



## مقایسه سینتیک خشک کردن برگ نعناع با خشک کن خورشیدی فتوولتائیک / گرمایی با خشک کردن

### طبیعی

محمد رضا روزگار<sup>۱</sup>، محمد حسین عباسپور فرد<sup>۲\*</sup>، مهدی هدایتی زاده<sup>۳</sup>، حمید محمدی نژاد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۴- دانشجوی دکتری گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

#### چکیده

#### اطلاعات مقاله

در این تحقیق یک خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی حاوی مواد تغییر فاز به منظور خشک کردن برگ های نعناع طراحی و ساخته شد. عملکرد این خشک کن تحت شرایط آب و هوایی مشهد با طول جغرافیایی ۵۹/۶۲ درجه و عرض جغرافیایی ۳۶/۲۶ درجه مورد بررسی قرار گرفت. اجزای اصلی این خشک کن عبارتند از: پنل فتوولتائیک، کلکتور خورشیدی، فن های دمنده، محفظه حاوی مواد تغییر فاز پارافین آلی و محفظه محصول. آزمایشات خشک کردن بر روی برگ های نعناع به دو روش خشک کردن با خشک کن خورشیدی ترکیبی و خشک کردن طبیعی در سایه با رطوبت اولیه ۸۰ درصد بر پایه تر انجام گرفت و تا رسیدن به رطوبت ۱۲ درصد ادامه یافت. مدت زمان خشک کردن با خشک کن خورشیدی ۲۹۰ دقیقه و به روش طبیعی ۱۵۶۰ دقیقه طول کشید. داده های آزمایشگاهی با هشت مدل خشک کردن لایه نازک در پیشینه پژوهش برازش گردید که مدل دوجمله ای و مدل وانگ و سینق به ترتیب بهترین مدل ها برای خشک کردن طبیعی و با خشک کن خورشیدی ترکیبی بودند. این مدل ها نسبت به مدل های دیگر بیشترین تطبیق را با نسبت رطوبت آزمایشی ( بالاترین ضریب همبستگی و حداقل ریشه میانگین مربعات خطا و مربع کای ) دارند.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:

خشک کن خورشیدی،

سینتیک خشک کردن،

فتوولتائیک گرمایی،

مواد تغییر فاز،

نعناع.

DOI: 10.52547/fsct.18.119.193

\* مسئول مکاتبات:

abaspour@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

یکی از مهم ترین کاربردهای بالقوه انرژی خورشیدی، استفاده از خشک کن های خورشیدی به منظور خشک کردن محصولات کشاورزی است. مصرف بالای انرژی، قیمت بالای سوخت های فسیلی و اثرات نامتعادلی اکولوژیکی ناشی از استفاده از آنها، از عوامل اصلی افزایش علاقه در بکارگیری خشک کن های خورشیدی می باشد. این خشک کن ها در مقایسه با روش های سنتی دارای راندمان بالاتر، رویکرد سالم تر و عملیات سریع تر می باشند. [۱ و ۲].

از مدل های ریاضی در طراحی، بهینه سازی و کنترل مراحل عملیاتی خشک کن ها استفاده می شود. این مدل ها می تواند به شبیه سازی فرایندها کمک کنند. مدل های خشک کردن لایه نازک به سه مدل متفاوت تجربی، نیمه تئوری و تئوری تقسیم بندی می شوند. در مدل تجربی، از اصول نظری خشک کردن صرف نظر شده و آن را مستقیماً می توان از نتایج آزمایشگاهی بدست آورد. مدل تئوری، به مشخصات محصول بستگی دارد و این مدل را می توان با پدیده انتقال جرم و حرارت ارزیابی کرد. مدل نیمه تئوری، میانگینی بین روش تجربی و تئوری است که با توجه به قانون دوم فیک، مدل ساده شده ای را برای تجزیه و تحلیل ارائه می دهد و به میزان زیادی استفاده می شود و ضرایب خاصی برای محصولات مختلف خشک کننده از این روش به دست می آید. مدل های نیوتن، دو جمله ای، ورما، پیچ و غیره از این روش به دست می آیند. مطالعات زیادی در مورد مدل سازی ریاضی و سینتیک فرایند خشک کردن برگ نعنای گزارش شده که در ادامه به مواردی اشاره گردیده است.

مرادی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی سینتیک خشک کردن برگ های نعنای با یک خشک کن خورشیدی جریان چرخشی آب گرم با نه سطح دمایی از یازده مدل ریاضی استفاده نمودند که مدل دیفیوژن دارای بالاترین ضریب همبستگی نسبت به دیگر مدل ها بود [۳]. خشک کردن برگ های نعنای فلفلی با دو روش خشک کن خورشیدی ترکیبی تونلی و روش مستقیم با تابش خورشید انجام گرفت که مدل دو جمله ای بهترین مدل برای شبیه سازی فرایند خشک کردن انتخاب گردید [۴]. در تحقیق سینتیک خشک کردن برگهای نعنای فلفلی به دو روش خشک کردن هوای

گرم و مادون قرمز آنالیز و مدل سازی گردید که در هر دو روش خشک کردن، کاهش رطوبت محصول در دوره نزولی رخ داد. از بین سه مدل ریاضی میدیلی، لگاریتمی و لوییس، مدل لگاریتمی بهترین مدل برای خشک کردن با هوای گرم و مدل میدیلی برای خشک کردن مادون قرمز بود [۵]. نتایج تحقیقات حبیبی اصل و همکاران (۲۰۱۷) در خشک کن خورشیدی حاکی از کاهش ۳۰ درصدی زمان خشک شدن نعنای در روش همرفت اجباری نسبت به روش همرفت طبیعی بود. در تجزیه و تحلیل رگرسیونی داده های مربوط به زمان خشک شدن این گیاه دارویی، معادله نمایی بهترین توصیف ریاضی رابطه رطوبت نعنای و زمان خشک شدن بود [۶]. همچنین در بررسی سینتیک خشک کردن لایه های نازک آویشن و نعنای، از چهارده مدل ریاضی توصیف رفتار خشک کردن استفاده کردند که مدل میدیلی و کوکوک برای لایه های نعنای و مدل پیچ و پیچ اصلاح شده برای آویشن مناسب ترین مدل ها بودند [۷].

