



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

وحید فهمیده^۱، فرامرز سرحدی^{۱*}، مهدی هدایتی‌زاده^۱، فاطمه صبح‌نمایان^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳

کلمات کلیدی:

خشک کن خورشیدی گلخانه‌ای
سلول فتوولتائیک
ماده تغییرفازدهنده
بازده انرژی

خلاصه: هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد حرارتی سیستم خشک کن خورشیدی گلخانه‌ای مجهز به سلول‌های فتوولتائیک و ماده تغییرفازدهنده می‌باشد. 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 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 خوبی با داده‌های تجربی گذشتگان می‌باشد. نتایج به دست آمده برای یک روز نمونه شهر زاهدان نشان می‌دهد که ماده 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 می‌آورد به نحوی که میزان تبخیر کلی در حدود ۳۸/۷۶٪ افزایش می‌یابد. حداکثر بازده انرژی سیستم در حدود ۱۵٪ است.

۱- مقدمه

خشک کردن به وسیله خورشید یکی از راه‌های قدیمی برای حفظ و ماندگاری بیشتر محصولات محسوب می‌شود [۱]. در خشک کردن طبیعی یا خورشید باز، محصولات بر کف زمین یا بتن قرار می‌گیرند. این محصولات در معرض آلودگی‌های مختلف مثل گرد و غبار، آفات، پرندگان، جانوران و یا حشرات قرار دارند. امروزه تقاضا برای مواد غذایی خشک شده همچون محصولات کشاورزی و فرآورده‌های دریایی و گیاهان دارویی افزایش پیدا کرده است [۲]. معمولاً محصولاتی که به طور طبیعی خشک می‌گردند کیفیت استاندارد بین‌المللی آن‌ها بسیار پایین است. در واقع خشک کردن محصولات کشاورزی روند کاهش رطوبت از آن‌ها است. کاهش مقدار رطوبت محصولات عملکرد آنزیم‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها و کپک‌ها را کاهش می‌دهد. به منظور بهبود کیفیت و رنگ محصولات خشک شده، محققان روش‌های مختلفی مثل اسپری خشک کن، خشک کردن مکانیکی، خشک کن الکتریکی، خشک کن خورشیدی و غیره را معرفی کرده‌اند. به واسطه افزایش سریع قیمت سوخت‌های فسیلی، اتمام‌پذیری و مسائل آلاینده‌گی

* 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 کوتاه بودن زمان خشک شدن می‌باشند [۱]. به طور کلی سه نوع سیستم خشک کن خورشیدی وجود دارد [۱]:

- خشک کن‌های خورشیدی مستقیم که محصولات به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرند و یا به صورت ترکیبی از تابش مستقیم خورشید و تابش منعکس شده استفاده می‌کنند.
- خشک کن‌های خورشیدی غیرمستقیم که در آن‌ها محصولات به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار نمی‌گیرند، اما هوای گرم شده که با استفاده از تابش خورشیدی تولید می‌شود از میان محصولات عبور داده می‌شود.
- خشک کن‌های خورشیدی ترکیبی که در آن‌ها محصولات



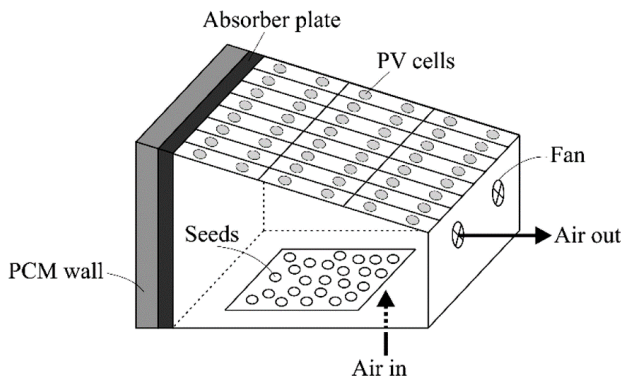
به صورت مستقیم در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرند و هوای گرم‌شده نیز در میان محصولات جریان می‌یابد.

خشک‌کن گلخانه‌ای در دسته خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم قرار دارد و همچنین گاهی اوقات در دسته خشک‌کن‌های خورشیدی ترکیبی قرار می‌گیرد. خشک‌کن 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 می‌گردد. لوتز^۱ و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۷ به مطالعه روی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی چند منظوره برای خشک‌کردن 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 می‌دهد. علاوه بر این کیفیت محصول را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین در طول خشک‌کردن، محصول به طور کامل از باران، گرد و غبار، حشرات و حیوانات محافظت می‌گردد. بارنوال^۲ و تایواری^۳ [۴] در سال ۲۰۰۸ به طور تجربی به مطالعه و بررسی خشک‌کردن انگور با استفاده از خشک‌کن گلخانه‌ای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خشک‌کردن انگور در خشک‌کن 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^۴ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد حرارتی یک گلخانه که دیوار شمالی آن دارای ماده تغییرفازدهنده بود پرداختند. ماده تغییرفازدهنده آن‌ها $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ بود. نتایج آن‌ها نشان داد که گلخانه دارای ماده تغییرفازدهنده در دوره زمستان نوسانات دمایی و رطوبت نسبی کمتری دارد. الخدروبی^۵ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ به طور تجربی عملکرد خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای حالت ترکیبی برای خشک‌کردن فلفل قرمز و انگور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدت زمان خشک‌کردن توسط خشک‌کن گلخانه‌ای برای رسیدن به فلفل قرمز دارای رطوبت ۱۶٪ در حدود

- 1 Lutz et al.
- 2 Barnwal
- 3 Tiwari
- 4 Berroug et al.
- 5 Elkhadraoui et al.

