

بررسی آزمایشگاهی کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در کلکتور خورشیدی لوله گرمایی تحت خلأ برای خشک کردن پسته

محمد صالح برقی جهرمی^{۱*}، مسعود ایرانمنش^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۸/۲۶

چکیده

یکی از کاربردهای مهم و گسترده‌ی انرژی خورشیدی، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی جهت نگهداری طولانی مدت آن است. پسته یکی از مهمترین اقلام صادرات غیرنفتی ایران است. با توجه به اهمیت روش خشک کردن در حفظ خصوصیات کیفی محصولات تولیدشده از مغز پسته و همچنین بهره‌گیری از منابع انرژی تجدید پذیر، یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم سینی دار با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده پارافین با نقطه ذوب ۵۵ درجه سانتی‌گراد و کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ با بازده ۶۲/۴۲ درصد طراحی و ساخته شد که دارای بازده عملکرد ۳۸/۴۲ درصد بوده است. محصول خشک‌شده از نظر ظاهری با پسته خشک‌شده از نوع ممتاز مقایسه شد که از کیفیت مطلوبی برخوردار است. پارامترهایی همچون دمای محفظه خشک‌کن، دمای ورودی و خروجی کلکتور، رطوبت داخل محفظه خشک‌کن و رطوبت محیط، شدت تابش خورشیدی و نمودار کاهش رطوبت بر حسب زمان برای دو حالت، با استفاده از مواد PCM و بدون استفاده از PCM اندازه‌گیری و مقایسه شد. با توجه به طولانی بودن روند خشک‌شدن محصول، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده راه حل مناسبی برای افزایش مدت زمان کارکرد خشک‌کن خورشیدی تا ۲ ساعت بعد از غروب خورشید است.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ، مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره کننده گرما

مقدمه

طبق آمار رسمی سازمان خوار و بار کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۱۷ تولید پسته جهانی، ۵۸۶۲۰۷ تن گزارش گردید (۱). مهمترین مرحله در فرآیند پس از برداشت پسته، خشک کردن محصول

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

*نویسنده مسئول : msc.barghi@gmail.com

۲ - استادیار مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهشکده انرژی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

است. در صورتی که پسته از طریق پهن کردن در معرض آفتاب (Open sun drying, OSD) به صورت سنتی خشک گردد، زمان لازم جهت خشک شدن آن طولانی است، از طرفی حمله حشرات و پرندگان، همچنین گرد و غبار و ریزش باران در این روش از عواملی هستند که باعث کاهش کیفیت پسته خشک شده می‌گردند. انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به روش صنعتی به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی و تجمع گازهای گلخانه‌ای در جو و به دنبال آن افزایش دمای کره زمین و آلودگی‌های زیست محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های فسیلی شده است. در این راستا استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به عنوان یک راه حل جدید مورد توجه قرار گرفته و به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است. این نوع خشک‌کن در مقایسه با خشک‌کن‌های صنعتی دارای بازده انرژی بالاتر بوده و در مناطقی که دارای ساعات تابش بالا در فصل برداشت پسته می‌باشند، به سادگی می‌تواند جانشین خشک کردن به روش سنتی و صنعتی گردد (۲). توکلی‌پور و مختاریان روش شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش بینی سینیتیک خشک کردن پسته مطالعه نمودند. آن‌ها فرآیند خشک کردن پسته را در دامنه دمایی ۴۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت جریان هوای ۲ متر بر ثانیه انجام داده و منحنی خشک کردن پسته را با بهره‌گیری از مدل‌های خشک کردن تجربی برازش و سرانجام نتایج پیش بینی شده این مدل‌ها را با مدل شبکه عصبی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی پرسپترون با تابع فعال سازی لگاریتم سیگموئیدی با ۷ نرون در اولین و دومین لایه پنهان توانست نسبت رطوبت پسته را در هر زمان از خشک کردن با ضریب تبیین ۰/۹۴۴ پیش‌بینی نماید (۳). توکلی‌پور و همکاران اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص‌های کیفی پسته دامغان و تعیین ضرایب نفوذ مؤثر در شرایط بهینه این فرآیند را بررسی نمودند. آن‌ها اثرات پارامترهای دما (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت جابجایی هوا (۱ و ۲ متر بر ثانیه) و همچنین ضخامت بستر (تک لایه، ۳ و ۵ سانتی‌متر) بر سرعت کاهش رطوبت و شاخص‌های کیفی فرآورده نهایی، شامل عدد پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد روغن پسته با استفاده از خشک‌کن‌های آزمایشگاهی با جریان متقاطع بررسی و شرایط بهینه خشک کردن تعیین گردید (۴). گاز و مینایی تأثیر دما و سرعت هوا را روی زمان خشک کردن و پارامترهای کیفی پسته بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش دما تا ۹۰ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن را تا ۳۷ درصد کاهش داد و منجر به تغییر طعم پسته شد. آزمون حسی طعم و مزه نشان داد که مصرف کنندگان پسته خشک شده در دمای ۷۵ درجه سلسیوس را ترجیح می‌دهند. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سرعت جریان هوا از ۱/۵ متر بر ثانیه به ۲/۵ متر بر ثانیه سبب کاهش زمان خشک کردن تا ۱۰ درصد شد. تأثیر دما و سرعت جریان هوا روی پروتئین و مقدار چربی معنا دار نبود اما افزایش دمای خشک کردن تا ۹۰ درجه سلسیوس سبب افزایش اندیس پراکسید

