
of	فيلتر طيفى مايع
рст	ماده تغييرفازدهنده
pv	فتوولتاييك
S	جامد، آسمان
SC	اتصال كوتاه
th	حرارتى
t	كلى
بالانويس	

مراجع

- X. Ju, C. Xu, X. Han, X. Du, G. Wei, Y. Yang, A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology, Applied energy, 563-534 (2017) 187.
- [2] F. Crisostomo, N. Hjerrild, S. Mesgari, Q. Li, R.A. Taylor, A hybrid PV/T collector using spectrally selective absorbing nanofluids, Applied energy, 14-1 (2017) 193.
- [3] N.E. Hjerrild, S. Mesgari, F. Crisostomo, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor, Spectrum splitting using gold and silver nanofluids for photovoltaic/thermal collectors, in: 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), IEEE, 2016, pp. 3523-3518.
- [4] N.E. Hjerrild, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor, Exploring the effects of heat and UV exposure on glycerol-based Ag-SiO2 nanofluids for PV/T applications, Renewable Energy, 274-266 (2018) 120.
- [5] J. Jin, D. Jing, A novel liquid optical filter based on magnetic electrolyte nanofluids for hybrid photovoltaic/ thermal solar collector application, Solar Energy, 155 61-51 (2017).
- [6] N. Brekke, J. Dale, D. DeJarnette, P. Hari, M. Orosz, K. Roberts, E. Tunkara, T. Otanicar, Detailed performance model of a hybrid photovoltaic/thermal system utilizing selective spectral nanofluid absorption, Renewable Energy, 693-683 (2018) 123.
- [7] T. Otanicar, J. Dale, M. Orosz, N. Brekke, D. DeJarnette, E. Tunkara, K. Roberts, P. Harikumar, Experimental evaluation of a prototype hybrid CPV/T system utilizing a nanoparticle fluid absorber at elevated temperatures, Applied energy, 1539-1531 (2018) 228.
- [8] L. Huaxu, W. Fuqiang, L. Dong, Z. Jie, T. Jianyu, Optical properties and transmittances of ZnO-containing nanofluids in spectral splitting photovoltaic/thermal systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, 678-668 (2019) 128.
- [9] M. Du, G. Tang, T. Wang, Exergy analysis of a hybrid PV/T system based on plasmonic nanofluids and silica

processes, fourth editio, in, John Wiley & Sons, 2013.

- [21] T.L. Bergman, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, A.S. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 2011.
- [22] K. Hollands, T. Unny, G. Raithby, L. Konicek, Free convective heat transfer across inclined air layers, Journal of Heat Transfer, (193-189 (1976.
- [23] R.K. Shah, A.L. London, Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data, Academic press, 2014.
- [24] M. Muhieddine, E. Canot, R. March, Various approaches for solving problems in heat conduction with phase change, (2009).
- [25] F. Goia, M. Perino, M. Haase, A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations, Energy and Buildings, 153-141 (2012) 54.
- [26] J.R. Howell, M.P. Menguc, R. Siegel, Thermal radiation heat transfer, CRC press, 2015.
- [27] M.F. Modest, Radiative heat transfer, Academic press, 2013.
- [28] H. Weinläder, Optische Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien zur Tageslichtnutzung, (2003).
- [29] A.K. González-Alcalde, E.R. Méndez, E. Terán, F.L. Cuppo, J. Olivares, A. García-Valenzuela, Reflection of diffuse light from dielectric one-dimensional rough surfaces, JOSA A, 382-373 (2016) (3)33.
- [30] G. Kortüm, Reflectance spectroscopy: principles, methods, applications, Springer Science & Business Media, 2012.
- [31] A. Abdelrazik, F. Al-Sulaiman, R. Saidur, Optical behavior of a water/silver nanofluid and their influence on the performance of a photovoltaic-thermal collector, Solar Energy Materials and Solar Cells, (2019) 201 110054.
- [32] C.F. Bohren, D.R. Huffman, Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley & Sons, 2008.
- [33] T. Mittal, S. Saroha, V. Bhalla, V. Khullar, H. Tyagi, R.A. Taylor, T.P. Otanicar, Numerical study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector using

aerogel glazing, Solar Energy, 511-501 (2019) 183.

- [10] Y. He, Y. Hu, H. Li, An Ag@ TiO2/ethylene glycol/ water solution as a nanofluid-based beam splitter for photovoltaic/thermal applications in cold regions, Energy Conversion and Management, 111838 (2019) 198.
- [11] X. Han, X. Chen, Q. Wang, S.M. Alelyani, J. Qu, Investigation of CoSO-4based Ag nanofluids as spectral beam splitters for hybrid PV/T applications, Solar Energy, 394-387 (2019) 177.
- [12] M. Islam, A. Pandey, M. Hasanuzzaman, N. Rahim, Recent progresses and achievements in photovoltaicphase change material technology: A review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems, Energy Conversion and Management, 204-177 (2016) 126.
- [13] S. Chandel, T. Agarwal, Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1351-1342 (2017) 73.
- [14] H. Manz, P. Egolf, P. Suter, A. Goetzberger, TIM– PCM external wall system for solar space heating and daylighting, Solar energy, 379-369 (1997) (6)61.
- [15] D. Buddhi, S. Sharma, Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: a latent heat storage material, Energy conversion and management, (18)40 1984-1979 (1999).
- [16] F. Goia, M. Zinzi, E. Carnielo, V. Serra, Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit, Energy and Buildings, 312-302 (2015) 87.
- [17] J.C. Fan, Theoretical temperature dependence of solar cell parameters, Solar cells, 315-309 (1986) (3-2)17.
- [18] T. Otanicar, R. Taylor, C. Telang, Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 033124 (2013) (3)5.
- [19] T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, Solar Energy, (2)75 152-143 (2003).
- [20] J.A. Duffie, W.A. Beckman, Solar engineering of thermal

Transfer, 192-187 (1964) (2)86.

- [37] A. Farzanehnia, M. Sardarabadi, Exergy in Photovoltaic/ Thermal Nanofluid-Based Collector Systems, in: Exergy and Its Application-Toward Green Energy Production and Sustainable Environment, IntechOpen, 2019.
- [38] Y. Cui, Q. Zhu, Study of photovoltaic/thermal systems with MgO-water nanofluids flowing over silicon solar cells, in: 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2012, pp. 4-1.

nanofluids, in: ASME 4 2013th international conference on micro/nanoscale heat and mass transfer, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.

- [34] R.A. Taylor, T. Otanicar, G. Rosengarten, Nanofluidbased optical filter optimization for PV/T systems, Light: Science & Applications, 2012) (10)1) e-34e34.
- [35] N. Aste, C. del Pero, F. Leonforte, Water flat plate PVthermal collectors: a review, Solar Energy, -98 (2014) 102 115.
- [36] R. Petela, Exergy of heat radiation, Journal of Heat

چگونه به اين مقاله ارجاع دهيم F. Yazdanifard, M. Ameri , R. Taylor , Investigation of using hybrid nanofluid-phase change material spectral splitter in photovoltaic/thermal system, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4429-4454. DOI: 10.22060/mej.2020.18326.6800



بی موجعه محمد ا