ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(11):2607-2614

Effect of Forced Convection and PCM Materials on an Indirect Solar Dryer Equipped with Evacuated Heat Pipe Collector

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Barghi Jahromi M.S.[1] *MSc,*
Iranmanesh M.*[1] *PhD*

How to cite this article
Barghi Jahromi M.S, Iranmanesh M. Effect of Forced Convection and PCM Materials on an Indirect Solar Dryer Equipped with Evacuated Heat Pipe Collector. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(11)-:2607-2614.

ABSTRACT

One of the most important applications of solar energy is its utilization in solar dryers to maintain agricultural products for long-term storage. These dryers work based on passing warm air through fresh materials by natural or forced convection. So, they have a direct dependence on the intensity of the sun's irradiance to their collector, which it disrupts the drying process in the absence of a thermal energy source in the hours when the sun is not available. In order to solve this problem, the phase change material (PCM) as thermal energy storage is used. The materials that have the capacity to absorb the thermal energy (charge phase) and, they release the absorbed energy (discharge phase) when the intensity of the solar radiation is low or during the night and cause the uniformity of the outlet temperature solar collector, and inside the drying chamber. As well as they provide the necessary thermal energy for hours when the sun is not available and increase the duration of use of the dryer. In the present research, the experimental studies have been carried out through designing and construction of an indirect cabin type solar dryer equipped with a heat pipe evacuated tube collector and using PCM material as energy storage in the expansion tank. In the present research, the experimental studies have been carried out through designing and construction of an indirect cabin type solar dryer equipped with a heat pipe evacuated tube collector and use of PCM material as energy storage in the expansion tank. The effect of various parameters such as inlet and outlet temperatures of the collector, temperature, and humidity of the drying chamber and ambient, the intensity of the solar irradiance on the drying process is investigated, with and without PCM and at two different speed of forced convection through the drying chamber. The results show that the effectiveness of forced convection on the drying process is more than the effect of PCM.

Keywords Solar Dryer; Vacuum Tube Collector (Heat Pipe); Phase Change Material; Thermal Energy Storage

[1]Energy Department, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

***Correspondence**
Address: Energy Department, Graduate University of Advanced, Technology, Haft Bagh Highway, Kerman, Iran. Postal Code: 7631818356
Phone: +98 (34) 33778502
Fax: +98 (34) 33778502
m.iranmanesh@kgut.ac.ir

Article History
Received: September 29, 2018
Accepted: May 21, 2019
ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts [2] Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region [3] Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. Renewable Energy [4] Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer [5] Phase change materials for smart textiles–An overview [6] Thermal energy storage and phase change materials: An overview [7] Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium [8] Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review [9] Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage [10] Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb) [11] Review of solar dryers for agricultural and marine products [12] Performance of an evacuated tube collector with heat pipe technology [13] Supply of money and food prices: The case of Greece [14] About Palayesh Paraffin Khavaran

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تجربی اثر مواد ذخیره‌کننده تغییر فاز دهنده و جریان جابجایی بر عملکرد یک نمونه خشک‌کن خورشیدی با کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ

محمدصالح برقی جهرمی MSc
پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته وعلوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
مسعود ایرانمنش* PhD
پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته وعلوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده
یکی از کاربردهای مهم و گسترده انرژی خورشیدی استفاده در خشک‌کن‌های خورشیدی برای محصولات کشاورزی برای نگه‌داری طولانی مدت آنها است. این خشک‌کن‌ها با عبور جریان طبیعی یا اجباری همرفت هوای‌گرم بین محصولات عمل می‌کنند و وابستگی مستقیمی به شدت تابش دریافتی خورشید توسط کلکتور دارند که این مساله باعث ایجاد اختلال در فرآیند خشک‌کردن در صورت عدم وجود منبع انرژی حرارتی در ساعاتی که خورشید در دسترس نیست می‌شود. به‌منظور حل این مشکل از مواد تغییر فاز دهنده (PMC) برای ذخیره انرژی حرارتی استفاده می‌شود. موادی که ظرفیت جذب انرژی گرمایی (مرحله شارژ) را داشته باشند و در صورت نیاز زمان‌هایی که شدت تابش خورشید کم بوده یا در طول شب انرژی جذب‌شده را آزاد کنند (مرحله دشارژ) و موجب تامین انرژی گرمایی لازم در ساعاتی که خورشید در دسترس نیست شده و افزایش مدت زمان استفاده از خشک‌کن بشوند. در این پژوهش با طراحی و ساخت خشک‌کن سینی‌دار خورشیدی غیرمستقیم مجهز به کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ) و با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PMC) برای ذخیره انرژی حرارتی، بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. اثر پارامترهای دماهای ورودی و خروجی کلکتور، محفظه خشک‌کن و محیط، رطوبت داخل محفظه خشک‌کن و رطوبت محیط، شدت تابش خورشیدی بر فرآیند خشک‌کردن برای دوحالت، با استفاده از مواد PMC و بدون استفاده از PMC و در سرعت‌های مختلف جریان جابجایی اجباری بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که اثر جریان جابجایی بر سرعت بخشیدن به فرآیند خشک‌کردن بیش از اثر استفاده از مواد ذخیره‌کننده بوده است.