۷ ساعت نسبت به خشک‌کردن در فضای باز کمتر است. همچنین رسیدن به انگور دارای رطوبت ۱۸٪ در حالت خشک‌کردن توسط خورشید در فضای باز ۷۶ 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 ترتیب $1/29 \text{ kW/h}$ و $2/30 \text{ kW/h}$ 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 خشک‌کردن محصولات مختلف با دوره بازگشت سرمایه مناسب برخوردار است. مهلا^۶ 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 $0/172$ و بازدهی اکسرژی $0/0846$ 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. بنی‌اسدی^۸ و 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 می‌یابد. همچنین مشاهده کردند که سرعت خشک‌کردن در اتاق خشک‌کن تقریباً ثابت است. راندمان جداسازی رطوبت و بازده حرارتی کلی خشک‌کن

- 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 $1/3$ برابر بیشتر از خشک‌کن غیرمستقیم است. آزا‌زیا^۷ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه تجربی سیستم اسپری خنک‌کننده خورشیدی حالت ترکیبی مجهز به مخزن 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^۸ می‌باشد. سیستم فتوولتائیک برای

به ترتیب حدود ۱۰٪ و ۱۱٪ است. وانگ^۱ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ به بررسی عملکرد حرارتی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جایجایی اجباری جهت خشک‌کردن 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 $1/67 \text{ kg/h}$ با درجه حرارت خشک شدن ۵۲ سانتی‌گراد است. مقادیر ضریب نفوذ موثر انبه بین $1/18$ تا ۱۰ مترمربع بر ثانیه برای محدوده دمایی ۵۲-۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. همچنین مقادیر ضریب نفوذ با افزایش دمای هوای خشک‌شدن افزایش می‌یابد چون با افزایش انرژی گرمایی فعالیت مولکول‌های آب افزایش می‌یابد. اسوامی^۳ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۸ به تحلیل تجربی خشک‌کردن خورشیدی ماهی با استفاده از مواد تغییرفازدهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده سرعت خشک‌کردن ماهی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت خشک‌کردن ماهی در نهایت منجر به کاهش دوره خشک‌شدن تا حدود ۸۰ درصد از روش سنتی و ۲۰ درصد از روش خشک‌کردن خورشیدی می‌شود. دواج^۴ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تجربی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی برای خشک‌کردن گیاهان دارویی در منطقه هیمالیای غربی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که با استفاده از مواد تغییرفازدهنده میزان خشک‌شدن حدود ۲ برابر می‌شود و زمان خشک‌شدن 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-تاگنه^۵ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به مدل‌سازی ریاضی یک خشک‌کن خورشیدی معمولی برای خشک‌کردن چوب پرداختند. مدل ریاضی آن‌ها قادر به پیش‌بینی دمای سطح کلکتور خورشیدی، رطوبت نسبی جریان هوا در خروجی خشک‌کن و میزان رطوبت تبخیری از محصول بود. دوبلی^۶ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ به مدل‌سازی ریاضی و تجزیه تحلیل فرایند خشک‌کردن سیب‌زمینی پرداختند. در این

- 1 Wang et al.
- 2 Page
- 3 Swami et al.
- 4 Bhardwaj et al.
- 5 Simo-Tagne et al.
- 6 Djebli et al.

7 Azaizia et al.

8 Phase change material (PCM)

در این جا $C_g, T_r, T_a, T_c, A_m, I_t, \beta_c, \tau_g, \alpha_c, \eta_{el}$ ،
 U_{tca} و U_{bcr}, M_g ،
 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 سلول‌های
 فتوولتائیک به محیط اطراف می‌باشد.

تعداد انرژی برای هوای داخل محفظه به صورت زیر است:

$$h_{cr}(T_{cr}-T_r)A_{cr}+U_{bcr}(T_c-T_r)A_m+A_b h_{c,b-r}(T_b-T_r)=$$

$$\dot{M}_r C_r(T_r-T_a)+(\sum UA)(T_r-T_a)+M_r C_r \frac{dT_r}{dt} \quad (2)$$

در این جا $UA, \dot{M}_f, M_r, C_r, h_{c,b-r}, A_{cr}, A_b, T_b, T_{cr}$ 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.

تعداد انرژی برای محصول به صورت زیر است:

$$\alpha_{cr} \tau_g^2 \tau_{gz} (1-\beta_c) I_t A_{cr} + \alpha_{cr} \tau_g A_{cr} \sum I(i) = h_{cr}(T_{cr}-T_r)A_{cr}$$

$$+U_{cra} A_{cr}(T_{cr}-T_a)+M_{cr} C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} \quad (3)$$

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

تعداد انرژی برای صفحه جاذب به صورت زیر است:

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

$$(T_b-T_r)+U_{b-pcm} A_b (T_b-T_{pcm})+M_b C_b \frac{dT_b}{dt} \quad (4)$$

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

تامین توان الکتریکی فن‌های تعدیل‌کننده هوای خشک‌کن و برای
 جلوگیری از قرارگرفتن محصول در معرض تابش مستقیم خورشید
 به منظور جلوگیری از بی‌رنگ‌شدن محصول مورد استفاده قرار
 گرفته است. همچنین سلول‌های فتوولتائیک در برخی از ساعات روز
 توان الکتریکی اضافه بر مصرف سیستم را نیز در اختیار می‌گذارند.
 ابعاد مدول فتوولتائیک نیمه شفاف $1m \times 0.6m$ با ضریب تراکم
 0.165 می‌باشد. فن‌ها از نوع جریان مستقیم $12V$ و $1A$ می‌باشند. فن‌ها
 در طول روز باعث ایجاد جریان جابجایی اجباری در محفظه می‌شوند
 و همچنین در صورت نیاز با افزایش سرعت آن‌ها می‌توانند نقش
 تعدیل‌کننده دمای هوای خشک‌کن را داشته باشند. در شب هنگام به
 دلیل عدم وجود تابش و برق فتوولتائیک، جریان هوا در محفظه توسط
 جابجایی آزاد صورت می‌گیرد.

