

## طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی تجهیز شده با مواد تغییر فاز دهنده

جواد جنت‌خواه\*، هادی غائبی و بهمن نجفی\*\*

\*نگارنده مسئول: گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. تلفن: ۰۴۵)۳۳۵۱۷۵۰۰،

پایم‌نگار: J.Jannatkah@ gmail.com

\*\*به ترتیب: دانشجوی دکتری انرژی‌های تجدیدپذیر؛ استادیار گروه مهندسی مکانیک؛ و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه

محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۴

### چکیده

از مشکلات اساسی خشک‌کن‌های محصولات کشاورزی، هزینه بر بودن آنها و مصرف انرژی بالا و در نتیجه کاهش سود کاربران است. یکی از راهکارهای مفید در این زمینه، استفاده از انرژی پاک و رایگان خورشید است. در این تحقیق یک خشک‌کن خورشیدی طراحی و ساخته شد. این خشک‌کن دارای یک کلکتور کاملاً نوآورانه است که از ضایعاتی مانند قوطی‌های فلزی خالی نوشابه ساخته و از مواد تغییر فاز دهنده در محفظه خشک‌کن آن جهت ذخیره‌سازی حرارت استفاده شده است. پس از طی مراحل طراحی و ساخت، دستگاه آزمایش و دبی هوا، دما و شدت تابش به صورت لحظه‌ای اندازه گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده، دمای صفحه جذب کلکتور تا ۱۱۱ درجه سلسیوس بالا رفت و دمای هوای خروجی از آن نیز با دمای محیط ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس اختلاف داشت. بهترین نتایج در دبی هوای ۱۸ مترمکعب بر ساعت در ورودی خشک‌کن و بین ساعات ۱۴ تا ۱۵ روزهای اجرای آزمایش به دست آمد. دمای تغییر فاز مواد تغییر فاز دهنده ۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس بود و زمانی که در آزمایش‌ها دمای محفظه به بیش از ۵۳ درجه رسید، مواد تغییر فاز دادند و انرژی حرارتی ذخیره شده خود را به محفظه خشک‌کن تحویل دادند و تا حدودی از افت دمای محفظه جلوگیری کردند به طوری که افت دمای محفظه در شرایط تغییر فاز این مواد با شدت بسیار کمتری اتفاق افتاد. در آزمون خشک کردن نعنا با رطوبت اولیه ۸۶ درصد بر پایه تر، طی آزمون محصول در ۲۷۳ دقیقه با میانگین دمای محفظه ۴۴/۳ درجه سلسیوس و دبی هوای ۱۸ مترمکعب بر ساعت مقدار ۸۶ گرم آب خود را از دست داد و به رطوبت ثانویه ۱۲ درصد رسید.

### واژه‌های کلیدی

خشک‌کن خورشیدی، طراحی و ساخت، کلکتور، مواد تغییر فاز دهنده

### مقدمه

سوختهای فسیلی هستند که در آینده به اتمام خواهد رسید. از انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است که می‌تواند جایگزینی برای انرژی‌های فسیلی باشد. خشک کردن یکی از روش‌های اصلی نگهداری و از مهمترین واحدهای عملیاتی صنایع غذایی است. خشک کردن ماده غذایی به معنای انتقال آب از داخل آن به سطح و از سطح به محیط است. آهنگ انتقال جرم آب برای هر ماده

خشک کردن مواد غذایی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری آنهاست. با کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی، امکان فساد میکروبی آن از بین می‌رود و وزن و حجم آن نیز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. از طرفی، فرآیند خشک کردن از لحاظ مصرف انرژی یکی از پرهزینه‌ترین عملیات پس از برداشت در کشاورزی است. امروزه منبع اصلی تأمین انرژی،

به‌هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز دهنده قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچگونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه تغییر فاز، درون خود حفظ کند (Demirbas, 2006; Mondal, 2008).

این مواد در سطح بسیار وسیعی در صنایع گوناگون شامل مخابرات، کشاورزی، حمل و نقل، خودروها، ها، ماهواره پزشکی، نساجی، گلخانه‌ها و دیگر موارد به کار می‌روند. اولین گزارش‌ها مبنی بر کاربرد این مواد در ساختمان از ۱۹۴۰ به‌صورت نوظهور مطرح (Zalba *et al.*, 2003) و از دهه ۱۹۸۰ به صورت گسترده بررسی شد و امروزه استفاده از آنها در صنعت نیز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است. همچنین، به‌کارگیری این ماده به سبب کاهش اندازه نوسانات دمای هوای داخل و باقی ماندن دمای هوای اتاق برای مدت زمان طولانی‌تر نزدیک به دمای محیط، باعث بهبود شرایط آسایش حرارتی نیز می‌شود (Feldman *et al.*, 1989).

در خصوص استفاده از ذخیره گرمای نهان برای نگهداری انرژی گرمایی به‌هنگام خشک کردن، اطلاعات محدودی وجود دارد. دواهاستین و موجومدار (Devahastin & Mujumdar, 1989) برای ذخیره کردن انرژی حاصل از گاز خروجی یک خشک‌کن دانه از نوع بستر جهنده اصلاح شده، استفاده از ذخیره گرمای نهان را از نظر عددی بررسی کردند. پیتاکسوریارات و دواهاستین (Devahastin & Pitaksuriyarat, 2006) اثر استفاده از پارافین جامد را به‌عنوان وسیله ذخیره انرژی گرمایی برای سینتیک خشک کردن محصولات غذایی مطالعه کردند؛ سیستم پیشنهادی آنها متشکل بود از یک کمپرسور (متراکم کننده)، یک کنترل کننده دما، یک گرمکن و یک ظرف ذخیره گرمای نهان (LHS)<sup>۲</sup> آکرلیک استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۲۰ متر. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که سیستم

غذایی متفاوت است و بستگی به حجم، دما و مقدار رطوبت هوای عبوری از آن ماده دارد (Mesgari, 2013). با گرم کردن هوای محیط، رطوبت نسبی کم می‌شود و ظرفیت جذب آب افزایش می‌یابد. هوای گرم با عبور از روی محصول، رطوبت را جذب و آن را خشک می‌کند؛ هوای با رطوبت بالاتر خارج می‌شود (Hollick, 1999). با خشک کردن محصول علاوه بر اینکه وزن پایین می‌آید حجم و هزینه‌های حمل و نقل و بسته‌بندی آن نیز کاهش می‌یابد (Holedman *et al.*, 1992).

در بسیاری از مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه، خرید خشک‌کن‌های صنعتی برای کشاورزان از لحاظ اقتصادی باصرفه نیست و کشاورزان خرده پا به ندرت از این تجهیزات استفاده می‌کنند. روش سنتی خشک کردن محصول زیر تابش مستقیم آفتاب هم محدودیت‌هایی دارد مانند تلفات بالای محصول، خشک شدن ناکافی، آلودگی با گرد و غبار، آلودگی‌های قارچی، بارندگی‌های غیرمنتظره، و حمله حشرات، پرندگان و جوندگان.

کاربرد خشک‌کن‌های خورشیدی در محل‌های تولید محصولات کشاورزی مانند مزارع و باغ‌ها باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تبدیل بهینه محصولات کشاورزی و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. کیفیت محصول، به خصوص محصولاتی مانند سبزی‌های برگی که با داشتن ترکیبات معطر، در برابر دمای بالای خشک‌کن‌های صنعتی فوق‌العاده حساس هستند وقتی با خشک‌کن‌های خورشیدی خشک شود به طور قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی (پهن کردن محصول در معرض آفتاب و باد) و روش صنعتی (که پرهزینه است) خواهد بود.