کلیدواژه‌ها: خشک‌کن خورشیدی، کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ)، مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره‌کننده گرما

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱
*نویسنده مسئول: m.iranmanesh@kgut.ac.ir

مقدمه

براساس مطالعات انجام‌شده، مصرف انرژی در جهان هر۲۰سال دو برابر می‌شود. این مسئله اهمیت استفاده از منابع تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست را بیش از پیش روشن می‌کند. در ایران به دلیل زیادبودن روزهای آفتابی، رطوبت کم و پایین‌بودن ارتفاع بسیاری از مناطق، انرژی خورشیدی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای باشد[1]. طبق بررسی‌ها ۱۵درصد جمعیت جهان دچار سوءتغذیه هستند. افزایش جمعیت جهان، عدم موازنه بین جمعیت و غذا در دنیای کنونی را افزایش خواهد داد. در کنار افزایش تولید موادغذایی و کنترل رشد جمعیت، کاهش دورریز و اتلاف مواد غذایی که در طی تولید، برداشت، پس از برداشت و فروش رخ می‌دهد راهی مناسب برای رویارویی با این مشکل می‌باشد[2] خشک‌کردن مواد غذایی به منظور نگه‌داری طولانی مدت آنها، بیشتر در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری که شغل اکثر مردم کشاورزی است، انجام می‌گیرد. آب می‌تواند مستقیماً در فعل و انفعالات شیمیایی مواد غذایی شرکت کند، زیرا در مواد غذایی آب به صورت مولکول‌های آزاد وجود دارد، پس با گرفتن آب از محصولات کشاورزی به ماندگاری هرچه بیشتر آن‌ها کمک می‌کنیم. 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. *مختاریان* و همکاران[1] به مقایسه تأثیر روش خشک‌کردن با کمک خشک‌کن خورشیدی در حالت بازگردش هوا با روش سنتی در معرض تابش مستقیم آفتاب بر خصوصیات کیفی پسته پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش خشک‌کردن خورشیدی پسته سبب کاهش ۳۱/۵۷درصد در زمان خشک‌کردن نسبت به روش سنتی در معرض تابش آفتاب گردید. علاوه بر این بررسی خصوصیات کیفی پسته تولیدی نشان داد که پسته‌های خشک شده به روش خورشیدی در حالت بازگردش هوا کمترین میزان چروکیدگی، میزان رطوبت و تغییرات رنگ را داشت. *موسمبی* و همکاران[2] به طراحی، تحلیل و بررسی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی طبیعی با کلکتور صفحه تخت از جنس چوب و ورق پلی‌کربنات برای منطقه میانه عرض جغرافیایی پرداختند. میوه خشک‌شده در این تحقیق سیب می‌باشد. هدف از این تحقیق طراحی خشک‌کن خورشیدی قابل حمل برای منطقه میانه عرض جغرافیایی است. نتایج نشان داد که رطوبت اولیه سیب که ۸۶درصد است به رطوبت نهایی ۸/۱۲درصد می‌رسد. *نابنین* و همکاران[3] به طراحی و عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی هیبریدی برای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی گیلاسی پرداختند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن ۱۰۰kg گوجه‌فرنگی گیلاسی با این خشک‌کن ٤روز طول می‌کشد. این خشک‌کن برای موادی که به نور خورشید حساس هستند مناسب است. *اکتاس* و همکاران[4] نیز به تحلیل و بررسی یک خشک‌کن خورشیدی با بازیاب حرارتی مادون قرمز (SHRAIRD) برای خشک‌کردن خربزه پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز گرمای دریافتی بیشتر و زمان خشک‌کردن محصول کمتر می‌شود. علاوه بر این در این آزمایش شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد که نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دمای سطح خربزه بین ۵۰ تا ٦۰درجه سلسیوس و سرعت هوا ۰/۵متر بر ثانیه می‌باشد. وابستگی خشک‌کن‌های خورشیدی به تابش خورشید باعث ایجاد دو مشکل اصلی می‌شود: اولاً دما و سرعت متغیر جریان هوا در طی شبانه‌روز و ثانیاً عدم وجود منبع انرژی گرمایی در ساعاتی که خورشید در دسترس نمی‌باشد. به منظور حل این مشکلات از مواد ذخیره‌کننده انرژی گرمایی و به خصوص مواد تغییر فاز دهنده (PMC) استفاده می‌شود. این مواد ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره مقادیر زیادی انرژی گرمایی را درون خود دارند. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی (مرحله شارژ) و آزادسازی انرژی جذب‌شده (مرحله دشارژ) در زمان‌هایی که شدت تابش خورشید کم بوده یا در طول شب در مواد تغییر فاز دهنده، در فرآیند تغییر فاز (حالت مایع به جامد یا بالعکس) اتفاق می‌افتد و موجب یکنواخت‌شدن سرعت و دمای هوای خروجی کلکتور خورشیدی و در نتیجه یکنواختی دمای محفظه خشک‌کن و تأمین انرژی گرمایی لازم در ساعاتی از شب می‌شود[5, 6]. *شلبی* و *بک*[7] به بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری (Indirect Solar Dryer) و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پارافین واکس برای خشک‌کردن گیاه دارویی (خرزهره) پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده زمان

خشک‌شدن خرزهره به ۱۴ساعت می‌رسد و همچنین استفاده‌کردن از مواد تغییر فاز دهنده باعث بهبود عملکرد حرارتی خشک‌کن می‌شود. *بال* و همکاران[8] خشک‌کن خورشیدی طراحی نموده و توسعه دادند که از پارافین جامد به عنوان PMC برای ذخیره‌کردن انرژی خورشیدی اضافی در طول روز استفاده می‌کرد. این پژوهشگران از هوای داغ در دماهای نزدیک به دماهای خروجی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت استفاده کردند که وقتی هیچ‌گونه انرژی خورشیدی در دسترس نباشد آن را آزاد می‌کند. این امر بر کاهش میزان انرژی مورد نیاز در فرآیند خشک‌کردن دلالت می‌کند. به علاوه، آنها خشک‌کردن محصولات کشاورزی و غذایی در دماهای یکنواخت و متوسط ۴۰-۷۵درجه سلسیوس انجام دادند. *بنی‌اسدی* و همکاران[9] به بررسی تجربی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری با مواد تغییر فاز دهنده برای خشک‌کردن زردآلو پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این تحقیق پارافین است. نتایج نشان داد که میزان خشک‌کردن زردآلو در نقاط مختلف سینی‌های فوقانی و پایین تقریباً یکسان است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش ۵۰درصد زمان خشک‌شدن و همچنین بازده خشک‌کن نیز افزایش پیدا می‌کند. *بهاروواج* و همکاران[10] به بررسی تجربی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری با مواد تغییر فاز دهنده برای خشک‌کردن گیاه دارویی (*والیرینا جاتامانسی*) پرداختند. مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این تحقیق پارافین است. نتایج نشان داد که استفاده‌کردن از این خشک‌کن محتوای رطوبت ریشه‌ها را از ۸۹درصد به ۹درصد می‌رساند و فرآیند خشک‌شدن ۵روز طول می‌کشد. علاوه بر این ریشه‌های والیرینا در دمای خشک ۴۰درجه سلسیوس خشک می‌شوند که استفاده‌کردن از مواد تغییر فاز دهنده در این خشک‌کن زمان خشک‌شدن را ۳/۵۰درصد کاهش می‌دهد.