از طرفی از معایب استفاده از سامانه های خورشیدی، عدم پیوستگی و یکنواختی انرژی خورشید می باشد که برای رفع این مشکل از سامانه های ذخیره گرمای نهان بر پایه مواد تغییر فاز<sup>۱</sup> (PCM) استفاده می شود. استفاده از این مواد در سیستم های خشک کن، یک روش خوب برای غلبه بر طبیعت نامنظم انرژی خورشیدی است. مواد تغییر فاز قادر به ذخیره مقدار زیادی انرژی حرارتی طی پروسه ذوبشان می باشند، که بعداً تحت تاثیر دمای ثابت از آن بهره مند می شوند [۸].

در تحقیق بهاردواج و همکاران (۲۰۲۱) به منظور خشک کردن گیاه دارویی جاتامانسی<sup>۲</sup> از ماده تغییر فاز پارافین RT-42 در یک خشک کن خورشیدی استفاده کردند [۹]. ماده تغییر فاز پارافین آلی با هدف خشک کردن فلفل در خشک کن کابینتی و برای ذخیره انرژی خورشیدی مازاد در خشک کردن سیب زمینی شیرین به کار گرفته شد [۱۰ و ۱۱]. لکشمی و همکاران (۲۰۱۸) به منظور خشک کردن محصول دارویی زردچوبه سیاه و همچنین شلبی و بک (۲۰۱۴) در بررسی آزمایشگاهی یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم ریحان از ماده تغییر فاز پارافین آلی با دماهای ذوب ۵۴ و ۴۹ درجه استفاده نمودند [۸ و ۱۲]. همچنین با

1. Phase Change Material  
2. Valeriana jatamansi

## ۲- مواد و روش ها

پژوهش حاضر در سال ۹۹ در گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با طول جغرافیایی ۵۹/۶۲ درجه و عرض جغرافیایی ۳۶/۲۶ درجه اجرا گردید. در این پژوهش یک خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی حاوی مواد تغییر فاز به منظور خشک کردن گیاهان دارویی طراحی و ساخته شد. تصویر این خشک کن در شکل ۱ نمایش داده شده است. اجزای اصلی این خشک کن عبارتند از: گرم کننده هوای خورشیدی که شامل پنل فتوولتائیک و کلکتور خورشیدی می باشد، محفظه تعبیه مواد تغییر فاز، محفظه محصول، فن های دمنده و شاسی. گرم کننده هوای خورشیدی با توجه به عرض جغرافیایی مشهد در زاویه مناسب ۳۶ درجه برای دریافت حداکثر تابش خورشید قرار گرفت. از این گرم کننده برای گرم کردن هوای محیط و تامین هوای گرم به داخل محفظه خشک کن استفاده می شود. به منظور تبدیل تابش خورشید به انرژی الکتریسیته از یک پنل فتوولتائیک مونوکریستال ۱۱۰ وات استفاده شد و باتری خورشیدی شارژ شده توسط این پنل تامین کننده انرژی اجزای برقی خشک کن از قبیل موتور الکتریکی فن های دمنده می باشد. به منظور کاهش تلفات حرارتی در قسمت بالایی کلکتور از شیشه ای به ضخامت ۴ میلی متر برای پوشش کلکتور استفاده گردید. قسمت کناری و پشت کلکتور با استفاده از پشم شیشه به عنوان ماده عایق به ضخامت ۳ سانتی متر عایق بندی شد.

با توجه به اینکه تابش اشعه های خورشید بر روی ماژول فتوولتائیک سبب افزایش دمای آن می شود، جریان هوای خشک کن ابتدا از زیر صفحه ی فتوولتائیک گذشته و گرمای این صفحه را جذب نموده که باعث پیش گرم شدن هوا می شود. با تنظیم پارامترهای عملکردی دستگاه، هوای پیش گرم شده پس از عبور از کلکتور خورشیدی گرم شده و به دمای مورد نظر می رسد. برای تامین جریان هوای خشک کن از دو فن که در ورودی دستگاه قرار گرفته استفاده می شود. این فن ها با الکتریسیته تولید شده از ماژول فتوولتائیک کار می کنند. مشخصات پنل فتوولتائیک به کار رفته در این خشک کن در جدول ۱ بیان شده است. هوای خروجی از کلکتور از محفظه مواد تغییر فاز عبور

استفاده از خشک کن خورشیدی مجهز به دو کلکتور خورشیدی و کلکتور خورشیدی حاوی ماده تغییر فاز هگزا هیدرات کلرید کلسیم، سینتیک خشک کردن انگور بررسی گردید [۱۳].

خشک کردن حالت اجباری در مقایسه با خشک کردن طبیعی به دلیل کنترل پارامترهای خشک کردن بهتر است [۱۴-۱۶]، ولی نیاز به انرژی بیشتری برای عملیات خشک کردن امری بدیهی می باشد که نیازمند راهکاری برای تامین این انرژی است. از طرفی خشک کن های خورشیدی برای خشک کردن محصولات به طور کامل از انرژی خورشیدی استفاده نمی نمایند بلکه برای تامین انرژی مصرفی اجزای خشک کن (مثل فن و غیره) از برق استفاده می نمایند. ولی خشک کن ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی مورد بررسی در تحقیق حاضر نوع جدیدی از خشک کن های خورشیدی می باشد که تمام انرژی مصرفی این خشک کن از نور خورشید تامین می گردد. در نتیجه دستگاهی است کاملاً مستقل که می توان از آن در مزارع و مناطق دورافتاده و دور از دسترس شبکه برق استفاده کرد. گیاهان دارویی معطر مثل نعناع عمدتاً نسبت به درجه حرارت های بالا و نوسانات دمایی حساس هستند و به این سبب تغییراتی در مواد مؤثره آنها ایجاد شده و باعث می شود این گیاهان محتوای ارزشمند خود را از دست بدهند. بنابراین به منظور کاهش نوسانات دمایی خشک کن که ناشی از تغییرات تابش خورشید است و تامین دمای یکنواخت در محفظه خشک کن و همچنین بسط زمان خشک کردن در غروب آفتاب و ساعات غیر آفتابی برای حفظ حداکثری مواد مؤثره گیاه دارویی معطر مثل نعناع از ماده تغییر فاز پارافین آلی ترکیبی با دو دمای انجامد و قیمت متفاوت که از لحاظ اقتصادی قابل توجه می باشد استفاده شد که از ویژگی های برجسته این خشک کن می باشد و آن را از بقیه متمایز نموده است. و مدلسازی فرایند خشک کردن لایه نازک برگ های نعناع با مدل های ریاضی و انتخاب بهترین مدل با استفاده از این خشک کن جدید مجهز به مواد تغییر فاز، در مقایسه با خشک کردن در سایه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی مناسب ترین مدل مورد استفاده برای توصیف منحنی های خشک کردن نعناع، از هشت مدل ریاضی خشک کردن (از قبیل پیچ، نیوتون، لگاریتمی و غیره) استفاده شد.