PCM<sup>۱</sup> به مواد تغییر فاز دهنده گفته می‌شود. این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد، در فرآیند تغییر فاز (تغییر حالت جامد به مایع یا بالعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد

دمای متوسط کلکتور در ارتباط باشد. به علاوه، افزایش در مقدار ضریب انتقال گرما در سرعت دبی جرمی بالاتر می تواند به عنوان عاملی دیگر در نظر گرفته شود. انتخاب PCM با یک دمای تغییر فاز مناسب دارای اهمیت و عاملی است کلیدی برای اجتناب از فاسد شدن مواد غذایی .

در تحقیق حاضر یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با کلکتور از نوع صفحه تخت با قابلیت تغییر زاویه نسبت به افق طراحی و ساخته شد. در صفحه جاذب کلکتور از قوطی های فلزی دورریختنی نوبابه استفاده شد که ضریب انتقال حرارت آن بالاست. ماده تغییر فاز دهنده به کار رفته در این تحقیق پارافین جامد با محدوده دمای تغییر فاز ۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس است که درون لوله های مسی جاسازی شده وظیفه ذخیره انرژی حرارتی در محفظه خشک کن را بر عهده دارد. پوشش از نوع شیشه است؛ برای انتقال جریان هوا از فن الکتریکی و برای اطلاع از میزان دما در نقاط مختلف از حسگرهای دما استفاده شده است.

### مواد و روش ها

#### انتخاب محصول و تعیین رطوبت

محاسبات لازم بر اساس خشک کردن ۱۵۰ گرم نعنا تا رطوبت ثانویه ۱۲ درصد انجام گرفت. با وزن کردن محصول تر و قرار دادن آن در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و توزین مجدد آن، رطوبت اولیه محصول ۸۶ درصد به دست آمد.

وزن محصول خشک را با استفاده از رابطه (۱) می توان به دست آورد (Azad *et al.*, 1990; Tavakolipour, 2002):

$$m_0(1 - x_0) = m_f(1 - x_f) \quad (1)$$

که در آن،

$x_0$  = درصد رطوبت محصول تر؛  $x_f$  = درصد رطوبت محصول خشک؛  $m_0$  = وزن محصول مرطوب و  $m_f$  = وزن محصول خشک. مقدار  $m_f$  برابر است با (رابطه ۲):

LHS پیشنهادی می تواند انرژی را به هنگام خشک کردن یک سیب زمینی شیرین در حدود تقریباً ۴۰ و ۳۴ درصد در هنگام استفاده از سرعت هوای ورودی به ترتیب ۱ و ۲ متر بر ثانیه ذخیره کند.

بال و همکاران (Bal *et al.*, 2010) خشک کنی خورشیدی طراحی کردند و توسعه دادند که از پارافین جامد به عنوان PCM برای ذخیره کردن انرژی خورشیدی اضافی روز استفاده می کرد. این پژوهشگران از هوای داغ در دماهای نزدیک به دماهای خروجی یک کلکتور (جمع کننده) نوعی استفاده کردند که وقتی هیچگونه انرژی خورشیدی در دسترس نباشد آن را آزاد می کند. این امر بر احتمال کاهش میزان انرژی مورد نیاز در فرایند خشک کردن دلالت می کند. به علاوه، آنها بر احتمال خشک کردن محصولات کشاورزی/ غذایی در دماهای یکنواخت و متوسط ۷۵-۴۰ درجه سلسیوس تأکید کردند.

چاکماک (Cakmak, 2011) نوع جدیدی از خشک کن خورشیدی را برای ارزیابی سینتیک خشک کردن انگور دانه دار به طور آزمایشی بررسی کرد. این خشک کن از یک اتاق مخصوص خشک کردن، یک کلکتور هوای خورشیدی و کلکتور دیگر با یک PCM تشکیل می شود. این طرح به منظور به دست آوردن اثر چرخش در جریان هوا، هم در ورودی و هم در بخش داخلی اتاق مخصوص خشک کردن، از عناصر دارای حرکت چرخشی استفاده می کند. کلکتور خورشیدی پیشنهادی مورد استفاده برای گرم کردن هوا در ابعاد ۰/۹۴، ۱/۸۵ و ۰/۲ متر ساخته شد.

ایساکیموتو و همکاران (Esakkimuthu *et al.*, 2013) خشک کنی خورشیدی و غیرمستقیم ساختند که از یک PCM استفاده می کند. این خشک کن متشکل از یک گرمکن هوای خورشیدی، یک دمنده، یک واحد ذخیره سازی حرارتی PCM از نوع بستر فشرده و یک اتاق مخصوص خشک کردن است؛ یک کلکتور هوای خورشیدی موج دار مثلثی نیز در آن به کار گرفته شد. این محققان نتیجه گیری کردند که راندمان کلکتور با کاهش سرعت دبی جرمی، افزایش می یابد و این افزایش می تواند با کاهش در اتلاف گرمایی همراه با کاهش

$$m_o - m_f = m_w \quad (2)$$

که در آن،

$$N = \text{تعداد پوشش شیشه: } 1 \leq N \leq 3$$

$F$ ،  $C$  و  $e$  ضرایب ثابتی هستند که از روابط ۶ تا ۸ به دست می‌آیند.

$$F = (1 + 0/089h_w - 0/1160h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0/07866N) \quad (6)$$

$$c = 520(1 - 0/000051B^2) \quad (7)$$

$$e = 0/43(1 - 100/T_{psm}) \quad (8)$$

#### انرژی تابشی جذب شده

مقدار انرژی تابشی جذب شده در صفحه جاذب کلکتور از رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$S = \bar{I}(z\alpha) \quad (9)$$

که در آن،

$\bar{I}$  = مقدار متوسط تابش روزانه رسیده به سطح زمین برای منطقه مورد نظر در یک روز معلوم و  $z\alpha$  = ضریب جذب صدور صفحه جاذب و شیشه که بدون واحد است و در سیستم‌های خورشیدی حدود ۰/۹ در نظر گرفته می‌شود (Haj-Saghati, 2002).

طبق گزارش‌های اخذ شده از ایستگاه سینوپتیک واقع در جاده خلخال شهر اردبیل، عرض جغرافیایی شهر اردبیل  $38/15^\circ N$  و طول جغرافیایی آن  $48/17^\circ E$  است و در ارتفاع ۱۳۳۲ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد و مقدار متوسط انرژی تابشی رسیده به سطح زمین برای یک روز سرد سال در ماه اکتبر میلادی عددی برابر با  $3/17 \frac{kwh}{m^2}$  است. این مقدار باید تبدیل بر  $w/m^2$  شود لذا با در نظر گرفتن میزان ساعت آفتابی استاندارد روزانه ۸ ساعت برای سیستم‌های خورشیدی در نظر می‌گیریم (Kalogirou, 2009).

مساحت کلکتور مورد نیاز از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

#### انرژی حرارتی مورد نیاز

برای به دست آوردن انرژی حرارتی لازم جهت تبخیر آب محصول، از رابطه ۳ استفاده می‌شود:

$$Q = m_w \cdot \lambda \quad (3)$$

#### مساحت مورد نیاز کلکتور

در سیستم‌های خورشیدی برای محاسبه سطح کلکتور مورد نیاز از رابطه ۴ استفاده می‌شود (Haj-Saghati, 2002; Kalogirou, 2009):

$$A_c = \frac{Q_U}{F_R \cdot [S - U_L(T_1 - T_a)]} \quad (4)$$

که در آن،

$A_c$  = مساحت صفحه جاذب؛  $F_R$  = ضریب انتقال حرارت در کلکتور (معمولاً بین ۰/۶۵ تا ۰/۹۵)؛  $S$  = انرژی تابشی جذب شده در صفحه جاذب؛  $U_L$  = ضریب اتلاف حرارت کل در کلکتور؛  $T_1$  = دمای هوای ورودی به کلکتور؛ و  $T_a$  = دمای هوای محیط.

طبق رابطه ۴، برای محاسبه سطح مورد نیاز کلکتور باید ابتدا پارامترهایی چون  $U_L$  و  $S$  محاسبه شود.