همان‌طور که بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در مورد خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم نشان می‌دهد در هیچ کدام از کلکتور لوله خلاء هیت‌پایپ (HPVTC) که در مقایسه با سایر کلکتورهای تخت دارای بیشترین بازده حرارتی می‌باشد استفاده نشده است. به علاوه مواد ذخیره‌کننده عموماً به طور مستقیم یا غیرمستقیم در داخل خشک‌کن یا در مسیر جریان هوای خشک‌کن قرار گرفته‌اند در حالی‌که در این پژوهش برای افزایش کارآیی مواد PMC در داخل لوله‌های مسی و در داخل مخزن ذخیره آب کلکتور قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش با طراحی و ساخت خشک‌کن سینی‌دار خورشیدی غیرمستقیم مجهز به کلکتور لوله خلأ نوع هیت‌پایپ و با استفاده از ماده PMC به عنوان ذخیره‌کننده انرژی از طریق کویل مسی داخل مخزن انبساط، بررسی‌های آزمایشگاهی روی پارامترهای عملکرد آن صورت گرفته است. در این بررسی اثر پارامترهای دماهای ورودی و خروجی کلکتور، دمای محفظه خشک‌کن و دمای محیط، رطوبت داخل محفظه خشک‌کن و شدت تابش خورشید بر فرآیند خشک‌کردن و انرژی مصرفی برای دوحالت، با استفاده از مواد PMC و بدون استفاده از PMC و در سرعت‌های مختلف جریان جابجایی اجباری بررسی و مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش یک نمونه خشک‌کن سینی‌دار خورشیدی غیرمستقیم با جریان اجباری که گرمای آن توسط یک دستگاه کلکتور لوله خلأ (نوع هیت‌پایپ) تامین می‌شود شامل قسمت‌های زیر می‌باشد: کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ)، منبع انبساط، مواد تغییر فاز دهنده درون لوله‌های مسی واقع در منبع انبساط، مبدل حرارتی (رادیاتور) در قسمت ورودی محفظه خشک‌کن، فن، محفظه خشک‌کن و سامانه اندازه‌گیری و کنترل دما و رطوبت.

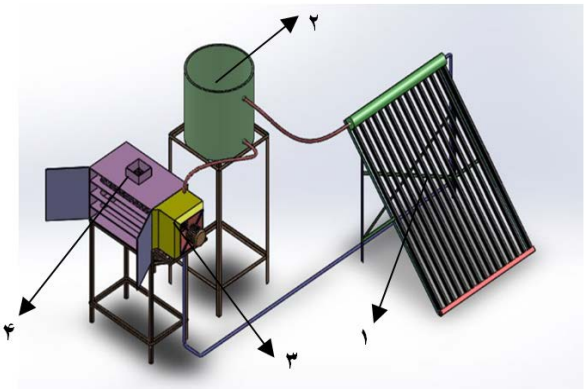
در ادامه به تشریح قسمت‌های مهم دستگاه خشک‌کن و نحوه ساخت و اندازه گیری‌های مربوطه پرداخته می‌شود.

۲-۱- شرح طراحی و ساخت دستگاه خشک‌کن خورشیدی و متعلقات آن

خشک‌کن خورشیدی که در شکل ۱ نشان داده شده است، دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶۰ × ۶۰ × ۱۰۰سانتی‌متر است که از ورق گالوانیزه ساخته شده و روی یک سازه به ارتفاع ۱۲۰سانتی‌متر قرار گرفته است.

شکل ۱) محفظه خشک‌کن خورشیدی و نقاط مختلف اندازه‌گیری سرعت، دما و رطوبت

به منظور طراحی خشک‌کن و محاسبه بار حرارتی مورد نیاز آن با استفاده از نرم‌افزار ترانسیس (Trnsys) بار حرارتی مفید دریافتی کلکتور به دست آمده که جزییات و معادلات آن در ادامه خواهد آمد. سپس با توجه به ظرفیت مورد نظر خشک‌کن (۲کیلوگرم سیب)، قسمت‌های مختلف آن مانند مبدل حرارتی، مخزن ذخیره و محفظه خشک‌کن انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار Solid Works طراحی سیستم انجام و نحوه استقرار اجزاء آن مشخص و بر همین اساس ساخته شد که جزییات آن مطابق شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲) تصویر شماتیک اجزاء سیستم خشک‌کن خورشیدی: ۱- کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ)، ۲- منبع انبساط ۳- فن و مبدل حرارتی واقع در دیفیوز، ٤- محفظه خشک‌کن خورشیدی

کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ) که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل SK-H-۱۵-۴۵ دارای ۱۵ لوله به ابعاد ۵۸×۱۸۰۰میلی‌متر (طول × قطر)، ظرفیت آب‌دهی (لیتر/روز) ۱۳۰-۱۵۰ و سطح موثر کلکتور ۱/۹متر مربع می‌باشد. مبدل حرارتی (رادیاتور) مورد استفاده در خشک‌کن خورشیدی، مدل ولئو آرمکو به ابعاد ۳۲۰×۳۸۳×۲۵میلی‌متر، شبکه مبدل حرارتی از نوع لوله فین‌دار با یک ردیف لوله آلومینیومی و نوع پره، کروگیت است. برای منبع تغذیه فن و تبدیل برق آن از یک پاورسوئیچینگ مدل R۱۰۰۴ با جریان ۳۳آمپر و ولتاژ ۱۲ولت استفاده شد. برای گردش آب مدار کلکتور خورشیدی، از یک پمپ سیرکولاتور مدل NM-۱۸۰-۶۰-۳۲ استفاده شد.