فرض‌های حاکم بر مسئله به شرح زیر می‌باشند:

- کلیه فرآیندها در سیستم گذرا می‌باشند.
- اجزاء مختلف سیستم به صورت ظرفیت متمرکز^۱ فرض می‌شود.
- پارامترهای تابشی سطوح (ضریب جذب، ضریب انتقال، ضریب صدور و غیره) ثابت فرض می‌شوند.
- ماده تغییرافزدهنده 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 تغییرافزدهنده
 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
 تغییرافزدهنده را پیش‌بینی نمود.

۲-۱- تحلیل انرژی سیستم در حالت شارژ

تعداد انرژی برای مدول فتوولتائیک به صورت زیر است:

$$\alpha_c \tau_g \beta_c I_t A_m = U_{tca} A_m (T_c - T_a) + U_{bcr}$$

$$(T_c - T_a) A_m + \tau_g \beta_c \eta_{el} I_t A_m + M_g C_g \frac{dT_c}{dt} \quad (1)$$

صورت زیر است:

$$U_{pcm-b} A_b (T_{pcm} - T_b) = h_{c,b-r} A_b (T_b - T_r) + M_b C_b \frac{dT_b}{dt} \quad (۸)$$

تعالادل انرژی برای هوای داخل محفظه در حالت تخلیه به صورت

زیر است:

$$h_{c,b-r} A_b (T_b - T_r) = h_{cr} (T_r - T_{cr}) A_{cr} + (\sum UA)(T_r - T_a) + M_r C_r \frac{dT_r}{dt} \quad (۹)$$

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

$$h_{cr} (T_r - T_{cr}) A_{cr} = U_{cra} A_{cr} (T_{cr} - T_a) + M_{cr} C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} \quad (۱۰)$$

تعالادل انرژی برای مدول فتوولتائیک در حالت تخلیه به صورت

زیر است:

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

شایان ذکر است زمان تخلیه شب هنگام است و در شب هنگام به دلیل عدم وجود تابش سلول‌های فتوولتائیک برق تولید نمی‌کنند. 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.

جرم محصول خشک به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۸]:

$$M_p = M_{cr} - n \sum m_{ev} \quad (۱۲)$$

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

$$m_{ev} = \frac{q_{ew}}{\lambda} A_t t \quad (۱۳)$$

در این جا q_{ew} ، λ ، A_t و t به ترتیب مقدار حرارت مورد استفاده

تغییرفازدهنده، دمای ماده تغییرفازدهنده، گرمای ویژه صفحه جاذب و جرم صفحه جاذب می‌باشد.

تعالادل انرژی برای ماده تغییرفازدهنده به صورت زیر است:

$$U_{b-pcm} A_b (T_b - T_{pcm}) = U_{pcm-a} A_b (T_{pcm} - T_a) + M_{equ} \frac{dT_{pcm}}{dt} \quad (۵)$$

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 می‌گردد [۲]:

$$\begin{aligned} M_{equ} &= M_{pcm} C_{s,pcm} & T_{pcm} < T_m \\ M_{equ} &= M_{pcm} L_{pcm} & T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \delta' \\ M_{equ} &= M_{pcm} C_{l,pcm} & T_{pcm} > T_m + \delta' \end{aligned} \quad (۶)$$

در این جا T_m و L_{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 سانتی‌گراد 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.

$$\begin{aligned} \frac{M_{equ}}{\Delta t} &= U_{b-pcm} A_b (T_{pcm} - T_b) + U_{pcm-a} A_b (T_{pcm} - T_a) & T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \delta' \\ M_{equ} \frac{dT_{pcm}}{dt} &= U_{b-pcm} A_b (T_{pcm} - T_b) + U_{pcm-a} A_b (T_{pcm} - T_a) & T_{pcm} \neq T_m \end{aligned} \quad (۷)$$

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

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (24)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (25)$$

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

۲-۴- توان الکتریکی مدول فتوولتائیک

بازده الکتریکی و توان الکتریکی مدول فتوولتائیک از رابطه زیر

محاسبه می‌گردد [۱۸]:

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} \left[1 - 0.0045(T_c - T_{a,ref}) + 0.052 \ln \left(\frac{I_t}{I_{t,ref}} \right) \right] \quad (26)$$

$$P_{el} = I_t A_m \eta_{el} - P_{fan} \quad (27)$$

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]:

$$I_{ref}(t) = 1000 \text{ W/m}^2 \quad (28)$$

$$T_{a,ref} = 25^\circ\text{C} \quad (29)$$

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 |
|-----------------------------|-----------------------------|
| منوکریستالین سیلیکون | نوع مدول فتوولتائیک |
| 3 | تعداد مدول فتوولتائیک |
| $A_m = 0.6 \text{ m}^2$ | مساحت سطح مدول |
| $\eta_{el,ref} = 0.12$ | بازده الکتریکی شرایط مرجع |
| $\beta_c = 0.6543$ | ضریب فشردگی مدول فتوولتائیک |
| $P_{el,max} = 75 \text{ W}$ | توان حداکثر مدول فتوولتائیک |
| $\alpha_c = 0.7$ | ضریب جذب |

برای تبخیر رطوبت، گرمای نهان تبخیر آب^۱، مساحت سینی حاوی محصول و فاصله زمانی می‌باشد.

