

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 795-798 DOI: 10.22060/mej.2020.18160.6751

Thermal performance evaluation of a greenhouse solar dryer equipped with photovoltaic cells and phase change material

V. Fahmideh¹, F. Sarhaddi^{1*,} M. Hedayatizadeh¹, F. Sobhnamayan¹

¹Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran ² Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

ABSTRACT: The purpose of the present study is to investigate the performance evaluation of a greenhouse solar dryer equipped with photovoltaic cells and phase change material. The governing equations of problem are obtained by writing the energy balance for the various components of the system including photovoltaic module, greenhouse chamber air, crop, absorber plate and phase change material. In order to calculate the thermal and electrical parameters of the system including photovoltaic cell's temperature, the temperature of greenhouse chamber air, crop temperature, phase change material temperature, absorber plate temperature and electrical power, the governing equations on the system performance are solved by numerical methods. Also, a relation for the overall energy efficiency of the system is introduced. The modeling results of the present study are in good agreement with the experimental data of the previous literature. The results obtained for the typical day of Zahedan show that the phase change material by storing the system loss heat during the day and releasing it at night enables the crop drying process to continue well into the night so that the overall evaporation rate increases by about 38.76%. The maximum energy efficiency of the system is about 15%.

Review History:

Received: Mar. 25, 2020 Revised: Jun. 11, 2020 Accepted: Aug. 18, 2020 Available Online: Aug. 24, 2020

Keywords:

Greenhouse solar dryer Photovoltaic cell Phase change material Energy efficiency

1-Introduction

Solar drying is considered an old preservation method of agricultural products [1]. It benefits from free source of energy while the final product has high quality. Various designs of solar dryers are introduced among which, greenhouse solar dryers are favored due to their simple design and low cost of fabrication [2]. Berroug et al. [3] studied a greenhouse solar dryer in which north wall was loaded by Phase Change Material (PCM). They reported that the given dryer had less thermal and relative humidity fluctuations during winter. Tiwari e al. [4, 5] also claimed that the greenhouse solar dryer is a promising candidate for drying different agricultural products with short payback period of investment

In the current study, a solar greenhouse dryer equipped with phase change material and a PhotoVoltaic module (PV) is introduced. Hence, the PV meets the electrical need of ventilating fans and the PCM availability helps the drying to maintain through the night.

2- Geometry Description and Energy Efficiency

The greenhouse solar dryer mainly comprises a PV module, DC fans, the greenhouse drying chamber and PCM (Fig. 1).

The PV module generates electricity to run DC fans during sun radiation (generating forced mode of air flow inside the enclosure). Moreover, its position upon the greenhouse dryer, hinders the direct exposure of product to sun radiation. To

*Corresponding author's email: fsarhaddi @eng.usb.ac.ir



Fig. 1. Schematic diagram of the investigated greenhouse dryer in the present research

find the energy efficiency of the given dryer, it is required to thermally model the whole system for two different modes: charging and discharging of PCM i.e. daytime and nighttime, respectively. So, to perform the given analysis, it is essential to write the energy balance equation for each above-mentioned component for the two distinct conditions of PCM.

2-1- Charging mode energy efficiency

The energy efficiency of the system for the daytime was achieved as follows:

$$\eta_{en,day} = \frac{\left(\frac{I_t A_m \eta_{el} - p_{fan}}{0.38}\right) + h_{ew} A_{cr} (T_{cr} - T_r)}{A_m I(t) + \sum A_i I(i)}$$
(1)

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

while 0.38 in denominator is to turn the electrical energy into its thermal equivalent [6].

2-2- Discharging mode energy efficiency

The discharging mode-related efficiency is also given by

$$\eta_{en,night} = \frac{h_{ew}A_{cr}(T_{cr} - T_r)}{M_{pcm}C_{pcm}\frac{dT_{pcm}}{dt}}$$
(2)

3- Validation

To examine the accuracy and the precision of the performed analysis, the theoretical results were validated against experimental ones reported by Tiwari et al. [4]. The greenhouse solar dryer of Tiwari et al. [4] did not have any PCM, so the daytime theoretical results were only compared with those of it.

Fig. 2 graphically compares the theoretical results (denoted by sim) with those of experiment (denoted by exp) for temperatures of PV cells, product, air inside the



Fig. 2. Experimental and simulated temperature values of different components of the greenhouse dryer



Fig. 3. Experimental and simulated values of evaporation mass against time of testing

greenhouse and ambient.

Moreover, the mass of evaporation in case of theory and experiment is also shown in Fig. 3. As seen, the maximum average relative error is below 8 percent which shows the good agreement of theoretical results with those of experiment.

4- Results and Discussion

The effects of operating and design parameters on energy efficiency and amount of evaporation/removal of moisture from product are investigated. Hence, the solar radiation and ambient temperature of a typical day (6 July) experienced in Zahedan are chosen as climatic reference.

Based on Fig. 4, the PCM stays in charging mode for 7 hours (above 54°C) which is highly favorable and shows the drying potential of dryer during the off-sunshine.

Moreover, it is observed that only during 4 hours of the day, the temperature of PV module is above that of air inside the dryer. So, for cooling PV and heating the air inside the dryer, stream of air entering the enclosure can be guided beneath the PV module.



Fig. 4. Diagram of simulated temperatures of different components of the greenhouse solar dryer



Fig. 5. Evaporation mass of the moisture in greenhouse dryer affected by the presence and lack of PCM

Finally, in Fig. 5, the effect of application of PCM and lack of it on mass of moisture evaporated is depicted. It is seen that application of PCM is only significant during nighttime and it improves the rate of evaporation by 38.76 percent round-the-clock.

5- Conclusions

The investigated greenhouse dryer having PCM showed promising results in terms of capability for extending the time period of drying products during nighttime while the round-the-clock improvement in amount of evaporated mass was achieved 38.76%.

References

[1] C. Tiris, N. Ozbalta, M. Tiris, I. Dincer, Experimental testing of a new solar dryer, International Journal of Energy Research, 18 (1994) 483-490.

- [2] K. Lutz, W. Mühlbauer, J. Müller, G. Reisinger, Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones, Solar & Wind Technology, 4(4) (1987) 417-424.
- [3] F. Berroug, E. Lakhal, M. El Omari, M. Faraji, H. El Qarnia, Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall, Energy and Buildings, 43(11) (2011) 3027-3035.
- [4] S. Tiwari, G.N. Tiwari, Exergoeconomic analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer, Energy, 114 (2016) 155-164.
- [5] S. Tiwari, G.N. Tiwari, I.M. Al-Helal, Performance analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer, Solar Energy, 133 (2016) 421-428.
- [6] S. Nayak, G. Tiwari, Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods, Energy and Buildings, 41(8) (2009) 888-896.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

V. Fahmideh, F. Sarhaddi , M. Hedayatizadeh, F. Sobhnamayan, . Thermal performance evaluation of a greenhouse solar dryer equipped with photovoltaic cells and phase change material ,*Amirkabir J. Mech. Eng.*, *53*(*Special Issue 5*) (2021) 795-798



DOI: 10.22060/mej.2020.18160.6751

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۳۶۷ تا ۳۳۸۴ DOI: 10.22060/mej.2020.18160.6751

بررسی عملکرد حرارتی خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به سلولهای فتوولتائیک و ماده تغییرفازدهنده

وحيد فهميده'، فرامرز سرحدى (*، مهدى هدايتىزاده'، فاطمه صبحنمايان (

۰ – گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران ۲دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