یکی از ویژگی‌های خشک‌کن حاضر استفاده از مخزن انبساط برای تامین حرارت مورد نیاز خشک‌کردن می‌باشد که به دلایل مختلفی این کار صورت گرفته است. از جمله اینکه نیاز به دمای بسیار بالا در خشک‌کردن محصولات کشاورزی نمی‌باشد و این مسئله نیاز به مخزن و کلکتور تحت فشار را منتفی می‌کند. ثانیاً هزینه‌های ساخت را کاهش داده و ثالثاً امکان دسترسی به داخل مخزن انبساط برای جای‌گذاری مواد و ظرف PMC را به راحتی فراهم می‌کند. 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 خشک‌کن بر عهده دارد می‌گردد. آب خروجی رادیاتور وارد کلکتور لوله خلأ (هیت‌پایپ) می‌شود و به وسیله پمپ سیرکولاتور دوباره وارد مخزن انبساط می‌شود و سیکل دوباره تکرار می‌شود.

۲-۲- وسایل اندازه‌گیری

مطابق شکل ۳ برای اندازه‌گیری دمای داخل محفظه خشک‌کن، دمای خروجی دودکش، دمای ورودی دیفیوز، دمای محیط، دمای ورودی و خروجی کلکتور لوله خلأ و مبدل حرارتی از ترموکوپل‌های نوع K که از قبل کالیبره شده‌اند و برای ثبت و ذخیره آن‌ها از دستگاه دیتالاگر ۱۶کاناله (Hioki) استفاده شد.

شکل ۳) وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده در تحقیق حاضر (۱- سنسور AM۲۳۰۱، ۲- دیتالاگر، ۳- پیرانومتر، ۴- testo۴۵۴)

برای اندازه‌گیری رطوبت داخل محفظه خشک‌کن از سنسور AM۲۳۰۱، مجهز به یک برد Arduino که برنامه آن توسط زبان برنامه نویسی C++ نوشته شد و نتایج روی یک LCD قرار داده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت هوا از دستگاه Testo۴۵۴ توسط سنسور و پراب تلسکوپی با دقت ۰/۱متر بر ثانیه استفاده شده است. هر کدام از این اندازه گیری‌ها چندبار تکرار شده و میانگین داده‌ها در نظر گرفته شده است. برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از دستگاه پیرانومتر مدل CMP KIPP&ZONEN ۶ با دقت (۴وات بر متر مربع) استفاده شد.

۳- تعیین محتوای رطوبت محصول و حرارت مورد نیاز خشک‌شدن

محصول انتخابی سیب درختی (طلایی/زرد) است که محاسبات لازم براساس خشک‌کردن ۱۴۰گرم سیب و قراردادن آن در آون به مدت ۲۴ساعت در دمای ۶۰درجه سلسیوس و توزین متناوب آن انجام شد و رطوبت اولیه محصول ۸۴/۲۸درصد به دست آمد که با اطلاعات موجود در منابع دیگر مطابقت دارد[11].

وزن محصول خشک را با استفاده از رابطه (۱) می‌توان به دست آورد.

$$m_0(1-x_0) = m_f(1-x_f) \qquad (۱)$$
$$m_0 - m_f = m_w$$

که در آن، x_0 درصد رطوبت محصول تر، x_f درصد رطوبت محصول خشک، m_o وزن محصول مرطوب و m_f وزن محصول خشک است.

آزمایش‌های مربوطه در تحقیق حاضر در محوطه آزمایشگاه گروه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان در خرداد و تیر ماه ۱۳۹۷ انجام گرفت. آزمایش‌ها با دبی جرمی هوای ثابت kgs^{-1} ۰/۰۹ برای دور تند فن و kgs^{-1} ۰/۰۷۸ برای دور کند فن و دبی جرمی آب در گردش مدار کلکتور kgs^{-1} ۰/۰۰۷ از ساعت ۹:۳۰ صبح تا ۱۹:۳۰ عصر انجام می‌گرفت و در هر آزمایش یک کیلوگرم سیب تازه، درون خشک‌کن خشک می‌شود. در نهایت با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده در هر آزمایش و داده‌های مربوط به شدت تابش خورشید و بازده کلکتور خورشیدی و بازده خشک‌کن از روابط (۳) و (۴) محاسبه و مقایسه شد[12, 13].

$$\eta_c = \frac{m_a c_p (T_o - T_i)}{i_t A_c} \qquad (۲)$$

که در این رابطه $c_{p=1.005+1.88W_{di}}$ می‌باشد.

بازده خشک‌کن برابراست با:

$$\eta_{dryer} = \frac{q_{drying}}{q_{collector}+q_{pcm}+q_{fan}+q_{pump}} \qquad (۳)$$

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

که در آن: q_{drying} انرژی حرارتی مورد نیاز برای خشک‌کردن، m_w جرم آب تبخیرشده، L_v گرمای نهان تبخیر آب است. q_{pcm} از جمع گرمای محسوس و گرمای نهان که به ترتیب طبق روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند، به دست می‌آید.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT = mc_p(T_f - T_i) \qquad (٤)$$

