

بررسی عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت

محمدحسین آق‌خانی^{*۱} - محمدحسین عباسپور فرد^۲ - محمدرضا بیاتی^۳ - حمید مرتضی پور^۴ - سید ایمان ساعدی^۵ - علی

مقیم^۶

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۱/۵/۱۶

چکیده

همواره در فرآیند خشک کردن، انرژی بسیار زیادی مصرف می‌شود. برای صرفه جویی در مصرف انرژی، استفاده مستقل و یا ترکیبی از انرژی خورشیدی از روش‌های معمول در خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. در تحقیق حاضر، عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، که مناسب خشک کردن محصولات با ارزش در حجم کم از قبیل گیاهان دارویی و زعفران است؛ بررسی شد. خشک‌کن مورد ارزیابی شامل جمع‌کننده‌ی خورشیدی، محفظه‌ی محصول، محفظه‌ی مواد جاذب رطوبت سیلیکاژل، دمنده، کانال‌های عبور هوا و سامانه‌ی اندازه‌گیری و کنترل بود. به منظور بررسی عملکرد دستگاه از گیاه نعنای استفاده شد و نرخ خشک شدن و میزان انرژی مصرفی در سه سطح فاکتور دما (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و در دو حالت سامانه‌ی گردش هوای باز و بسته اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه گردش هوای بسته تأثیر بسیار معنی داری بر انرژی مصرفی و بازده خشک کن دارد. افزایش دمای هوای خشک‌کننده در سامانه‌ی هوای باز، باعث کاهش زمان و بازده خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی شد. در حالی که در سامانه‌ی گردش هوای بسته، با افزایش دما؛ انرژی مصرفی کاهش، بازده خشک‌کن و سرعت خشک شدن افزایش یافت. بیشترین بازده خشک‌کن مربوط به تیمار دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سامانه‌ی گردش هوای بسته بود. در نهایت متوسط بازده‌ی جمع‌کننده‌ی خورشیدی و بیشترین بازده خشک‌کن به ترتیب ۰/۳۴ و ۰/۴۱ به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: بازده خشک‌کن، جمع‌کننده‌ی خورشیدی، خشک‌کن خورشیدی، سامانه‌ی گردش هوای بسته

فهرست نمادها

Nomenclature

شرح Explanation	نماد Symbol	واحد Unit
مساحت سطح جمع‌کننده Area of collector	A_c	m^2
گرمای ویژه‌ی هوا در فشار ثابت Specific heat of air at constant pressure	C_p	$J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
گرمای نهان تبخیر آب Latent heat of water vapour	h_{fg}	$kJ\ kg^{-1}$
جرم رطوبت از دست رفته در طی فرآیند خشک شدن Mass of removed moisture during drying	m_{wd}	kg

۱، ۲ و ۶- به ترتیب دانشیار، دانشیار و دانشجوی دکتری گروه ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳ و ۵- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۴- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(Email: aghkhani@ um.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

انرژی مصرفی در گرم‌کن کمکی	q_{heater}	kJ
Energy consumption of auxiliary heater		
انرژی مصرفی در دمنده	q_{fan}	kJ
Energy consumption of blower		
انرژی مورد نیاز برای خشک کردن	q_{drying}	kJ
Required energy for drying		
انرژی تامین شده توسط جمع‌کننده خورشیدی	$q_{collector}$	kJ
Energy provided by solar collector		
زمان	t	s
Time		
زمان شروع خشک‌شدن	t_i	s
Starting time of drying		
زمان پایان خشک شدن	t_f	s
End of drying time		
دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی	T_o	°C
Outlet temperature of solar collector		
دمای هوای ورودی به جمع‌کننده خورشیدی	T_i	°C
Inlet temperature of solar collector		
شدت تابش در سطح جمع‌کننده خورشیدی	I_t	W m ⁻²
Radiation at the surface of solar collector		
نسبت رطوبت هوای ورودی به محفظه ی خشک کن	W_{di}	-
Relative humidity of inlet air and drying chamber		
دبی جرمی هوای عبوری	\dot{m}_a	kg s ⁻¹
Mass flow rate of air		
بازدهی جمع‌کننده خورشیدی	η_c	-
Efficiency of solar collector		
بازدهی خشک‌کن	η_{dryer}	-
Efficiency of dryer		

مقدمه

خشک کردن، یک فرآیند پیچیده با مصرف انرژی فراوان می‌باشد. انتخاب روش خشک کردن مناسب می‌تواند علاوه بر صرفه جویی اقتصادی باعث بهبود کیفیت محصول تولیدی گردد. در حال حاضر، خشک کردن با جریان هوای گرم، متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. به طوری که با استفاده از این روش می‌توان محصول باکیفیت، در مدت زمان کوتاه تولید کرد (Doymaz, 2004; Chou *et al.*, 2004). به علت رسانش حرارتی پائین محصولات کشاورزی، انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی این مواد بسیار کند صورت می‌گیرد. لذا، خشک کردن آن‌ها نیازمند مصرف انرژی فراوان است (Afzal *et al.*, 1999). انرژی مورد نیاز برای خشک کردن به طور معمول از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد. به دلیل افزایش قیمت جهانی سوخت‌های فسیلی، منابع غیر قابل اطمینان و آلودگی‌های زیست محیطی آن‌ها، توجه زیادی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان جایگزین یا مکمل برای سوخت‌های فسیلی شده است. اخیراً در ایران نیز با اجرای طرح هدفمند کردن یارانه‌ها لزوم توجه به روش‌های مؤثر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و استفاده از انرژی‌های جایگزین، جدی‌تر شده است. در

این راستا انرژی خورشیدی به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی مورد نظر قرار گرفته است و استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی به صورت فزاینده‌ای در حال رشد است. چنانچه این نوع خشک‌کن‌ها به خوبی و متناسب با نوع محصول مورد نظر طراحی شوند، می‌توانند جایگزینی مناسب برای خشک‌کن‌های صنعتی هوای گرم باشند (Pangavhane *et al.*, 2002). به خصوص، استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی در کشورهای در حال توسعه که بیش از ۸۰٪ از مواد غذایی آن‌ها را، کشاورزی‌های کوچک تأمین می‌کند، به خوبی می‌تواند مفید واقع شود (Murthy, 2009). پژوهش‌ها نشان داده است که زمان خشک کردن محصول در خشک‌کن‌های خورشیدی، در مقایسه با روش خشک کردن مستقیم زیر آفتاب (روش سنتی)، حدود ۶۵٪ کاهش داشته است و کیفیت محصول نیز بهبود می‌یابد (Tiris *et al.*, 1996).