به ۰/۵۵ میلی اکی والان بر کیلوگرم می‌شود که مقدار قابل قبول برای پسته فرآوری شده می‌باشد (۵). میدیلی رفتار خشک کردن پسته پوست گیری شده و پوست گیری نشده در یک سامانه خشک کن خورشیدی را مطالعه نمود. نتایج نشان داد که پسته‌های خشک شده در خشک کن خورشیدی با کمک جابجایی هوای اجباری در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، در مدت زمان ۶ ساعت خشک شدند. در حالی که نمونه‌های خشک شده در هوای آزاد، دمای ۲۸ درجه سلسیوس رضایت بخش نبودند. این محقق دلیل عدم رضایت بخش بودن روش خشک کردن آفتابی را به دلیل طولانی بودن زمان خشک کردن، خاک، گرد و غبار و حشرات مضر اعلام نمودند (۶). یکی از روش‌های خشک کردن پسته استفاده از کلکتور های صفحه تخت مشبک (Unglazed transpired collector) است. کوتسچر و همکاران، اتلاف حرارتی مرتبط با UTC را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تئوری اتلاف حرارتی را، بر اساس عبور جریان آرام، موازی با صفحه جاذب دارای مکش یکنواخت مدل سازی کردند و به صورت تحلیلی برای افت جابجایی باد بسط دادند (۷). کائو و همکاران بر پایه نتایج آزمایشگاهی، روابطی را برای ضریب مؤثر مبدل حرارتی بر روی یک صفحه با ردیفی از شکاف‌ها به عنوان روزنه، همراه با جریان متقاطع باد نسبت به این شکاف‌ها ارائه دادند (۸). غلام پور و عامری در سال ۲۰۱۴ به مطالعه انرژی و انرژی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد UTC پرداختند. آن‌ها شرایطی را که می‌توان از توان مصرفی فن صرف نظر کرد را مشخص کردند (۹). غضنفری و همکارانش نشان دادند که کیفیت گیاهان دارویی خشک شده به وسیله خشک کن خورشیدی، به دلیل خشک کردن آرام، بهتر از خشک کن های معمولی می‌باشد (۱۰). هالاوا و همکاران از دو UTC مجزا، جهت خشک کردن چای و کاکائو استفاده کردند (۱۱). شلیبی و بک به بررسی تجربی یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پارافین واکس برای خشک کردن گیاه دارویی (خرزهره) پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده زمان خشک شدن خرزهره به ۱۴ ساعت می‌رسد و همچنین استفاده کردن از مواد تغییر فاز دهنده باعث بهبود عملکرد حرارتی خشک کن می‌شود (۱۲). بنی اسدی و همکاران به بررسی تجربی عملکرد یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری با مواد تغییر فاز دهنده برای خشک کردن زرد آلو پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این تحقیق پارافین است. نتایج نشان داد که میزان خشک کردن زرد آلو در نقاط مختلف سینی های فوقانی و پایینی تقریباً یکسان است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش ۵۰ درصد زمان خشک شدن و همچنین بازده خشک کن نیز افزایش پیدا می‌کند (۱۳). بهارواج و همکاران به بررسی تجربی عملکرد یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری با مواد تغییر فاز دهنده برای خشک کردن گیاه دارویی (والیرینا جاتامانسی) پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این تحقیق پارافین است. نتایج نشان داد که استفاده کردن از این خشک کن محتوای رطوبت ریشه‌ها را از ۸۹ درصد به ۹ درصد می‌رساند

و فرآیند خشک شدن ۵ روز طول می کشد. علاوه بر این ریشه های والیرینا در دمای خشک ۴۰ درجه سلسیوس خشک می شوند که استفاده کردن از مواد تغییر فاز دهنده در این خشک کن زمان خشک شدن را ۳/۵۰ درصد کاهش می دهد (۱۴).

همانطور که بررسی پژوهش های انجام شده در مورد خشک کن های خورشیدی غیر مستقیم نشان می دهد در هیچیکدام، از کلکتور لوله خلاء هیت پایپ (Heat Pipe Vacuum Tube Collector, HPVTC) در مقایسه با سایر کلکتورهای تخت دارای بیشترین بازده حرارتی می باشد استفاده نشده است. به علاوه مواد ذخیره کننده عموماً بطور مستقیم یا غیرمستقیم در داخل خشک کن و یا در مسیر جریان هوای خشک کن قرار گرفته اند در حالی که در این پژوهش برای افزایش کارایی مواد تغییر فاز دهنده (Phase change material) در داخل لوله های مسی و در داخل مخزن ذخیره آب کلکتور قرار گرفته است.