#### تلفات

تلفات کلکتور شامل تلفات جانبی ( $u_e$ )، تلفات سطح زیرین ( $u_b$ ) و تلفات سطح بالایی ( $u_t$ ) است که مجموع آنها به صورت  $u_L = u_e + u_b + u_t$  بیان می‌شود. حد معمول تلفات جانبی  $k \cdot w/m^2$  ۱/۵-۲ است و برای تلفات زیرین این عدد  $k \cdot w/m^2$  ۱/۲ - ۰/۳ خواهد بود (Klein, 1975; Haj-Saghati, 2002; Kalogirou, 2009). بدین ترتیب تلفات سطح بالایی محاسبه می‌شود (رابطه ۵):

$$u_t = \left[ \frac{N}{\frac{c}{T_{psm}} \left[ \frac{T_{psm} - T_a}{N + F} \right] + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \quad (5)$$

$$\frac{\sigma(T_{psm} + T_a)(T_{psm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + F - 1 + 0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}$$

### بازده خشک کن خورشیدی

بازده خشک کن خورشیدی از رابطه ۱۲ به دست می آید:

$$\eta_2 = \frac{m_w \times L_v}{G_T + P_{Fan}} \quad (12)$$

که در آن:  $\eta_2$  = بازده خشک کن خورشیدی؛  $L_v$  = گرمای نهان تبخیر آب؛ و  $m_w$  = جرم آب تبخیر شده.

### تعیین زاویه های بهینه کلکتور نسبت به سطح افق برای ماه های سال

برای تعیین زاویه بهینه نسبت به سطح افق، از مدلی استفاده شد که نیجگروداو و همکاران (Nijegorodov et al., 1994). ارائه داده اند.

عرض جغرافیایی شهر اردبیل  $38/15^{\circ}N$  و محوطه آزمایش (دانشگاه محقق اردبیلی)  $38/21^{\circ}N$  است. در روابط،  $\emptyset$  نشانگر عرض جغرافیایی بر حسب درجه است. با جایگذاری اعداد در روابط جدول ۱ زاویه های بهینه برای شهر اردبیل به تناسب ماه به صورت زیر تعیین شد.

$$Ac = \frac{Q_u}{F_R \cdot [S - U_L(T_3 - T_a)]} \quad (10)$$

که در آن،  $F_R$  = مقدار ضریب انتقال حرارت در کلکتور؛ و  $T_3$  = دمای هوا در ورودی به کلکتور.

### بازده کلکتور

بازده کلکتور عبارت است از آهنگ گرمای جمع شده به گرمای رسیده به سطح کلکتور که با رابطه ۱۱ بیان می شود (Panahandeh, 1985):

$$\eta_1 = (za) - u_L \frac{T_{p,m} - T_a}{G_T} \quad (11)$$

که در آن:  $\eta_1$  = بازده کلکتور؛  $G_T$  = میزان شار تابشی بر صفحه جذب کننده؛  $Z_a$  = حاصل ضرب عبور جذب مؤثر انرژی خورشیدی؛  $U_L$  = ضریب کلی اتلاف در سطح کلکتور؛  $T_a$  = دمای هوای محیط؛ و  $T_{p,m}$  = دمای متوسط صفحه جذب.

جدول ۱- زاویه های بهینه کلکتور نسبت به سطح افق به تناسب هر ماه

زاویای به دست آمده برای شهر اردبیل	ماه های سال	مدل Nijegorodov
۶۲/۹۵	ژانویه	0.890+29
۵۴	فوریه	0.970+17
۴۲/۱۵	مارس	0+4
۲۸/۱۵	آوریل	0-10
۱۱/۴۸	می	0.930-24
۰/۸۱	ژوئن	0.870-34
۳/۹۵	جولای	0.890-30
۲۰	اگوست	0.970-17
۳۶/۱۵	سپتامبر	0-2
۵۰/۱۵	اکتبر	0+12
۶۰/۴۸	نوامبر	0.930+25
۶۷/۱۹	دسامبر	0.870+34

### طراحی خشک‌کن خورشیدی

پارامترها از مفروضات مورد استفاده در محاسبات سیستم‌های خورشیدی استفاده شد؛ تمامی پارامترها در جدول ۲ قابل مشاهده هستند (Haj-Saghati, 2002; Kalogirou, 2009). پارامترهای محاسبه شده در جدول ۳ آمده است.

برای طراحی و ساخت دستگاه باتوجه به روابط ذکر شده در بخش قبلی، با پارامترهای مختلفی از جمله  $G_T, P_{fan}, L_v, C_p, N, \bar{I}$  روبه‌رو هستیم که از معلومات مسئله هستند و نیز برای سایر

جدول ۳- پارامترهای محاسبه شده

F	۰/۹۳۷	$Q_U$	۲۹۸/۳
C	۴۲۴/۵	$m_f$	۰/۰۲۳
e	۰/۳۱۵	$m_w$	۰/۱۲۶
$U_t$	۳/۶۵	$\eta_1$	۰/۵۲
$U_{Tot}$	۶/۶۵	$\eta_2$	۰/۲۳
$\Delta p$	۸۸/۱۱	S	۳۵۶/۶
$V_{corp}$	۱/۰۱	$A_c$	۱/۰۴
$\bar{v}$	۸۶۴	$M_a$	۱۴/۹
$A_t$	۰/۳	$V_a$	۲۸/۶

\*واحدهای پارامترها در فهرست اعلام و نشانه‌ها آمده است.

جدول ۲- پارامترهای معلوم و مفروضات مسئله

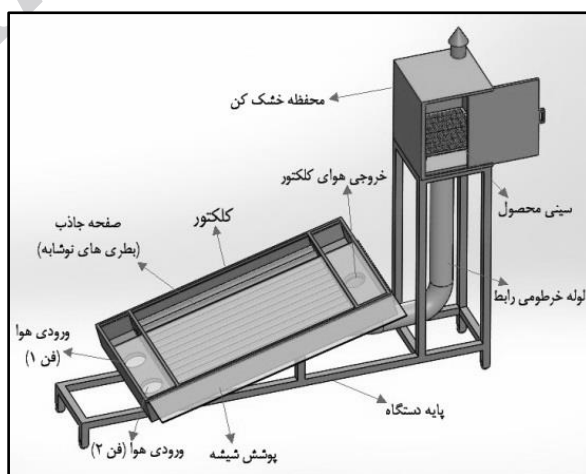
N	۱	$T_1$	۵۵	$G_T$	۹۰۰
$\epsilon_p$	۰/۱	$T_2$	۳۵	$P_{fan}$	۱۶
$\epsilon_g$	۰/۹۵	$\bar{I}$	۳/۱۷	$L_v$	۲۵۰۰
$T_a$	۲۸۳	$T_3-T_a$	۳	$C_p$	۱/۰۰۳
$T_{psm}$	۳۷۳	R	۰/۲۸۸	$X_o$	۰/۸۶
$h_w$	۱۰	P	۸۵	$X_f$	۰/۱۲
$\tau\alpha$	۰/۹	T	۳۰۸	$M_o$	۰/۱۵
$F_R$	۰/۸۵	$M_{bd}$	۱۰	$\rho$	۱/۲۲۵
B	۶۰	M	۰/۱۵	$\Delta T$	۸۵
$U_e$	۲	h	۰/۰۵	$\lambda$	۲۵۰۰
$U_b$	۱	v	۱/۵		

\*واحدهای پارامترها در فهرست اعلام و نشانه‌ها آمده است.

استفاده و قسمت‌های مختلف دستگاه شامل کلکتور خورشیدی، محفظه خشک‌کن، سینی محصول، لوله رابط و پایه نگهداری و حمل و نقل طراحی شد (شکل ۱).