استفاده از انرژی خورشید برای خشک کردن محصولات کشاورزی، قدمتی برابر با تاریخ دارد، ولی در جستجوی منابع، اولین بار در سال ۱۹۵۸، محققى به نام Buelow اقدام به استفاده از خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی کرد. از آن پس پژوهشگران مختلف، خشک‌کن‌های خورشیدی فراوانی را

کیفی برنج تولیدی در خشک‌کن خورشیدی نیز در حد قابل قبولی قرار داشت. برای افزایش بازدهی جمع‌کننده خورشیدی، از صفحات جاذب نور خورشید سوراخ‌دار استفاده شد (Zomorodian and Barati, 2010). در این تحقیق تأثیر استفاده از پوشش شیشه‌ای، بر روی جمع‌کننده خورشیدی بر بازده آن بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش شیشه‌ای می‌تواند تا ۲۵٪ سبب افزایش بازده جمع‌کننده گردد. در تحقیقی دیگر یک خشک‌کن خورشیدی با جمع‌کننده‌ی دو مسیره طراحی شد و عملکرد آن با خشک‌کن‌های خورشیدی کابینتی متداول و روش خشک‌کردن زیر آفتاب مستقیم مقایسه شد (Banout et al., 2011).

یکی از معایب استفاده از سامانه‌های خورشیدی، عدم پیوستگی و یکنواختی انرژی خورشیدی می‌باشد. برای رفع این مشکل، پژوهشگران اقدام به استفاده از سامانه‌های ذخیره گرمایی در خشک‌کن‌های خورشیدی کردند (Devahastin and Pitaksuriyarat, 2006; Madhlopa and Ngwalo, 2007; Bal et al., 2009; Bal et al., 2010; Bal et al., 2011). در این پژوهش‌ها از آب، سنگ، سیمان، پارافین و مواد ترمو-شیمیایی برای ذخیره‌ی گرما استفاده شد. در تحقیقی یک خشک‌کن خورشیدی ترکیبی برای موز طراحی شد (Amer et al., 2010). خشک‌کن طراحی شده در این پژوهش، شامل جمع‌کننده خورشیدی، منعکس کننده نور خورشید، میدل حرارتی و واحد ذخیره گرمایی (که شامل یک مخزن آب بود) می‌شد. این خشک‌کن توانست ۳۰ کیلوگرم موز را در مدت زمان ۸ ساعت در روز تابستانی خشک کند. همچنین، کیفیت محصول خشک شده در خشک‌کن خورشیدی مورد بررسی در این تحقیق، بهتر از محصول خشک شده زیر آفتاب بود.

تعدادی از پژوهشگران به منظور افزایش بازده انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی، از سامانه گردش هوای بسته در این خشک‌کن‌ها استفاده کردند (Aboul-Enien et al., 2000; Sarsavadia, 2007; Shanmugam and Natarajan, 2007; Punlek et al., 2009). در خشک‌کن‌های مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، هوای گرم پس از عبور از روی محصول و جذب رطوبت آن، به محیط بیرون منتقل نمی‌شود. بلکه، از داخل جمع‌کننده‌ی خورشیدی عبور کرده و پس از گرم شدن، دوباره به صورت یک سیکل بسته برای خشک‌کردن، مجدداً وارد محفظه محصول می‌شود. با توجه به این که رطوبت نسبی هوای عبوری در این نوع خشک‌کن، پس از مدتی به علت جذب رطوبت محصول، بالا می‌رود و قدرت جذب رطوبت آن کاهش می‌یابد، از مواد جاذب رطوبت در این نوع از خشک‌کن‌ها استفاده می‌شود. در این حالت هوای عبوری پس از خروج از محفظه‌ی محصول، از داخل مواد جاذب رطوبت عبور می‌کند تا رطوبت نسبی آن کاهش یابد. از دیگر مزایای استفاده از خشک‌کن مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، کاهش آلودگی میکروبی در

ارائه و مورد بررسی قرار دادند. در ایران برای مثال (Zare et al., 2005)، تأثیر دبی جرمی هوای عبوری و زمان تخلیه محصول را بر نرخ خشک شدن شلتوک، در یک خشک‌کن نیمه پیوسته خورشیدی بررسی کردند. بیشترین بازده جمع‌کننده در خشک‌کن مورد استفاده در این تحقیق ۳۷/۱۳٪ تعیین شد.

در این راستا یک خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، برای سبزی‌های برگ‌ی طراحی و ارزیابی شد (Soheili et al., 2006). در مطالعه‌ی دیگری خشک‌کن خورشیدی کابینتی برای خشک کردن انگور ارزیابی شد (Dadashzadeh et al., 2008). در این پژوهش، آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خشک‌کن در دو روش مختلط و غیر مستقیم انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که دبی هوای خشک‌کننده و روش خشک کردن، تأثیر معنی داری بر نرخ خشک شدن انگور دارد.

در تحقیقی عملکرد شش نوع جمع‌کننده‌ی خورشیدی تحت قابل استفاده در خشک‌کن‌های خورشیدی مقایسه شد (Koyuncu, 2006). در این تحقیق تفاوت بین جمع‌کننده‌ها در تعداد پوشش‌های پلاستیکی به کار رفته در ساختمانشان و وضعیت عبور جریان هوای خشک‌کننده نسبت به صفحه جاذب نور خورشید بود. در سال ۲۰۰۷ عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی با چهار نوع صفحه جمع‌کننده^۱ خورشیدی مختلف (جمع‌کننده مسطح، جمع‌کننده مجهز به پره‌هایی با زاویه ۷۰ درجه، صفحه مجهز به پره‌هایی با زاویه ۷۵ درجه و صفحه مجهز به تعدادی لوله) ارزیابی شد (Karsli, 2007). نتایج آزمایش‌ها نشان داد جمع‌کننده مجهز به پره با زاویه ۷۵ درجه، جمع‌کننده مجهز به پره با زاویه ۷۰ درجه، جمع‌کننده مجهز به لوله و جمع‌کننده با صفحه مسطح به ترتیب از اول دارای بیشترین بازده بودند. در این راستا خشک‌کردن لایه نازک نوعی کدو، با استفاده از روش‌های مختلف: خشک‌کن هوای گرم، خشک‌کن خورشیدی تونلی و زیر آفتاب مستقیم، بررسی شده است (Sacilik, 2007). همچنین عملکرد محفظه محصول در یک خشک‌کن خورشیدی جریان اجباری مورد بررسی قرار گرفته است (Eltief et al., 2007). در پژوهشی یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی غیر مستقیم ارزیابی شد (Sreekumar et al., 2008). در این تحقیق مدت زمان لازم، برای خشک‌کردن ۴ کیلوگرم کدو در خشک‌کن مورد نظر، ۶ ساعت بود، در حالی که زمان مورد نیاز برای خشک کردن محصول زیر آفتاب، ۱۱ ساعت تعیین شد. کیفیت برنج خشک شده به دو روش خشک‌کن خورشیدی و زیر آفتاب مستقیم با هم مقایسه شد (Mehdizadeh and Zomorodian, 2009). نتایج این تحقیق نشان داد که میزان سفیدی برنج تولید شده در خشک‌کن خورشیدی در مقایسه با روش آفتاب مستقیم دارای کیفیت بالاتری بود و سایر پارامترهای