مواد و روش ها

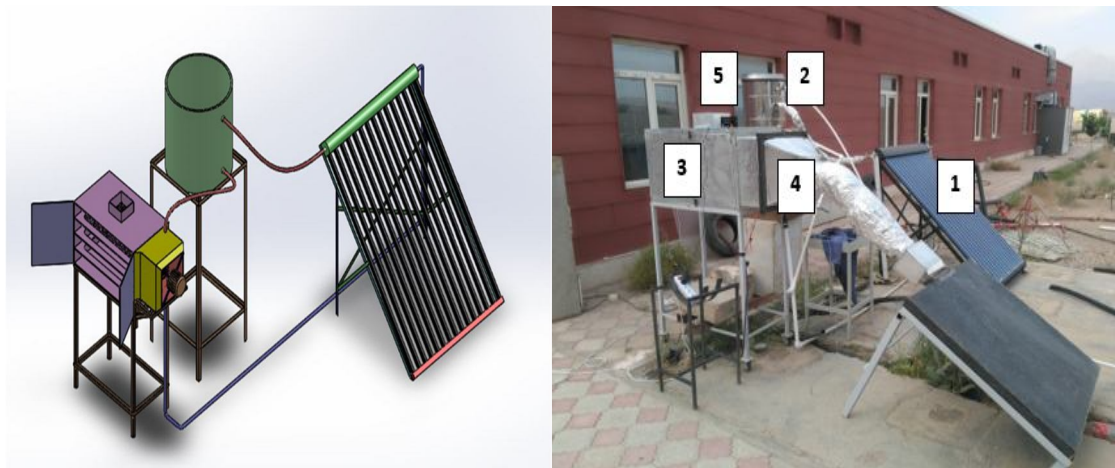
در این پژوهش از یک نمونه خشک کن ناپیوسته سینی دار خورشیدی غیرمستقیم با جریان اجباری استفاده شده است که اجزاء اصلی آن عبارتند از: کلکتور لوله خلأ (هیت پایپ)، منبع انبساط و لوله های مسی حاوی مواد تغییر فاز دهنده درون آن، مبدل حرارتی (رادیاتور) و فن، محفظه خشک کن و سامانه اندازه گیری و کنترل. یکی از ویژگی های خشک کن حاضر استفاده از مخزن انبساط برای تامین حرارت مورد نیاز خشک کردن می باشد که به دلایل مختلفی این کار صورت گرفته است از جمله اینکه نیاز به دمای بسیار بالا در خشک کردن محصولات کشاورزی نمی باشد و این مسئله نیاز به مخزن و کلکتور تحت فشار را منتفی می کند. ثانیاً هزینه های ساخت را کاهش داده و ثالثاً امکان دسترسی به داخل مخزن انبساط برای جایگذاری مواد و ظرف PCM را به راحتی فراهم می کند. بنابراین در ابتدا آب تغذیه پس از ورود به کلکتور لوله خلاء وارد مخزن انبساط شده، سپس خروجی مخزن وارد یک مبدل حرارتی (رادیاتور) که یک فن با موتور DC روی آن نصب شده و وظیفه جابجایی و گردش هوا را به سمت محفظه خشک کن بر عهده دارد می گردد. آب خروجی رادیاتور وارد کلکتور لوله خلأ (هیت پایپ) می شود و به وسیله پمپ سیرکولاتور دوباره وارد مخزن انبساط می شود و سیکل دوباره تکرار می شود.

شرح دستگاه خشک کن خورشیدی

سامانه خشک کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله خلأ (هیت پایپ) و مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده در شکل ۱ نشان داده شده است. محفظه خشک کن دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $۱۰۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ سانتی متر است. کلکتور خورشیدی لوله خلأ مدل SK-H-15-45 دارای ۱۵ لوله به ابعاد ۵۸×۱۸۰۰ (طول \times قطر)، میلیمتر و ظرفیت آبدهی (لیتر/روز) $۱۳۰-۱۵۰$ ، سطح موثر کلکتور $۱/۹$ مترمربع می باشد. برای مکش هوا از یک فن DC، ۱۲۰ وات با جریان ۱۰ آمپر و ولتاژ ۱۲ ولت استفاده شد. مبدل حرارتی (رادیاتور) مورد استفاده در خشک کن خورشیدی، مدل ولئو آرمکو به ابعاد $۳۲۰ \times ۳۸۳ \times ۲۵$ میلیمتر، شبکه مبدل حرارتی از جنس آلومینیوم و یک ردیف لوله و نوع پره، کروگیت است. برای تبدیل برق DC فن به AC از یک پاور سوئیچینگ مدل R1004 با جریان ۳۳ آمپر و ولتاژ ۱۲ ولت استفاده شد. برای گردش آب سیستم خشک کن خورشیدی، از یک پمپ سیرکولاتور مدل NM-32-60-180 استفاده شد.

وسایل اندازه گیری

برای اندازه گیری دما، رطوبت، شدت تابش خورشید و سرعت هوای داخل محفظه خشک کن از وسایل اندازه گیری مطابق شکل ۲ استفاده شده است و مشخصات آنها در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۱- تصویر اجزاء سامانه خشک کن خورشیدی ساخته شده در طرح حاضر.

۱- کلکتور لوله خلأ (هیت پایپ)، ۲- منبع انبساط ۳- محفظه خشک کن ۴- فن و مبدل حرارتی (رادیاتور) واقع در دیفیوز ۵- سامانه اندازه گیری و کنترل.

جدول ۱- مشخصات وسایل اندازه گیری مورد استفاده در این پژوهش.

دقت اندازه گیری	سازنده دستگاه ومدل آن	نام وسیله اندازه گیری
± 0.1	Hioki	دیتا لاگر ۱۶ کاناله
$\pm 4 W/m^2$	KIPP&ZONEN CMP6	پیرانومتر
$0.1 m/s$	Testo 454	سرعت سنج
± 0.1	AM2301	سنسور رطوبت سنج



شکل ۲- وسایل اندازه گیری مورد استفاده در تحقیق حاضر.

۱- سنسور رطوبت سنج AM2301، ۲- دیتالاگر، ۳- پیرانومتر.

انتخاب محصول و تعیین رطوبت

محاسبات لازم بر اساس خشک کردن ۵۰۰ گرم پسته رقم ممتاز که از باغ‌های زرنند شهرستان کرمان تهیه شد، تا رطوبت ثانویه ۹/۶ درصد انجام گرفت. با وزن کردن محصول تر و قرار دادن آن در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و توزین مجدد آن، رطوبت اولیه محصول ۵۸/۴۲ درصد به دست آمد. محتوی رطوبت از رابطه زیر در هر مرحله (زمان) از فرآیند خشک کردن، قابل محاسبه است.

$$\% \text{ محتوای رطوبت} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 10 \quad (1)$$

که در آن m_i و m_f بترتیب جرم اولیه و انتهای محصول پسته در بازه زمانی فرآیند خشک شدن می باشند.