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

$$A_t = l \times b \quad (15)$$

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

$$p(T_{cr}) = \exp \left[25.317 - \frac{5144}{T_{cr} + 273.15} \right] \quad (16)$$

$$p(T_r) = \exp \left[25.317 - \frac{5144}{T_r + 273.15} \right] \quad (17)$$

$$h_{cw} = \frac{K_v}{L_c} Nu \quad (18)$$

در این جا L_c ، K_v و Nu به ترتیب طول مشخصه^۲، هدایت حرارتی هوای مرطوب، دمای میانگین متوسط و عدد ناسلت می‌باشد که به صورت زیر قابل محاسبه هستند [۸]:

$$L_c = \frac{l + b}{2} \quad (19)$$

$$K_v = 0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4} T_i \quad (20)$$

$$T_i = \frac{T_{cr} + T_r}{2} \quad (21)$$

$$Nu = 0.03 (\text{RePr})^{1.023} \quad (22)$$

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

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]:

$$I_t = I_n \cos \theta_i + I_d R_d + \rho R_r (I_d + I_b) \quad (23)$$

- 1 Latent heat of vaporization
- 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 می‌گردد.

$$\eta_{en} = \dot{E}_{out,desired} / \dot{E}_{in,net} \quad (30)$$

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 می‌گردد.

$$\dot{E}_{in,net,day} = A_m I_t + \sum A_i I(i) \quad (31)$$

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.

$$\dot{E}_{in,net,night} = M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt} \quad (32)$$

نرخ انرژی مطلوب خروجی از سیستم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\dot{E}_{out,desired} = h_{ew} A_{cr} (T_{cr} - T_r) + P_{el} \quad (33)$$

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.

$$\eta_{en,day} = \frac{\left(\frac{I_t A_m \eta_{el} - P_{fan}}{0.38} \right) + h_{ew} A_{cr} (T_{cr} - T_r)}{A_m I(t) + \sum A_i I(i)} \quad (34)$$

$$\eta_{en,night} = \frac{h_{ew} A_{cr} (T_{cr} - T_r)}{M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt}} \quad (35)$$

جدول ۲. پارامترهای طراحی خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای پژوهش تایواری و همکاران [۷]

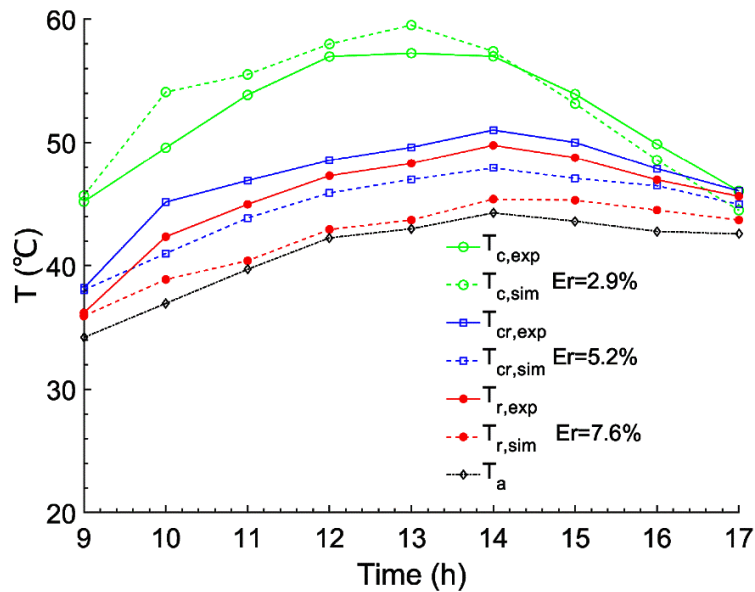
Table 2. Design parameters of the greenhouse solar dryer investigated by Tiwari et al

| پارامتر | مقدار |
|--------------------------|----------------------------|
| مساحت دیوار شمالی گلخانه | $A_n = 0.2 \text{ m}^2$ |
| مساحت دیوار جنوبی گلخانه | $A_s = 0.1264 \text{ m}^2$ |
| مساحت دیوار شرقی گلخانه | $A_e = 0.5 \text{ m}^2$ |
| مساحت دیوار غربی گلخانه | $A_w = 0.5 \text{ m}^2$ |
| مساحت کف گلخانه | $A_g = 1.066 \text{ m}^2$ |
| حجم گلخانه | $V = 0.71 \text{ m}^3$ |
| مساحت سطح محصول | $A_c = 1.2666 \text{ m}^2$ |
| جرم محصول | $M_{cr} = 2 \text{ kg}$ |
| ضریب جذب محصول | $\alpha_c = 0.3$ |
| سرعت فن | $N = 1100 \text{ rpm}$ |
| قطر فن | $d = 0.1 \text{ m}^2$ |

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].

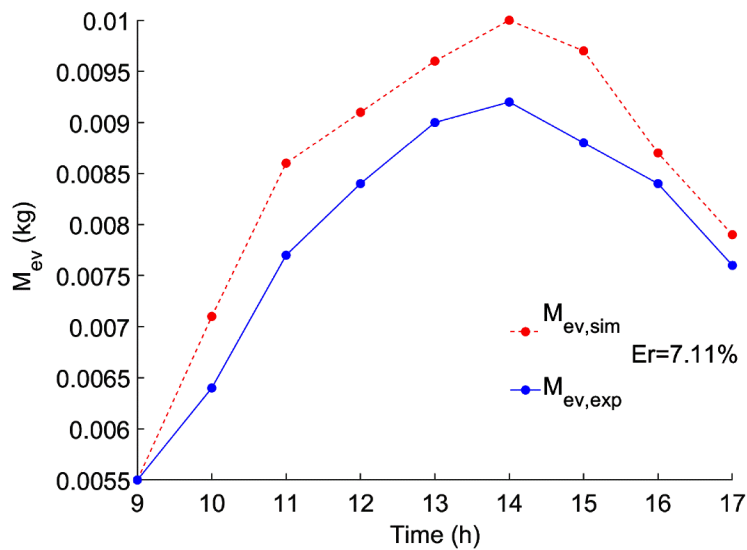
۳- اعتبارسنجی

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 خورشیدی 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