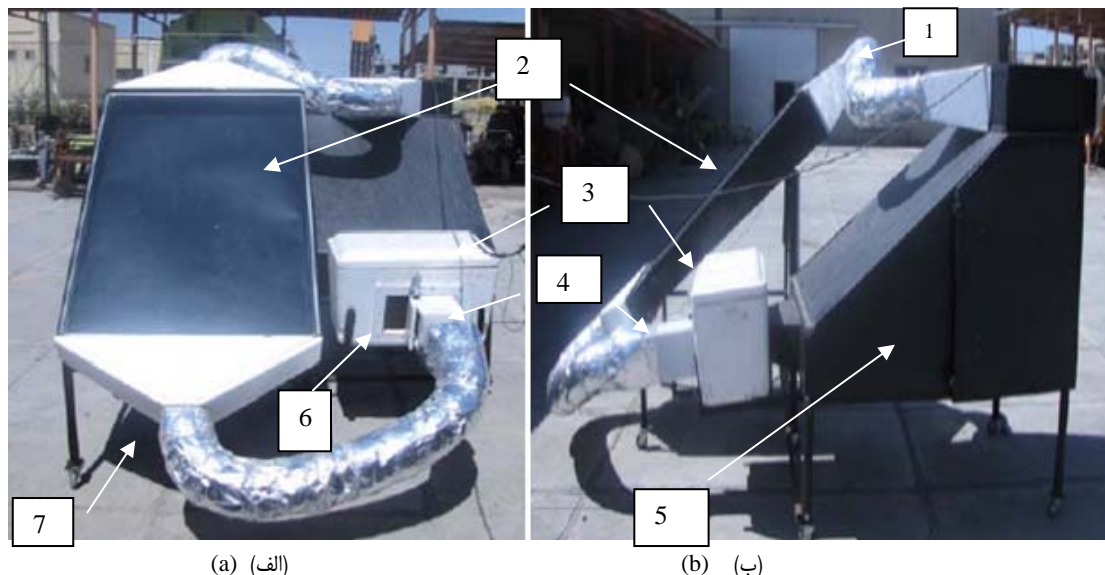
داده شده است. اجزای اصلی این خشک‌کن شامل جمع‌کننده خورشیدی، گرم‌کن الکتریکی کمکی، محفظه محصول، محفظه رطوبت گیر سیلیکاژل، دمنده و سامانه‌ی اندازه‌گیری و کنترل بود. هوای خشک‌کننده در ابتدا از داخل جمع‌کننده خورشیدی عبور و دمای آن افزایش می‌یافت. پس از آن، چنانچه دمای هوای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی کمتر از دمای تنظیم شده برای خشک کردن باشد، سامانه کنترل، گرم‌کن الکتریکی را روشن کرده و دمای هوا را تا مقدار مطلوب افزایش می‌دهد. در ادامه هوای گرم با دمای مشخص از روی سینی‌های محصول که در داخل محفظه قرار گرفته بودند، عبور کرده و با جذب رطوبت محصول، آن را خشک می‌کرد. در نتیجه‌ی این فرآیند، دمای هوا پس از عبور از روی محصول کاهش و رطوبت نسبی آن افزایش می‌یافت. در ادامه، در صورت استفاده از خشک‌کن با سامانه گردش هوای بسته، هوای مرطوب خروجی از محفظه محصول از داخل محفظه‌ی رطوبت گیر سیلیکاژل عبور می‌کرد تا رطوبت موجود در آن کاهش یافته و برای خشک کردن دوباره محصول، وارد جمع‌کننده خورشیدی شود. برای استفاده از سامانه‌ی هوای باز در خشک‌کن، دریچه‌ای بین مجرای خروجی محفظه محصول و دمنده‌ی خشک‌کن قرار داده شد که با باز شدن آن، هوای خروجی از محفظه محصول به بیرون و هوای تازه‌ی محیط، وارد خشک‌کن می‌شد. کنترل باز بودن این دریچه به وسیله‌ی سامانه کنترل و حسگر رطوبت نسبی موجود در خشک‌کن انجام می‌شد.

محصول به دلیل کاهش استفاده از هوای آزاد محیط است (Chen *et al.*, 2005).

در اکثر خشک‌کن‌های مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به طور معمول کسر مشخصی از هوای خشک‌کننده‌ی محصول، از سامانه‌ی گردش هوای بسته و مابقی از هوای آزاد تأمین شده و این فرآیند از ابتدا تا انتهای خشک شدن محصول ثابت بوده است. در تحقیق حاضر، عملکرد نوع جدیدی از خشک‌کن‌های خورشیدی مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته مورد ارزیابی قرار گرفته است. این خشک‌کن به گونه‌ای طراحی شده است که، هوای آزاد فقط در شرایطی که رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده از حد معینی بیشتر شد، اجازه‌ی ورود به داخل خشک‌کن را دارد. با توجه به این که افزایش رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده در مراحل اولیه‌ی خشک شدن محصول، به مراتب بیشتر از مراحل انتهایی است، بدیهی است که استفاده از چنین سیستمی می‌تواند با کاهش حجم هوای تازه‌ی ورودی به خشک‌کن، باعث بهبود عملکرد آن شود. هدف اصلی این مقاله بررسی میزان تغییرات بازده مصرف انرژی و نرخ خشک شدن محصول در خشک‌کن خورشیدی ترکیبی با جریان هوای اجباری در دو حالت با سامانه گردش هوای بسته و باز و در دماهای مختلف هوای خشک‌کننده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تصویر خشک‌کن مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۱، نشان



شکل ۱- الف) نمای روبرو و **ب)** نمای جانبی خشک‌کن مورد استفاده در طرح حاضر (۱- کانل خروج هوا از جمع‌کننده، ۲- جمع‌کننده خورشیدی، ۳- محفظه سیلیکاژل، ۴- دمنده، ۵- محفظه محصول، ۶- دریچه هوای آزاد و ۷- کانل ورود هوا به جمع‌کننده)

Fig.1. The solar dryer: a) Front view and b) Side view (1- Air outlet duct of collector, 2- Solar collector, 3- Desiccant gel's chamber, 4- Blower, 5- Main drying chamber, 6- Valve to atmosphere, 7- Air inlet duct of collector)

جدول ۱- جزئیات اجزای مختلف خشک‌کن خورشیدی

Table 1- The specifications of the solar dryer and its components

طول جمع‌کننده خورشیدی	2.5 m
Length of solar collector	
عرض جمع‌کننده خورشیدی	1.5 m
Width of solar collector	
ارتفاع دهانه‌ی ورودی جمع‌کننده خورشیدی	10 cm
Height of solar collector' inlet gate	
ارتفاع دهانه‌ی خروجی جمع‌کننده خورشیدی	23 cm
Height of solar collector' outlet gate	
قطر کانال هوا	15 cm
Air duct diameter	
دبی هوای عبوری	0.05 kg s ⁻¹
Mass flow rate of air	
طول محفظه محصول	2.15 m
Length of main drying chamber	
عرض محفظه محصول	1.5 m
Width of main drying chamber	
ارتفاع محفظه	1m بیشینه و 0.3 m کمینه
Height of main drying chamber	
زاویه جمع‌کننده خورشیدی نسبت به افق	36 درجه
Tilt angle of solar collector	
جنس صفحه جاذب نور خورشید	ورقه‌ی آلومینیوم سیاه شده به ضخامت 2 mm
Material of absorption surface	
جنس دیواره‌ی جمع‌کننده خورشیدی	به ترتیب شامل ورق گالوانیزه 2 mm، یونولیت به ضخامت 30 mm و ورق گالوانیزه به ضخامت 2 mm
Material of collector's side walls	
پوشش جمع‌کننده خورشیدی	شیشه معمولی به ضخامت 4 mm
Solar collector cover	
ابعاد محفظه‌ی سیلیکاژل	0.34×0.34×0.68 m
Dimensions of desiccant gel's chamber	