سامانه آزمایش در تحقیق حاضر پس از ساخت و آماده سازی در ماه‌های خرداد و تیر در محوطه آزمایشگاه گروه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان مورد آزمایش اولیه قرار گرفت و سپس آزمایشات مربوطه بر روی محصول پسته در ماه‌های مهر و آبان ۱۳۹۷ انجام گرفت. آزمایش‌ها با دبی جرمی هوای ثابت ۰،۰۹ کیلوگرم بر ثانیه و دبی جرمی سیال ۰/۰۰۷ کیلوگرم بر ثانیه از ساعت ۹:۳۰ صبح تا ۲۱:۳۰ عصر انجام شده است و در هر آزمایش ۵۰۰ گرم پسته تازه، درون خشک‌کن خشک گذاشته شد. در نهایت با استفاده از داده‌های بدست آمده در هر آزمایش و داده‌های مربوط به شدت تابش خورشیدی، بازده کلکتور خورشیدی و بازده خشک‌کن به ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه شد.

$$\eta_c = \frac{m_a c_p (T_o - T_i)}{I_t A_c} \quad (2)$$

که در این رابطه $c_p = 1.005 + 1.88 W_{di}$ می‌باشد، و m_a ، T_o و T_i به ترتیب دبی جرمی هوا، دمای خروجی کلکتور و دمای ورودی کلکتور می‌باشند.

$$\eta_{dryer} = \frac{q_{drying}}{q_{collector} + q_{pcm}} \quad (3)$$

در این رابطه $q_{drying} = m_w \times L_v$ می‌باشد.

که در آن: q_{drying} انرژی حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن، q_{pcm} مقدار گرمای جذب شده توسط ماده تغییر فاز دهنده، m_w جرم آب تبخیر شده، L_v گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد.

تهیه لوله‌های حاوی PCM

در تحقیق حاضر از پارافین (شرکت خاوران پارافین) به عنوان ماده تغییر فاز دهنده درون لوله‌های مسی استفاده شد. مشخصات آن مطابق جدول ۲ ارائه شده است. در این مرحله لوله‌های مسی مطابق شکل ۳ تهیه و با دستگاه خم شد، پس از آن پارافین ذوب شده و درون لوله‌ها ریخته و سمت دیگر لوله‌ها بسته شد، سپس لوله‌های مسی درون منبع انبساط متصل به کلکتور لوله خلأ قرار داده شد.

q_{pcm} مقدار گرمای جذب شده توسط ماده تغییر فاز دهنده، از جمع گرمای محسوس و گرمای نهان به ترتیب

طبق روابط ۴ و ۵ بدست می‌آید.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m c_p dT = m c_p (T_f - T_i) \quad (4)$$

$$Q = m [c_{sp} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + c_{lp} (T_f - T_i)] \quad (5)$$

در این رابطه am ، Clp ، Gsp و Δhm به ترتیب متوسط ظرفیت گرمایی ویژه بین دمای اولیه و دمای ذوب ماده pcm، متوسط ظرفیت گرمایی ویژه بین دمای ذوب و دمای نهایی ماده pcm، کسر ذوب شده و گرمای نهان ذوب ماده بر واحد جرم می باشد T_i و T_m ، T_f بترتیب دمای نهایی، دمای ذوب و دمای اولیه ماده PCM می باشند.

بحث و نتایج

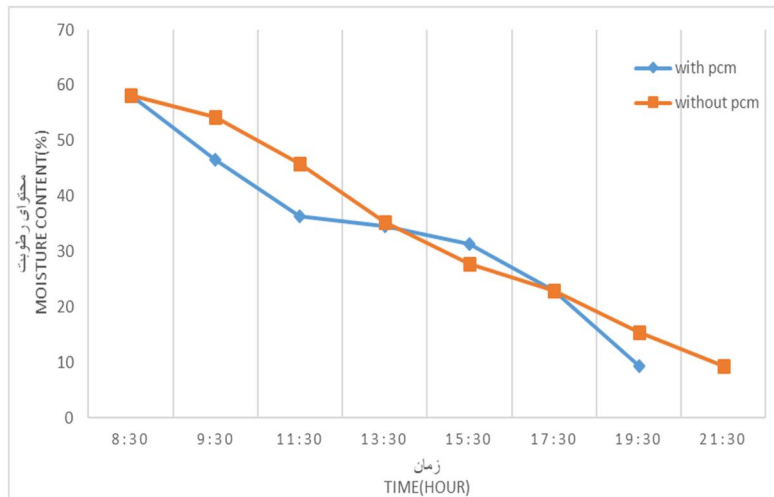
در بررسی پژوهش های انجام شده در مورد خشک کن های خورشیدی غیر مستقیم با ماده تغییر فاز دهنده این نکته حائز اهمیت است، زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده می شود بازده خشک کن خورشیدی افزایش پیدا کرده و مدت زمان خشک کردن محصول کاهش پیدا می کند. در شکل ۴ مشاهده می شود که استفاده کردن از ماده PCM به

جدول ۲- مشخصات مواد تغییر فاز دهنده در تحقیق حاضر.