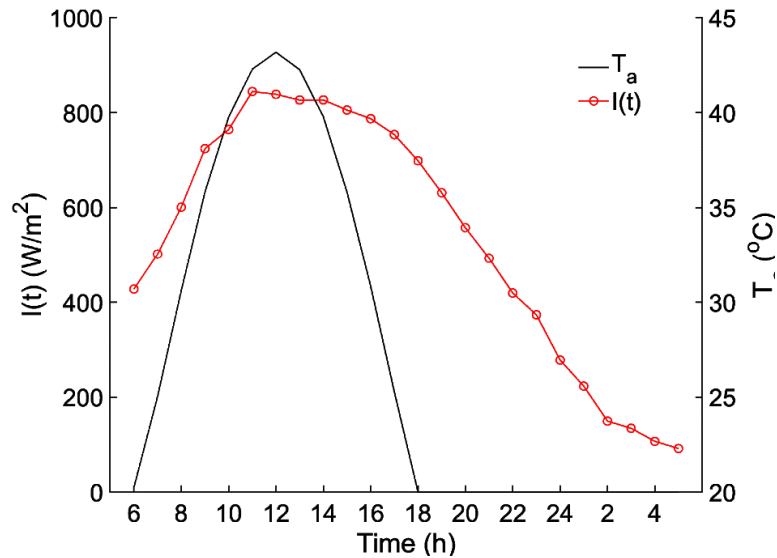


شکل ۳. مقادیر تجربی و شبیه‌سازی میزان تبخیر بر حسب زمان آزمایش

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 شبیه‌سازی دمای سلول‌های فتوولتائیک، دمای محصول و دمای هوای محفظه گلخانه‌ای و همچنین دمای محیط را بر حسب زمان آزمایش نشان می‌دهد. در شکل مربوطه اندیس exp داده‌های تجربی تایواری و همکاران [۷] و اندیس sim نتایج عددی تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. 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 سانتی‌گراد است که این امر موجب ادامه یافتن فرآیند رطوبت‌زایی 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 خشک‌کن است و لذا خنک‌کاری مدول فتوولتائیک به منظور افزایش توان الکتریکی آن فقط در این بازه ۴ ساعته صورت می‌گیرد. به منظور افزایش مدت زمان خنک‌کاری مدول فتوولتائیک پیشنهاد می‌شود که هوای ورودی به محفظه ابتدا از زیر مدول فتوولتائیک عبور داده شود و سپس وارد محفظه گردد تا بازه خنک‌کاری مدول فتوولتائیک بالا رود و عملکرد حرارتی خشک‌کن نیز بهبود یابد.

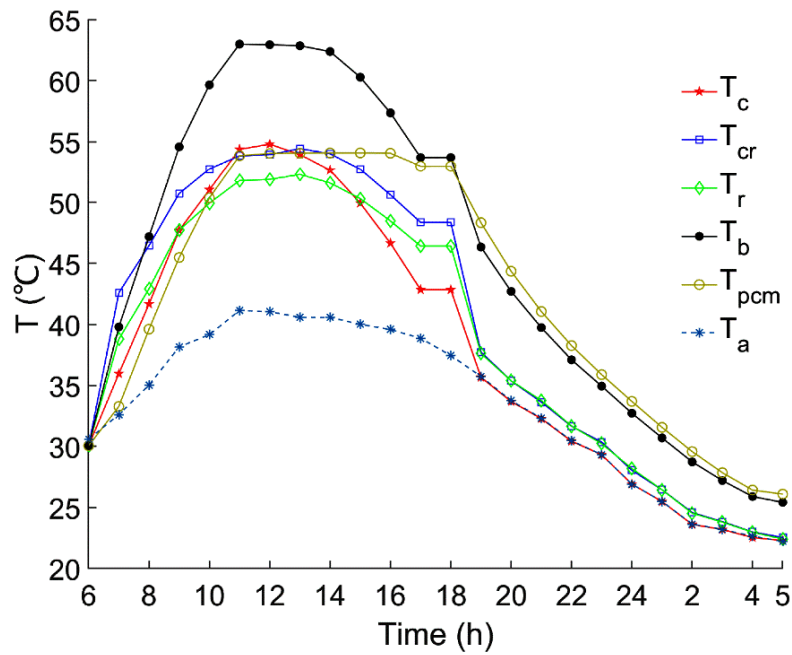
۴-۱- مطالعات پارامتری روی مقدار رطوبت تبخیرشده

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.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت نسبی میزان تبخیر در حدود ۵۳٪ کاهش می‌یابد. چون افزایش رطوبت نسبی به صورت یک مانع در برابر تبخیر سطحی از محصول

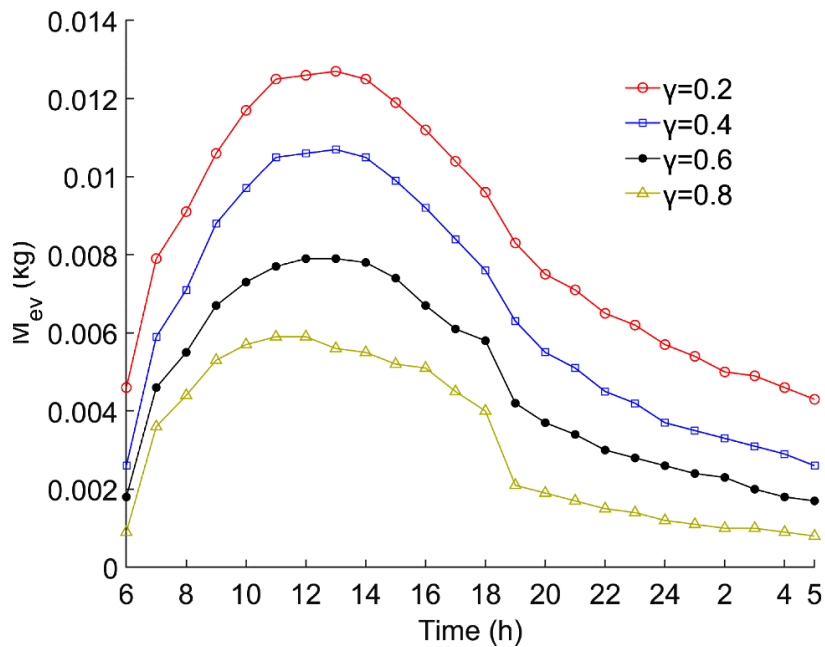
در این بخش به بررسی عملکرد خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای مجهز به سلول‌های فتوولتائیک و ماده تغییرفازدهنده برای یک روز نمونه تابستانی (۱۵ تیر) شهر زاهدان پرداخته می‌شود. در این تحقیق تأثیر پارامترهای طراحی و عملکردی مختلف برای بازه انرژی و میزان تبخیر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. محصول مورد نظر در این طراحی انگور می‌باشد که ضریب جذب آن بین ۰/۲۵ 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 می‌باشند. در شکل ۵ مقادیر دماهای شبیه‌سازی شده برای اجزا مختلف سیستم مورد مطالعه ترسیم شده است. مطابق این شکل در روز مربوطه ماده تغییرفازدهنده در حدود ۷ ساعت در تغییر فاز $(T_{pcm} = ^\circ C)$ ۵۴ 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