درجه سانتیگراد) و قیمت کمتر با نسبت مشخص می باشد که ترکیب مدنظر از لحاظ اقتصادی قابل اهمیت خواهد بود. هفت کیلوگرم ماده تغییر فاز پارافین آلی مدنظر در محفظه مواد تغییر فاز و پس از خروجی گرم کننده هوای خورشیدی قرار گرفت. چهل لوله آلومینیومی به قطر ۲۰ میلی متر و طول ۶۰۰ میلی متر با پارافین آلی پر شد و به طور منظم و به صورت افقی و موازی در همان جهت جریان هوا به منظور کاهش افت فشار، درون محفظه مواد تغییر فاز توزیع گردید تا به عنوان واحدهای ذخیره گرما مورد استفاده قرار گیرد. چیدمان لوله ها به گونه ای بود که هوا به راحتی از بین لوله های حاوی مواد تغییر فاز عبور می کرد و پس از تبادل حرارتی با این مواد و کاهش نوسانات دمایی آن، هوای گرم با دمای یکنواخت وارد محفظه خشک کن می شد.

از یک اتاقک خشک کن کابینتی برای خشک کردن برگ های نعنای که بر روی سینی های خشک کن به طور یکنواخت و به صورت لایه نازک پهن شده اند استفاده شد. محفظه خشک کن با عایق پشم شیشه عایق بندی گردید.

داده شده و نهایتا به محفظه خشک کن وارد می شود تا طی فرایند انتقال جرم رطوبت محصول مدنظر کاهش یابد.



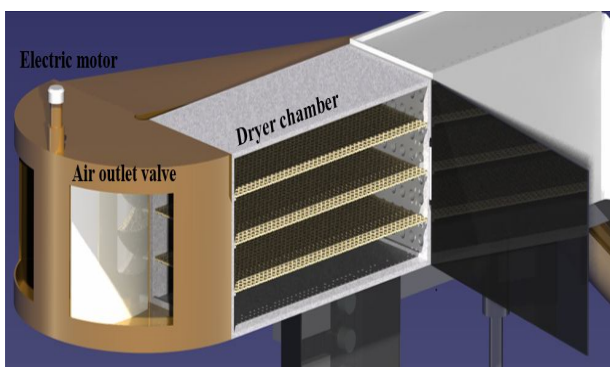
**Fig 1** The combined photovoltaic / thermal solar dryer containing PCM

1: Blowers 2: Air channel 3: Photovoltaic panel 4: Solar collector 5: Air channel 6: Air tube

در خشک کن تحقیق حاضر از ماده تغییر فاز پارافین آلی استفاده شد. ماده تغییر فاز پارافین آلی مورد استفاده ترکیبی از دو پارافین آلی، یکی با دمای انجماد پایین تر (۴۸-۴۶ درجه سانتیگراد) و البته قیمت بالاتر و پارافین دیگری با دمای انجماد بالاتر (۶۰-۵۷

**Table 1** Characteristics of the photovoltaic panel used in the experiment

Cells type	Mono-crystalline silicone	Cells dimensions	125*125 mm
Number of cells	40	Module dimensions	1049*683*35mm
Open circuit voltage	25.24 V	Short circuit current	5.49 A
Maximum output Power	110 W	Maximum voltage	20.86 V
Maximum current	5.28 A	Maximum system voltage	1000 V



**Fig 2** The dryer chamber with the electric motor as actuator for opening/ closing the air valve

به منظور اندازه گیری و ثبت دما برای هر مدت زمان دلخواه در بخش های مختلف خشک کن از یک سامانه کنترل و اندازه گیری استفاده شد. این سامانه شامل دو قسمت دستگاه کنترل مرکزی و حسگرها است. راه اندازی و کنترل اندازه گیرها و

سینی های خشک کن به صورت مشبک هستند که به فاصله عمودی یکسان از هم قرار می گیرند و در نتیجه هوا از لابلای سینی های حاوی محصول عبور کرده و موجب انتقال حرارت به محصول شده و در نهایت با جذب رطوبت محصول باعث خشک شدن آن می شود. این سینی ها روی یک شاسی فلزی که در قسمت داخلی محفظه خشک کن ثابت است قرار می گیرند. دو دریچه ورود و خروج هوا کنار هم در انتهای خشک کن قرار دارند که از یکی هوای گرم و مرطوب خارج شده و از دیگری هوای تازه محیط به درون دستگاه وارد می شود. باز و بسته شدن دریچه های ورود و خروج هوا در این خشک کن، به صورت هوشمند و به وسیله سیستم کنترلر و موتور الکتریکی بالای دریچه خشک کن انجام می گیرد (شکل ۲).

