



## 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.<sup>1</sup> MSc,  
Iranmanesh M.\*<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup>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

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

محمد صالح برقی جهرمی MSc

پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

مسعود ایرانمنش PhD

پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم، تکنولوژی پیشرفته و علوم 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 هوای گرم 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 (PCM) 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 (PCM) 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 دو حالت، با استفاده از مواد PCM و بدون استفاده از PCM 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

بر اساس مطالعات انجام‌شده، مصرف انرژی در جهان هر ۲۰ سال 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<sup>[1]</sup>. طبق بررسی‌ها ۱۵ درصد 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 مواد غذایی 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<sup>[2]</sup> 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<sup>[1]</sup> 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 ۳۱/۵۷ درصد 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. موسمی و همکاران<sup>[2]</sup> 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 سبب می‌باشد. هدف از این تحقیق طراحی خشک‌کن خورشیدی قابل حمل برای منطقه میانه عرض جغرافیایی است. نتایج نشان داد که رطوبت اولیه سبب که ۸۶ درصد است به رطوبت نهایی ۸/۱۲ درصد می‌رسد. ناپین و همکاران<sup>[3]</sup> به طراحی و عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی هیبریدی برای خشک‌کردن گوجه‌فرنگی گیلانی پرداختند. نتایج نشان داد که خشک‌کردن ۱۰۰ kg گوجه‌فرنگی گیلانی با این خشک‌کن ۴ روز طول می‌کشد. این خشک‌کن برای موادی که به نور خورشید حساس هستند مناسب است. اکتاس و همکاران<sup>[4]</sup> نیز به تحلیل و بررسی یک خشک‌کن خورشیدی با بازتاب 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 ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوا ۰/۵ متر 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 (PCM) 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 یکنواخت شدن سرعت و دمای هوای خروجی کلکتور خورشیدی و در نتیجه یکنواختی دمای محفظه خشک‌کن و تأمین انرژی گرمایی لازم در ساعاتی از شب می‌شود<sup>[5]</sup>، شلی و بک<sup>[7]</sup> به بررسی تجربی یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با جابجایی اجباری (Indirect Solar Dryer) و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پارافین و اکس برای خشک‌کردن گیاه دارویی (خرزهره) پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده زمان

تغییر فاز دهنده درون لوله‌های مسی واقع در منبع انبساط، مبدل حرارتی (رادپاتور) 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 اندازه‌گیری‌های مربوطه پرداخته می‌شود.

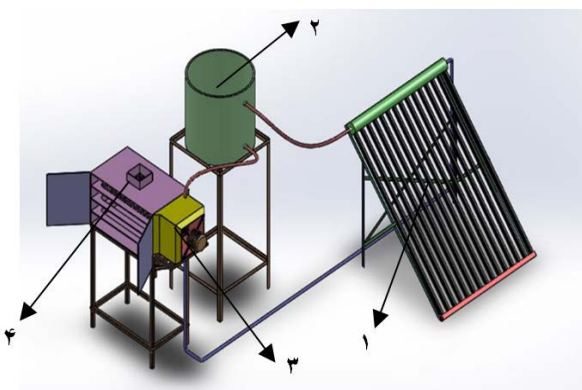
## ۱-۲- شرح طراحی و ساخت دستگاه خشک‌کن خورشیدی و متعلقات آن

خشک‌کن خورشیدی که در شکل ۱ نشان داده شده است، دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب  $60 \times 60 \times 100$  سانتی‌متر است که از ورق گالوانیزه ساخته شده و روی یک سازه به ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متر 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 ترانسپس (Trnsys) بار حرارتی مفید دریافتی کلکتور به دست آمده که جزئیات و معادلات آن در ادامه خواهد آمد. سپس با توجه به ظرفیت مورد نظر خشک‌کن (۲ کیلوگرم 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 جزئیات 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 دیفیوزر، ۴- محفظه خشک‌کن خورشیدی