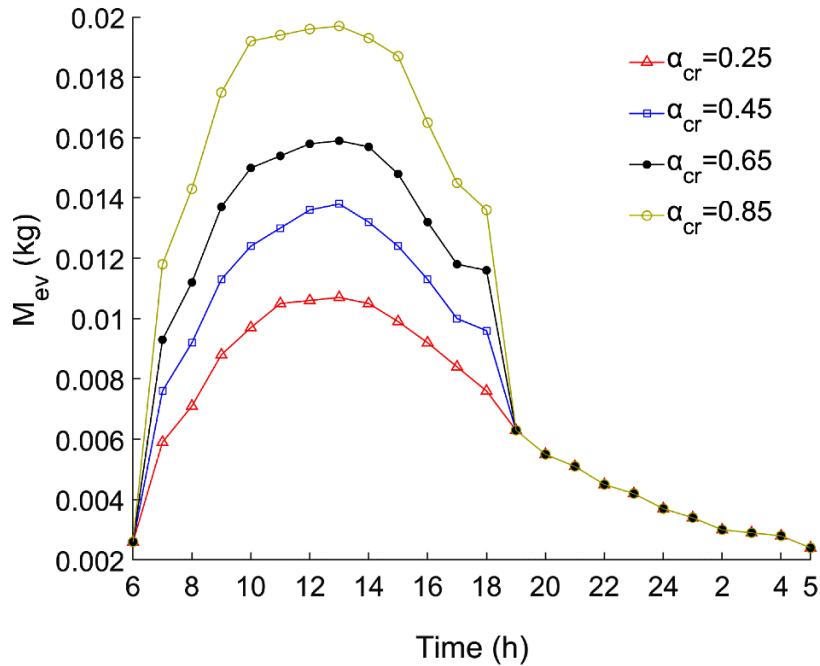
شکل ۵. نمودار دماهای شبیه‌سازی شده اجزاء مختلف سیستم خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای

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



شکل ۷. تأثیر تغییرات ضریب جذب محصول بر میزان تبخیر
Fig. 7. Effect of variation of product absorptivity on evaporation mass

تغییرفازدهنده تنها وظیفه ذخیره انرژی اتلافی را دارد لذا تغییرات جرم آن بر میزان تبخیر تأثیر 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 است. می‌توان گفت که جرم بیشتر برای ماده تغییرفازدهنده به معنای امکان ذخیره انرژی اتلافی بیشتر در طول روز و لذا بازپس‌دهی 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 ۲۵ kg به بعد تغییراتی در میزان تبخیر دیده نمی‌شود.

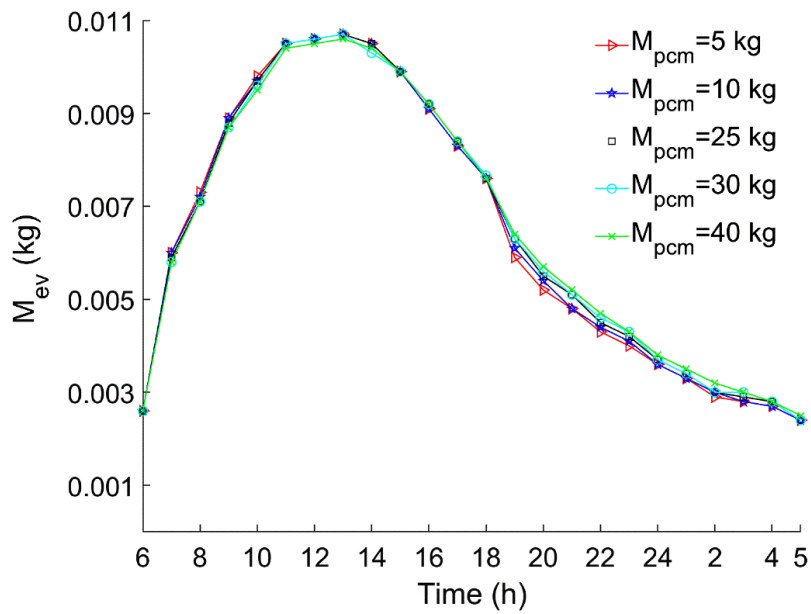
۴-۲- مطالعات پارامتری روی بازده انرژی

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

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.