نسبی هوای خشک‌کننده توسط حسگر رطوبت نسبی^۲ که در کانال خروجی محفظه محصول قرار داشت؛ اندازه‌گیری شد. از یک حسگر لودسل^۳ برای اندازه‌گیری تغییرات وزن محصول در طول زمان خشک شدن استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری توان الکتریکی مصرفی دمنده و گرم‌کن الکتریکی موجود در خشک‌کن، از یک وات‌متر^۴ استفاده شد. یک کابل سریال، تمامی این حسگرها را به رایانه متصل می‌کند و داده‌های مربوط به هر حسگر، با نرم افزار نمایش و کنترل (که برای این سامانه تهیه شده بود) نمایش داده

جزئیات اجزای مختلف خشک‌کن مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۱ آورده شده است که بر اساس ظرفیت مورد انتظار دستگاه، شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد آزمایش تعیین شده‌اند.

سامانه اندازه‌گیری و کنترل

به منظور اندازه‌گیری دمای هوای محیط و در قسمت‌های مختلف خشک‌کن، از ۵ حسگر دما^۱ استفاده شد. حسگرهای دمای داخل خشک‌کن، قبل و بعد از جمع‌کننده خورشیدی و در کانال‌های ورودی و خروجی محفظه محصول نصب شدند. رطوبت

۲- مدل TMH-1 با دقت ۳٪ ساخت شرکت Lutron- تایوان

۳- مدل FG-5005 با دقت ۰/۴٪ بیشترین خروجی شرکت Lutron- تایوان

۴- مدل TM15010 با دقت ۰/۵٪ بیشترین خروجی شرکت Lutron- تایوان

۱- مدل STM160 با دقت ۰/۷ °C ساخت شرکت TES- تایوان

هر آزمایش درجه حرارت هوای خشک کننده در نقاط مختلف خشک کن رطوبت نسبی و تغییر جرم محصول به وسیله سامانه نمایش و کنترل، نمایش و ثبت گردید. آزمایش‌ها با دبی جرمی هوای ثابت 0.05 Kg s^{-1} و از ساعت ۱۰ صبح تا ۲ عصر انجام می‌گرفت و در هر آزمایش ۴ کیلوگرم نعنای تازه، درون خشک‌کن خشک می‌شد. در نهایت با استفاده از داده‌های به دست آمده در هر آزمایش و داده‌های مربوط به شدت تابش خورشید، بازده جمع کننده خورشیدی و بازده خشک کن از روابط (۱) و (۲) محاسبه و مقایسه شد.

بازده جمع کننده خورشیدی

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a C_p (T_o - T_i)}{I_t A_c} \quad (1)$$

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

بازده خشک کن

$$\eta_{dryer} = \frac{Q_{drying}}{Q_{collector} + Q_{heater} + Q_{fan}} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲) مقادیر انرژی مورد نیاز برای دمنده و گرمکن کمکی در هر آزمایش، با وات‌متر به کار رفته در خشک‌کن اندازه‌گیری شد. انرژی مورد نیاز برای خشک شدن محصول و گرمای تولیدی توسط جمع کننده نیز از روابط (۳) و (۴) به دست آمده است.

$$Q_{drying} = m_{wd} \cdot h_{fg} \quad (3)$$

$$Q_{Collector} = \int_{t_i}^{t_f} \dot{m}_a C_p (T_o - T_i) \cdot dt \quad (4)$$

نتایج و بحث

متوسط تغییرات شدت تابش خورشید و دمای محیط در طول روز در آبان ماه ۱۳۸۹، در مکانی از شهرستان مشهد که آزمایش‌ها صورت گرفته، در نمودار شکل ۳ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شدت تابش خورشید در طول مدت آزمایش، بین $721 - 487 \text{ W m}^{-2}$ تغییر کرده است که بیشترین مقدار آن در ساعت ۱۲ ظهر اتفاق افتاده است. دمای محیط در ساعات آزمایش بین $25 - 12 \text{ }^\circ\text{C}$ تغییر کرد که بیشترین مقدار آن مربوط به ساعت ۱ عصر بوده است. همان طور که مشاهده می‌شود، منطقه مورد نظر از نقطه نظر تابش خورشیدی، در وضعیت مطلوبی قرار دارد. در نمودار شکل ۴ تغییرات دمای هوای ورودی و خروجی و بازده جمع کننده خورشیدی (که با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه شد) در ساعات مختلف روز نشان داده شده است. با توجه به این نمودار

شد. سامانه کنترل مورد استفاده در خشک‌کن، شامل کنترل گرم‌کن کمکی الکتریکی و کنترل کننده درجه‌ی هوای تازه‌ی محیط بود. به منظور کنترل گرم‌کن کمکی از یک کنترل کننده‌ی دو وضعیتی (روشن/ خاموش) استفاده شد. چنانچه هوای خروجی از جمع کننده از دمای مورد نظر برای خشک کن (که در ابتدای آزمایش از طریق نرم افزار کنترل خشک کن تنظیم می‌گردید) کمتر بود، کنترل کننده در وضعیت روشن قرار می‌گرفت و گرم کن روشن می‌شد. این وضعیت تا رسیدن دمای هوا به دمای مطلوب ادامه داشت و پس از آن، کنترل کننده گرم کن را خاموش می‌کرد. در زمان استفاده از سامانه گردش هوای بسته، از کنترل کننده درجه‌ی هوای آزاد (تازه)، برای کنترل رطوبت نسبی هوای خشک کننده استفاده شد.

این دستگاه مجهز به سامانه کنترل رطوبت که شامل حسگر رطوبت نسبی، کنترل کننده دو وضعیتی عملگر و درجه‌ی هوای آزاد بود. در صورت استفاده از سامانه گردش هوای بسته، اگر رطوبت نسبی هوای در حال گردش، از ۷٪ (که از قبل تنظیم شده بود) بیشتر می‌شد، سامانه‌ی کنترل درجه‌ی هوای تازه را باز کرده و با ورود هوای تازه (با رطوبت پایین) به داخل خشک کن، رطوبت هوا کاهش می‌یافت. تصویری از نرم افزار نمایش و کنترل به کار رفته در این تحقیق، در شکل ۲ نشان داده شده است. از یک جریان سنج نوع حرارتی^۱ برای اندازه‌گیری دبی هوای عبوری داخل خشک کن استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری شدت تابش خورشید در سطح جمع کننده، یک سولاریمتر^۲ در کنار جمع کننده و موازی با سطح آن نصب گردید.