### مدل‌سازی نرم‌افزاری

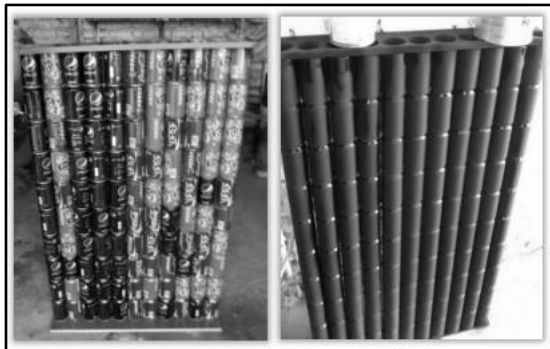
پس از محاسبات لازم، به طراحی نرم‌افزاری و استخراج ابعاد دستگاه پرداخته شد، در اینجا از نرم‌افزار Solid Works 2014



شکل ۱- طرح خشک‌کن خورشیدی ترکیب شده نهایی

طراحی، ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی...

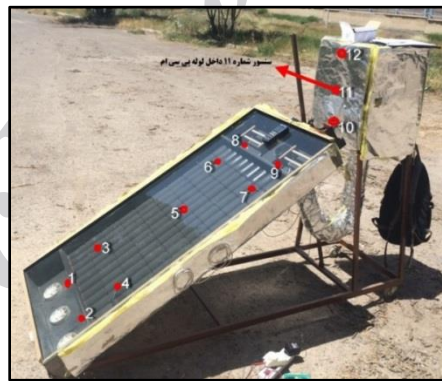
حرارتی به همدیگر متصل شدند (شکل ۲). در شکل‌های ۳ و ۴ صفحه‌ی جاذب رنگ کاری شده و کلکتور نهایی دیده می‌شوند. حسگرهای شماره ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ در شرایط داخل محفظه و لوله PCM را نشان می‌دهند.



شکل ۳- صفحه‌ی جاذب آماده و رنگ کاری شده



شکل ۲- جمع‌آوری و باز کردن مقاطع قوطی‌ها و اتصال آنها به یکدیگر



شکل ۴- خشک‌کن خورشیدی تکمیل شده و حسگرهای دما تعبیه شده روی آن

پارافین ذوب‌شده درون آنها ریخته و سمت دیگر لوله‌ها نیز بسته شد (شکل ۵). پارافین محصول کارخانه Merck کشور آلمان بوده و دمای تغییر فاز آن ۵۱-۵۳ درجه‌ی سلسیوس است.

تهیه‌ی لوله‌های حاوی PCM در تحقیق حاضر از پارافین به عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده‌ی درون لوله‌های مسی استفاده شد. در این مرحله لوله‌های مسی تهیه و یک مقطع آنها بسته شد؛ پس از آن،

## ساخت دستگاه

### مراحل ساخت و مونتاژ دستگاه

پس از طراحی نرم‌افزاری، فرآیند ساخت دستگاه به شرح شکل‌های ۲ تا ۴ انجام شد. قوطی‌های نوشابه جمع‌آوری شدند، مقاطع آنها باز شد، و با چسب



شکل ۵- تهیه لوله‌های حاوی PCM

### ارزیابی

یافته‌های پژوهش از قبیل دمای حسگرها در نقاط مختلف کلکتور و محفظه خشک کن، میزان انرژی تابشی رسیده به زمین به هنگام آزمایش، دمای هوای محیط، سرعت هوای خروجی از فن‌های الکتریکی در سه سطح مختلف و تعداد فن‌های روشن در خلال آزمایش یادداشت شد.

برای سنجش عملکرد دستگاه، ۱۰۰ گرم نعنا تهیه شد؛ رطوبت اولیه آن تعیین و تا رطوبت ثانویه ۱۲ درصد خشک شد. رطوبت اولیه محصول با نمونه گیری و قرار دادن در آون به میزان ۸۶ درصد بر پایه تر تعیین شد. در حین آزمون، محصول طی ۲۷۳ دقیقه و میانگین دمای محفظه ۴۴/۳ درجه سلسیوس و دبی هوای ۱۸ مترمکعب بر ساعت مقدار ۸۶ گرم آب خود را از دست داد و به رطوبت ثانویه آن به ۱۲ درصد رسید (شکل ۶).

(میانگین مقدار انرژی تابشی رسیده به زمین در این روز ۹۴۱/۷ وات بر متر مربع و میانگین دمای محیط ۲۲ درجه سلسیوس بود).

آزمایش‌ها در محوطه دانشگاه محقق اردبیلی اجرا شد. دستگاه، در تمامی آزمون‌ها، ۳۰ دقیقه پیش از داده‌برداری در موقعیت مورد نظر قرار داده شد تا به شرایط پایدار برسد. دستگاه زیر تابش مستقیم نور خورشید و با زاویه متناسب نسبت به سطح افقی (۱۱/۵ تا ۳۰ درجه) و رو به جنوب قرار داده شد. آزمون‌ها در سه سطح جریان هوا (۱۸، ۳۶ و ۵۴ مترمکعب بر ساعت) و سه سطح تعداد فن و در دو حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده و با مواد تغییر فاز دهنده دنبال شد و دماها در ۱۲ نقطه با توجه به حسگرهای تعبیه شده طی ساعات ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ و در سه روز متفاوت آزمایش ثبت گردید. همچنین در سراسر آزمایش‌ها اطلاعات هواشناسی هر روز مانند دمای محیط و سرعت وزش باد در منطقه و میزان انرژی تابشی رسیده از خورشید ثبت گردید. برای ثبت میزان انرژی تابشی دریافتی از خورشید از دستگاه سولار پاور متر استفاده شد. پس از اجرای آزمون‌ها،



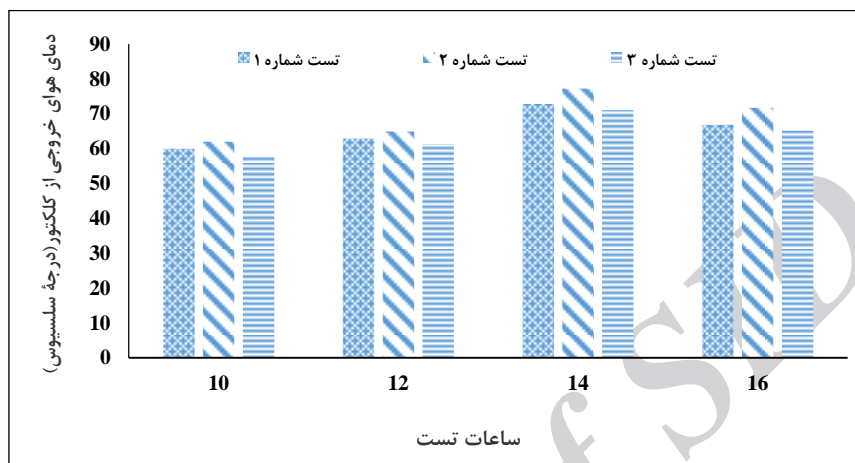
شکل ۶- نعناي مرطوب و خشک شده در خشک کن خورشیدی



## نتایج و بحث

حدود ساعت ۱۴ افزایشی است و پس از آن رفته رفته کاهش می‌یابد. با گذشت زمان، از صبح تا بعد از ظهر، با افزایش دمای تابش خورشید کلکتور داغ شده و نتایج بهتری به دست آمده است.