و سپس منحنی روند تغییرات رطوبتی محصول خشک شونده با زمان ترسیم گردید. سینتیک خشک کردن در بیشتر پژوهش‌ها بر اساس شاخص نسبت رطوبت (MR) گزارش می‌شود. برای محاسبه نسبت رطوبت برگ‌های نعنای در طی فرایند خشک کردن از معادله ۳ استفاده شد: [۱۸ و ۱۹ و ۲۰]

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

که در آن:  $M_t$ : مقدار رطوبت در زمان  $t$  (بدون بعد)،  $M_0$ : مقدار رطوبت اولیه (بدون بعد) و  $M_e$ : مقدار رطوبت در حالت تعادل (بدون بعد) می‌باشد. مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_t$  یا  $M_0$  برای زمان خشک کردن، بسیار کوچک می‌باشد بنابراین MR به صورت معادله زیر می‌تواند ساده شود: [۲۱ و ۲۲]

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (4)$$

## ۲-۲-۲- مدل‌سازی خشک کردن

برای مدل‌سازی ریاضی خشک کردن نمونه‌ها از نسبت رطوبت استفاده گردید که معادلات آن، مستخرج از ارتباط بین تغییرات مقادیر رطوبت و زمان خشک کردن می‌باشد. بدین منظور از هشت مدل ریاضی خشک کردن پیچ، نیوتون، لگاریتمی، دو جمله‌ای و .. که در جدول ۲ نشان داده شده است استفاده شد. برای یافتن بهترین مدل و به دست آوردن ضرایب آنها، با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی و با نرم افزار MATLAB، مدل‌های فوق به داده‌های حاصل از مراحل مختلف خشک کردن برآزش گردید. سه معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) و مربع کای<sup>۲</sup> ( $\chi^2$ ) به منظور سنجش بهترین مدل استفاده گردید که با استفاده از معادلات ۵ و ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند [۱۷ و ۲۳]. ملاک انتخاب بهترین مدل توصیف رفتار خشک کردن بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار RMSE و  $\chi^2$  می‌باشد [۳ و ۷ و ۲۴].

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (6)$$

$$(7)$$

همچنین ثبت اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط حسگرها به عهده دستگاه کنترل مرکزی است. به منظور اندازه‌گیری دما از حسگرهای دمایی نوع DS18B20 ضد آب و دارای پراب استیل ضد زنگ در محدوده دمایی ۵۵- تا ۱۲۵ درجه سانتیگراد استفاده شد، به نحوی که دما را با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌نمایند. به منظور اندازه‌گیری دبی هوای عبوری داخل خشک کن، از جریان سنج مدل PROVA سری AVM-07 و به منظور اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و توان مصرف کننده‌های این خشک کن از مولتی متر مدل TES-2360 استفاده شد. پارامترهای مورد اندازه‌گیری و ارزیابی در این تحقیق، زمان مورد نیاز خشک کردن محصول و روند تغییر رطوبت در طی زمان خشک شدن می‌باشد.

## ۲-۱- بررسی سینتیک خشک کردن

در این پژوهش، روند خشک کردن برگ‌های نعنای با دو روش خشک کردن در سایه و با خشک کن خورشیدی فتوولتائیک گرمایی حاوی مواد تغییر فاز بررسی گردید. برای انجام آزمایشات، نمونه برگ‌های نعنای در ابتدا از ساقه‌ها جدا گردید و تحت شرایط آزمایشگاهی قرار داده شد تا رطوبت آنها یکسان شود. نمونه‌ها با یک ترازوی دیجیتال مدل AXIS BTA2100 با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و در سینی‌های جاگذاری شد. ۲۱۰ گرم برگ‌های تازه نعنای در هر دو روش خشک کردن مورد استفاده قرار گرفت..

مقادیر رطوبت بر مبنای وزن تر ( $M_{wb}$ ) و خشک ( $M_{db}$ ) از معادلات زیر به دست می‌آید: [۷ و ۱۷]

$$M_{wb} = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \quad (1)$$

$$M_{db} = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (2)$$

که در آن:  $W_0$ : وزن اولیه محصول (kg)،  $W_d$ : وزن محصول خشک شده (kg)،  $M_{wb}$ : درصد رطوبت بر پایه وزن تر و  $M_{db}$ : درصد رطوبت بر پایه وزن خشک می‌باشد.

رطوبت اولیه برگ‌های نعنای در این آزمایشات  $80 \pm 0/5$  درصد (بر پایه تر) بود که تا رطوبت نهایی  $12 \pm 0/5$  درصد ادامه می‌یافت. میزان رطوبت نمونه‌ها با دستگاه آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد [۱۷]. در حین فرایند خشک کردن نمونه برداری‌ها هر ده دقیقه انجام می‌گرفت

1 . Root mean square error  
2 . Chi-square

سیس ثابت های معادله (ضرایب) انتخاب شده به متغیرهای مورد استفاده در فرایند خشک کردن ربط داده شده و معادله عمومی که قادر به پیش بینی مشخصات خشک کردن برگ های نعناع در شرایط آزمایش شده بود به دست آمد.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})(MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre,i}}))^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp,i}})^2 \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR_{pre,i}})^2}$$

که در آن  $MR_{exp,i}$ : نسبت رطوبت مشاهده شده تجربی  $i$  ام،  
 $MR_{pre,i}$ : نسبت رطوبت پیش بینی شده  $i$  ام،  $N$ : تعداد مشاهدات و  $n$ : تعداد ثابت های معادله می باشد.

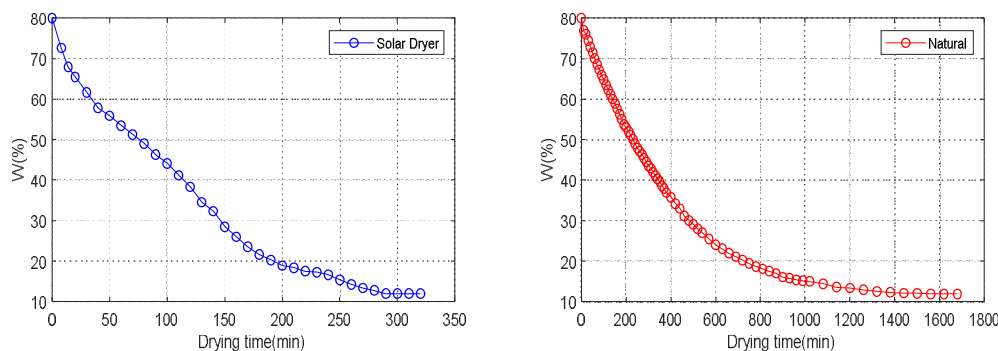
**Table 2** Mathematical models widely used to describe the drying kinetics