آزمایش‌های مربوط به ارزیابی دستگاه ساخته شده در تحقیق حاضر، در محوطه‌ی باز کارگاه گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد در آبان ماه سال ۱۳۸۹ انجام گرفت. آزمایش‌ها در دو قسمت اصلی: آزمایش‌های مربوط به ارزیابی جمع کننده خورشیدی و آزمایش‌های مربوط به نرخ خشک شدن محصول و ارزیابی خشک‌کن بود. به منظور ارزیابی جمع کننده، دمای هوای ورودی و خروجی از آن و شدت تابش خورشید بر سطح جمع کننده در طول مدت زمان آفتابی در روز اندازه‌گیری شد. برای بررسی نرخ خشک کن و میزان انرژی مصرفی در خشک کن، از محصول نعنای استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خشک‌کن و نرخ خشک شدن محصول، شامل فاکتور دمای هوای خشک کننده در سه سطح (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و فاکتور حالت خشک کننده در دو وضعیت سامانه‌ی گردش هوای باز و گردش هوای بسته بودند. آزمایش‌ها در یک طرح فاکتوریل در قالب بلوک کامل تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد. در

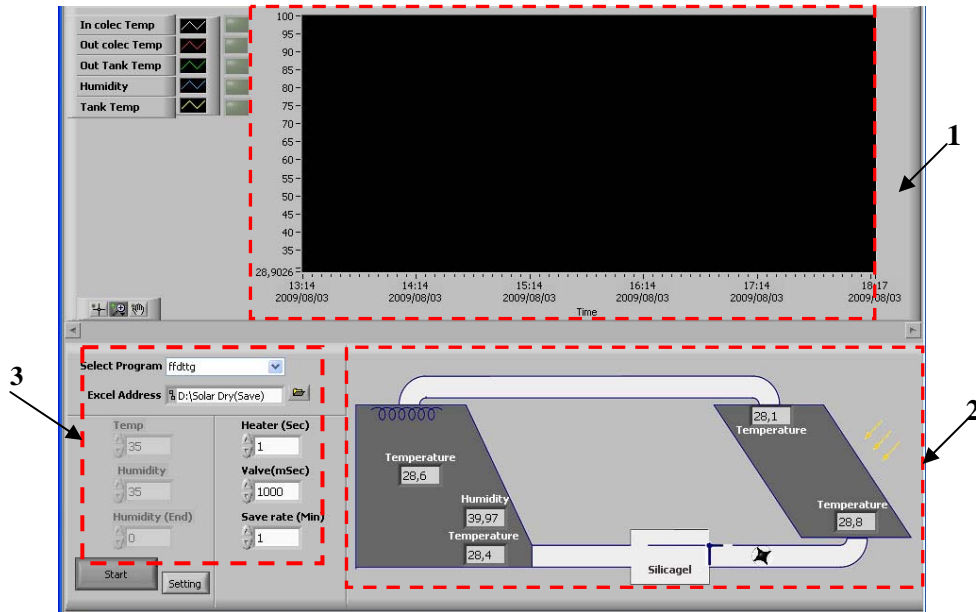
۱- مدل Testo 425 با دقت 0.3 m s^{-1} ساخت آلمان

۲- مدل TES- 1333R با دقت 10 W m^{-2} ساخت شرکت TES- تایوان

(2008).

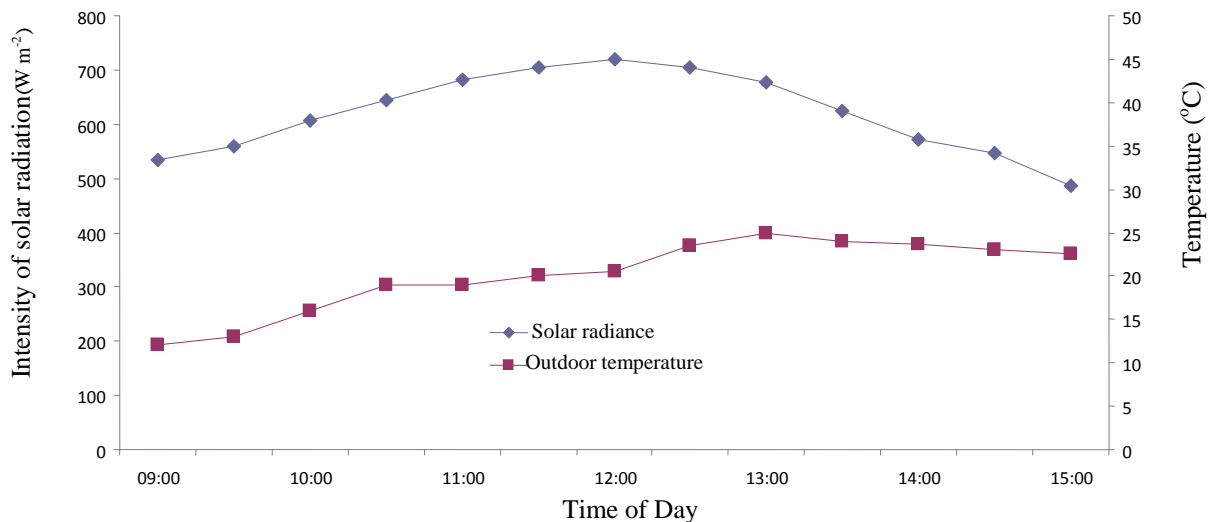
این در حالی است که، جمع‌کننده در خشک‌کن خورشیدی، در دبی‌های مختلف هوای عبوری بین ۰/۲۷ تا ۰/۳۷ تغییر کرد (Zare *et al.*, 2005). همچنین متوسط بازدهی جمع‌کننده خورشیدی مجهز به صفحه‌ی جاذب پره دار، ۰/۴۰ به دست آمد (Soheili *et al.*, 2006).

بازده جمع‌کننده بین مقادیر ۰/۳۱ تا ۰/۳۷ تغییر کرد و میانگین آن در طول مدت آزمایش ۰/۳۴ محاسبه شد. بازده جمع‌کننده خورشیدی به جنس و رنگ صفحه جاذب نور خورشید، نوع پوشش شیشه‌ای و میزان عایق کاری آن بستگی دارد. در پژوهشی متوسط بازده جمع‌کننده خورشیدی ساخته شده در دبی حجمی هوای عبوری $0.085 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ برابر ۰/۳۱ محاسبه گردید (Dadashzadeh *et al.*, 2006).