خلاصه: هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد حرارتی سیستم خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به سلولهای فتوولتائیک و ماده تغییرفازدهنده می باشد. معادلات حاکم بر مسئله توسط نوشتن تعادل انرژی برای اجزا مختلف سیستم شامل مدول فتوولتائیک، هوای محفظه گلخانهای، محصول، صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده به دست آمده است. از یک مدل تجربی برای محاسبه توان الکتریکی مدول فتوولتائیک استفاده شده است. به منظور محاسبه پارامترهای حرارتی و الکتریکی سیستم شامل دمای سلول خورشیدی، دمای هوای محفظه گلخانهای، دمای محصول، دمای ماده تغییرفازدهنده، دمای صفحه جاذب و توان الکتریکی، معادلات حاکم بر عملکرد سیستم توسط روشهای عددی حل شده است. همچنین رابطهای برای بازده کلی انرژی سیستم معرفی شده است. نتایج مدلسازی تحقیق حاضر در توافق شده است. همچنین رابطهای برای بازده کلی انرژی سیستم معرفی شده است. نتایج مدلسازی تحقیق حاضر در توافق تغییرفازدهنده با ذخیره حرارت اتلافی سیستم در طول روز و با پس دادن آن در طول شب امکان ادامه فرایند خشک کردن تغییرفازدهنده با ذخیره حرارت اتلافی سیستم در طول روز و با پس دادن آن در طول شب امکان ادامه فرایند خشک کردن محصول در شب هنگام به خوبی فراهم می آورد به نحوی که میزان تبخیر کلی در حدود ۲۵% تولیش می باید. حداکش بازده انرژی سیستم در حدو ۲۵%

تاریخچه داوری: دریافت: ۰۶ /۰۱/ ۱۳۹۹ بازنگری: ۲۲ /۰۰/ ۱۳۹۹ پذیرش: ۲۸ /۰۵/ ۱۳۹۹ ارائه آنلاین:۰۲ /۰۶/ ۱۳۹۹

کلمات کلیدی: خشک کن خورشیدی گلخانهای سلول فتوولتائیک ماده تغییرفازدهنده بازده انرژی.

۱– مقدمه

خشک کردن به وسیله خورشید یکی از راههای قدیمی برای حفظ و ماندگاری بیشتر محصولات محسوب می شود [۱]. در خشک کردن طبیعی یا خورشید باز، محصولات بر کف زمین یا بتن قرار می گیرند. این محصولات در معرض آلودگیهای مختلف مثل گرد و غبار، آفات، یرندگان، جانوران و یا حشرات قرار دارند. امروزه تقاضا برای مواد غذايي خشکشده همچون محصولات کشاورزي و فرآوردههاي دريايي و گیاهان دارویی افزایش پیدا کرده است [۲]. معمولاً محصولاتی که به طور طبيعی خشک می گردند کيفيت استاندارد بين المللی آن ها بسیار پایین است. در واقع خشککردن محصولات کشاورزی روند کاهش رطوبت از آنها است. کاهش مقدار رطوبت محصولات عملکرد آنزیمها، باکتریها، قارچها وکیکها را کاهش میدهد. به منظور بهبود کیفیت و رنگ محصولات خشکشده، محققان روشهای مختلفی مثل اسپری خشککن، خشککردن مکانیکی، خشککن الکتریکی، خشککن خورشیدی و غیره را معرفی کردهاند. به واسطه افزایش سریع قیمت سوختهای فسیلی، اتمامپذیری و مسائل آلایندگی * نویسنده عهدهدار مکاتبات: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

آنها، انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع مفید انرژی مطرح شده است که میتواند در فرآیند خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد. خشک کنهای خورشیدی دارای مزایایی مختلفی همچون کاهش ضایعات ناشی از گرد و غبار، حفظ مواد مغذی موجود در محصولات و کوتاهبودن زمان خشک شدن میباشند [۱]. به طور کلی سه نوع سیستم خشک کن خورشیدی وجود دارد [۱]:

- خشککنهای خورشیدی مستقیم که محصولات به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار میگیرند و یا به صورت ترکیبی از تابش مستقیم خورشید و تابش منعکسشده استفاده میکنند.
- خشک کنهای خورشیدی غیرمستقیم که در آنها محصولات به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار نمی گیرند، اما هوای گرمشده که با استفاده از تابش خورشیدی تولید می شود از میان محصولات عبور داده می شود.
- خشککنهای خورشیدی ترکیبی که در آنها محصولات

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

به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار میگیرند و هوای گرمشده نیز در میان محصولات جریان مییابد.

خشککن گلخانهای در دسته خشککنهای خورشیدی مستقیم قرار دارد و همچنین گاهی اوقات در دسته خشککنهای خورشیدی ترکیبی قرار می گیرد. خشک کن خورشیدی گلخانهای کمهزینه است، ساخت آسان و طراحی سادهای دارد از این رو میتواند در هر بخش از جهان مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات تئوری و تجربی متعددی در خصوص بررسی عملکرد خشککنهای خورشیدی انجام شده است که در ادامه به برخی موارد اشاره می گردد. لوتز و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۷ به مطالعه روی عملکرد یک خشککن خورشیدی چند منظوره برای خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی از جمله میوهها، سبزیجات، گیاهان دارویی و غیره پرداختند. آنها خاطر نشان کردند که استفاده از خشککن خورشیدی زمان خشککردن را کاهش ميدهد. علاوه بر اين كيفيت محصول را نيز بهبود ميبخشد. همچنين در طول خشک کردن، محصول به طور کامل از باران، گرد و غبار، حشرات و حیوانات محافظت می گردد. بارنوال ۲ و تایواری [۴] در سال ۲۰۰۸ به طور تجربی به مطالعه و بررسی خشک کردن انگور با استفاده از خشككن گلخانهاى تركيبى فتوولتائيك-حرارتى پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که خشک کردن انگور در خشک کن گلخانهای سایهدار به مراتب بهتر از خشککردن در فضای باز میباشد. همچنین یک عبارت چندجملهای برای پیشبینی تبخیر رطوبت در حالت جابجایی اجباری معرفی کردند که تطابق خوبی با دادههای تجربی داشت. بیروگ و همکاران [۵] درسال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد حرارتی یک گلخانه که دیوار شمالی آن دارای ماده تغییرفازدهنده بود پرداختند. ماده تغییرفازدهنده آنهاCaC۱۲ ۶Η۲Ο بود. نتایج آنها نشان داد که گلخانه دارای ماده تغییرفازدهنده در دوره زمستان نوسانات دمایی و رطوبت نسبی کمتری دارد. الخدرویی⁶ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ به طور تجربي عملكرد خشككن خورشيدي گلخانهاي حالت تركيبي برای خشککردن فلفل قرمز و انگور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقيق آنها نشان داد كه مدت زمان خشككردن توسط خشككن گلخانهای برای رسیدن به فلفل قرمز دارای رطوبت ۱۶% در حدود