خشک‌شدن خرزهره به ۱۴ ساعت می‌رسد و همچنین استفاده‌کردن از مواد تغییر فاز دهنده باعث بهبود عملکرد حرارتی خشک‌کن می‌شود. بال و همکاران<sup>[8]</sup> 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 ۴۰-۷۵ درجه سلسیوس انجام دادند. بنی‌اسدی و همکاران<sup>[9]</sup> 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 پایینی تقریباً یکسان است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده باعث کاهش ۵۰ درصد زمان خشک‌شدن و همچنین بازده خشک‌کن نیز افزایش پیدا می‌کند. بهارواج و همکاران<sup>[10]</sup> 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 ۸۹ درصد به ۹ درصد می‌رساند و فرآیند خشک‌شدن ۵ روز طول می‌کشد. علاوه بر این ریشه‌های والیرینا در دمای خشک ۴۰ درجه سلسیوس خشک می‌شوند که استفاده‌کردن از مواد تغییر فاز دهنده در این خشک‌کن زمان خشک‌شدن را ۳/۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

همان‌طور که بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در مورد خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم نشان می‌دهد در هیچ کدام از کلکتور لوله خلأ 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 کارایی 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 دو حالت، 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

سنسور و پراب تلسکوپي با دقت ۰/۱ متر بر ثانيه استفاده شده است. هر کدام از اين اندازه گيريها چندبار تکرار شده و ميانگين دادهها در نظر گرفته شده است. براي اندازه گيري شدت تابش خورشيدی از دستگاه پيرانومتر مدل ۶ CMP KIPP&ZONEN با دقت (۴ وات بر متر مربع) استفاده شد.

**۳- تعيين محتوای رطوبت محصول و حرارت مورد نیاز خشک شدن**  
محصول انتخابی سيب درختی (طلايي/زرد) است که محاسبات لازم براساس خشک کردن ۱۴۰ گرم سيب و قرارداد آن در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسيوس و توزين متناوب آن انجام شد و رطوبت اوليه محصول ۸۴/۲۸ درصد به دست آمد که با اطلاعات موجود در منابع ديگر مطابقت دارد [11].

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

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

$$m_0 - m_f = m_w$$

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 است.

آزمایشهای مربوطه در تحقيق 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  $0.09 \text{ kg s}^{-1}$  برای دور تند فن و  $0.078 \text{ kg s}^{-1}$  برای دور کند فن و دبی جرمی آب در گردش مدار کلکتور  $0.007 \text{ kg s}^{-1}$  از ساعت ۹:۳۰ صبح تا ۱۹:۳۰ عصر انجام می گرفت و در هر آزمایش یک کیلوگرم سيب تازه، درون خشک کن خشک می شود. در نهایت با استفاده از دادههای به دست آمده در هر آزمایش و دادههای مربوط به شدت تابش خورشيد و بازده کلکتور خورشيدی و بازده خشک کن از روابط (۳) و (۴) محاسبه و مقایسه شد [12, 13].

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

که در این رابطه  $C_p = 1.005 + 1.88W_{di}$  می باشد. بازده خشک کن برابر است با:

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

که در این رابطه  $q_{drying} = m_w \times L_v$  می باشد. که در آن:  $q_{drying}$  انرژی حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن،  $m_w$  جرم آب تبخیر شده،  $L_v$  گرمای نهان تبخیر آب است.  $q_{pcm}$  از جمع گرمای محسوس و گرمای نهان که به ترتیب طبق روابط ۴ و ۵ محاسبه می شوند، به دست می آید.

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

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

برای به دست آوردن گرمای مفید کلکتور از نرم افزار 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 می باشد که مقدار آن  $1/30 \text{ kW}$  به دست آمده است (جدول ۱).

کلکتور لوله خلأ (هیت پایپ) که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل SK-H-۱۵-۴۵ دارای ۱۵ لوله به ابعاد  $1800 \times 58$  میلی متر (طول  $\times$  قطر)، ظرفیت آب دهی (لیتر/روز)  $130-150$  و سطح موثر کلکتور  $1/9$  متر مربع می باشد. مبدل حرارتی (رادیاتور) مورد استفاده در خشک کن خورشيدی، مدل ولئو آرکو به ابعاد  $25 \times 38 \times 320$  میلی متر، شبکه مبدل حرارتی از نوع لوله فین دار با یک ردیف لوله آلومینیومی و نوع پره، کروگیت است. برای منبع تغذیه فن و تبدیل برق آن از یک پاور سوئیچینگ مدل R1004 با جریان ۳۳ آمپر و ولتاژ ۱۲ ولت استفاده شد. برای گردش آب مدار کلکتور خورشيدی، از یک پمپ سیرکولاتور مدل NM-۱۸۰-۶۰-۳۲ استفاده شد.