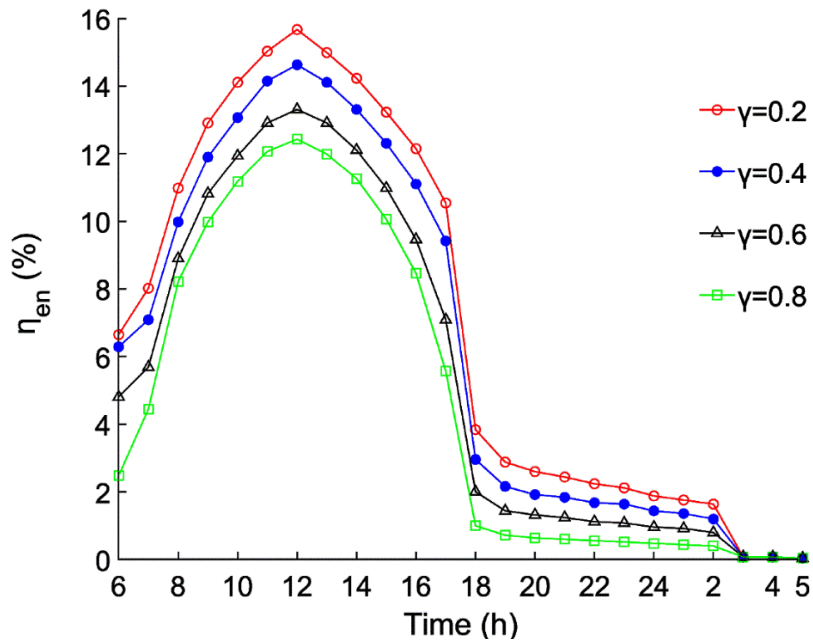
شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش ضریب جذب محصول میزان تبخیر در حدود ۴۵٪ افزایش پیدا می‌کند. علت افزایش میزان تبخیر زیاد شدن دمای محصول به واسطه جذب تابش خورشیدی بیشتر توسط محصول می‌باشد. شایان ذکر است افزایش ضریب جذب محصول به معنای خشک‌کردن انگور از انواع مختلف می‌باشد. شکل ۸ تأثیر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده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

مطابق با شکل ۸ افزایش جرم ماده تغییرفازدهنده، تأثیری 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



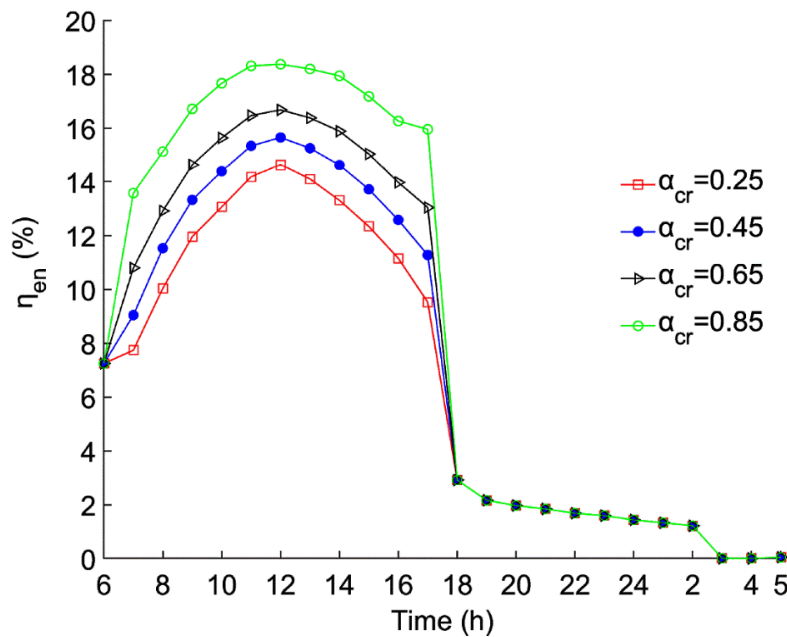
شکل ۸. تأثیر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده بر میزان تبخیر

Fig. 8. Effect of variation of PCM mass on evaporation mass



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

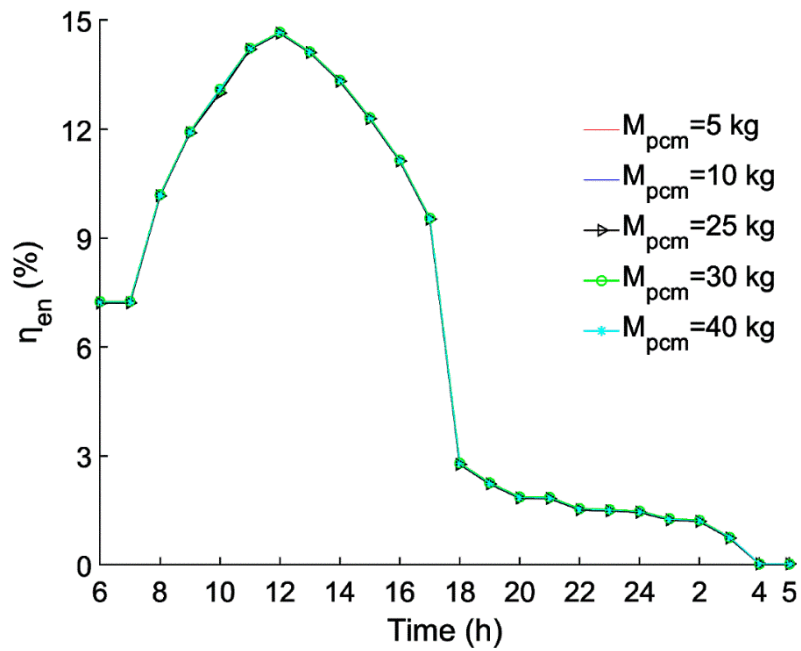
شب هنگام تابش خورشیدی و توان الکتریکی وجود ندارد و دمای محصول و دمای محفظه به دلیل مود انتقال حرارت جابجایی آزاد مثل روز چندان بالا نیستند. عوامل مذکور باعث می‌شود که تغییرات ماده تغییرفازدهنده بر بازده انرژی قابل ملاحظه نباشد. در شکل ۱۲ مقایسه‌ای برای میزان تبخیر بین خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای مجهز به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