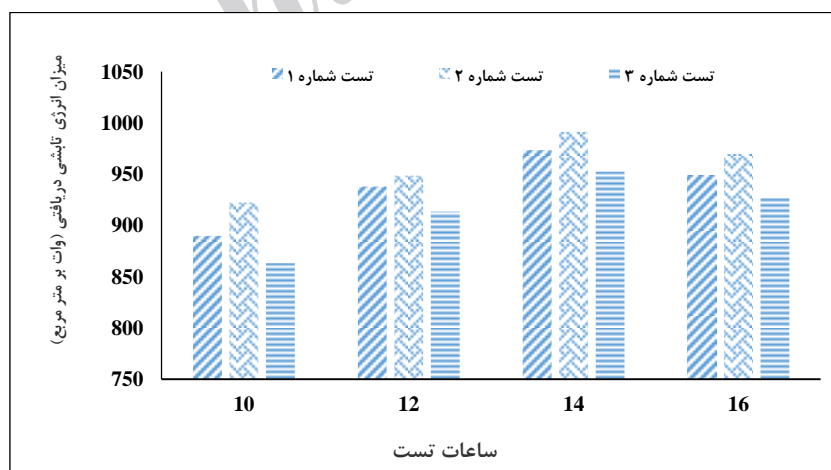
شکل ۷ نمودار تغییرات هوای خروجی از کلکتور را در ساعات مختلف آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات دمای کلکتور از ابتدای آزمایش تا



شکل ۷- تغییرات هوای خروجی از کلکتور در ساعات مختلف آزمایش

بعد از آن کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین مقدار انرژی دریافتی به ترتیب ۹۹۱/۵۶ و ۸۶۳/۳ (وات بر متر مربع) در ساعاتی ۱۰ تا ۱۶ به ثبت رسیده است.

شکل ۸ بیانگر رابطه زمان آزمایش و میزان انرژی تابشی دریافتی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان انرژی تابشی رسیده به زمین تا ساعت ۱۴ روندی صعودی دارد و



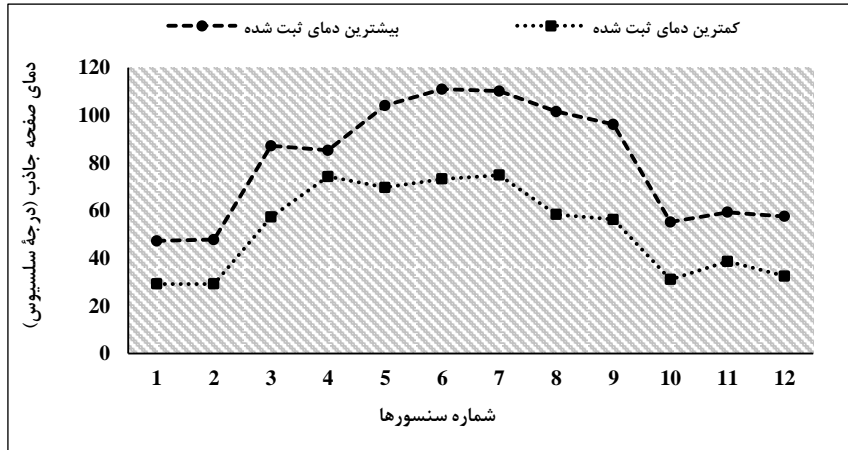
شکل ۸- زمان آزمایش و میزان انرژی تابشی دریافتی

است. بیشترین دما در ساعت ۱۴ به میزان ۱۱۱ درجه سلسیوس است (زیرا میزان تابش دریافتی در این ساعت بیشترین است) و کمترین آن ۲۹ درجه سلسیوس در

با توجه به شکل ۴ خشک‌کن خورشیدی و جایگاه حسگرهای تعبیه شده روی آن مشاهده گردید، مقایسه دما در نقاط مختلف کلکتور و محفظه در شکل ۹ آورده شده

است که چندین قوطی را طی کرده و زمان بیشتری برای گرم شدن داشته است و پس از رسیدن به نقاط بالایی با کمی گرمایش بیشتر از خود آن نقاط از محفظه خارج می‌شود در نتیجه دمای آن نقاط نیز بالاتر است.

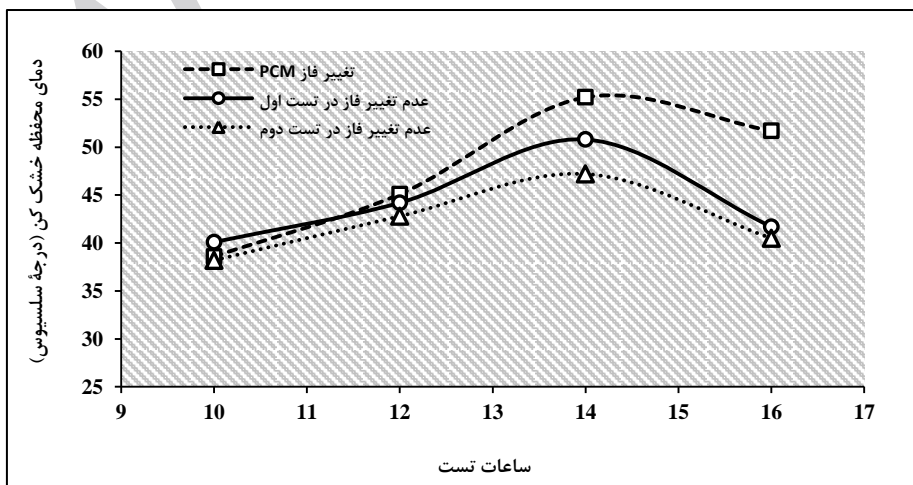
ساعت ۱۰ صبح است. دلیل اختلاف دما این است که در ابتدای کلکتور هوای محیط وارد می‌شود و این حسگرها نسبت به حسگرهای بالایی در ارتباط با هوای خنک‌تری هستند. صفحه جاذب در نقاط ۶ و ۷ در ارتباط با هوایی



شکل ۹- تغییرات دمای صفحه جاذب کلکتور به تفکیک حسگرها

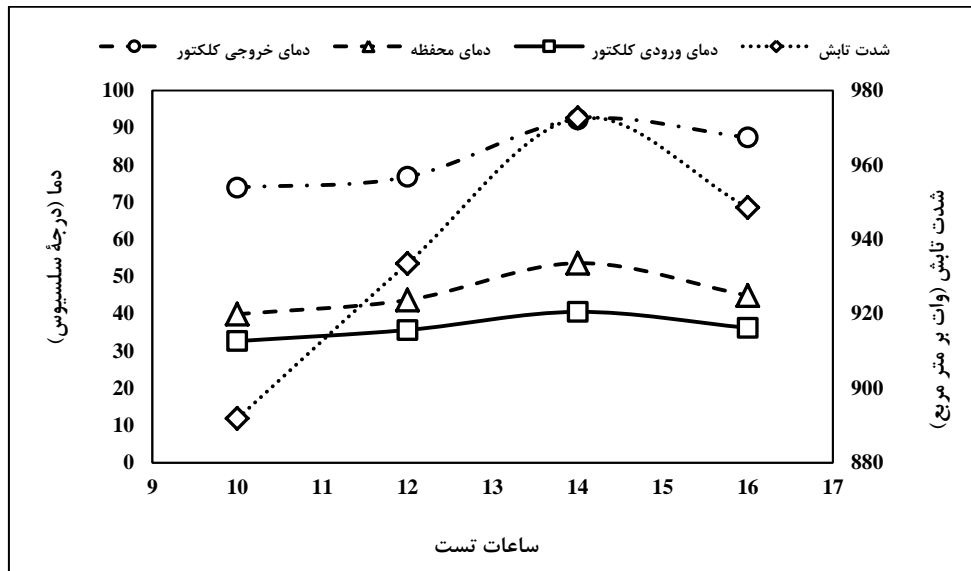
PCM (۵۱ تا ۵۳ درجه سلسیوس) بیشتر بوده و تغییر فاز داده، روند نزولی با ملایمت و با شدت کمتری اتفاق افتاده است، این همان مزیت PCM است که انرژی ذخیره شده در خود را آزاد کرده بر شدت افت دما تأثیر گذاشته و شیب کاهش نمودار بسیار ملایم‌تر است.