۷ ساعت نسبت به خشککردن در فضای باز کمتر است. همچنین رسیدن به انگور دارای رطوبت ۱۸% در حالت خشک کردن توسط خورشید در فضای باز۷۶ ساعت طول میکشد در حالی که در خشککن گلخانهای تنها ۵۰ ساعت زمان میبرد. تایواری و تایواری [۷] در سال ۲۰۱۶ به تحلیل عملکرد سیستم خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به سلولهای فتوولتائیک به صورت تجربی و تئوری پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که انرژی حرارتی خشککردن تئوری و تجربی به ترتیب۱/۲۹kW/hو ۲/۳۰kW/h میباشد. تایواری و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ به تحلیل اقتصادی خشککن خورشیدی مجهز به سلولهای فتوولتائیک پرداختند. آنها دمای محصول، دمای هوای محفظه و دمای سلول فتوولتائیک را توسط یک مدل تئوری محاسبه کردند. همچنین میزان نرخ بازگشت سرمایه را برای سه محصول خشکشده انگور، موز و خرما محاسبه کردند. تحقیقات تایواری و همکاران [۷ و ۸] نشان داد که خشککن خورشیدی گلخانهای از پتانسیل بالایی برای خشک کردن محصولات مختلف با دوره بازگشت سرمایه مناسب برخوردار است. مهلا و یاداو^۷ [۹] در سال ۲۰۱۷ به تحلیل انرژی و اکسرژی سیستم تهویه مطبوع خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده با استفاده از چرخ خشککننده در طول شب پرداختند. در نرخهای پایین جریان هوا، سیستم به ترتیب ضریب حرارتی عملکرد ۰/۱۷۲ و بازدهی اکسرژی ۰/۰۸۴۶ را داشت. بررسی عملکرد کلی سیستم نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای ادامه عملکرد سیستم در زمستان در طول ساعات تاریکی بسیار مناسب میباشد. بنی اسدی أو همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ به بررسی تجربی عملکرد خشککن خورشیدی ترکیبی پرداختند. آزمایشات آنها برای خشککردن ورقههای زردآلوی تازه در شرایط کاری مختلف انجام شد. اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده برای ذخیره انرژی حرارتی در طول روز و استفاده آن شب هنگام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده فرآیند خشککردن به طور موثری حتی در بازهای که انرژی خورشیدی در دسترس نباشد ادامه می یابد. همچنین مشاهده کردند که سرعت خشک کردن در اتاق خشک کن تقریبا ثابت است. راندمان جداسازی رطوبت و بازده حرارتی کلی خشککن

¹ Lutz et al.

² Barnwal

³ Tiwari

⁴ Berroug et al.

⁵ Elkhadraoui et al.

⁶ Mehla

⁷ Yadav

⁸ Baniasadi et al.



شکل ۱. تصویر شماتیک خشککن گلخانهای مورد بررسی در پژوهش حاضر Fig. 1 Schematic diagram of the investigated greenhouse solar dryer in the present research

مطالعه از خشککن خورشیدی غیرمستقیم و خشککن خورشیدی ترکیبی برای خشککردن ورقههای برش خورده سیبزمینی استفاده شده است. معادله انتشار در مدل ریاضی آنها توسط سری فوریه و تبدیل لاپلاس حل شد و در نهایت عملکرد فرایند خشککردن توسط خشککن غیرمستقیم و خشککن ترکیبی مورد مقایسه قرار گرفت. راندمان خشککن ترکیبی تقریباً ۱/۳برابر بیشتر از خشککن غیرمستقیم است. آزازیا^۷ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه محزن ذخیرهسازی انرژی گرمایی برای خشککردن فلفل پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده در خشککن خورشیدی مذکور یک جایگزین مناسب برای بهبود راندمان فرآیند خشککردن است.

برخلاف مطالعات گذشته [۱۶–۱]، در تحقیق حاضر به استفاده همزمان ماده تغییرفازدهنده و سلولهای فتوولتائیک جهت بهبود عملکرد خشککن خورشیدی گلخانهای پرداخته میشود. سلولهای فتوولتائیک توان الکتریکی فنهای تهویه هوا را در خشککن فراهم میآورد و از سوی دیگر ماده تغییرفازدهنده امکان ادامه فرایند رطوبتزدایی از محصول را در شب هنگام فراهم میکند.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

مطابق با شکل ۱ خشککن گلخانهای مورد بررسی شامل سلولهای فتوولتائیک، فنهای جریان مستقیم، محفظه گلخانهای خشککن و ماده تغییرفازدهنده^ میباشد. سیستم فتوولتائیک برای به ترتیب حدود %۱۰ و ۱۱% است. وانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ به بررسی عملکرد حرارتی یک خشککن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری جهت خشک کردن انبه پرداختند. آنها از مدل پیگ^۲ برای تحلیل سینتیک ورقههای برش خورده انبه استفاده کردند. آنها گزارش کردند که متوسط راندمان حرارتی سیستم بین ۹/۹ % و ۳۳/۸ % است. نرخ استخراج رطوبت خالص ۱/۶۷ kg/h با درجه حرارت خشک شدن ۵۲ سانتی گراد است. مقادیر ضریب نفوذ موثر انبه بین ۱/۱۸ تا ۱۰ مترمربع بر ثانیه برای محدوده دمایی ۵۲-۴۰ درجه سانتی گراد متغیر میباشد. همچنین مقادیر ضریب نفوذ با افزایش دمای هوای خشکشدن افزایش می یابد چون با افزایش انرژی گرمایی فعالیت مولکولهای آب افزایش مییابد. اسوامی^۳ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ به تحلیل تجربی خشک کردن خورشیدی ماهی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده سرعت خشککردن ماهی افزایش می یابد. افزایش سرعت خشک کردن ماهی در نهایت منجر به کاهش دوره خشک شدن تا حدود ۸۰ درصد از روش سنتی و ۲۰ درصد از روش خشک کردن خورشیدی می شود. دواج [†] و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تجربی عملکرد یک خشککن خورشیدی برای خشک کردن گیاهان دارویی در منطقه هیمالیای غربی پرداختند. آنها مشاهده کردند که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده میزان خشک شدن حدود ۲ برابر می شود و زمان خشک شدن به ۱۲۰ ساعت کاهش پیدا میکند. متوسط راندمان انرژی سیستم در هنگام عدم استفاده از مواد تغییرفازدهنده حدود ۹/۹ % و هنگام استفاده از مواد تغییرفازدهنده حدود ۲۶/۱ % است. سیمو-تاگنه⁶و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به مدلسازی ریاضی یک خشککن خورشیدی معمولی برای خشک کردن چوب پرداختند. مدل ریاضی آنها قادر به پیش بینی دمای سطح کلکتور خورشیدی، رطوبت نسبی جریان هوا در خروجی خشککن و میزان رطوبت تبخیری از محصول بود. دوبلی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ به مدلسازی ریاضی و تجزیه تحلیل فرایند خشک کردن سیبزمینی پرداختند. در این

5 Simo-Tagne et al.

⁷ Azaizia et al.

⁸ Phase change material (PCM)

Wang et al.

² Page

³ Swami et al.

⁴ Bhardwaj et al.

⁶ Djebli et al.

 $C_g , T_r , T_a , T_c , A_m , I_t , \beta_c , \tau_g , \alpha_c , \eta_{el}$ و $U_{bcr} , M_g ,$ ، U_{tca} و U_{bcr} , M_g به ترتیب بازده سلول خورشیدی، ضریب جذب سلول خورشیدی، ضریب عبور شیشه، ضریب فشردگی مدول فتوولتائیک، شدت تابش خورشیدی، مساحت مدول فتوولتائیک، دمای سلول فتوولتائیک، دمای محیط، دمای هوای داخل محفظه، گرمای ویژه شیشه، جرم شیشه، ضریب انتقال حرارت از پایین مدول به هوای محفظه و ضریب انتقال حرارت اتلافی از بالای سلول های فتوولتائیک به محیط اطراف میباشد.