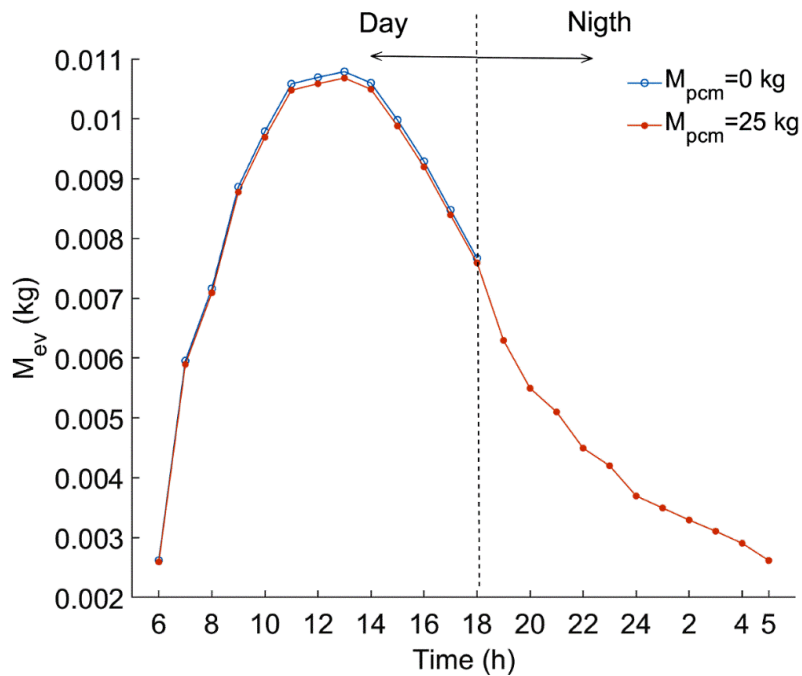
می‌یابد. چون با افزایش رطوبت نسبی انرژی حرارتی تبخیر کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۰ تأثیر تغییرات ضریب جذب محصول را بر بازده انرژی نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۰ با افزایش ضریب جذب محصول بازده انرژی ۲۰٪ افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب جذب محصول دمای محصول افزایش پیدا می‌کند 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 می‌کند لذا بر دمای محصول و دمای محفظه در طول روز تاثیر نمی‌گذارد. همچنین در طول روز تابش خورشیدی و توان الکتریکی فتوولتائیک اصلاً به جرم ماده تغییرفازدهنده وابستگی ندارند. در



شکل ۱۱. تأثیر تغییرات جرم ماده تغییرفازدهنده بر بازده انرژی
 Fig. 11. Effect of variation of PCM mass on energy efficiency



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

| | | | |
|--|----------------|--|-------------------|
| فشار جزئی | $p(N/m^2)$ | 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. | |
| پرانتل | Pr | | |
| رینولدز | Re | | |
| نرخ انتقال حرارت | $q(W)$ | | |
| زمان | $t(s)$ | | |
| دما | $T(^{\circ}C)$ | | |
| ضریب انتقال حرارت | $U(W/m^2K)$ | | |
| نشانه | علائم یونانی | | |
| ضریب جذب | α | • ماده تغییرفازدهنده با ذخیره حرارت اتلافی سیستم در طول روز و با پس‌دادن آن در طول شب امکان ادامه فرآیند خشک‌کردن محصول در شب هنگام به خوبی فراهم می‌آورد. | |
| درصد پوشش شیشه توسط سلول | β | • هر چقدر ضریب جذب محصول و جرم ماده تغییرفازدهنده بیشتر شود میزان تبخیر افزایش می‌یابد. | |
| ضریب عبور شیشه | τ_g | • هر چقدر رطوبت نسبی هوا افزایش یابد میزان تبخیر کاهش می‌یابد. | |
| ضریب عبور شیشه سیل داده شده | τ_{gz} | • هر چقدر ضریب جذب محصول افزایش یابد، میزان بازده انرژی افزایش می‌یابد. | |
| رطوبت نسبی | γ | • هر چه رطوبت نسبی بیشتر شود میزان بازده انرژی کاهش می‌یابد. | |
| بازده | $\eta(\%)$ | • یک افزایش ۳۸/۷۶ درصدی در میزان تبخیر به واسطه استفاده از مواد تغییرفازدهنده در خشک‌کن خورشیدی گلخانه‌ای مشاهده می‌شود. | |
| نشانه | علامت | | |
| محیط اطراف | a | | |
| صفحه جاذب | b | | |
| پایین مدول فتوولتائیک به محفظه خشک‌کن | bcr | | |
| سلول خورشیدی | c | | |
| محصول | cr | | |
| پایین محصول به محیط اطراف | cra | | |
| همرفت از سطح محصول به محفظه خشک‌کن خورشیدی | crc | | |
| خشک‌شده | d | | |
| مطلوب | $desired$ | | |
| تجربی | exp | | |
| الکتریکی | el | | |
| انرژی | en | نشانه | علامت |
| معادل | equ | مساحت | $A(m^2)$ |
| تبخیری | ev | گرمای ویژه | $C(J/kgK)$ |
| ورودی | in | نرخ انرژی | $\dot{E}(W)$ |
| شیشه | g | خطا | $Er(\%)$ |
| مدول فتوولتائیک | m | ضریب انتقال حرارت | $h(W/m^2K)$ |
| خالص | net | شدت تابش خورشید روی سلول‌های فتوولتائیک | $I_t(W/m^2)$ |
| نقطه ذوب | m | شدت تابش خورشید روی دیوار محفظه خشک‌کن | $I(i)(W/m^2)$ |
| ماده تغییرفازدهنده | pcm | جرم | $M(kg)$ |
| فتوولتائیک | pv | دبی جرمی هوا | $\dot{M}_f(kg/s)$ |

۵- نتیجه‌گیری

۶- فهرست علائم

- [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. Elkhali, A.A. Guizani, Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper, *Renewable*

| | |
|------------------------------|--------------|
| خروجی | <i>out</i> |
| محفظه خشک کن | <i>r</i> |
| شبیه سازی | <i>sim</i> |
| خورشیدی | <i>solar</i> |
| جامد | <i>s</i> |
| بالا مدول فتوولتائیک به محیط | <i>tca</i> |
| اتلافی | <i>loss</i> |
| مایع | <i>l</i> |
| از دیوار به محیط اطراف | <i>w</i> |

۷- مراجع

- [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] A. El-Sebaei, 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. Lakhali, 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 thermal-electrical 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](https://doi.org/10.22060/mej.2020.18160.6751)