شکل ۱۰ نمودار روند تغییرات دمای محفظه خشک کن را در ساعات مختلف آزمایش نشان می‌دهد. در اینجا روند ابتدا صعودی است و بعد از گذر از زمان پیک تابش، کاهش داشته است. اما مقایسه بین نمودارها نشان می‌دهد که در منحنی بالایی که دمای هوای محفظه از دمای تغییر فاز



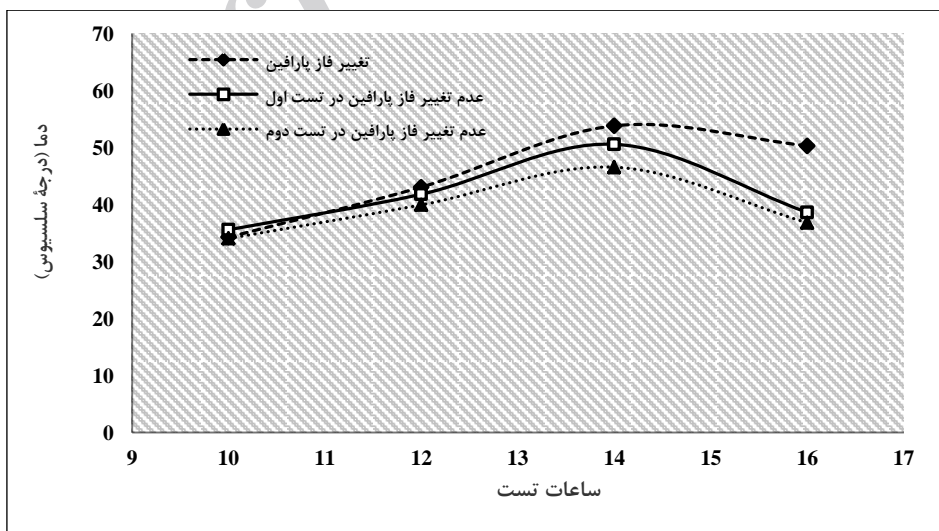
شکل ۱۰- روند تغییرات دمای محفظه خشک کن به ترتیب ساعات آزمایش

در شکل ۱۱ تغییرات تابش و دمای ورودی و خروجی کلکتور و محفظه در ساعات مختلف آزمایش آمده است. با افزایش روند تابش، دما بالاتر می‌رود و با کاهش آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات شدت تابش و دما در محفظه و ورودی و خروجی کلکتور

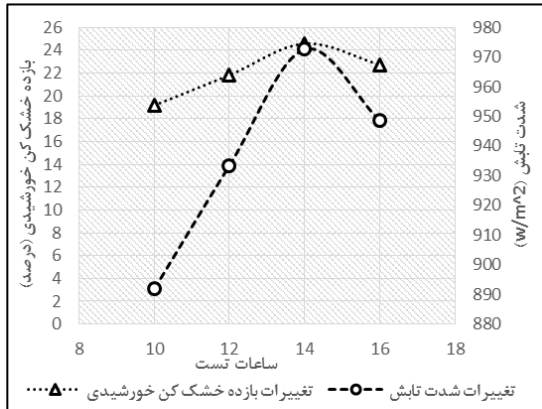
در شکل ۱۲ تغییرات دمای PCM در ساعات مختلف همان‌گونه که قبلاً هم توضیح داده شد، با نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شرایط تغییر فاز پارافین تغییرات بسیار ملایم و پس از تغییر فاز نیز افت دما کند است. در خود را آزاد کرده و بر روند افت دما مثبت گذاشته است.



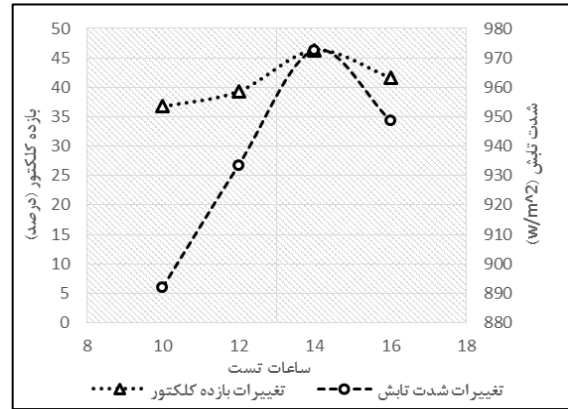
شکل ۱۲- روند تغییرات دمای پارافین در طول آزمایش

همچنین، اختلاف بازده خشک کن وقتی از مواد تغییر فاز دهنده استفاده بشود یا نشود، در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. در اینجا می‌بینیم که بازده در حالت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به‌طور مشخص بهبود یافته است.

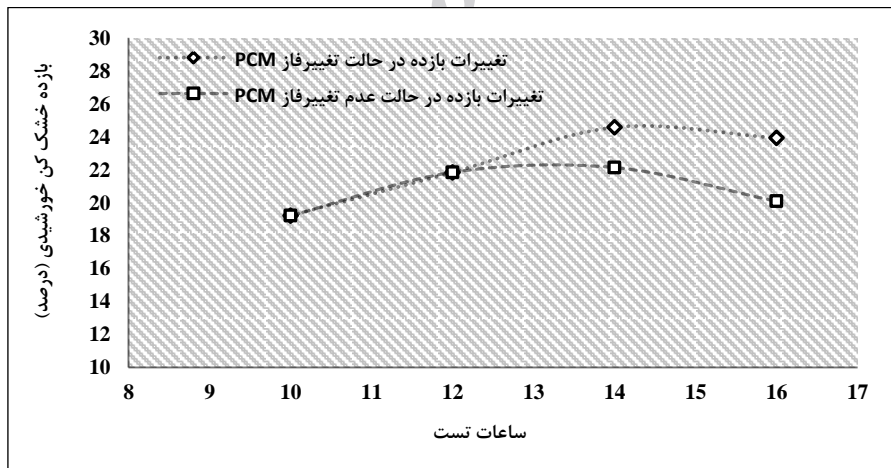
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تغییرات بازده کلکتور و تغییرات بازده خشک کن خورشیدی را در ساعات و میزان تابش‌های مختلف نشان می‌دهد. بیشترین بازده کلکتور ۴۶/۲۴ درصد و بیشترین بازده خشک کن خورشیدی ۲۴/۵۷ درصد است که در محدوده ۱۴ ساعت به دست آمده است.



شکل ۱۴- تغییرات بازده خشک کن خورشیدی و شدت تابش در خلال آزمایش



شکل ۱۳- تغییرات بازده کلکتور و شدت تابش در خلال آزمایش



شکل ۱۵- تغییرات بازده خشک کن خورشیدی در دو حالت تغییر فاز و بدون تغییر فاز PCM

این دو رابطه معنی‌دار وجود دارد به‌طوری‌که مقدار PValue محاسبه شده در سطح معنی‌داری ۵ درصد، ( $PV < 5\% = 0.016$ ) و ضریب همبستگی (۰/۶۷۵) را نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر با گذشت ساعات روز از ابتدای صبح تا ساعت ۱۴، شدت تابش دریافتی نیز افزایش یافته است.

### تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور بررسی معنی‌داری نتایج، داده‌ها در نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد که نتایج به‌صورت زیر است:  
مطابق جدول‌های ۴ و ۵ با توجه به نتایج آماری همبستگی بین دو پارامتر ساعات آزمایش و شدت تابش دریافتی، جدول نتایج فوق نشان می‌دهد که بین

جدول ۴- آمار توصیفی ارتباط بین ساعات آزمایش و شدت تابش دریافتی

منبع تغییرات	تعداد	انحراف استاندارد	میانگین
ساعات آزمایش	۱۲	۳۳۵۵۰/۲	۰۰۰۰/۱۳
میزان شدت تابش دریافتی	۱۲	۲۰۱۰۸/۳۶	۶۲۵۰/۹۳۶

جدول ۵- نتایج مقایسه حاصل از ارتباط بین ساعات آزمایش و شدت تابش دریافتی

شدت تابش دریافتی	ساعات آزمایش	
۰/۶۷۵*	۱	ضریب همبستگی
۰/۰۱۶	-	سطح معنی داری
۱۲	۱۲	تعداد
۰/۶۷۵*	۱	ضریب همبستگی
۰/۰۱۶	-	سطح معنی داری
۱۲	۱۲	تعداد

\* در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی دار ندارند.