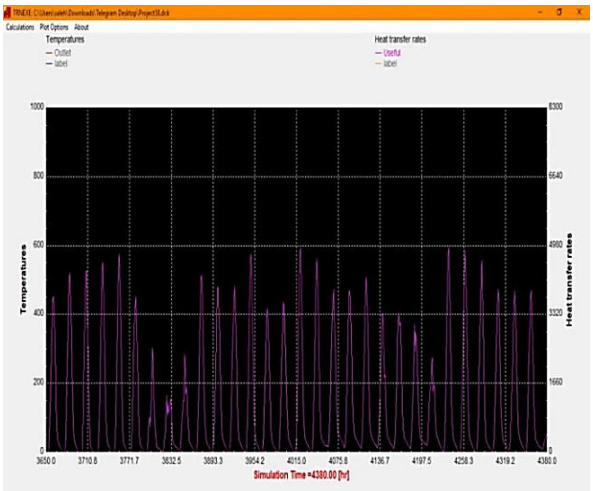
$$Q = m[c_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + c_{lp}(T_f - T_i) \qquad (۵)$$

برای به‌دست‌آوردن گرمای مفید کلکتور از نرم‌افزار ترنسیس (Trnsys) استفاده شد.گرمای مفید کلکتور برای تمام ماه‌های سال به دست آورده شده است. بیشترین گرمای مفید کلکتور مربوط به ماه‌های ژوئن و جولای می‌باشد که مقدار آن ۱/۳۰kw به دست آمده است (جدول ۱).

به عنوان نمونه گرمای مفید محاسبه‌شده با برنامه ترنسیس در ماه ژوئن که برخی اندازه‌گیری‌ها در آن انجام شده مطابق شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱) گرمای مفید کلکتور در ماه‌های سال

ماه	گرمای مفید کلکتور (kw)
ژانویه	۰/٤۷
فوریه	۰/۷۲
مارس	۱/۰۲
آپریل	۱/۱٦
می	۱/۲۸
ژوئن	۱/۳۰
ژولای	۱/۳٦
آگوست	۱/۱۳
سپتامبر	۰/۸۹
اکتبر	۰/٦۸
نوامبر	۰/۵۱
دسامبر	۰/٤۲



شکل ۴) گرمای مفید کلکتور مربوط به ماه ژوئن (مجموع گرمای مفید کلکتور در سال = 10.94kw و متوسط ماهانه گرمای مفید کلکتور= 0.9116Kw)

۴- انتخاب ماده PMC و طراحی محفظه نگه‌دارنده

ماده تغییر فاز دهنده (PMC) مورد استفاده در خشک‌کن خورشیدی، پارافین محصول شرکت خاوران‌پارافین[14] ایران بوده و مشخصات آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

برای قراردادن پارافین در مخزن انبساط آن را ذوب کرده و درون لوله‌های Uشکل ریخته و برای جلوگیری از منجمدشدن سریع پارافین لوله‌های مسی در حمام آب داغ قرار داده شد. در مرحله بعد لوله‌های مسی حاوی پارافین توسط صفحه مدور نگه‌دارنده در محل خود تثبیت شد و درون منبع انبساط قرار داده شد. این مراحل در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۲) مشخصات مواد تغییر فاز دهنده در تحقیق حاضر

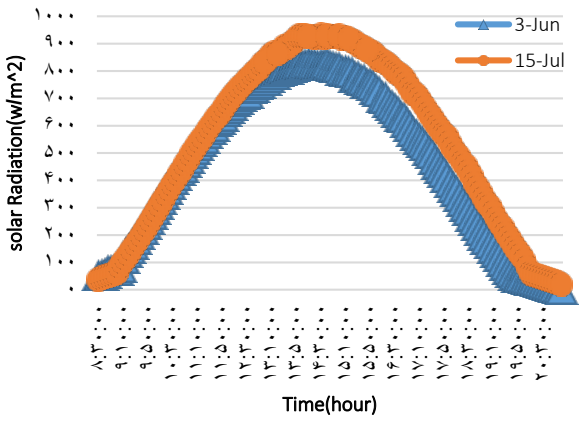
خصوصیات ماده PMC	مقدار
نام تجاری	Paraffin wax
نقطه انجماد (درجه سانتی گراد)	۵۹
نقطه ذوب (درجه سانتی گراد)	۵۴
محتوی روغن (درصد)	۰/۵
ویسکوزیته سینماتیکی در ۱۰۰درجه سانتیگراد (سانتی استوک)	۶/۲

شکل ۵) ماده PMC پرشده در لوله‌های مسی Uشکل

۵- بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق طراحی و ساخت یک خشک‌کن خورشیدی سینی‌دار مجهز به کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ (هیت‌پایپ) انجام شد و برای حالت‌های مختلف: با ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) و بدون آن و دو حالت جابجایی اجباری دور تند و کند فن دمنده، پارامترهای عملکرد این خشک‌کن خورشیدی برای خشک‌کردن محصول سیب در شرایط آب و هوایی شهر کرمان بررسی شد. نتایج خشک‌کن خورشیدی طراحی‌شده با خشک‌کردن تحت شرایط نور خورشید (OSD) در فضای باز بدون استفاده از خشک‌کن یا هر سیستم فعال دیگری که انجام شده است، مقایسه شد. بنابراین نتایج به‌دست‌آمده اثر استفاده از ماده ذخیره‌کننده گرما و جابجایی اجباری به طور مستقل و ترکیب آنها بر فرآیند خشک‌کردن را نشان می‌دهد.

آزمایشات در روزهای ۳ ژوئن و ۱۵ جولای انجام شده است. در این روزها میزان انرژی تابشی رسیده از خورشید طبق نمودار ۱ نشان می‌دهد که بیشترین میزان شدت تابش در محدوده زمانی ۱۴ تا ۱۶ اتفاق افتاده و به طور دقیق‌تر بیشترین میزان شدت تابش تقریباً در محدوده زمانی ساعت ۱۵ در روز ۳ ژوئن به مقدار حدود ۸۴۴وات بر متر مربع و در روز ۱۵ جولای به حدود ۹۳۰وات بر متر مربع می‌رسد. این روند از ابتدای صبح تاساعت ۱۵:۱۰ صعودی است و از این ساعت به بعد سیر نزولی می‌گیرد.