Model name	Model equation	Reference
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[25]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[26]
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[27]
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[28]
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[29]
Two term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	[30]
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	[7]
Diffusion approach	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[31]

یک ساعت قبل از انجام آزمایش روشن می شد. میانگین درجه حرارت محیط در زمان آزمایشات ۱۳/۵ درجه سانتیگراد و میانگین شدت تابش روزانه انرژی خورشید در زمان آزمایشات در اسفند ماه، ۴۷۶/۲ وات بر مترمربع بود. تغییرات رطوبت محصول نسبت به زمان در طی ساعات آزمایش با خشک کن خورشیدی فتوولتائیک گرمایی حاوی مواد تغییر فاز مدنظر و خشک کن به صورت طبیعی در سایه در شکل ۳ نشان داده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

خشک کردن برگ های نعناع در سایه و با خشک کن خورشیدی فتوولتائیک / گرمایی حاوی مواد تغییر فاز در کارگاه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد در روزهای منتخبی از اسفندماه ۱۳۹۹ مورد آزمایش قرار گرفت. آزمایش ها با خشک کن خورشیدی مدنظر با نرخ جریان جرمی ۰/۱۶ کیلوگرم بر ثانیه انجام گرفت که از ساعت ۱۱ شروع و تا ساعت ۱۷ ادامه می یافت. به منظور ایجاد حالت پایدار در طی آزمایشات، دستگاه



**Fig 3** Variation of moisture content versus the duration of drying time for solar dryer containing PCM and natural drying

صرفه جویی ۵۳۸ درصدی مدت زمان خشک کردن گیاه دارویی نعناع گردید که کاهش زمان خشک شدن ایجاد شده به دلیل تامین هوای گرم توسط کلکتور خورشیدی برای جذب اشعه های تابش خورشید، دمش هوا توسط دمنده خشک کن مدنظر و کاهش نوسانات دمایی نور خورشید و یکنواخت شدن دمای محفظه خشک کن توسط مواد تغییر فاز پارافین آلی می باشد.

همانطور که در این منحنی ها نشان داده شده است محتوای رطوبت برگ های نعناع با خشک کن خورشیدی فتوولتائیک گرمایی پس از حدود ۲۹۰ دقیقه از ۸۰ ± ۰/۵ درصد به ۱۲ ± ۰/۵ درصد رسید. به طور مشابه، این مدت زمان خشک کردن در سایه ۱۵۶۰ دقیقه بود (جدول ۳). این بیانگر این موضوع می باشد که استفاده از خشک کن خورشیدی فتوولتائیک گرمایی سبب

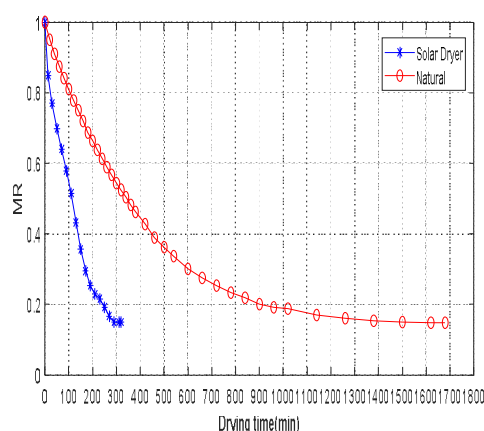
**Table 3** Comparison of moisture content and drying time of mint leaves by two drying methods

Parameter	Photovoltaic / thermal solar dryer	Natural drying
Initial moisture content (%)	80 ± 0.5	80 ± 0.5
Final moisture content (%)	12 ± 0.5	12 ± 0.5
Time (min)	290	1560

صورتی که در اولین ساعت خشک کردن با خشک کن خورشیدی حاوی مواد تغییر فاز یک سوم رطوبت از محصول دفع شده و در کمتر از دو ساعت نسبت رطوبت محصول به نصف رسیده و پس از پنج ساعت از شروع آزمایش به رطوبت نهایی خود رسید. شیب منحنی در ابتدای فرآیند خشک کردن نعنای با خشک کن خورشیدی که همان آهنگ از دست دادن رطوبت می باشد، زیاد است ولی با گذشت زمان این آهنگ به تدریج کم و کاهش محتوای رطوبت به آهستگی صورت میگیرد. به عبارت دیگر، شدت خشک کردن در ابتدای فرآیند بیشتر از مراحل انتهایی است و بیشترین مقدار رطوبت محصول در همان لحظات اولیه از دست می رود که این امر به دلیل زیاد بودن مقدار رطوبت روی سطح برگهای نعنای در ابتدای فرآیند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح نعنای می باشد. در این مرحله بخش عمده ای از حرارت منتقل شده از جریان هوا در خشک کن صرف تبخیر رطوبت از سطح محصول می گردد و قسمت باقیمانده به فضای داخلی محصول منتقل شده و باعث افزایش دما می شود. رطوبت موجود در قسمت داخلی برگهای نعنای به سطح آنها منتقل شده تا جایگزین رطوبت منتقل شده از سطح برگ ها گردد. با گذشت زمان خشک شدن و کاهش رطوبت محصول، نرخ خشک شدن کاهش یافته ولی دمای محصول افزایش می یابد.

سپس داده های آزمایشی با هشت مدل خشک کردن لایه های نازک بیان شده توسط محققین در پیشینه پژوهش (ارائه شده در جدول ۲) برآزش گردید. ملاک انتخاب بهترین مدل توصیف رفتار خشک کردن بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار RMSE و  $\chi^2$  می باشد. نتایج آنالیز آماری گرفته شده از این مدل ها برای خشک کردن نعنای با خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی و خشک کردن در سایه در جدول ۴ ارائه شده است.

به منظور تشریح رفتار خشک کردن و مدل سازی ریاضی برگهای نعنای، داده های محتویات رطوبت نسبت به زمان به پارامتر بدون بعد نسبت رطوبت در مقابل زمان انتقال یافت. شکل ۴ منحنی تغییرات نسبت رطوبت به زمان برای خشک کردن محصول با هر دو روش را نشان می دهد.