تعادل انرژی برای هوای داخل محفظه به صورت زیر است:

$$h_{cr}(T_{cr} - T_r)A_{cr} + U_{bcr}(T_c - T_r)A_m + A_b h_{c,b-r}(T_b - T_r) = \dot{M}_f C_r(T_r - T_a) + (\sum UA)(T_r - T_a) + M_r C_r \frac{dT_r}{dt}$$
(Y)

در این جا M_f ، M_r ، C_r ، $h_{c,b-r}$ ، A_{cr} ، A_b ، T_b ، T_{cr} و M_f به ترتیب دمای محصول، دمای صفحه جاذب، مساحت صفحه جاذب، مساحت سطح محصول، ضریب انتقال حرارت جابجایی از صفحه جاذب به هوای محفظه، گرمای ویژه هوا، جرم هوای داخل گلخانه، دبی جرمی هوا و ضریب اتلاف حرارت کلی از محفظه به محیط اطراف از طریق دیوارهای جانبی گلخانه میباشد. تعادل انرژی برای محصول به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} &\alpha_{cr}\tau_g^2\tau_{gz}(1-\beta_c)I_tA_{cr} + \alpha_{cr}\tau_gA_{cr}\sum I(i) = h_{cr}(T_{cr}-T_r)A_{cr} \\ &+ U_{cra}A_{cr}(T_{cr}-T_a) + M_{cr}C_{cr}\frac{dT_{cr}}{dt} \end{aligned}$$
($\ref{eq:tau}$

در این جا C_{cr} ، U_{cra} ، h_{cr} ، $\sum I(i)$ ، τ_{gz} ، α_{cr} و M_{cr} به ترتیب ضریب جذب محصول، ضریب عبور شیشه صیقلی، شدت تابش خورشیدی روی دیوارهای مختلف محفظه خشککن، ضریب انتقال انتقال حرارت جابجایی از محصول به هوای خشککن، ضریب انتقال حرارت اتلافی از پایین محصول به محیط، گرمای ویژه محصول و جرم محصول می باشد.

تعادل انرژی برای صفحه جاذب به صورت زیر است:

$$\alpha_b \tau_g \sum I(i)A_b + \alpha_b \tau_g^2 \tau_{gz} (1 - \beta_c)I_t A_b = h_{c,b-r}A_b$$

$$(T_b - T_r) + U_{b-pcm}A_b (T_b - T_{pcm}) + M_b C_b \frac{dT_b}{dt}$$
(*)

در این جا a_b ، M_b و C_b ، T_{pcm} ، U_{b-pcm} ، a_b به ترتیب ضریب جذب صفحه جاذب، ضریب انتقال حرارت هدایتی از صفحه جاذب به ماده

تامین توان الکتریکی فنهای تعدیل کننده هوای خشک کن و برای جلوگیری از قرار گرفتن محصول در معرض تابش مستقیم خورشید به منظور جلوگیری از بی رنگ شدن محصول مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین سلول های فتوولتائیک در برخی از ساعات روز توان الکتریکی اضافه بر مصرف سیستم را نیز در اختیار می گذارد. ابعاد مدول فتوولتائیک نیمه شفاف $0.6m \times 1m$ با ضریب تراکم در طول روز باعث ایجاد جریان مستقیم ۲۷ و ۱۸ می باشند. فن ها در طول روز باعث ایجاد جریان جابجایی اجباری در محفظه می شوند تعدیل کننده دمای هوای خشک کن را داشته باشند. در شب هنگام به دلیل عدم وجود تابش و برق فتوولتائیک، جریان هوا در محفظه توسط جابجایی آزاد صورت می گیرد.

فرضهای حاکم بر مسئله به شرح زیر میباشند:

- کلیه فرآیندها در سیستم گذرا میباشند.
- اجزاء مختلف سیستم به صورت ظرفیت متمرکز فرض می شود.
- پارامترهای تابشی سطوح (ضریب جذب، ضریب انتقال،
 ضریب صدور و غیره) ثابت فرض می شوند.
 - ماده تغییرفازدهنده از نوع واکس پارافین است.
 - نوع سلولهای فتوولتائیک سیلیکونی است.

تحلیل انرژی سیستم ترکیبی خشککن خورشیدی گلخانهای تحقیق حاضر برای دو حالت شارژ و تخلیه ماده تغییرفازدهنده صورت میپذیرد. هدف از تحلیل انرژی سیستم ترکیبی خشککن خورشیدی گلخانهای ارائه روابطی است که از حل آن بتوان دمای اجزاء مختلف سیستم شامل دمای سلولهای فتوولتائیک، دمای هوای محفظه گلخانهای، دمای محصولات، دمای صفحه جاذب و دمای ماده تغییرفازدهنده را پیشبینی نمود.

۲- ۱- تحلیل انرژی سیستم در حالت شارژ
 تعادل انرژی برای مدول فتوولتائیک به صورت زیر است:

$$\alpha_{c}\tau_{g}\beta_{c}I_{t}A_{m} = U_{tca}A_{m}(T_{c}-T_{a}) + U_{bcr}$$

$$(T_{c}-T_{a})A_{m} + \tau_{g}\beta_{c}\eta_{el}I_{t}A_{m} + M_{g}C_{g}\frac{dT_{c}}{dt}$$
(1)

1 Lumped

تغییرفازدهنده، دمای ماده تغییرفازدهنده، گرمای ویژه صفحه جاذب و جرم صفحه جاذب میباشد. توادل از شهر برای ماده تغییرفاندهنده به میترند استن

تعادل انرژی برای ماده تغییرفازدهنده به صورت زیر است:

$$U_{b-pcm}A_b(T_b - T_{pcm}) = U_{pcm-a}A_b(T_{pcm} - T_a) + M_{equ}\frac{dT_{pcm}}{dt}$$
(Δ)

در این جا U_{pcm-a} ضریب انتقال حرارت اتلافی از ماده تغییرفازدهنده به محیط میباشد. همچنین M_{equ} ظرفیت حرارتی معادل ماده تغییرفازدهنده میباشد که در فازهای مختلف به صورت زیر معرفی می گردد [۲]:

$$\begin{split} M_{equ} &= M_{pcm} C_{s,pcm} & T_{pcm} < T_{m} \\ M_{equ} &= M_{pcm} L_{pcm} & T_{m} \leq T_{pcm} \leq T_{m} + \delta' \\ M_{equ} &= M_{pcm} C_{I,pcm} & T_{pcm} > T_{m} + \delta' \end{split}$$

در این جا $C_{s,pcm}$ ، $C_{l,pcm}$ ، $C_{s,pcm}$ به ترتیب گرمای ویژه ماده تغییرفازدهنده در حالت جامد، گرمای ویژه ماده تغییرفازدهنده در حالت مایع، گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده و دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده میباشد. همچنین δ یک انحراف دمای فرضی است که مقدار آن برابر با ۳ درجه سانتی گراد در نظر گرفته میشود [۲].