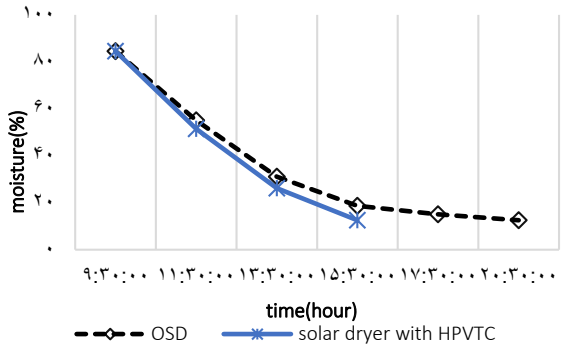


نمودار ۱) شدت تابش خورشیدی در روزهای انجام آزمایشات

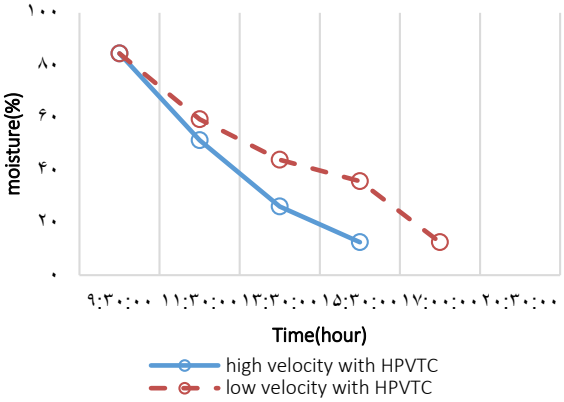
طبق نتایج به‌دست‌آمده مطابق نمودار ۲ مدت زمان خشک‌شدن سیب با استفاده از کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ (HPVTC) به مدت ۷ساعت و با استفاده از روش خشک‌کردن تحت شرایط نور خورشید (OSD) به مدت ۱۱ساعت طول کشید که روش HPVTC معادل ۴۵/۴۵درصد صرفه‌جویی در مدت زمان خشک‌شدن نسبت به روش OSD را نشان داد.

طبق نمودار ۳ خشک‌کن خورشیدی ساخته‌شده با دو دور تند و کند

کار می‌کند که طبق نتایج به‌دست‌آمده با دور تند، زمان خشک‌شدن محصول ۶ساعت و با دور کند، زمان خشک‌شدن محصول ۷ساعت و ۳۰دقیقه طول کشیده است که دور تند معادل ۱۷/۸۰درصد صرفه‌جویی در زمان خشک‌شدن نسبت به دور کند را نشان می‌دهد.

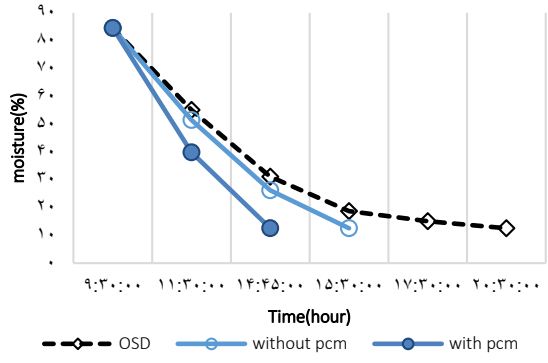


نمودار ۲) کاهش رطوبت برحسب زمان خشک‌کردن محصول بدون ماده PMC و با جابجایی اجباری (دورتند فن)



نمودار ۳ کاهش رطوبت بر حسب زمان بدون ماده PMC و مقایسه دو حالت جابجایی اجباری (دور تند و کند فن)

طبق نمودار ۴ خشک‌کن خورشیدی ساخته‌شده با ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) کار می‌کند. هنگامی که از دور تند و همچنین از ماده PMC در خشک‌کن استفاده می‌شود، مدت زمان خشک‌کردن محصول ۵ساعت و ۱۵دقیقه و بدون استفاده از ماده PMC در خشک‌کن، مدت زمان خشک‌شدن محصول ۶ساعت طول می‌کشد، بنابراین ماده PMC، ۴۵دقیقه مدت زمان خشک‌کردن را کاهش می‌دهد که معادل ۱۴/۱۶درصد کاهش نسبت به حالت بدون PMC می‌باشد.

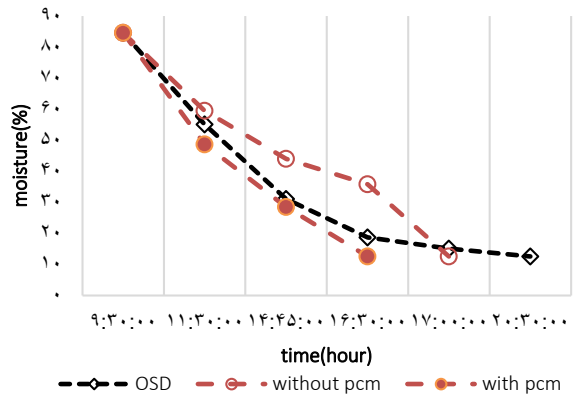


نمودار ۴) کاهش رطوبت برحسب زمان با و بدون استفاده از ماده PMC و با جابجایی اجباری (دورتند فن)

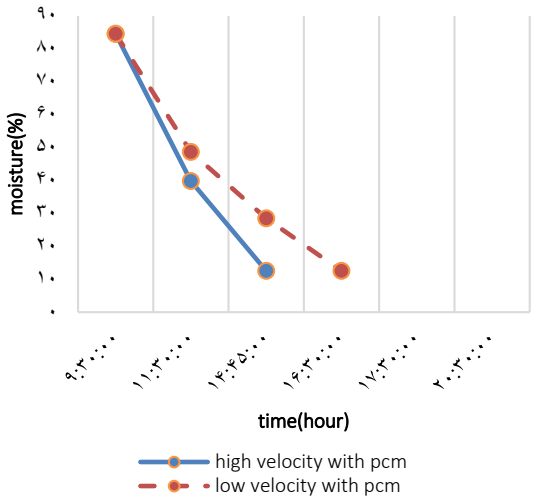
طبق نمودار ۵ هنگام استفاده از دور کند و همچنین ماده PMC در خشک‌کن خورشیدی، مدت زمان خشک‌کردن محصول ۷ساعت و بدون استفاده از ماده PMC ۷ساعت و ۳۰دقیقه طول کشیده است. بنابراین ماده PMC ۳۰دقیقه مدت زمان خشک‌کردن را کاهش می‌دهد که معادل ۴/۱۰درصد صرفه‌جویی در زمان خشک‌شدن نسبت به حالت بدون PMC نشان می‌دهد.