با توجه به نتایج آماری همبستگی این دو پارامتر سرعت هوا و دمای محفظه خشک کن، جدول‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که بین این دو پارامتر رابطه آماری معنی دار وجود دارد که ضریب همبستگی منفی (۰/۴۲۴-) آن را نشان می‌دهد. بدین ترتیب نتیجه گیری می‌شود که بین افزایش سرعت هوا و دمای محفظه خشک کن رابطه آماری معنی داری وجود دارد. به عبارتی دیگر با افزایش سرعت هوا، میزان دمای هوای خروجی از محفظه کاهش می‌یابد. یعنی هرچه میزان سرعت هوا بیشتر باشد میانگین دمای محفظه کمتر می‌شود.

جدول ۶- آمار توصیفی ارتباط سرعت هوا و دمای محفظه خشک کن

منبع تغییرات	تعداد	انحراف استاندارد	میانگین
دمای محفظه	۹	۳/۱۵۳	۶۶/۱۷۷
سرعت هوا	۹	۰/۴۳۳	۱/۰۰۰

جدول ۷- نتایج مقایسه حاصل از ارتباط سرعت هوا و دمای محفظه خشک کن

دمای محفظه	سرعت هوا	
۱	۰/۴۲۴-	ضریب همبستگی
۰/۲۵۵		سطح معنی داری
۹	۹	تعداد
۰/۴۲۴-	۱	ضریب همبستگی
۰/۲۵۵		سطح معنی داری
۹	۹	تعداد

با توجه به نتایج آماری همبستگی بین دو پارامتر ساعات آزمایش و دمای هوای خروجی از کلکتور، جدول‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که بین این دو رابطه معنی دار وجود دارد. به طوری که مقدار P<sub>Value</sub> محاسبه شده در سطح معنی داری ۵ درصد، ( $PV < 5\% = 0.014$ ) و ضریب همبستگی ۰/۶۸۴ را نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر با گذشت زمان میزان دمای هوای خروجی کلکتور نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۸- آمار توصیفی ارتباط ساعات آزمایش و دمای هوای خروجی از کلکتور

منبع تغییرات	تعداد	انحراف استاندارد	میانگین
دمای هوای خروجی کلکتور	۱۲	۲/۳۳۵	۱۳/۰۰۰
ساعات آزمایش	۱۲	۵/۸۹۷	۶۶/۱۷۷

جدول ۹- نتایج مقایسه حاصل از ارتباط بین ساعات آزمایش و دمای هوای خروجی از کلکتور

شدت تابش دریافتی	ساعات آزمایش	ضریب همبستگی
۰/۶۸۴*	۱	ضریب همبستگی
۰/۰۱۴		سطح معنی داری
۱۲	۱۲	تعداد
۰/۶۸۴*	۱	ضریب همبستگی
۰/۰۱۴		سطح معنی داری
۱۲	۱۲	تعداد

\* در هر ستون میانگین‌های دارای حرف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی دار ندارند.

جدول ۱۰ نتایج آماری حاصل از تجزیه و تحلیل آماری آنوا متغیر وابسته به تغییر فاز دمای محفظه خشک‌کن را نشان می‌دهد که بین متغیر وابسته فوق با تغییر فاز رابطه آماری کاملاً معنی‌داری موجود است. سطح معنی‌داری ۹۹/۹ درصد با سطح قابل اعتماد ۵ درصد. به عبارت دیگر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بر تغییرات دمای محفظه خشک‌کن تاثیر کاملاً معنی‌داری دارد.

جدول ۱۰- نتایج آماری حاصل از تجزیه و تحلیل آماری آنوا متغیر وابسته به تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	F	سطح معنی‌داری
مدل اصلاح شده	۵۴/۰۰۰ <sup>a</sup>	۱	۱/۹۰۱	۰/۱۹۸
عدم تغییر فاز	۲۱۴۰۸/۴۲۷	۱	۷۵۳/۶۸۵	۰/۰۰۰
تغییر فاز ماده	۵۴/۰۰۰	۱	۱/۹۰۱	۰/۱۹۸
خطا	۲۸۴/۰۵۰	۱۰		
کل	۲۳۶۲۲/۸۸۰	۱۲		

متغیر وابسته: دمای محفظه خشک‌کن

مطابق جدول‌های ۱۱ و ۱۲ با توجه به نتایج آماری همبستگی بین دو پارامتر میزان دمای خروجی از کلکتور و شدت تابش، جدول نتایج فوق نشان می‌دهد که بین میزان دمای خروجی از کلکتور و شدت تابش دریافتی رابطه معنی‌دار وجود دارد به طوری که مقدار  $P_{\text{value}}$  محاسبه شده در سطح معنی‌داری ۵ درصد، ( $PV < 5\% = 0.040$ ) و ضریب همبستگی (۰/۶۲۰) را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱- آمار توصیفی ارتباط بین دو پارامتر دمای هوای خروجی از کلکتور و شدت تابش

منبع تغییرات	تعداد	انحراف استاندارد	میانگین
دمای هوای خروجی کلکتور	۴	۸/۶۵۵	۸۲/۵۸۲
شدت تابش	۴	۳۳/۹۲۵	۹۳۶/۶۲۲

جدول ۱۲- نتایج مقایسه حاصل از ارتباط بین دو پارامتر دمای هوای خروجی از کلکتور و شدت تابش

دمای هوای خروجی از کلکتور	شدت تابش دریافتی	
۰/۶۲۰	۱	ضریب همبستگی
۰/۰۴۰		سطح معنی‌داری
۴	۴	تعداد
۱	۰/۶۲۰	ضریب همبستگی
	۰/۰۴۰	سطح معنی‌داری
۴	۴	تعداد

### نتیجه‌گیری

جاذب قرار دارند در تمامی آزمایش‌ها بیشترین دما را نشان داده‌اند؛ کمترین اعداد مربوط به حسگرهای شماره ۱ و ۲ است که در ابتدای کلکتور قرار دارند.

- طبق اطلاعات به‌دست آمده، دمای محفظه خشک‌کن متناسب با هوای گرم کلکتور تا ساعت ۱۴ روند افزایشی دارد ولی از ساعت ۱۴ تا ۱۶ (با کاهش میزان انرژی تابشی رسیده) کمی افت دما ایجاد می‌شود. وقتی پارافین درون محفظه دچار تغییر فاز نشده است افت دمای محفظه تا ساعت ۱۶ با شیب بیشتری پیش می‌رود اما با تغییر فاز پارافین کاهش دمای محفظه بعد از ساعت ۱۶ با شیب کمتری همراه است.

- اختلاف دمای ایجاد شده در آزمایش‌ها بین دو هوای ورودی و خروجی کلکتور ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس است که برای خشک کردن محصولات کشاورزی، به‌ویژه سبزی‌ها، مناسب است.

- پارافین، یعنی ماده تغییر فاز دهنده توانست پس عبور از دمای تغییر فاز میزان گرمای ذخیره شده در خود را در خلال آزمایش به مجموعه پس دهد و به نسبت حجم استفاده شده از افت دمای محیط برای مدت زمانی جلوگیری کند. با استفاده از پارافین در محفظه، در مقایسه با زمانی که از این ماده استفاده نشود، دماهای بالاتری طی ساعات ۱۴ تا ۱۶ برای محفظه ثبت شده است.