**Fig 4** Variation of moisture ratio versus the duration of drying time by combined photovoltaic / thermal solar dryer containing PCM and natural drying

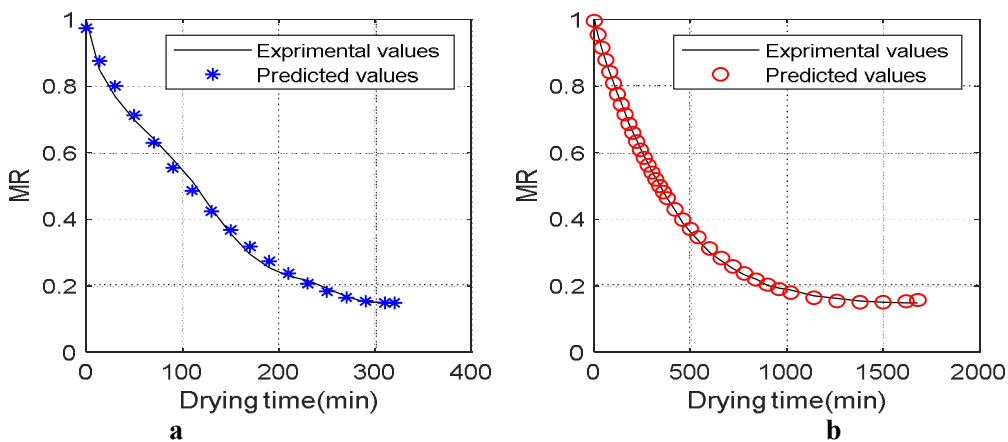
همانطور که در این منحنی نشان داده شده است، در خشک شدن برگ های نعنای دوره ثابتی وجود ندارد و فرآیند خشک شدن در دوره نرخ نزولی انجام می گیرد. خشک شدن در این دوره بیانگر این موضوع می باشد که سطح محصول دیگر با آب اشباع نشده و فرآیند انتقال جرم با نفوذ<sup>۱</sup> (دیفیوژن) رخ داده و سرعت خشک شدن با انتشار رطوبت از فضای داخلی به سطح کنترل می شود. نتایج مشابهی برای مطالعات خشک کردن نعنای توسط محققانی چون آکینار [۲۴]، سلام و همکاران [۳۲] و آشتیانی و همکاران [۵] گزارش شده است.

میزان دفع رطوبت در خشک کن با سایه در ساعت اولیه حدود یک هشتم بوده که پس از گذشت زمان نزدیک به پنج ساعت و چهل دقیقه رطوبت آن به ۵۰ درصد کاهش یافته است و تا رسیدن محصول به رطوبت نهایی، ۲۶ ساعت سپری شد، در

#### 1. Diffusion

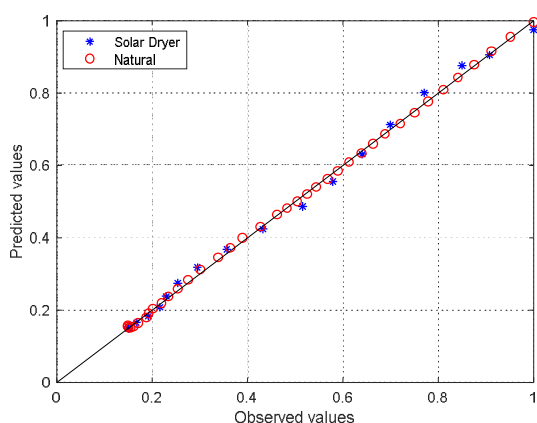
**Table 4** Statistical results of mathematical modeling of drying curves for mint leaves by combined photovoltaic / thermal solar dryer containing PCM and natural drying

model	type	coefficients	R <sup>2</sup>	$\chi^2(E-4)$	RMSE
Newton	solar dryer	k= 0.0067	0.9911	7.501	0.0270
	natural	k= 0.0019	0.9907	14	0.0369
page	solar dryer	k= 0.008536 n= 0.9514	0.9903	7.1	0.0259
	natural	k= 0.0047 n= 0.8532	0.9909	6.47	0.0251
Henderson and Pabis	solar dryer	a= 0.9650 k= 0.006405	0.9914	5.937	0.0236
	natural	a= 0.9575 k= 0.0018	0.9864	11	0.0332
Logarithmic	solar dryer	a= 0.9785 k= 0.0062 c= -0.0175	0.9915	6.056	0.0235
	natural	a= 0.8854 k= 0.0025 c= 0.1181	0.9989	0.776	0.0086
<b>Wang and Singh</b>	<b>solar dryer</b>	<b>a= -0.00505</b> <b>b= 8.007e-06</b>	<b>0.9940</b>	<b>4.2827</b>	<b>0.0198</b>
	natural	a= -0.0013 b= 5.5360e-07 a= 0.9556	0.9840	11	0.0325
<b>Two term</b>	solar dryer	k <sub>0</sub> = 0.0063 b= 0.0444 k <sub>1</sub> = 2.6090 <b>a= 0.9622</b>	0.9922	5.814	0.0227
	<b>natural</b>	<b>k<sub>0</sub>= 0.002197</b> <b>b= 0.03339</b> <b>k<sub>1</sub>= 0.0008217</b>	<b>0.9996</b>	<b>0.308</b>	<b>0.0054</b>
Two term exponential	solar dryer	a= 0.0409 k= 0.1557	0.9919	5.663	0.0231
	natural	a= 0.3166 k= 0.0043 a= 9.1180e-08	0.9931	5.23	0.0226
Diffusion approach	solar dryer	k= 0.0403 b= -0.1674 a= 0.03795	0.9913	7.303	0.0258
	natural	k= 0.0007473 b= 2.986	0.9995	0.323	0.0056



**Fig 5** Correlation of the variation of moisture ratio versus time for predicted model and experimental data  
a) solar dryer containing PCM  
b) natural drying





**Fig 6** Observed and predicted values of moisture ratio by the Two term model for natural drying and the Wang and Singh model for the combined photovoltaic / thermal solar dryer containing PCM