۲- ۲- تحلیل انرژی سیستم در حالت تخلیه

معادله تعادل انرژی برای ماده تغییرفازدهنده برای زمانی که این ماده در حالت تغییر فاز قرار دارد و زمانی که در این حالت قرار ندارد به شرح زیر میباشد.

$$\begin{split} \frac{M_{equ}}{\Delta t} &= U_{b-pcm} A_b (T_{pcm} - T_b) + U_{pcm-a} & T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \delta' \\ A_b (T_{pcm} - T_a) & (Y) \\ M_{equ} \frac{dT_{pcm}}{dt} &= U_{b-pcm} A_b (T_{pcm} - T_b) + & T_{pcm} \neq T_m \\ U_{pcm-a} A_b (T_{pcm} - T_a) & (Y) \end{split}$$

شایان ذکر است که در حالت تخلیه با گذشت زمان از محتوای انرژی ذخیرهشده در ماده تغییرفازدهنده کاسته می شود لذا مقدار آن منفی است. تعادل انرژی برای صفحه جاذب در حالت تخلیه به

صورت زیر است:

$$U_{pcm-b}A_{b}(T_{pcm}-T_{b}) = h_{c,b-r}A_{b}(T_{b}-T_{r}) + M_{b}C_{b}\frac{dT_{b}}{dt} \qquad (\lambda)$$

تعادل انرژی برای هوای داخل محفظه در حالت تخلیه به صورت زیر است:

$$h_{c,b-r}A_{b}\left(T_{b}-T_{r}\right) = h_{cr}\left(T_{r}-T_{cr}\right)A_{cr} + \left(\sum UA\right)\left(T_{r}-T_{a}\right) + M_{r}C_{r}\frac{dT_{r}}{dt}$$

$$(9)$$

تعادل انرژی برای محصول در حالت تخلیه به صورت زیر است:

$$h_{cr}\left(T_{r}-T_{cr}\right)A_{cr}=U_{cra}A_{cr}\left(T_{cr}-T_{a}\right)+M_{cr}C_{cr}\frac{dT_{cr}}{dt} \qquad (1\cdot)$$

تعادل انرژی برای مدول فتوولتائیک در حالت تخلیه به صورت

زير است:

$$U_{bcr}A_m(T_r - T_c) = U_{tca}A_m(T_c - T_a) + M_g C_g \frac{dT_c}{dt}$$
(۱۱)

شایان ذکر است زمان تخلیه شب هنگام است و در شب هنگام به دلیل عدم وجود تابش سلولهای فتوولتائیک برق تولید نمی کنند. لذا معادله (۱۱) فاقد جملات تابش خورشیدی و توان الکتریکی میباشد. به جهت اختصار، جزئیات محاسبه ضرایب انتقال حرارت مربوطه در معادلات قبل به مراجع [۷ و ۸] ارجاع میشود. معادلات قبل به مراجع یا و ۸] ارجاع میشود. $M_p = M_{cr} - n \sum m_{ev}$

در این جا M_{cr} و $\sum M_{ev}$ به ترتیب جرم محصول تازه، مدت زمان خشکشدن محصول (بر حسب شبانهروز) و مقدار رطوبت تبخیرشده تبخیرشده در طول یک شبانهروز میباشد. مقدار رطوبت تبخیرشده از محصول به صورت زیر قابل محاسبه است [۸]:

$$m_{ev} = \frac{q_{ew}}{\lambda} A_t t \tag{11}$$

در این جا $A_t \cdot \lambda \cdot q_{ev}$ د ترتیب مقدار حرارت مورد استفاده د

برای تبخیر رطوبت، گرمای نهان تبخیر آب^۰، مساحت سینی حاوی محصول و فاصله زمانی میباشد.

$$q_{ew} = 0.016h_{cw} \left(p(T_{cr}) - \gamma p(T_r) \right)$$
(14)

$$A_t = l \times b \tag{10}$$

در این جا l، h_{cw} ، h_{cw} ، b، $p(T_r)$ و γ به ترتیب طول سینی، عرض سینی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، فشار بخار جزیی هوای مرطوب در هوای مرطوب در دمای محصول، فشار بخار جزیی هوای مرطوب در دمای هوای محفظه خشککن و رطوبت نسبی هوا میباشد.

$$p(T_{cr}) = \exp\left[25.317 - \frac{5144}{T_{cr} + 273.15}\right]$$
(19)

$$p(T_r) = \exp\left[25.317 - \frac{5144}{T_r + 273.15}\right]$$
(1Y)

$$h_{cw} = \frac{K_{v}}{L_{c}} N u \tag{11}$$

در این جا L_c ، K_v و Nu به ترتیب طول مشخصه ، هدایت حرارتی هوای مرطوب، دمای میانگین متوسط و عدد ناسلت میباشد که به صورت زیر قابل محاسبه هستند [۸]:

$$L_c = \frac{l+b}{2} \tag{19}$$

$$K_{\nu} = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} T_{i}$$
 (\(\cdot\) - 1)

$$T_i = \frac{T_{cr} + T_r}{2} \tag{(1)}$$

$$Nu = 0.03 (\text{RePr})^{1.023}$$
 (YY)

در این جا Re و Pr به ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل می باشد.

۲- ۳- تابش خورشیدی بر سطح شیبدار

در معادلات بخش قبل نیاز به محاسبه تابش خورشیدی روی سطوح مختلف خشککن گلخانهای میباشد که در ادامه به آن پرداخته شده است. تابش کل روی یک سطح شیبدار برای راستاهای مختلف (شرقی، جنوبی، غربی و شمالی) از رابطه زیر قابل محاسبه میباشد [۱۷]:

$$I_t = I_N \cos_{\theta i} + I_d R_d + \rho R_r \left(I_d + I_b \right) \tag{(YT)}$$

1 Latent heat of vaporization

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \tag{(1f)}$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \tag{7\Delta}$$

در این جا β ، β ، R_r ، R_d ، I_b ، I_d ، I_n ، θ_i ، β و ρ به ترتیب زاویه شیب سطح شیبدار، زاویه راستای سطح، تابش عمودی، تابش پخشی، تابش پرتویی، ضریب جریان تابش مستقیم تابششده، ضریب جریان تابش مستقیم بخش بازتابیده و ضریب بازتابش زمین میباشد.

۲ –۴ – توان الکتریکی مدول فتوولتائیک

بازده الکتریکی و توان الکتریکی مدول فتوولتائیک از رابطه زیر

محاسبه می کردد [۱۸]:

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} \left[1 - 0.0045 \left(T_c - T_{a,ref} \right) + 0.052 \ln \left(\frac{I_t}{I_{t,ref}} \right) \right]$$
(۲۶)

$$P_{el} = I_t A_m \eta_{el} - p_{fan}$$
(۲۷)

در این جا
$$\eta_{el,ref}$$
 و P_{fan} به ترتیب بازده الکتریکی سلولهای
فتوولتائیک در شرایط مرجع و توان الکتریکی مصرفی فنها میباشد.
شرایط مرجع به صورت زیر معرفی میشود [۱۸]:
 $I_{ref}(t) = 1000 \text{ W/m}^2$
 $T_{a,ref} = 25^{\circ}C$ (۲۹)

در تحقیق حاضر مطابق با مرجع [۷]، سه مدول فتوولتائیک با مشخصات مندرج در جدول ۱ در سقف خشککن استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مدول فتوولتائیک [۷] Table 1 Specifications of the photovoltaic module

مقدار	پارامتر
منوكريستالين سيليكون	نوع مدول فتوولتائيك
3	تعداد مدول فتوولتائيك
$A_m = 0.6 \text{ m}^2$	مساحت سطح مدول
$\eta_{el,ref}=0.12$	بازده الكتريكي شرايط مرجع
$\beta_{c} = 0.6543$	ضريب فشردكي مدول فتوولتائيك
$P_{el,max} = 75 \mathrm{W}$	توان حداكثر مدول فتوولتائيك
$\alpha_c = 0.7$	ضريب جذب

² Characteristic length

۲- ۵- محاسبه بازده انرژی سیستم

بازده انرژی سیستم ترکیبی خشککن خورشیدی گلخانهای به صورت نرخ انرژی مطلوب خروجی از سیستم به نرخ انرژی خالص ورودی به سیستم تعریف می گردد. $\eta_{en} = \dot{E}_{out,desired} / \dot{E}_{in,net}$ (۳۰)