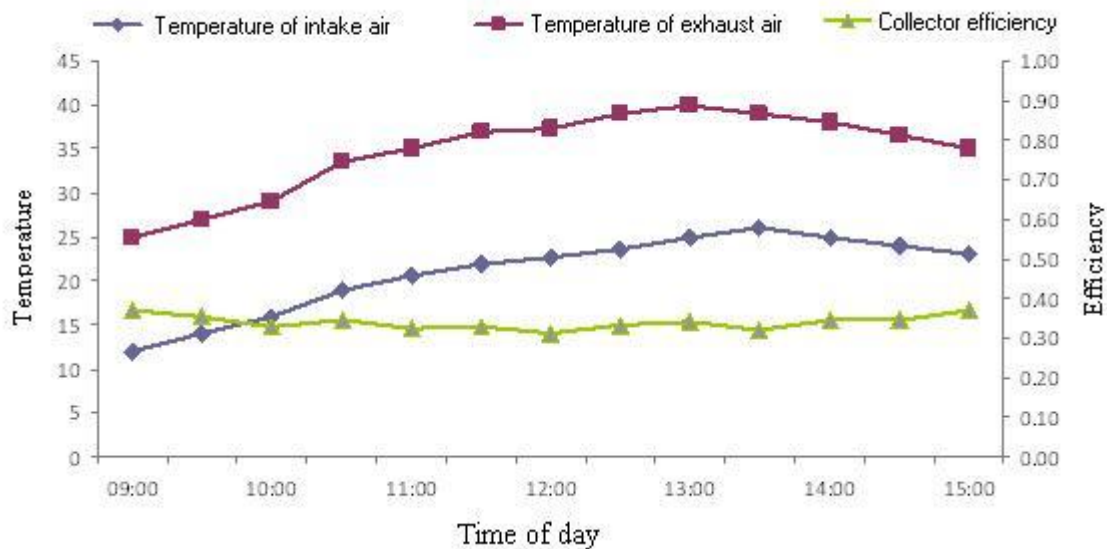
شکل ۲- تصویری از نحوه‌ی نمایش اطلاعات مربوط به سامانه کنترل و نمایش در رایانه، ۱- محل ترسیم نمودار مربوط به تغییرات داده‌ها در طول زمان آزمایش، ۲- نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده به صورت لحظه‌ای، ۳- محل انجام تنظیمات اولیه

Fig.2. A photograph of control software interface and how inputs are entered and outputs are displayed, 1-Display of data-time diagram during the test, 2- Display of on line measured parameters, 3- Primary settings



شکل ۳- تغییرات شدت تابش خورشید و دمای محیط در مشهد طی مدت زمان انجام آزمایش

Fig.3. Variations of solar radiance and outdoor temperature on a typical day during the tests in the city of Mashhad



شکل ۴- تغییرات دمای هوای ورودی و خروجی و بازده جمع‌کننده خورشیدی در مدت انجام آزمایش

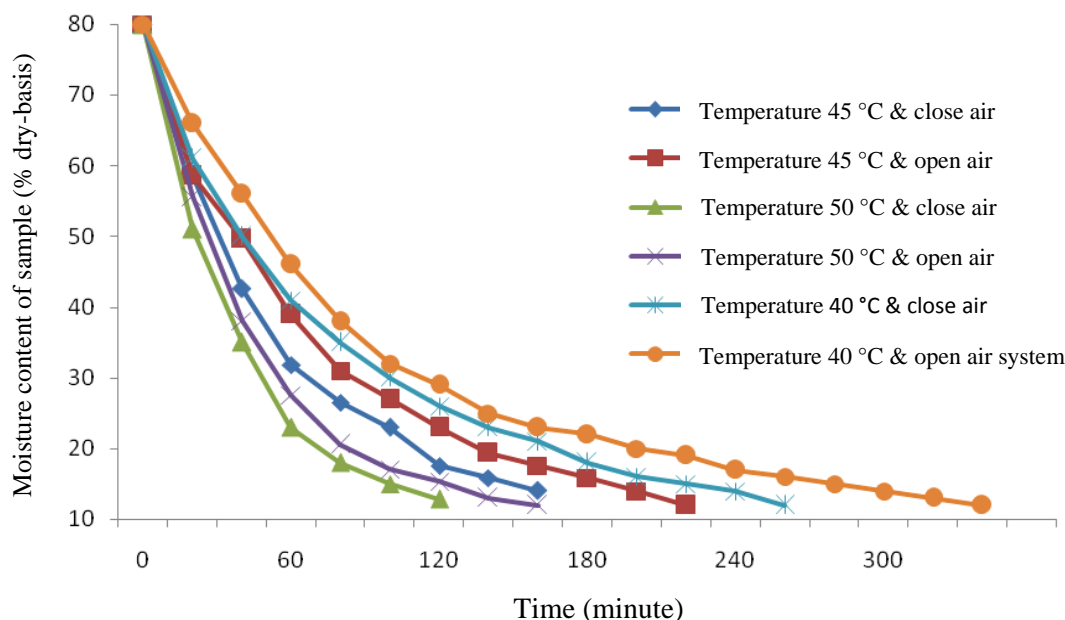
Fig.4. Variations of inlet and outlet temperature and the efficiency of collector

موجود) و انرژی فراهم شده توسط جمع‌کننده‌ی خورشیدی در هر یک از تیمارهای آزمایش، به تفکیک اندازه‌گیری و انرژی مصرفی کل و بازده خشک کردن محاسبه شده است. نتایج آنالیز واریانس طرح آزمایش در جدول ۲ آمده است. تأثیر دمای خشک‌کن بر انرژی مصرفی و بازده معنی‌دار نیست اما نوع گردش هوای خشک‌کن (دریچه باز یا بسته) تأثیر بسیار معنی‌داری در سطح ۹۹٪ بر انرژی و بازده دارد. همچنین اثرات متقابل دما و دریچه بر انرژی مصرفی در سطح ۹۵٪ و بر بازده در سطح ۹۹٪ معنی‌دار شده است.

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که علی‌رغم معنی‌دار نشدن اثر دما بر انرژی مصرفی، تغییرات دما تا حدودی توانسته مصرف انرژی خشک‌کن را تغییر دهد. اما شاید به دلیل اندک بودن تغییرات دمای اعمال شده، تغییرات انرژی مصرفی معنی‌دار نشده است. به عبارت دیگر، با تغییر دما در بازه‌ی ۴۰ تا ۵۰ درجه‌ی سیلسیوس، تغییر معنی‌داری ایجاد نشده است. از طرفی با افزایش دمای خشک‌کن، انرژی مصرفی در خشک‌کن با سیکل باز، افزایش می‌یابد در حالی که در خشک‌کن با سیکل بسته، انرژی مصرفی کاهش یافت. این امر ممکن است یکی از دلایلی باشد که در نتایج تجزیه‌ی واریانس تغییرات دمای هوای خشک‌کننده، در مجموع نتواند اثر معنی‌داری بر مصرف انرژی داشته باشد. همان‌گونه که از شکل ۶ مشخص است، تغییرات بین سطوح اول و دوم تغییرات دما معنی‌دار نیست، ولی با افزایش دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد این اختلاف در سطح ۹۵٪ معنی‌دار شده است.