یکی از ویژگیهای 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 جای گذاری مواد و ظرف PMC را به راحتی فراهم می کند. بنابراین در ابتدا آب تغذیه پس از ورود به کلکتور لوله خلأ 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.

## ۲-۲- وسایل اندازه گیری

مطابق شکل ۳ برای اندازه گیری دمای داخل محفظه خشک کن، دمای خروجی دودکش، دمای ورودی دیفیوزر، دمای محیط، دمای ورودی و خروجی کلکتور لوله خلأ و مبدل حرارتی از ترموکوپل های نوع K که از قبل کالیبره شده اند و برای ثبت و ذخیره آنها از دستگاه دیتالاگر ۱۶ کاناله (Hioki) استفاده شد.



شکل ۳ (۱) سنسور AM۲۳۰۱، (۲) دیتالاگر، (۳) پیرانومتر، (۴) testo۴۵۴

برای اندازه گیری رطوبت داخل محفظه خشک کن 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 اندازه گیری سرعت هوا از دستگاه Testo۴۵۴ توسط

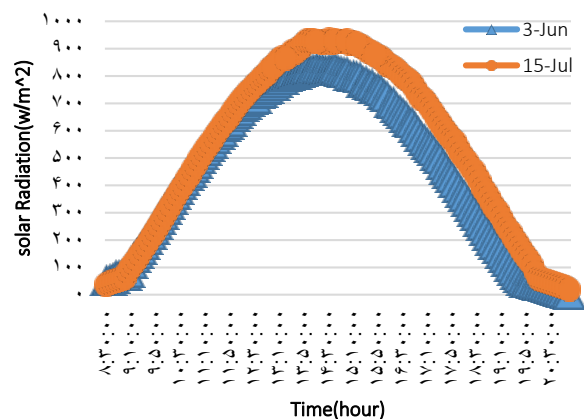


شکل ۵) ماده PMC پرشده در لوله‌های مسی U شکل

#### 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 ۱۵ ساعت در روز ۳ ژوئن به مقدار حدود ۸۴۴ وات بر متر مربع و در روز ۱۵ جولای به حدود ۹۳۰ وات بر متر مربع می‌رسد. این روند از ابتدای صبح تا ساعت 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 ۷ ساعت و با استفاده از روش خشک‌کردن تحت شرایط نور خورشید (OSD) به مدت ۱۱ ساعت طول کشید که روش HPVTC معادل ۴۵/۴۵ درصد صرفه‌جویی در مدت زمان خشک‌شدن نسبت به روش OSD را نشان داد. طبق نمودار ۳ خشک‌کن خورشیدی ساخته‌شده با دو دور تند و کند

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	۰/۴۷
فوریه	۰/۷۲
مارس	۱/۰۲
آوریل	۱/۱۶
می	۱/۲۸
ژوئن	۱/۳۰
ژولای	۱/۳۶
اگوست	۱/۱۳
سپتامبر	۰/۸۹
اکتبر	۰/۶۸
نوامبر	۰/۵۱
دسامبر	۰/۴۲



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 خاوران پارافین<sup>[14]</sup> ایران بوده و مشخصات آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود. برای قراردادن پارافین در مخزن انبساط آن را ذوب کرده و درون لوله‌های U شکل 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.

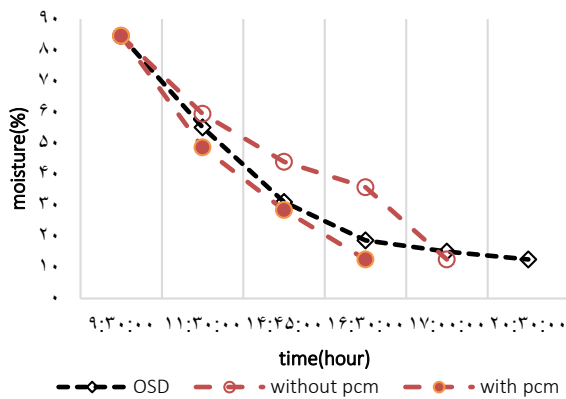
جدول ۲) مشخصات مواد تغییر فاز دهنده در تحقیق حاضر