با توجه به این عملکرد خشککن خورشیدی گلخانهای تحقیق حاضر در کل شبانه روز میباشد لذا نرخ انرژی خالص ورودی و نرخ انرژی مطلوب خروجی در روز و شب متفاوت است. نرخ انرژی خالص ورودی به سیستم در طول روز توسط تابش خورشیدی رسیده به سطوح مختلف خشککن خورشیدی تأمین می گردد.

$$\dot{E}_{in,net,day} = A_m I_t + \sum A_i I(i) \tag{(Y)}$$

جمله اول در سمت راست معادله (۳۱) تابش خورشیدی روی مدول فتوولتائیک و جمله دوم تابش خورشیدی رسیده به سایر سطوح محفظه خشککن را نشان میدهد. در شب هنگام که تابش خورشید وجود ندارد، نرخ انرژی خالص ورودی به سیستم شامل انرژی آزاد شده از ماده تغییرفازدهنده در حالت تخلیه تأمین میشود.

$$\dot{E}_{in,net,night} = M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt}$$
(TY)

نرخ انرژی مطلوب خروجی از سیستم به صورت زیر تعریف می گردد:
$$\dot{E}_{out,desired} = h_{ew}A_{cr}(T_{cr} - T_r) + P_{el}$$
 (۳۳)

جمله اول در سمت راست معادله (۳۳) نرخ انتقال حرارت تبخیری را نشان میدهد و جمله دوم توان الکتریکی خالص خروجی از سیستم است که در شب هنگام به دلیل عدم وجود تابش خورشیدی صفر میباشد. از جایگذاری معادلات (۳۱) تا (۳۳) در معادله (۳۰) بازده انرژی سیستم ترکیبی برای روز و شب به شرح زیر به دست میآید.

$$\eta_{en,day} = \frac{\left(\frac{I_{t}A_{m}\eta_{el} - P_{fan}}{0.38}\right) + h_{ew}A_{cr}\left(T_{cr} - T_{r}\right)}{A_{m}I(t) + \sum A_{i}I(i)}$$
(٣٤)

$$\eta_{en,night} = \frac{h_{ew}A_{cr}(T_{cr} - T_r)}{M_{pcm}C_{pcm}}\frac{dT_{pcm}}{dt}$$
(٣۵)

جدول ۲. پارامترهای طراحی خشککن خورشیدی گلخانهای پژوهش		
تایواری و همکاران [۷]		
Fable 2. Destan managemeters of the succession solar during		

 Table 2. Design parameters of the greenhouse solar dryer

 .investigated by Tiwari et al

مقدار	پارامتر
$A_n = 0.2 \text{ m}^2$	مساحت ديوار شمالي گلخانه
$A_s = 0.1264 \text{ m}^2$	مساحت ديوار جنوبى گلخانه
$A_e = 0.5 \text{ m}^2$	مساحت ديوار شرقى گلخانه
$A_{w} = 0.5 \text{ m}^{2}$	مساحت دیوار غربی گلخانه
$A_g = 1.066 \text{ m}^2$	مساحت كف گلخانه
$V = 0.71 \text{ m}^3$	حجم گلخانه
$A_c = 1.2666 \text{ m}^2$	مساحت سطح محصول
$M_{cr} = 2 \mathrm{kg}$	جرم محصول
$\alpha_c = 0.3$	ضريب جذب محصول
$N = 1100 \mathrm{rpm}$	سرعت فن
$d = 0.1 \text{ m}^2$	قطر فن

چون کیفیت انرژی الکتریکی و حرارتی یکسان نیست، یک ضریب ۰/۳۸ در معادله (۳۴) برای تبدیل انرژی الکتریکی به معادل حرارتی آن استفاده شده است [۱۹].

۳- اعتبار سنجی

معادلات حاکم بر عملکرد حرارتی خشککن خورشیدی گلخانهای یک دستگاه از معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی را تشکیل میدهد. این دستگاه معادلات توسط روش رانگ-گوتا مرتبه ۴ در نرمافزار متلب حل شده است. جهت اطمینان از صحت و دقت حل معادلات مذکور نتایج مدلسازی تحقیق حاضر با دادههای تجربی تایواری و همکاران [۷] برای دمای اجزاء مختلف خشککن فورشیدی گلخانهای و همچنین میزان تبخیر مقایسه شده است. شایان ذکر است خشککن خورشیدی گلخانهای پژوهش تایواری و همکاران [۷] فاقد مواد تغییرفازدهنده میباشد. لذا دادههای تجربی آن صرفاً شامل دمای اجزاء مختلف سیستم در طول روز میباشد. پارامترهای طراحی خشککن خورشیدی گلخانهای پژوهش تایواری و همکاران [۷] در جدول ۲ داده شده است.



شکل ۲. مقادیر تجربی و شبیهسازی دماهای مختلف سیستم خشککن خورشیدی گلخانهای

Fig. 2. Experimental and simulated temperature values of different components of the greenhouse solar dryer



شکل ۳. مقادیر تجربی و شبیه سازی میزان تبخیر بر حسب زمان آزمایش Fig. 3. Experimental and simulated values of evaporation mass against time of testing

آزمایش ترسیم و مقایسه شده است.

همان طور که در شکلهای ۲ و ۳ مشاهده میشود حداکثر خطای نسبی متوسط پارامترهای شبیهسازی نسبت به دادههای آزمایشگاهی کمتر از ۸ درصد میباشد. لذا نتایج مدلسازی تحقیق حاضر در توافق خوبی با دادههای تجربی پژوهش تایواری و همکاران [۷] میباشد. شکل ۲ مقادیر تجربی و شبیه سازی دمای سلول های فتوولتائیک، دمای محصول و دمای هوای محفظه گلخانه ای و همچنین دمای محیط را بر حسب زمان آزمایش نشان می دهد. در شکل مربوطه اندیس exp داده های تجربی تایواری و همکاران [۷] و اندیس sim نتایج عددی تحقیق حاضر را نشان می دهد.

در شکل ۳ مقادیر تجربی و شبیهسازی میزان تبخیر بر حسب زمان



شکل ۴. شدت تابش خورشیدی و دمای محیط برای روز ۱۵ تیر در شهر زاهدان [۲۰] Fig. 4. Solar radiation intensity and ambient temperature for 6 July in Zahedan city

۴- بررسی نتایج

دمای محصول در شب هنگام بیش از ۳۰ درجه سانتی گراد است که این امر موجب ادامهیافتن فرآیند رطوبتزادیی از محصول در شب هنگام میشود. از سوی دیگر مطابق با شکل مربوطه در حدود ۴ ساعت از طول روز دمای مدول فتوولتائیک بیشتر از دمای محفظه خشک کن است و لذا خنک کاری مدول فتوولتائیک به منظور افزایش توان الکتریکی آن فقط در این بازه ۴ ساعته صورت می گیرد. به منظور افزایش مدت زمان خنک کاری مدول فتوولتائیک پیشنهاد میشود که هوای ورودی به محفظه ابتدا از زیر مدول فتوولتائیک عبور داده شود و سپس وارد محفظه گردد تا بازه خنک کاری مدول فتوولتائیک عبور داده شود رود و عملکرد حرارتی خشک کن نیز بهبود یابد.