- عملکرد صفحه جاذب کلکتور و استفاده از قوطی‌های نوشابه به‌جای ورق گالوانیزه یا آلومینیومی، بسیار مناسب است و به‌دلیل ضخامت بسیار ناچیز قوطی‌ها، به‌خوبی

در این تحقیق یک نمونه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده ساخته و ارزیابی شد. عمده نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به‌صورت زیر است:

- در تمامی آزمایش‌ها بر اساس نتایج به‌دست آمده، تأثیر سرعت هوا و تعداد فن روشن برای این نوع کلکتور به گونه‌ای است که وقتی از یک فن و در پایین‌ترین دبی هوا استفاده شود، برای صفحه جاذب و هوای خروجی بیشترین دماهای ممکن به‌دست خواهد آمد. همچنین، با بیشتر شدن تعداد فن یا افزایش سرعت آنها، از دمای کلکتور و دمای هوای خروجی کاسته می‌شود.

در خصوص رابطه بین ساعت آزمایش و میزان انرژی تابشی رسیده از خورشید نتیجه گرفته شد که بیشترین میزان شدت تابش در حدود ساعت ۲ بعد از ظهر است و این روند از ابتدای صبح تا ساعت ۱۴ صعودی است از این ساعت به بعد رفته‌رفته نزولی می‌شود. همچنین، رابطه مستقیمی بین میزان انرژی تابشی دریافتی و افزایش دمای کلکتور وجود دارد به‌طوری که بالاترین دماها نیز در ساعت ۱۴ به ثبت رسیده است.

- در تمامی آزمایش‌ها بیشترین دما در یک روز از آزمایش در ساعت ۱۴ و به‌میزان ۱۱۱ درجه سلسیوس (در قسمت انتهای صفحه جاذب) ثبت شده است. کمترین مقدار نیز مربوط به ساعت ۱۰ به‌میزان ۲۹ درجه سلسیوس (در ابتدای کلکتور) است.

- حسگرهای شماره ۶ و ۷ که در قسمت انتهایی صفحه

توانست میزان گرمای رسیده را جذب و تبادل نماید. به‌طوری‌که بیشترین دمای آن به ۱۱۱ درجه سلسیوس رسید.

میزان گرما و دمای هوای منتقل شده به محفظه خشک‌کن در حین آزمایش‌ها، با سرعت فن نسبت عکس دارد به‌طوری‌که با افزایش سرعت فن، هوا مدت زمان کمتری برای گرم شدن در اختیار داشت و میانگین دما کاهش یافت و بالعکس.

میزان گرمایش کلکتور و بالطبع هوای عبوری از آن با میزان انرژی تابشی رسیده به سطح زمین رابطه مستقیم دارد و این مقدار تا ساعت ۱۴ و ۱۵ بعد از ظهر صعودی است و بعد از آن به تدریج نزولی می‌شود.

- برای بررسی قطعیت آماری، نتایج تجزیه و تحلیل و مشاهده شد که بین حالت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و حالت بدون استفاده از آن، اختلاف معنی‌داری وجود دارد. همچنین بین میزان انرژی تابشی دریافتی و زمان آزمایش و همچنین بین دمای هوای خروجی از کلکتور و زمان آزمایش، رابطه معنی دار است به‌طوری‌که با گذشت زمان تا ساعت ۱۴ روند صعودی است و پس از آن کاهش می‌یابد.

- در خصوص ارتباط سرعت هوای ورودی و دمای محفظه نیز رابطه معنی دار است به‌طوری‌که با افزایش دبی جریان هوای ورودی دمای هوای محفظه خشک‌کن کاهش می‌یابد.

## مراجع

- Azad, A., Ghaem Maghami, J., Panahandeh, H. and Gaoola, F. 1990. Solar Energy. Vol. II. Design Institute. Tehran University Press. (in Persian)
- Bal, L. M., Sudhakar, P., Satya, S. and Naik, S. N. 2010. Solar dryer with latent heat storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14, 2298-2314.
- Cakmak, G. and Yidiz, C. 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food Bioprod. Process*. 89, 103-8.
- Demirbas, F. 2006. Thermal energy storage and phase change materials: An overview, *Energy Source, Part B. Econ. Plann. Policy*. 1, 85-95
- Devahastin, S. and Mujumdar, A. S. 1989. Preliminary study of a novel thermal storage-spouted bed contactor for particulate drying. 48<sup>th</sup> Canadian Chemical, Engineering Conference. London, Ontario.
- Devahastin, S. and Pitaksuriyarat, S. 2006. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. *Appl. Therm. Eng.* 26, 1705-13.
- Esakkimuthu, S., Hassabou, A., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J. and Velraj, R. 2013. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Sol. Energy*. 88, 144-53.
- Feldman, D., Khan, M. A. and Banu, D. 1989. Energy storage composite with an organic phase change material. *Sol. Energ. Mater.* 18, 333-341.
- Haj-Saghati, A. 2002. Principles and Applications of Solar Energy. First Ed. The University of Science and Technology Press. Tehran. Iran. (in Persian)
- Holedman, D. R. and Lund, D. B. 1992. Handbook of Engineering. New York.
- Hollick, J. C. 1999. Commercial scale solar drying. *Renew. Energ.* 16, 714-719.
- Klein, S. A. 1975. Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients. *Sol. Energy*. 17: 79.
- Mesgari, A. 2013. The modeling and optimization of experimental hot air dryer with forced convection grapes. M.Sc. Thesis. University of Mohaghegh-Ardabili. Ardabil, Iran. (in Persian)



- Mondal, S. 2008. Phase change materials for smart textiles and overview. *Appl. Therm. Eng.* 28(11-12): 1536-1550.
- Nijegorodov, N. K. R. S., Devan., P. K. J. and Carlsson, S. 1994. Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude. *Renew. Energ.* 4, 529-543.
- Panahandeh, H. 1985. *Solar Thermal*. First Ed. University Publication Center. Tehran, Iran. (in Persian)
- Kalogirou, S. 2009. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. First Ed. Academic Press Pub.
- Tavakolipour, H. 2002. *Drying Food*. Ayizh Pub. Tehran, Iran. (in Persian)
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F. and Mehling, H. 2003. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications, *Appl. Therm. Eng.* 23, 251-283.

Archive of SID

## **Design and Development of Asolar Dryer Augmented with Phase Change Materials (PCM)**

**J. Jannatkah\* , H. Ghaebi and B. Najafi**

\* Corresponding Author: Ph. D. Student of Renewable Energies, Department of Biosystem Engineering, Mohaghegh-Ardabili University, Ardabil, Iran. Email: J.Jannatkah@gmail.com  
Received: 28 May 2016, Accepted: 25 October 2016

One of the main problems of crops dryers is their high cost, high energy consumption, and the associated higher cost of operation. The solution proposed for this problem is use of the free and clean solar energy. In this study, a solar dryer was developed, which consisted of a solar collector that innovatively is made of discarded waste materials such as cold drinks metal cans. Also Phase change materials (PCM), was included in the dryer chamber for energy storage, and was tested under laboratory conditions, and air flow rate, temperature and radiation intensity were measured. According to the results, the temperature of the absorber plate of the innovatively solar collector increased up to 111 °C and the temperature of the exhaust air had a difference of 50 to 60 °C compared to the ambient temperature. Highest temperature increase was obtained with air velocity of 0.5 m/s at 2- 3 PM in test days. The phase change temperature of the materials occurred at 51 to 53 °C. When the chamber temperature exceeded 53 °C, the material's phase changed and the stored heat was directed to dryer in order to compensate for the temperature drop in the plenum. . As result, the temperature loss of the drying chamber occurred less severely under the phase change material conditions, because it slightly prevented temperature loss. Finally, mint drying test was carried out. The mint with an initial moisture content of 86 percent, lost 86g of its moisture and reached final moisture content of 12 percent during the product test in 273 minutes, under mean chamber temperature of 44.3 °C and air velocity of 0.5 m/s.

**Keywords:** Collector, Design and Manufacture, Phase Change Material, Solar Dryer