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

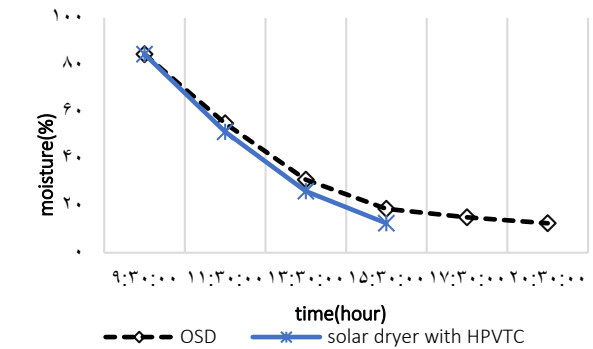
طبق نمودار ۵ هنگام استفاده از دور کند و همچنین ماده PMC در خشک کن خورشیدی، مدت زمان خشک کردن محصول ۷ ساعت و بدون استفاده از ماده PMC ۷ ساعت و ۳۰ دقیقه طول کشیده است. بنابراین ماده PMC ۳۰ دقیقه مدت زمان خشک کردن را کاهش می دهد که معادل ۴/۱۰ درصد صرفه جویی در زمان خشک شدن نسبت به حالت بدون PMC نشان می دهد.

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

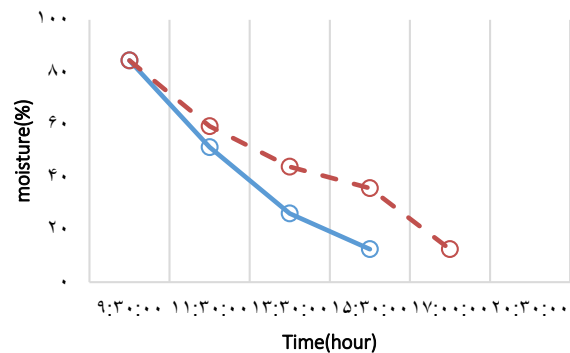
در یک جمع بندی، زمان های مربوط به فرآیند خشک شدن محصول سیب برای حالت های مختلف که شامل اثر جابجایی اجباری و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده می باشد به طور خلاصه در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه شده است.



کار می کند که طبق نتایج به دست آمده با دور تند، زمان خشک شدن محصول ۶ ساعت و با دور کند، زمان خشک شدن محصول ۷ ساعت و ۳۰ دقیقه طول کشیده است که دور تند معادل ۱۷/۸۰ درصد صرفه جویی در زمان خشک شدن نسبت به دور کند را نشان می دهد.

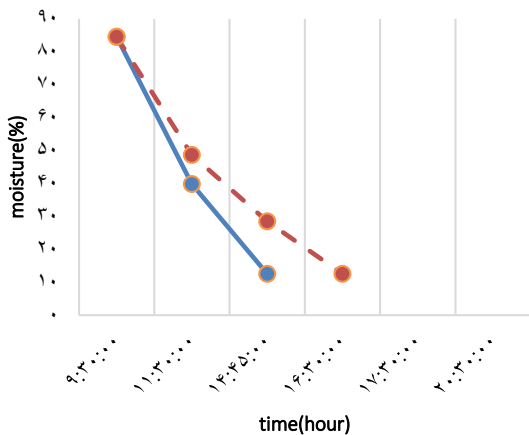


نمودار ۲) کاهش رطوبت بر حسب زمان خشک کردن محصول بدون ماده PMC و جابجایی اجباری (دور تند فن)