۴- ۱- مطالعات پارامتری روی مقدار رطوبت تبخیرشده

در این بخش به بررسی پارامترهای طراحی و عملکردی مثل رطوبت نسبی، ضریب جذب محصول، جرم ماده تغییرفازدهنده بر میزان تبخیر پرداخته شده است. شکل ۶ تأثیر تغییرات رطوبت نسبی بر میزان تبخیر را نشان میدهد.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود با افزایش رطوبت نسبی میزان تبخیر در حدود ۵۳% کاهش می یابد. چون افزایش رطوبت نسبی به صورت یک مانع در برابر تبخیر سطحی از محصول در این بخش به بررسی عملکرد خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به سلولهای فتوولتائیک و ماده تغییرفازدهنده برای یک روز نمونه تابستانی (۱۵ تیر) شهر زاهدان پرداخته می شود. در این تحقیق تأثیر پارامترهای طراحی و عملکردی مختلف برای بازده انرژی و میزان تبخیر مورد ارزیابی قرار می گیرد. محصول مورد نظر در این طراحی انگور می باشد که ضریب جذب آن بین ۲۵/۰ و ۰/۸۵ است [۷]. با توجه به این که طراحی خشککن خورشیدی مذکور برای شهر زاهدان مد نظر است لذا نیاز به دادههای جوی شهر زاهدان میباشد که در شکل ۴ دمای محیط و شدت تابش خورشیدی برای شهر زاهدان نشان داده شده است. شایان ذکر است که در شکل مربوطه کلیه دادههای مربوطه تجربی بوده و از مرجع [۲۰] اخذ شده است. در شکلهای بعدی، کلیه دادههای ترسیمشده مربوط به شبیهسازی عددی تحقیق حاضر می باشند. در شکل ۵ مقادیر دماهای شبيهسازى شده براى اجزا مختلف سيستم مورد مطالعه ترسيم شده است. مطابق این شکل در روز مربوطه ماده تغییرفازدهنده در حدود ۷ ساعت در تغییر فاز ۵۴ $(T_{ncm} = \ {}^{c})$ میباشد. این موضوع مطلوب است و از پتانسیل بالای سیستم برای ادامه فرآیند خشککردن در ساعات عدم وجود تابش خورشیدی حکایت دارد. به نحوی که متوسط



شکل ۵. نمودار دماهای شبیهسازی شده اجزاء مختلف سیستم خشککن خور شیدی گلخانهای Fig. 5. Diagram of simulated temperatures of different components of the greenhouse solar dryer



شکل ۶. تأثیر تغییرات رطوبت نسبی بر میزان تبخیر Fig. 6. Effect of variation of relative humidity on evaporation mass





عمل میکند. شایان ذکر است بررسی رطوبت نسبی میتواند به معنای استفاده از خشککن گلخانهای مذکور در شهرهای مختلف با رطوبت نسبی هوای متفاوت باشد. شکل ۷ تأثیر تغییرات ضریب جذب محصول بر میزان تبخیر را نشان میدهد.

شکل ۷ نشان میدهد که با افزایش ضریب جذب محصول میزان تبخیر در حدود ۴۵% افزایش پیدا میکند. علت افزایش میزان تبخیر زیادشدن دمای محصول به واسطه جذب تابش خورشیدی بیشتر توسط محصول میباشد. شایان ذکر است افزایش ضریب جذب محصول به معنای خشککردن انگور از انواع مختلف میباشد. شکل ۸ تأثیر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده بر میزان تبخیر را نشان میدهد.

مطابق با شکل ۸ افزایش جرم ماده تغییرفازدهنده، تاثیری محسوسی بر میزان تبخیر در طول روز ندارد. برای خشککن گلخانهای تحقیق حاضر برخلاف خشککنهای خورشیدی متداول، انرژی حرارتی اتلافی از سیستم در عوض هدررفت به محیط در طول روز در ماده تغییرفازدهنده ذخیره میشود و در شب هنگام برای ادامه فرایند تبخیر مورد استفاده قرار میگیرد. این موضوع مزیتی مهمی برای سیستم مورد مطالعه به شمار میرود. در طول روز چون ماده

تغییرفازدهنده تنها وظیفه ذخیره انرژی اتلافی را دارد لذا تغییرات جرم آن بر میزان تبخیر تاثیر محسوسی ندارد. ولی در شب هنگام نقش ماده تغییرفازدهنده در سیستم عوض میشود و وظیفه تامین انرژی حرارتی سیستم برای ادامه تبخیر را پیدا میکند. اثر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده بر میزان تبخیر در شب تا حدودی قابل مشاهده امده تغییرفازدهنده بر میزان تبخیر در طول روز و لذا بازپس دهی انرژی است. میتوان گفت که جرم بیشتر برای ماده تغییرفازدهنده به معنای امکان ذخیره انرژی اتلافی بیشتر در طول روز و لذا بازپس دهی انرژی حرارتی بیشتر در طول شب میباشد. به هر حال چون با توجه به ابعاد و اندازه هندسی سیستم بالاخره حد مشخصی از اتلاف حرارت از سیستم وجود دارد لذا صرفاً افزایش جرم ماده تغییرفازدهنده به معنای ذخیره انرژی حرارتی بیشتر نیست. به نحوی که در شب هنگام از جرم kg به به بعد تغییراتی در میزان تبخیر دیده نمیشود.

۴- ۲- مطالعات پارامتری روی بازده انرژی

در این بخش به بررسی پارامترهای مختلف طراحی و عملکردی بر روی بازده انرژی سیستم پرداخته میشود. شکل ۹ تأثیر تغییرات رطوبت نسبی بر بازده انرژی را نشان میدهد.

مطابق با شکل ۹ با افزایش رطوبت نسبی بازده انرژی ۱۵% کاهش







شکل ۹. تأثیر تغییرات رطوبت نسبی بر بازده انرژی Fig. 9. Effect of variation of relative humidity on energy efficiency



شکل ۱۰. تأثیر تغییرات ضریب جذب محصول بر بازده انرژی Fig. 10. Effect of variation of product absorptivity on energy efficiency

مییابد. چون با افزایش رطوبت نسبی انرژی حرارتی تبخیر کاهش پیدا میکند. شکل ۱۰ تأثیر تغییرات ضریب جذب محصول را بر بازده انرژی نشان میدهد.

مطابق شکل ۱۰ با افزایش ضریب جذب محصول بازده انرژی ۲۰% افزایش مییابد. با افزایش ضریب جذب محصول دمای محصول افزایش پیدا می کند و به طبع انتقال حرارت تبخیری افزایش مییابد که باعث افزایش بازده انرژی میشود. اما در شب هنگام چون تابش خورشیدی وجود ندارد لذا افزایش ضریب جذب محصول تاثیری بر بازده انرژی ندارد. شکل ۱۱ تأثیر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده بر بازده انرژی را نشان میدهد.

مطابق شکل ۱۱ تأثیر تغییرات ماده تغییرفازدهنده بر بازده انرژی اصلاً محسوس نیست. چون بازده انرژی تابعی از شدت تابش خورشیدی، دمای محصول، دمای محفظه و توان الکتریکی است. در طول روز ماده تغییرفازدهنده فقط انرژی اتلافی سیستم را ذخیره می کند لذا بر دمای محصول و دمای محفظه در طول روز تاثیر نمی گذارد. همچنین در طول روز تابش خورشیدی و توان الکتریکی فتوولتائیک اصلاً به جرم ماده تغییرفازدهنده وابستگی ندارند. در

شب هنگام تابش خورشیدی و توان الکتریکی وجود ندارد و دمای محصول و دمای محفظه به دلیل مود انتقال حرارت جابجایی آزاد مثل روز چندان بالا نیستند. عوامل مذکور باعث میشود که تغییرات ماده تغییرفازدهنده بر بازده انرژی قابل ملاحظه نباشد. در شکل ۱۲ مقایسهای برای میزان تبخیر بین خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به ماده تغییرفازدهنده و خشککن خورشیدی گلخانهای بدون ماده تغییرفازدهنده انجام شده است.