مقدار	خصوصیات ماده PCM
۵۹	نقطه انجماد (درجه سانتی گراد)
۵۴	نقطه ذوب (درجه سانتی گراد)
۰،۵	محتوی روغن (درصد)
۶،۲	ویسکوزیته سینماتیکی در ۱۰۰ درجه سانتیگراد (سانتی استوک)



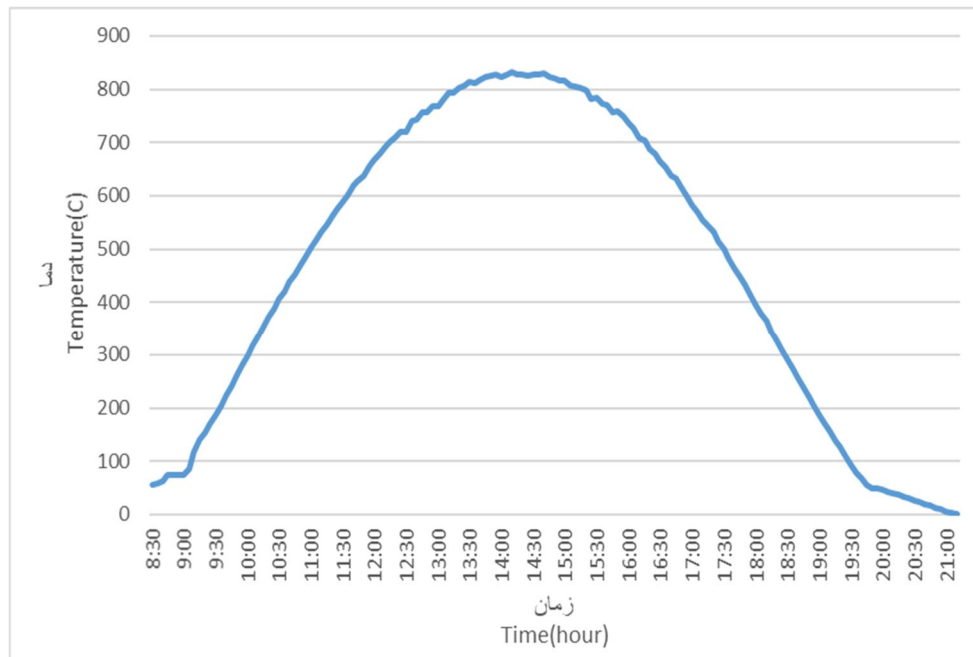
شکل ۳- قرار دادن ماده pcm در منبع انبساط.



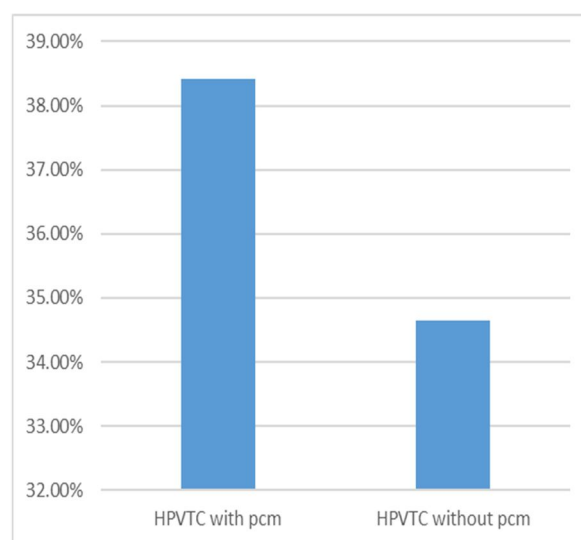
شکل ۴- نمودار کاهش رطوبت بر حسب زمان در روز ۱۱ تیر.

علت ذخیره کردن انرژی باعث افزایش مدت زمان کارکرد خشک‌کن خورشیدی تا حدود ۲ ساعت بعد از غروب خورشید شده است. نتایج بدست آمده در پژوهش‌های قبل (۱۲، ۱۳ و ۱۴)، صحت نتایج در تحقیق حاضر را تأیید می‌کند. از جمله ویژگی‌های خشک‌کن حاضر استفاده از مخزن انبساط برای ذخیره سازی حرارت مورد نیاز خشک کردن می‌باشد که به دلایل مختلفی این کار صورت گرفته است از جمله اینکه نیاز به دمای بسیار بالا در خشک کردن محصولات کشاورزی نمی‌باشد و این مسئله نیاز به مخزن و کلکتور تحت فشار را منتفی می‌کند. ثانیاً هزینه های ساخت را کاهش داده و ثالثاً امکان دسترسی به داخل مخزن انبساط برای جایگذاری مواد و ظرف PCM را به راحتی فراهم می‌کند. مطابق شکل شماره ۵، مقدار شدت تابش خورشید بین ساعات ۱۳:۳۰ تا ۱۵:۱۰، ۸۳۰ وات بر مترمربع بوده است این روند از ابتدای صبح تا ساعت ۱۵:۱۰ صعودی است و از این ساعت به بعد سیر نزولی می‌گیرد. همچنین در شکل شماره ۵، مطابق آزمایش انجام شده زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده در خشک‌کن خورشیدی استفاده می‌شود، مدت زمان لازم برای کاهش رطوبت پسته از ۵۸/۴۲ به ۹/۶ درصد، ۱۱ ساعت و زمانی که از ماده تغییر فاز دهنده استفاده نمی‌شود مدت زمان لازم برای خشک کردن پسته به ۱۳ ساعت می‌رسد. محاسبات انجام شده مطابق شکل ۶ نشان می‌دهد که بازده خشک‌کن خورشیدی در حالت بدون مواد ذخیره کننده ۳۴/۸ و با استفاده از مواد PCM به ۳۸/۴۲ درصد افزایش یافته است و این در حالی است که بازده کلکتور خورشیدی لوله خلاً ۶۲/۴۲ درصد می‌باشد. مطابق نتایج اندازه گیری انجام شده که در شکل شماره ۷ مشاهده می‌شود دما در تمامی قسمت‌ها متناسب با شدت تابش خورشیدی افزایش پیدا کرده است، دمای محفظه خشک‌کن با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده افزایش یافته و از ساعت ۱۸:۳۰ تا ۲۰:۵۰ باعث کاهش آهسته و تدریجی دما از ۳۹ تا ۳۵ درجه سلسیوس شده است. در صورتی که عدم استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش

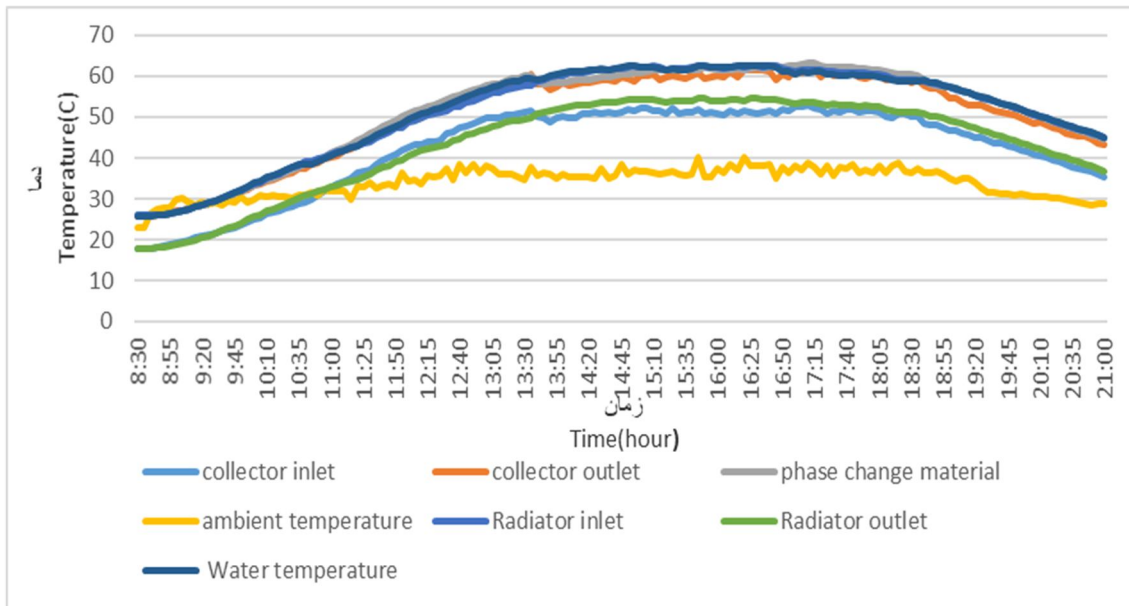
شدید دما به میزان ۷ درجه سلسیوس در مدت زمان مشابه مطابق شکل شماره ۸ بوده است. در نتیجه استفاده از خشک‌کن خورشیدی در ساعات عدم تابش خورشید با مواد تغییر فاز دهنده امکان پذیر است. رطوبت نسبی داخل محفظه خشک‌کن ثابت و به مقدار ۵ درصد بوده است در حالی که رطوبت نسبی محیط تقریباً ۱۰ درصد است (شکل ۹). برای صحت نتایج، محصول سیب با استفاده از این دستگاه خشک شد و در دو حالت با ماده pcm و بدون ماده pcm



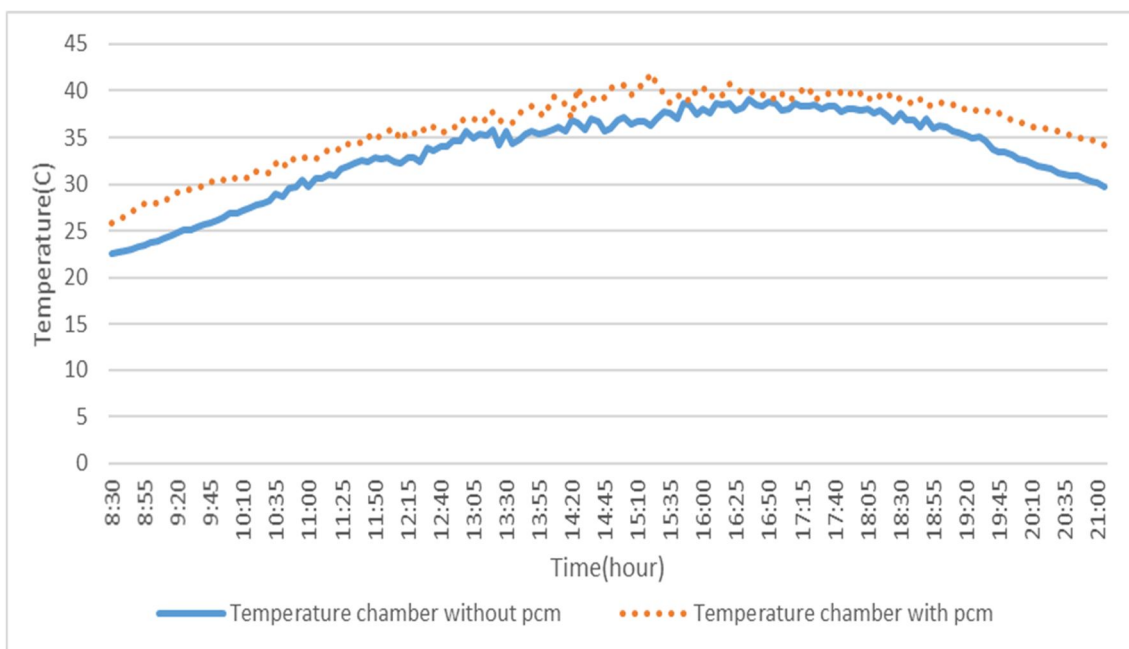
شکل ۵- نمودار شدت تابش خورشید در روز ۱۱ تیر.