نرخ خشک شدن محصول در تیمارهای مختلف آزمایش، در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار مشخص است و البته انتظار می‌رفت، افزایش دمای خشک‌کننده سبب افزایش سرعت خشک شدن محصول شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده از ۴۰ به ۵۰ درجه‌ی سیلسیوس، زمان خشک شدن محصول به طور متوسط ۵۳٪ کاهش یافت. علت این امر این است که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک‌کننده، در نتیجه سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و سرعت خشک شدن محصول افزایش یافته است. این نتیجه مطابق با نتایج به دست آمده روی پیاز بود (Bennamoun and Belhamri, 2003). از طرفی با توجه به شکل ۵، در استفاده از خشک‌کن با سامانه گردش هوای بسته، سرعت خشک شدن محصول نسبت به سامانه‌ی هوای باز افزایش یافت. در سامانه‌ی هوای بسته به دلیل استفاده از مواد جاذب رطوبت، رطوبت و در نتیجه فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کننده کاهش می‌یابد. کاهش فشار جزئی بخار آب هوای خشک‌کننده، سبب افزایش سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوا و خشک شدن محصول می‌گردد، که این مطابق با نتایج به دست آمده در سایر پژوهش‌ها می‌باشد (Shanmugam and Natarajan, 2007). میزان کاهش زمان خشک شدن محصول در سامانه‌ی گردش هوای بسته نسبت به باز حدود ۳۳٪ مشاهده شد.

انرژی مورد نیاز برای خشک شدن محصول، شامل انرژی الکتریکی مصرفی (انرژی مورد نیاز برای گرم‌کن کمکی و دمنده



شکل ۵- نرخ خشک شدن محصول در تیمارهای مختلف آزمایش

Fig.5. The effect of drying air temperature and mode of drying on drying rate of product

جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس تأثیر دما و دریچه بر انرژی مصرفی و بازده خشک کن

Table 2- Results of analysis of variance of the effect of temperature and valve mode on energy

منابع تغییر Variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean square	
		بازده Efficiency	انرژی Energy
دما Temperature	2	1.556 ^{ns}	2.117 ^{ns}
دریچه Valve	1	242 ^{**}	31.731 ^{**}
دما × دریچه Valve × Temperature	2	86 ^{**}	9.977 [*]
خطا Error	12	9.111	1.922

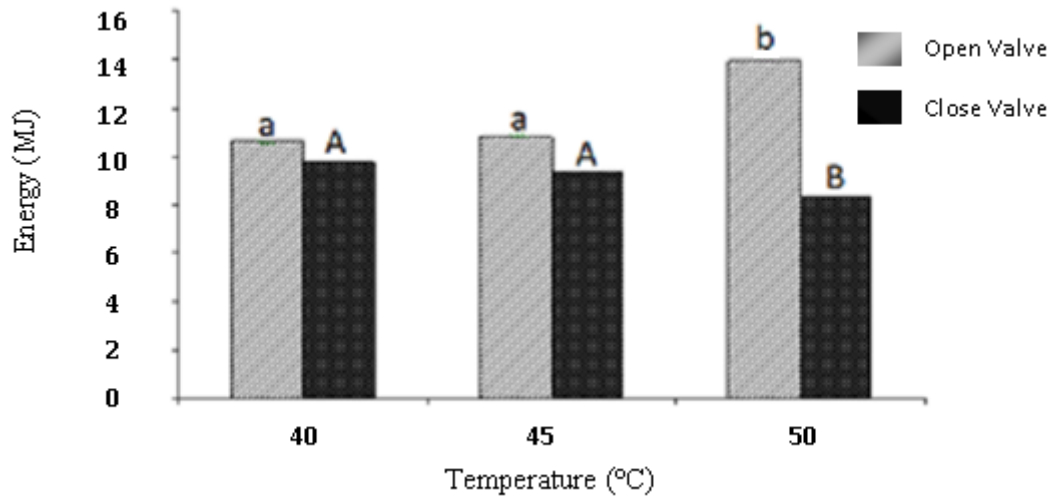
^{**}، ^{*} و ^{ns}: به ترتیب اختلاف معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم اختلاف
*، **، and ns: Significant at 1 and 5 level of probability and non significant

مصرفی ۱۴٪ کاهش یافته است. در حالی که، با توجه به نمودار، با افزایش دمای تنظیم شده برای هوای خشک کننده در سامانه‌ی گردش هوای باز، انرژی مصرفی ۲۴٪ افزایش یافته است. دلیل اصلی این است که با افزایش دمای هوای خشک کننده، اختلاف آن با دمای

نتایج مقایسه میانگین‌ها برای اثرات متقابل دما و دریچه، بر انرژی، در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در سامانه‌ی گردش هوای بسته، با افزایش دمای هوای خشک کننده به دلیل کاهش زمان خشک شدن محصول، انرژی

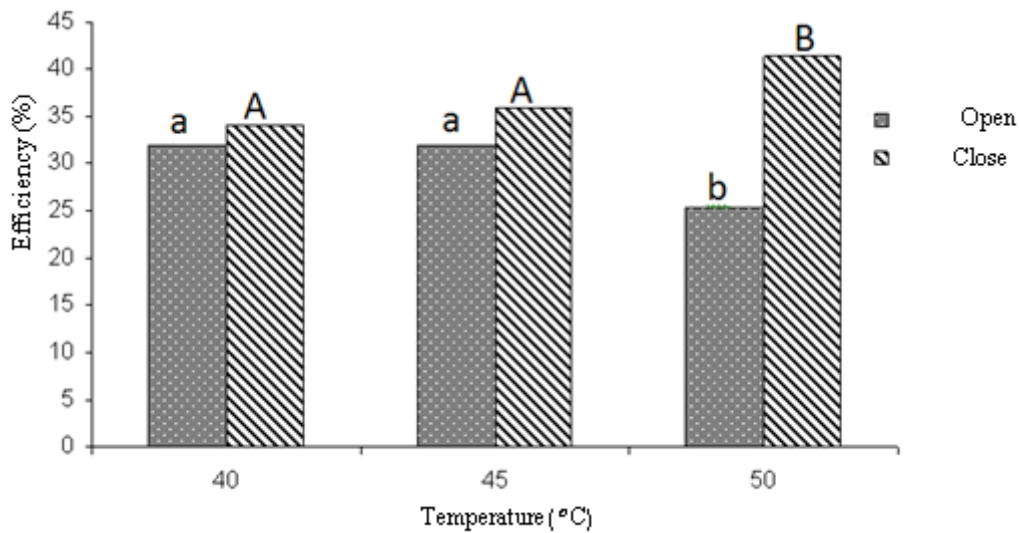
مشابه نتایج به دست آمده در سایر مطالعات می‌باشد (Sarsavadia, 2007).

محیط بیشتر می‌شود و به دلیل گرادیان دمایی بالاتر بین داخل و خارج خشک‌کن، نیازمند مصرف انرژی بیشتری برای رساندن دمای هوای تازه‌ی محیط به دمای مطلوب در خشک‌کن است. این نتیجه،



شکل ۶- اثرات متقابل دما و دریچه بر انرژی مصرفی خشک‌کن

Fig.6. Interaction of temperature and valve mode on dryer energy consumption



شکل ۷- اثرات متقابل دما و دریچه بر بازده خشک‌کن

Fig.7. Interaction of temperature and valve mode on dryer efficiency

می‌یابد. این تغییرات بین سطوح اول و دوم تغییرات دما معنی دار نیست ولی با افزایش دما به ۵۰ درجه سانتی‌گراد این اختلاف در سطح ۹۵٪ معنی دار شده است.