#### ۴- نتیجه گیری

به منظور خشک کردن گیاهان دارویی یک خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی حاوی مواد تغییر فاز طراحی و ساخته شد و عملکرد این خشک کن خورشیدی تحت شرایط آب و هوایی مشهد مورد بررسی قرار گرفت. از مواد تغییر فاز پارافین آلی به منظور کاهش نوسانات اشعه های خورشید و تامین دمای یکنواخت در محفظه خشک کن و ذخیره انرژی گرمایی و بسط زمان خشک کردن در ساعات غیرآفتابی در این خشک کن استفاده شد. به عنوان مطالعه موردی سبزی خشک کردن برگ های نعنای توسط این خشک کن با خشک کردن طبیعی در سایه با هم مقایسه گردید. بر اساس نتایج به دست آمده از نمودارهای خشک کردن در این دو روش، خشک شدن نعنای نرخ نزولی خشک شدن محصولات کشاورزی را به نمایش گذاشت. به منظور تشریح رفتار خشک کردن و ایجاد مدل سازی ریاضی برگهای نعنای، داده های آزمایشی با هشت مدل خشک کردن لایه های نازک بیان شده در پیشینه برازش گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل وانگ و سینق برای توصیف خشک کردن با خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک / گرمایی با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴۰ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۱۹۸ مناسب می باشد و با این وجود، مدل دو جمله ای با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۰۰۵۴ برای توصیف

از نتایج این جدول مشاهده می شود که در تمام مدل های مربوط به خشک کردن با خشک کن خورشیدی، ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۹۹ (۰/۹۹۴۰-۰/۹۹۰۳) به دست آمد به نحوی که مدل وانگ و سینق بیشترین ضریب همبستگی (۰/۹۹۴۰) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۱۹۸) را دارد و مقدار مربع کای این مدل نیز ( $4/28 \times 10^{-4}$ ) می باشد که معادله آن به شرح زیر آورده شده است. بنابراین این مدل برای تشریح و پیش بینی رفتار خشک کردن برگ های نعنای به کمک خشک کن فتوولتائیک / گرمایی حاوی مواد تغییر فاز انتخاب گردید.

$$MR = 1 + (-0.005)t + (8.007 \times 10^{-5})t^2 \quad (8)$$

به طور مشابه، بر طبق نتایج ارائه شده در این جدول برای خشک کردن در سایه، ضریب همبستگی مدل ها در محدوده ۰/۹۸۴۰ تا ۰/۹۹۹۶ قرار دارند که مدل دو جمله ای به صورت بسیار مطلوب رفتار خشک کردن نعنای را با داشتن ضریب همبستگی بسیار بالای ۰/۹۹۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۵۴) و مقدار مربع کای ( $10^{-10} \times 3$ ) توصیف می نماید (معادله ۹). تطبیق این مدل ها با داده های آزمایشی به وضوح در شکل ۵ دیده می شود.

$$MR = 0.9622 \exp(-0.0022t) + 0.0339 \exp(-0.0008t) \quad (9)$$

مقایسه بین نسبت رطوبت دست آمده از آزمایشات و مقادیر پیش بینی شده در هر دو آزمایش خشک کردن با خشک کن خورشیدی و به صورت طبیعی در سایه با هم در شکل ۶ نشان داده شده است. از این نمودار، به وضوح مشخص است که همخوانی بسیار خوبی بین نسبت رطوبت آزمایشگاهی و پیش بینی شده با مدل دو جمله ای به منظور خشک کردن طبیعی در سایه وجود دارد و همچنین مدل وانگ و سینق تایید خوبی برای برگ های نعنای با خشک کن خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک گرمایی تحقیق حاضر ایجاد نموده و داده های پیش بینی شده عموماً حول خطوط مستقیم ۴۵ درجه، قرار گرفته اند. این بدین معنا می باشد که هر دو مدل رفتار فرایند خشک کردن خورشیدی لایه نازک نعنای را به خوبی تشریح و پیش بینی می کند و برای پارامترهای عملیاتی خشک کردن داده شده، تایید می شود.

- collector for drying mint (*Mentha Viridis*). *Journal of Cleaner Production*. 181. 352-364.
- [5] Ashtiani, S.H.M., Salarikia, A. and Golzarian, M.R. 2017. Analyzing drying characteristics and modeling of thin layers of peppermint leaves under hot-air and infrared treatments. *Information Processing in Agriculture*. 4(2). 128-139.
- [6] Habibi Asl, J., Behbahani, L. and Azizi, A. 2017. Evaluation and comparing of natural and forced solar dryer for mint drying in Khuzestan province. *Journal of Agricultural Machinery*. 7 (1). 114-125.
- [7] El-Sebaii, A.A. and Shalaby, S.M. 2013. Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. *Energy conversion and management*. 74. 109-116.
- [8] Shalaby, S.M. and Bek, M.A. 2014. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy conversion and management*. 83. 1-8.
- [9] Bhardwaj, A.K., Kumar, R., Kumar, S., Goel, B. and Chauhan, R. 2021. Energy and exergy analyses of drying medicinal herb in a novel forced convection solar dryer integrated with SHSM and PCM. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 45. 101119.
- [10] Pakhare, V.V. and Salve, S.P. 2016. Design and development of solar dryer cabinet with thermal energy storage for drying chilies. *Int. J. Curr. Eng. Tech*. 358. 362.
- [11] 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. *Applied Thermal Engineering*. 26(14). 1705-1713.
- [12] Lakshmi, D.V.N., Muthukumar, P., Layek, A. and Nayak, P.K. 2018. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*. 120. 23-34.
- [13] Çakmak, G. and Yıldız, C. 2011. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and bioproducts processing*. 89(2). 103-108.

منحنی های خشک شدن برگ های نعناع به صورت طبیعی بهترین ها در بین مدل های دیگر بود. این مدلها بالاترین مقادیر ضریب همبستگی و کمترین مقدار کاهش مربعات را نشان دادند. سپس مقایسه ای بین نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش و نسبت رطوبت پیش بینی شده انجام گرفت که همخوانی بسیار خوبی مشاهده گردید و این مدل ها در تشریح رفتار خشک کردن خورشیدی لایه نازک برگ های نعناع در حضور مواد تغییر فاز برای پارامترهای عملیاتی خشک کردن داده شده، تایید گردید. انتظار می رود که این مطالعه برای همه محققین علاقمند به بهبود عملکرد سیستم های خشک کردن مفید باشد.