در شکل ۱۲ مشاهده میشود که در طی روز (بازه ۶ صبح تا ۱۸ عصر) که تابش خورشیدی وجود دارد عملکرد خشککن خورشیدی مجهز به ماده تغییرفازدهنده و بدون ماده تغییرفازدهنده تقریباً یکسان است. چون عمدتاً ماده تغییرفازدهنده انرژی حرارتی اتلافی از سیستم در خود ذخیره میکند. ولی به محض غروب آفتاب و شروع شب (بازه ۱۸ عصر تا ۵ صبح) عملکرد خشککن خورشیدی بدون ماده تغییرفازدهنده متوقف میشود. زیرا منبع انرژی حرارتی برای ادامه تبخیر وجود ندارد. اما عملکرد خشککن خورشیدی دارای ماده تغییرفازدهنده در شب هنگام ادامه دارد چون انرژی حرارتی ورودی به سیستم از انرژی آزادشده از ماده تغییرفازدهنده تامین میشود.







شکل ۱۲. میزان تبخیر خشککن خورشیدی گلخانهای مجهز به ماده تغییرفازدهنده و بدون ماده تغییرفازدهنده Fig. 12. Evaporation mass of the moisture in greenhouse solar dryer affected by presence and lack of PCM

به نحوی که درصد افزایش میزان تبخیر در طول یک شبانهروز در حدود ۳۸/۷۶ درصد میباشد. این موضوع مزیت استفاده از ماده تغییرفازدهنده را در بهبود عملکرد خشککن خورشیدی نشان میدهد.

٥- نتیجه گیری

نتایج بهدستآمده از تحقیق تئوری حاضر به شرح زیر میباشد:

- ماده تغییرفازدهنده با ذخیره حرارت اتلافی سیستم در طول روز و با پسدادن آن در طول شب امکان ادامه فرآیند خشک کردن محصول در شب هنگام به خوبی فراهم میآورد.
- هر چقدر ضریب جذب محصول و جرم ماده
 تغییرفازدهنده بیشتر شود میزان تبخیر افزایش
 مییابد.
- هر چقدر رطوبت نسبی هوا افزایش یابد میزان تبخیر
 کاهش مییابد.
- هر چقدر ضریب جذب محصول افزایش یابد، میزان
 بازده انرژی افزایش مییابد.
- هر چه رطوبت نسبی بیشتر شود میزان بازده انرژی
 کاهش مییابد.
- یک افزایش ۳۸/۷۶ درصدی در میزان تبخیر به واسطه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در خشککن خورسیدی گلخانهای مشاهده می شود.

۶- فهرست علائم

نشانه	علامت
مساحت	$A(\mathbf{m}^2)$
گرمای ویژه	C (J/kgK)
نرخ انرژی	\dot{E} (W)
خطا	Er (%)
ضريب انتقال حرارت	$h(W/m^2K)$
شدت تابش خورشید روی سلولهای فتوولتائیک	$It(W/m^2)$
شدت تابش خورشید روی دیوار محفظه خشککن	$I(i)(W/m^2)$
جرم	M(kg)
دبی جرمی هوا	$\dot{M}_{f}(\mathrm{kg}/\mathrm{s})$

$p(N/m^2)$
Pr
Re
$q(\mathrm{W})$
t(s)
$T(\mathcal{C})$
$U(W/m^2K)$
ُ علائم يوناني
α
β
$ au_{g}$
$ au_{gz}$
γ
$\eta(\%)$
زيرنويس ها
علامت
а
b
bcr
С
cr
cra
crc
d
desired
exp
el
en
eau
ev
in
σ
o m
net

نقطه ذوب

ماده تغییرفازدهنده فتوولتائیک т рст

pv

- [8] S. Tiwari, G.N. Tiwari, I.M. Al-Helal, Performance analysis of photovoltaic–thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer, Solar Energy, 133 (2016) 421-428.
- [9] N. Mehla, A. Yadav, Energy and exergy analysis of a PCM-based solar powered winter air conditioning using desiccant wheel during nocturnal, International Journal of Sustainable Engineering, 11(1) (2018) 54-64.
- [10] E. Baniasadi, S. Ranjbar, O. Boostanipour, Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage, Renewable Energy, 112 (2017) 143-150.
- [11] W. Wang, M. Li, R.H.E. Hassanien, Y. Wang, L. Yang, Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango, Applied Thermal Engineering, 134 (2018) 310-321.
- [12] V.M. Swami, A.T. Autee, T. Anil, Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material, Journal of Energy Storage, 20 (2018) 310-315.
- [13] A. Bhardwaj, R. Kumar, R. Chauhan, Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region, Solar Energy, 177 (2019) 395-407.
- [14] M. Simo-Tagne, A. Zoulalian, R. Rémond, Y. Rogaume, Mathematical modelling and numerical simulation of a simple solar dryer for tropical wood using a collector, Applied Thermal Engineering, 131 (2018) 356-369.
- [15] A. Djebli, S. Hanini, O. Badaoui, B. Haddad, A. Benhamou, Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of potatoes, Renewable Energy, 145 (2020) 1494-1506.
- [16] Z. Azaizia, S. Kooli, I. Hamdi, W. Elkhal, A.A. Guizani, Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper, Renewable



۷- مراجع

- C. Tiris, N. Ozbalta, M. Tiris, I. Dincer, Experimental testing of a new solar dryer, International Journal of Energy Research, 18 (1994) 483-490.
- [2] A. El-Sebaii, A. Al-Ghamdi, F. Al-Hazmi, A.S. Faidah, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, Applied Energy, 86(7-8) (2009) 1187-1195.
- [3] K. Lutz, W. Mühlbauer, J. Müller, G. Reisinger, Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones, Solar & Wind Technology, 4(4) (1987) 417-424.
- [4] P. Barnwal, G.N. Tiwari, Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study, Solar Energy, 82 (2008) 1131-1144.
- [5] F. Berroug, E. Lakhal, M. El Omari, M. Faraji, H. El Qarnia, Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall, Energy and Buildings, 43(11) (2011) 3027-3035.
- [6] A. Elkhadraoui, S. Kooli, I. Hamdi, A. Farhat, Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape, Renewable Energy, 77 (2015) 1-8.
- [7] S. Tiwari, G.N. Tiwari, Exergoeconomic analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer, Energy, 114 (2016) 155-164.

133 (2017) 458-476.

- [19] S. Nayak, G. Tiwari, Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods, Energy and Buildings, 41(8) (2009) 888-896.
- [20] M. Irani, F. Sarhaddi, A. Behzadmehr, Thermal analysis of a solar wall equipped to nano phase change material, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 51 (4) (2019) 1-12 (In Persian).

Energy, 145 (2020) 1972-1984.

- [17] O.C. Aja, H.H. Al-Kayiem, Z.A. Abdul Karim, Analytical investigation of collector optimum tilt angle at low latitude, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 5 (2013) 63112-63129.
- [18] M.E. A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, W. B. Chaouch, A detailed thermalelectrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions, Energy Conversion and Management,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید: V. Fahmideh, F. Sarhaddi, M. Hedayatizadeh, F. Sobhnamayan . Thermal performance evaluation of a greenhouse solar dryer equipped with photovoltaic cells and phase change material ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3367-3384.

DOI: 10.22060/mej.2020.18160.6751



بی موجعه محمد ا