نتایج مقایسه میانگین‌ها برای اثرات متقابل دما و دریچه بر بازده، در شکل ۷ آمده است. با افزایش دمای خشک‌کن، بازده خشک‌کن با سیکل باز کاهش و بالعکس بازده خشک‌کن با سیکل بسته افزایش

بر روی دستگاه مورد نظر نشان داد که:

افزایش دمای هوای خشک‌کننده و استفاده از سامانه‌ی گردش هوای بسته به ترتیب سبب کاهش ۵۳ و ۳۳ درصدی در زمان خشک شدن محصول شد.

با افزایش دمای هوای خشک‌کننده در سامانه‌ی گردش هوای بسته، مصرف انرژی ۱۴٪ کاهش و در نتیجه بازده خشک‌کن افزایش یافت.

در سامانه‌ی هوای باز، افزایش دمای هوای خشک‌کننده سبب افزایش ۲۴ درصدی در مصرف انرژی و کاهش بازده خشک‌کن گردید.

متوسط بازده‌ی جمع‌کننده خورشیدی و خشک‌کن خورشیدی مورد استفاده در تحقیق بترتیب ۰/۳۴ و ۰/۴۱ به دست آمد.

بررسی عملکرد دستگاه و تأثیر آن روی خواص کیفی محصولات خشک شده نیازمند بررسی‌های بیشتر است که بخشی از آن در حال انجام است.

با توجه به این نتایج بیشترین بازده خشک‌کن، مربوط به تیماری با دمای هوای خشک‌کننده 50°C و سامانه‌ی گردش هوای بسته بود که طبق شکل ۶ کمترین مقدار مصرف انرژی را نیز دارد. در نهایت بهترین بازده‌ی خشک‌کن ۰/۴۱ محاسبه شد. بیشترین بازده خشک‌کن در پژوهش مشابه ۰/۲۱ بود (Zare *et al.*, 2005). همچنین متوسط بازده خشک‌کن خورشیدی برابر ۰/۳ به دست آمد (Dadashzadeh *et al.*, 2008). در بررسی نوعی خشک‌کن مجهز به سامانه‌ی گردش هوای بسته، بازده بین ۰/۴۳ تا ۰/۵۵ تغییر کرد (Shanmugam and Natarajan, 2007).

نتیجه گیری

به منظور فراهم نمودن سامانه‌ای برای خشک کردن بهینه محصولات کشاورزی کم حجم و با ارزش اقتصادی بالا، خشک‌کن خورشیدی ترکیبی ساخته شد؛ تا با ایجاد جریان هوای بسته، ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی فسیلی؛ کیفیت محصول خشک شده نیز افزایش یابد. به طور کلی نتایج به دست آمده از آزمایشات متعدد

منابع

1. Aboul-Enein, S., A. M.R.I. El-Sebaai, A. A. Ramadan, and H. G. El- Gohary. 2000. Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renewable Energy* 21: 505-522.
2. Afzal, T. M., T. Abe, and Y. Hikida. 1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering* 42: 177-182.
3. Amer, B. M. A., M. A. Hossain, and K. Gottschalk. 2009. Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management* 51: 813-820. DOI:10.1016/j.enconman.2009.11.016
4. Bal, L. M., P. Sudhakar, S. Satya, and S. N. Naik. 2009. Solar dryer with latent heat storage systems for drying agricultural food products. In: *Proceedings of the International Conference on Food Security and Environmental Sustainability*.
5. Bal, L. M., S. Santosh Satya, and S. N. Naik. 2010. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2298-2314.
6. Bal, L. M., S. Santosh Satya, S. N. Naik, and V. Meda. 2011. Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 876-880.
7. Banout, J., P. Ehl, J. B. Havlik, B. Z. Lojka, Z. Polesny, and V. Verner. 2011. Design and performance evaluation of a double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). *Solar Energy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.017>.
8. Bennamoun, L., and A. Belhamri. 2003. Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Food Engineering* 59: 259-266.
9. Buelow, F. H. 1958. Drying grain with solar energy. *Mich. State univ., Agric, Exp. Stn. Q. Bull* 41: 421-429.
10. Chen, H. H., C. E. Hernandez, and T. C. Huang. 2005. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy* 78: 97-103.
11. Chou, S. K., K. J. Chua, J. C. Ho and C. L.Ooi. 2004. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification. *Applied Energy* 77: 355-373.
12. Dadashzadeh, M., A. Zomorrodian, and G. Mesbahi. 2008. The effect of air flow rate and method of drying on moisture content removal of grape in a cabinet type drier. *Journal of Agricultural Science and*

- industry, Horticultural Science Issue 22 (1): 23-34. (In Farsi).
13. Devahastin, S., and S. Pitaksuriyarat. 2006. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. *Appl Therm Eng* 26: 1705-13.
 14. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Food Engineering* 61: 359-364.
 15. Eltief, S. A, M. H. Ruslan, and B. Yatim. 2007. Drying chamber performance of V-groove forced convective solar dryer. *Desalination* 209: 151-155.
 16. Karsli, S. 2007. Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications. *Renewable Energy* 32: 1645-1660.
 17. Koyuncu, T. 2006. Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy* 31: 1073-1088.
 18. Madhlopa, A. and G. Ngwalo. 2007. Solar dryer with thermal storage and bio mass backup heater. *Solar Energy* 81: 449-62.
 19. Mehdizadeh, Z., and A. Zomorodian. 2009. Study of the effect of solar drying System on rice quality. *J. Agr. Sci. Tech* 11: 527-534.
 20. Murthy, M. V. R. 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (4): 835-844.
 21. Pangavhane, D. R., R. L. Sawhney, and P. N. Sarsavadia. 2002. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy* 27(6): 579-590.
 22. Punlek, C., R. Pairintra S. Chindaraksa, and S. Maneewan. 2009. Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). *Food and Bioproducts Processing* 87: 77-86.
 23. Sacilik, K. 2007. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Food Engineering* 79: 23-30.
 24. Sarsavadia, P. N. 2007. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy* 32: 2529-2547
 25. Shanmugam, V., and E. Natarajan. 2007. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering* 27: 1543-1551.
 26. Soheili mehdizadeh, A., A. Kayhani, k. Abbaspour Sani, and A. Akram. 2006. Design a solar drier with Compulsory convection for vegetables and evaluate its performance. *Agricultural Engineering Research* 7 (27): 147-164. (In Farsi).
 27. Sreekumar, A., P. E. Manikantan, and K. P. Vijayakumar. 2008. Performance of indirect solar cabinet dryer. *Energy Conversion and Management* 49: 1388-1395.
 28. Tiris, C., M. Tiris, and I. Dincer. 1996. Energy efficiency of a solar drying system. *Energy Research* 20(9): 767-770.
 29. Zare, D., A. Zomorodian, and H. Ghasemkhani. 2005. The effect of air flow rate and discharge time of product on moisture content removal of paddy in a cabinet type semi continuous solar drier. *Journal of Agricultural science and Technology* 1: 251-263. (In Farsi).
 30. Zomorodian, A., and M. Barati. 2010. Efficient solar air heater with perforated absorber for crop drying. *J. Agr. Sci. Tech* 12: 569-577.