## ۵- سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل حمایت مالی این تحقیق در قالب طرح پژوهشی و نیز گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل فراهم نمودن فضا و امکانات مناسب در طول انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می گردد.

## ۶- منابع

- [1] Kumar, M., Sansaniwal, S.K. and Khatak, P. 2016. Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55. 346-360.
- [2] Zarezade, M. and Mostafaeipour, A. 2016. Identifying the effective factors on implementing the solar dryers for Yazd province, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 57. 765-775.
- [3] Moradi, M., Fallahi, M.A. and Mousavi Khaneghah, A. 2020. Kinetics and mathematical modeling of thin layer drying of mint leaves by a hot water recirculating solar dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 43(1). 13181.
- [4] Eltawil, M.A., Azam, M.M. and Alghannam, A.O. 2018. Energy analysis of hybrid solar tunnel dryer with PV system and solar

- [22] Rabha, D.K., Muthukumar, P. and Somayaji, C. 2017. Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable energy* 105. 583-589.
- [23] Özbek, B. and Dadali, G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*. 83(4). 541-549.
- [24] Akpınar, E.K. 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *Journal of Food Engineering*. 77(4). 864-870.
- [25] Jayas, D.S., Cenkowski, S., Pabis, S. and Muir, W.E. 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying technology*. 9(3). 551-588.
- [26] Vijayaraj, B., Saravanan, R. and Renganarayanan, S. 2007. Studies on thin layer drying of bagasse. *International Journal of Energy Research*. 31(4). 422-437.
- [27] Chhinnan, M.S. 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*. 27(2). 610-615.
- [28] Balasubramanian, S., Sharma, R., Gupta, R.K. and Patil, R.T. 2011. Validation of drying models and rehydration characteristics of betel (*Piper betel* L.) leaves. *Journal of food science and technology*. 48(6). 685-691.
- [29] Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy conversion and Management*. 44(7). 1111-1122.
- [30] Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17(6). 1167-1168.
- [31] Kassem, A.S. 1998, February. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In 13th international congress on agricultural engineering. 6. 2-6.
- [32] Sallam, Y.I., Aly, M.H., Nassar, A.F. and Mohamed, E.A. 2015. Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of advanced research*. 6(2). 171-178.
- [14] Pawar, R.S., Takwale, M.G. and Bhide, V.G. 1995. Solar drying of custard powder. *Energy conversion and management*. 36(11). 1085-1096.
- [15] Barnwal, P. and Tiwari, G.N. 2008. Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study. *Solar energy*. 82(12). 1131-1144.
- [16] Tiwari, S., Tiwari, G.N. and Al-Helal, I.M. 2016. Performance analysis of photovoltaic-thermal (PVT) mixed mode greenhouse solar dryer. *Solar Energy*. 133. 421-428.
- [17] Mbegbu, N.N., Nwajinka, C.O. and Amaefule, D.O., 2021. Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (*Ocimum gratissimum*) and lemon basil leaves (*Ocimum africanum*). *Heliyon*. 7(1). e05945.
- [18] Tarafdar, A., Jothi, N. and Kaur, B.P. 2021. Mathematical and artificial neural network modeling for vacuum drying kinetics of *Moringa olifera* leaves followed by determination of energy consumption and mass transfer parameters. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 100306.
- [19] Ye, L., EL-Mesery, H.S., Ashfaq, M.M., Shi, Y., Zicheng, H. and Alshaer, W.G. 2021. Analysis of energy and specific energy requirements in various drying process of mint leaves. *Case Studies in Thermal Engineering*. 101113.
- [20] Nadi, F. and Tzempelikos, D. 2018. Vacuum drying of apples (cv. Golden Delicious): drying characteristics, thermodynamic properties, and mass transfer parameters. *Heat and Mass Transfer*. 54(7). 1853-1866.
- [21] Jahanbakhshi, A., Kaveh, M., Taghinezhad, E. and Rasooli Sharabiani, V. 2020. Assessment of kinetics, effective moisture diffusivity, specific energy consumption, shrinkage, and color in the pistachio kernel drying process in microwave drying with ultrasonic pretreatment. *Journal of Food Processing and Preservation*. 44(6). 1444.



## Comparison of drying kinetics of mint leaves by photovoltaic / thermal solar dryer and natural drying

Rouzegar, M. R.<sup>1</sup>, Abbaspour-Fard, M. H.<sup>1\*</sup>, Hedayatizadeh, M.<sup>2</sup>, Mohamadinezhad, H.<sup>1</sup>

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.  
2. Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 2021/06/09  
Accepted 2021/08/30

#### Keywords:

Solar dryer, Drying kinetics, Photovoltaic / Thermal, Phase change materials, Mint.

**DOI: 10.52547/fsct.18.119.193**

\*Corresponding Author E-Mail: [abaspour@um.ac.ir](mailto:abaspour@um.ac.ir)

In this research, a combined photovoltaic / thermal solar dryer containing phase change materials (PCM) was designed and fabricated for drying mint leaves. The performance of this dryer was evaluated under the climatic conditions of Mashhad city with a longitude of 59.62° and a latitude of 36.26°. The components of this dryer mainly include: photovoltaic panel, solar collector, blowers, phase change material chamber containing paraffin wax and drying chamber. Solar dryer and natural drying in shade as two different drying types were used to perform experiments on mint leaves. The initial moisture content of the mint leaves was 80% which reduced to 12%. The required drying time for the combined solar drying and natural drying was 290 minutes and 1560 minutes, respectively. Eight thin layer drying models available in the literature were fitted to the experimental data in which the Two-term model and the Wang and Singh model were the best fit models for natural and combined solar drying respectively. These models have the highest correlation (highest coefficient of determination and least root mean square error and Chi-square) with the experimental moisture ratio among the other models.