نمودار ۶ نتایج مربوط به هنگام استفاده از ماده PMC برای دو حالت دور تند و کند را نشان می‌دهد. هنگام استفاده از دور تند مدت زمان خشک‌کردن ۵ساعت و ۱۵دقیقه و هنگام استفاده از دور کند ۷ساعت طول کشیده است.

در یک جمع‌بندی، زمان‌های مربوط به فرآیند خشک‌شدن محصول سیب برای حالت‌های مختلف که شامل اثر جابجایی اجباری و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد به طور خلاصه در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه شده است.



نمودار ۵) کاهش رطوبت برحسب زمان با و بدون استفاده از ماده PMC برای حالت دور کند فن



نمودار ۶) کاهش رطوبت برحسب زمان با استفاده از ماده PMC برای حالت دور تند و کند

جدول ۳) مدت زمان خشک‌شدن محصول در حالت‌های مختلف

حالت‌های مختلف خشک‌کردن	مدت زمان خشک‌شدن (min)
خشک‌کردن طبیعی	۶۶۰
خشک‌کردن با کلکتور HPVTC +PMC دور کند	۴۲۰
خشک‌کردن با کلکتور HPVTC +PMC دور تند	۳۰۹
خشک‌کردن با کلکتور HPVTC دورکند	۴۳۸
خشک‌کردن با کلکتور HPVTC دور تند	۳۶۰

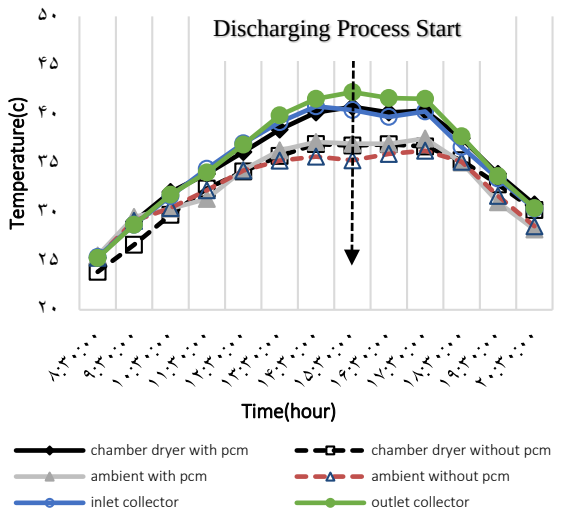
طبق نمودار ۷ نتایج به‌دست‌آمده هنگام استفاده از دور تند خشک‌کن و استفاده از ماده PMC، دمای محفظه خشک‌کن در ساعت ۱۵:۳۰ به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۰/۷۶درجه سانتی‌گراد و بدون استفاده از ماده PMC درساعت ۱۴:۳۰ به مقدار ۳۶/۹۴درجه سانتی گراد می‌رسد. همچنین دمای میانگین ورودی و خروجی کلکتور که به علت انجام آزمایش در فشار اتمسفریک بسیار به هم نزدیک بوده در طول آزمایش بیشترین دمای ورودی و خروجی کلکتور به ترتیب ۴۲/۲۶ و ۴۰/۸۰ به ترتیب در ساعات ۱۵:۳۰ و ۱۴:۳۰ بوده است.

شرایط محیطی ساعتی آب و هوا و تابش خورشید در روزهای آزمایش (۳ ژوئن و ۱۵ جولای) مطابق جدول ۴ ملاحظه می‌شود.

نتایج مربوط به بازده خشک‌کن خورشیدی طبق نمودار ۸ نشان می‌دهد که بیشترین بازده هنگام استفاده از ماده PMC و همچنین دور تند خشک‌کن و برابر ۴۳/۳۴درصد می‌باشد. در حالت بدون استفاده از ماده PMC مقدار بازده ۳۹/۵۶درصد به دست آمده است و هنگام استفاده از ماده PMC و همچنین دور کند خشک‌کن خورشیدی، بازده خشک‌کن خورشیدی ۳۲/۹۷درصد و بدون استفاده از ماده PMC ۲۹/۶۷درصد به دست آمده است. بنابراین در یک جمع‌بندی می‌توان ملاحظه کرد که اثر استفاده از جابجایی اجباری بر زمان خشک‌کردن و همچنین بازده خشک‌کن بیشتر از اثر ماده PMC می‌باشد.

طبق نتایج به‌دست‌آمده میزان خشک‌شدن نمونه‌های سیب در نقاط مختلف سینی فوقانی، وسط و پایین تقریباً به صورت یکسان است.

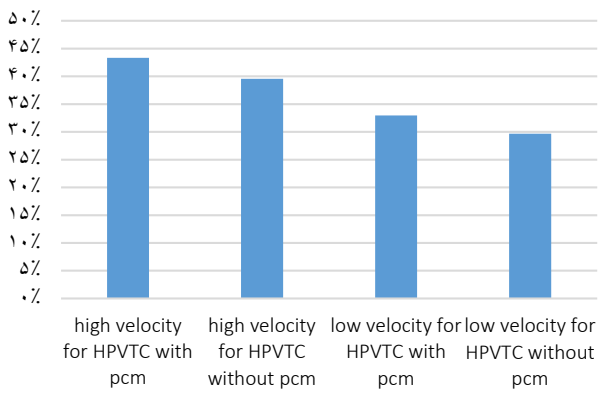
همچنین کیفیت سیب خشک‌شده در خشک‌کن خورشیدی طراحی‌شده از نظر رنگ و طعم بالا بود. عملکرد، کیفیت و سرعت بالای خشک‌کردن نشان داد که خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ با استفاده از مواد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی نسبت به روش خشک‌کردن تحت شرایط نور خورشید (OSD) برتری قابل ملاحظه‌ای دارد.