شکل ۶- بازده خشک‌کن خورشیدی در حالت‌های مختلف.



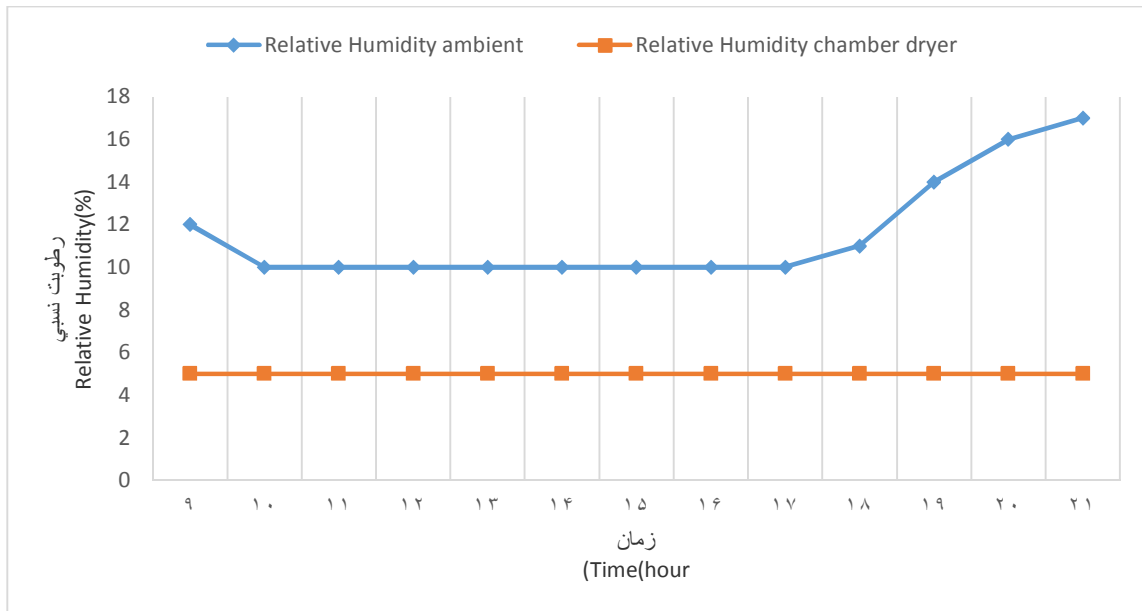
شکل ۷- نمودار دمای اجزاء مختلف سیستم خورشیدی متصل به خشک کن خورشیدی در روز ۱۱ تیر.



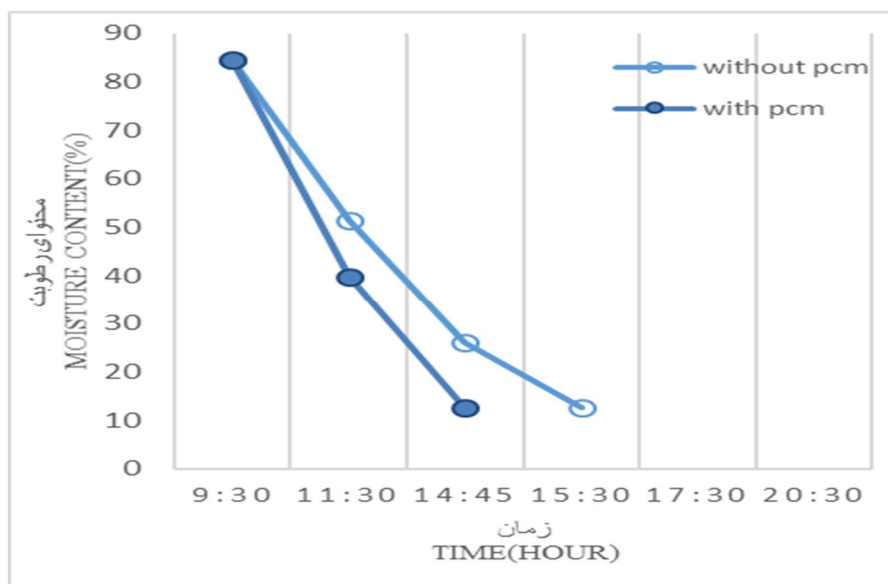
شکل ۸- نمودار دمای محفظه خشک کن با pcm و بدون pcm در روز ۱۱ تیر.

مقایسه گردید. در شکل شماره ۱۰ هنگامی که از ماده pcm در خشک کن استفاده می شود، مدت زمان خشک کردن محصول ۵ ساعت و ۱۵ دقیقه و بدون استفاده از ماده pcm در خشک کن، مدت زمان خشک شدن محصول ۶ ساعت طول می کشد، بنابراین ماده pcm ۴۵ دقیقه مدت زمان خشک کردن را کاهش می دهد که معادل ۱۴،۱۶٪ کاهش نسبت به