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

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

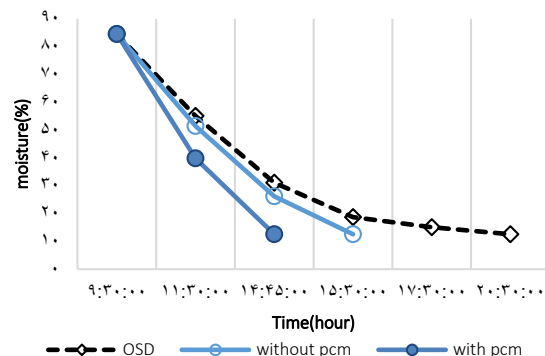


نمودار ۶) کاهش رطوبت بر حسب زمان با استفاده از ماده PMC برای حالت دور تند و کند

جدول ۳) مدت زمان خشک شدن محصول در حالت های مختلف

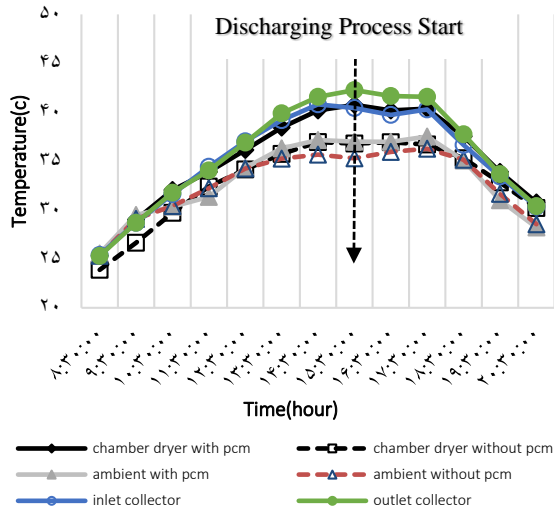
حالت های مختلف خشک کردن	مدت زمان خشک شدن (min)
خشک کردن طبیعی	۶۶۰
خشک کردن با کلکتور HPVTC + PMC دور کند	۴۲۰
خشک کردن با کلکتور HPVTC + PMC دور تند	۳۰۹
خشک کردن با کلکتور HPVTC دور کند	۴۳۸
خشک کردن با کلکتور HPVTC دور تند	۳۶۰

طبق نمودار ۴ خشک کن خورشیدی ساخته شده با ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) کار می کند. هنگامی که از دور تند و همچنین از ماده PMC در خشک کن استفاده می شود، مدت زمان خشک کردن محصول ۵ ساعت و ۱۵ دقیقه و بدون استفاده از ماده PMC در خشک کن، مدت زمان خشک شدن محصول ۶ ساعت طول می کشد، بنابراین ماده PMC، ۴۵ دقیقه مدت زمان خشک کردن را کاهش می دهد که معادل ۱۴/۱۶ درصد کاهش نسبت به حالت بدون PMC می باشد.



نمودار ۴) کاهش رطوبت بر حسب زمان با و بدون استفاده از ماده PMC و جابجایی اجباری (دور تند فن)

همچنین کیفیت سبب 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

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 ۴۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد و بدون استفاده از ماده PMC در ساعت ۱۴:۳۰ به مقدار ۳۶/۹۴ درجه سانتی‌گراد 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 ۴۳/۳۴ درصد می‌باشد. در حالت بدون استفاده از ماده PMC مقدار بازده ۳۹/۵۶ درصد به دست آمده است و هنگام استفاده از ماده PMC و همچنین دور کند خشک‌کن خورشیدی، بازده خشک‌کن خورشیدی ۳۲/۹۷ درصد و بدون استفاده از ماده PMC ۲۹/۶۷ درصد 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 سبب در نقاط مختلف سینی فوقانی، وسط و پایین تقریباً به صورت یکسان است.

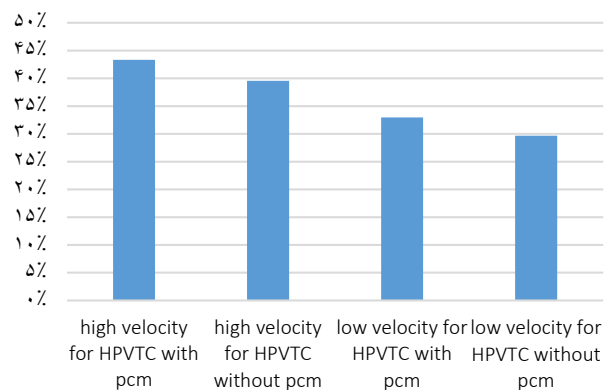
جدول ۴) شرایط محیطی ساعتی آب و هوا و تابش خورشید در روزهای آزمایش (۳ ژوئن و ۱۵ جولای)

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

### 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 ۴ درصد) می‌یابد.

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



نمودار ۸) بازده خشک‌کن خورشیدی در حالت‌های مختلف

- 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- Baniyasi 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>

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

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

**تعارض منافع:** موردی بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** محمد صالح 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.