نمودار ۷) دمای میانگین محفظه خشک‌کن و محیط، با و بدون استفاده از ماده PMC برای حالت دور تند فن

جدول ۴) شرایط محیطی ساعتی آب و هوا و تابش خورشید در روزهای آزمایش (۳ ژوئن و ۱۵ جولای)

ساعت	شدت تابش w/m^2		دمای محیط C		رطوبت %		سرعت باد m/sec	
	۳ ژوئن	۱۵ جولای	۳ژوئن	۱۵ جولای	۳ ژوئن	۱۵ جولای	۳ ژوئن	۱۵ جولای
۸	۰	۰	۲۵	۲۵	۱۳	۲۴	۳/۵	۰/۸
۹	۶۸	۵۲	۲۶	۲۵	۱۱	۱۹	۴/۴	۱/۳
۱۰	۱۸۸	۱۶۹	۲۹	۲۹	۱۰	۱۸	۵/۴	۱/۱
۱۱	۴۰۳	۳۸۷	۳۰	۳۰	۱۰	۱۵	۶/۳	۱/۱
۱۲	۵۸۷	۵۹۵	۳۱	۳۲	۱۰	۱۳	۵/۹	۱/۴
۱۳	۷۲۵	۷۶۵	۳۴	۳۴	۱۰	۱۲	۴/۷	۱/۳
۱۴	۸۰۷	۸۸۵	۳۶	۳۵	۱۰	۱۱	۳/۷	۲/۴
۱۵	۸۲۵	۹۲۷	۳۷	۳۶	۱۰	۱۲	۴	۲/۲
۱۶	۷۸۰	۸۹۶	۳۷	۳۵	۱۰	۱۳	۴/۴	۱/۹
۱۷	۶۶۴	۷۹۶	۳۷	۳۶	۱۰	۱۵	۴/۷	۱/۶
۱۸	۴۸۸	۶۳۲	۳۸	۳۶	۱۰	۱۸	۵/۶	۱/۴
۱۹	۲۹۲	۴۲۹	۳۵	۳۵	۱۰	۲۲	۵/۹	۱/۳
۲۰	۱۰۲	۲۱۰	۳۱	۳۲	۱۳	۲۵	۵/۴	۱/۱
۲۱	۲۳	۴۵	۲۸	۲۹	۱۴	۲۶	۴/۷	۱



نمودار ۸) بازده خشک‌کن خورشیدی در حالت‌های مختلف

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی اثر پارامترهای جابجایی اجباری و استفاده از ماده ذخیره‌کننده گرما(PMC) در یک مدل خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم که منبع حرارتی آن کلکتور لوله گرمایی تحت خلأ بوده است و مقایسه آن با خشک‌کردن طبیعی پرداخته شده است. به طور خلاصه نتایج حاصله نشان داد که استفاده از ماده ذخیره‌کننده گرما (PMC) به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی سیستم، متوسط دمای محفظه خشک‌کن را افزایش داده و مدت زمان خشک‌کردن را کاهش می‌دهد. به علاوه مدت زمان استفاده از خشک‌کن و همین‌طور بازده خشک‌کن نیز افزایش (۳ تا ۴درصد) می‌یابد.

استفاده از جابجایی اجباری به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت باعث کاهش قابل توجه زمان خشک‌کردن و افزایش بازده خشک‌کن

(حدود ۱۰درصد) شده است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان و پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته وعلوم محیطی، به واسطه حمایت مادی و معنوی از کار پژوهشی انجام‌شده، مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام نمایند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد هستند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

تعارض منافع: موردی بیان نشد.

سهم نویسندگان: محمدصالح برقی جهرمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۴۰%)؛ مسعود ایرانمنش (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰%)

منابع مالی: موردی بیان نشد.

منابع

1- Mokhtarian M, Tavakolipour H, Kalbasi Ashtari A. Effects of solar drying along with air recycling system on physicochemical and sensory properties of dehydrated pistachio nuts. LWT. 2017;75:202-209.

2- Musembi MN, Kiptoo KS, Yuichi N. Design and analysis of solar dryer for mid-latitude region. Energy Procedia. 2016;100:98-110.

3- Nabnean S, Janjai S, Thepa S, Sudaprasert K, Songprakorp R, Bala BK. Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. Renewable Energy. 2016;94:147-156.

4- Aktaş M, Şevik S, Amini A, Khanlari A. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. Solar Energy. 2016;137:500-515.

5- Mondal S. Phase change materials for smart textiles–An overview. Applied Thermal Engineering. 2008;28(11–12):1536-1550.

6- Demirbas MF. Thermal energy storage and phase change materials: An overview. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. 2006;1(1):85-95.

7- Shalaby SM, Bek MA. Drying nerium oleander in an indirect solar dryer using phase change material as an energy storage medium. Journal of Clean Energy Technologies. 2015;3(3):176-180.

8- Bal LM, Satya S, Naik SN. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010;14(8):2298-2314.

9- Baniasadi E, Ranjbar S, Boostanipour O. Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage. Renewable Energy. 2017;112:143-150.

10- Bhardwaj AK, Chauhan R, Kumar R, Sethi M, Rana A. Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb). Case Studies in Thermal Engineering. 2017;10:302-314.

11- Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010;14(1):1-30.

12- Parmar RB, Bhojak K. Performance of an evacuated tube collector with heat pipe technology. International Journal of Engineering Research and General Science. 2016;4(3):71-89.

13- Ziotis N, Papadas CT. Supply of money and food prices: The case of Greece. Agricultural Economics Review. 2011;12(1):36-44.

14- Khavaran Paraffin. About Palayesh Paraffin Khavaran [Internet]. Tehran: Khavaran Paraffin; 2019 [Unknown cited]. Available from: https://www.khavaranparaffin.com/about-us.html