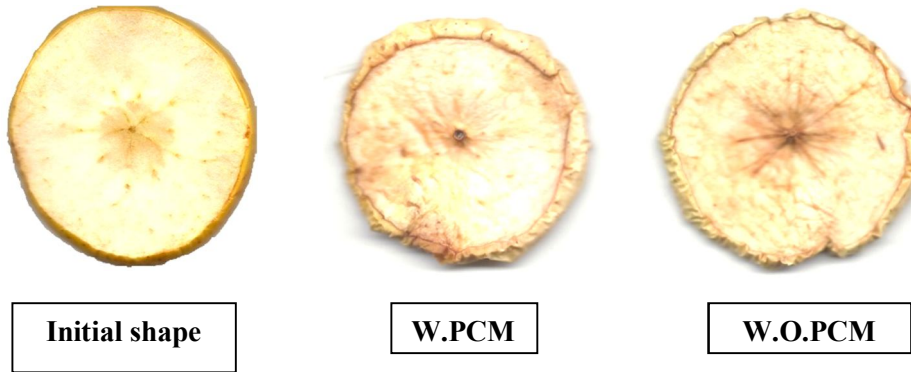
حالت بدون pcm می‌باشد. همچنین ۱۴۰ گرم سیب و قرار دادن آن در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و توزین متناوب آن انجام شد و رطوبت اولیه محصول ۸۴/۲۸ درصد به دست آمد که با اطلاعات موجود در منابع دیگر مطابقت دارد (۱۶). محصول خشک شده در هر دو حالت با ماده pcm و بدون ماده pcm در شکل شماره ۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۹- نمودار رطوبت نسبی محیط و رطوبت نسبی محفظه خشک کن در روز ۱۱ تیر.



شکل ۱۰- نمودار کاهش رطوبت برای محصول سیب بر حسب زمان.



شکل ۱۱- خشک کردن محصول سیب در حالت‌های مختلف.



شکل ۱۲- پسته رقم ممتاز خشک شده توسط خشک‌کن خورشیدی در تحقیق حاضر.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج مهم این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: (۱) با استفاده از ماده PCM مدت زمان خشک کردن پسته کاهش پیدا می‌کند و همچنین در شب ادامه خشک کردن محصول امکان پذیر است. (۲) با استفاده از ماده PCM راندمان خشک‌کن بالاتر می‌رود. (۳) محصول خشک شده از نظر ظاهری با پسته خشک شده از نوع ممتاز مقایسه شد (شکل ۱۲) که از کیفیت مطلوبی برخوردار است که این موضوع نشان می‌دهد که ماده PCM کیفیت محصول را کاهش نمی‌دهد که این نتایج در پژوهش‌های محققان دیگر به خوبی مشاهده می‌شود (۱۵).

- 1- FAO. FaoStat Database. 2012. Available from <http://faostat.fao.org>
- 2- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumar, A., & Jain, A. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative food science & emerging technologies*, 34, 86-99.
- 3- Tavakolipour H, Mokhtarian M. (2012). Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. *Int J Food Eng*2012; 8(3): Article 42.
- 4- Tavakolipour, H., KALBASI, A. A., & BASIRI, A. (2009). Effect of drying parameters on quality indicators of Damghan pistachio nuts (*Pistacia vera* L.) and determining effective diffusion coefficient in optimum conditions.
- 5- Gazor, H. R., & Minaei, S. (2005). Influence of temperature and air velocity on drying time and quality parameters of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Drying technology*, 23(12), 2463-2475.
- 6- Midilli, A. (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 715-725.
- 7- Kutscher, C. F., Christensen, C. B., & Barker, G. M. (1993). Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory. *Journal of Solar Energy Engineering*, 115(3), 182-188.
- 8- Van Decker, G. W. E., Hollands, K. G. T., & Brunger, A. P. (1996, December). Heat exchange effectiveness of unglazed transpired-plate solar collector in 3D flow. In *Proceedings of EuroSun* (Vol. 96, pp. 130-846).
- 9- Ghazanfari, A., Tabil Jr, L., & Sokhansanj, S. (2003). Evaluating a solar dryer for in-shell drying of split pistachio nuts. *Drying Technology*, 21(7), 1357-1368.
- 10- Gholampour, M., & Ameri, M. (2014). Design considerations of unglazed transpired collectors: energetic and exergetic studies. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136(3), 031004.
- 11- Halawa, E. E. H., Brojonegoro, A., & Davies, R. (1997). An overview of the ASEAN-Canada project on solar energy in drying processes. *Drying technology*, 15(5), 1585-1592.
- 12- Shalaby, S. M., & Bek, M. A. (2015). Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium. *Journal of Clean Energy Technologies*, 3(3).
- 13- Baniasadi, E., Ranjbar, S., & Boostanipour, O. (2017). Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. *Renewable energy*, 112, 143-150.
- 14- Bhardwaj, A. K., Chauhan, R., Kumar, R., Sethi, M., & Rana, A. (2017). Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb). *Case studies in thermal engineering*, 10, 302-314.
- 15- Iranmanesh, M., Akhijahani, H. S., & Jahromi, M. S. B. (2020). CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*, 145, 1192-1213.
- 16- 16. Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 1-30.

فهرست علائم

فهرست نمادها nomenclature		
شرح Explanation	نماد Symbol	واحد Unit
مساحت سطح جمع کننده Area of collector	A_c	m^2
گرمای ویژه هوا در فشار ثابت Specific heat of air at constant pressure	C_p	$jk g^{-1}c^{-1}$
گرمای نهان تبخیر آب Latent heat of water vapour	L_v	$kJkg^{-1}$
جرم رطوبت از دست رفته در طی فرآیند خشک شدن Mass of removed moisture during drying	m_{wd}	kg
انرژی مصرفی در دمنده Energy consumption of blower	q_{fan}	kJ
انرژی مصرفی در پمپ Energy consumption of pump	q_{pump}	kJ
انرژی مصرفی در پمپ Energy consumption of pump	q_{drying}	kJ
زمان Time	t	s
زمان شروع خشک شدن Starting time of drying	t_i	s
زمان پایان خشک شدن End of drying time	t_f	s
شدت تابش روی سطح کلکتور Radiation at the surface of solar collector	I_t	wm^{-2}
بازده کلکتور خورشیدی Efficiency of solar collector	η_c	—
بازده خشک کن خورشیدی Efficiency of dryer	η_{dryer}	—