

ارزیابی عملکرد خشک‌کن خورشیدی با جمع‌کننده‌ی دارای صفحه‌ی جاذب پره‌دار سوراخ‌دار مجهز به سامانه‌ی کنترل هوای خشک‌کننده برای خشک کردن شوید

مسعود رزمی پور^۱ - ناصر علوی نائینی^{۲*} - حمید مرتضی پور^۳ - احمد غضنفری مقدم^۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱/۱۸

چکیده

شوید، یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی در جهان است که امروزه به‌خاطر داشتن خواص دارویی در بیشتر نقاط ایران از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق از یک خشک‌کن خورشیدی با صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار برای خشک کردن سبزی شوید استفاده گردید. این خشک‌کن شامل: جمع‌کننده، محفظه‌ی محصول، مکند و سامانه‌ی اندازه‌گیری و کنترل است. برای تنظیم دمای هوای خشک‌کننده، از یک سامانه‌ی کنترل‌کننده‌ی دما استفاده شد. جمع‌کننده‌ی خشک‌کن دارای صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار می‌باشد که عملکرد حرارتی آن در دبی‌های مختلف هوای عبوری با یک جمع‌کننده‌ی صفحه تخت مقایسه شد. تأثیر دمای هوای خشک‌کننده در سه سطح (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس)، اندازه‌ی محصول در سه سطح به طول‌های (۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر) و دو حالت مختلف خشک کردن (مختلط و غیر مستقیم) بر عملکرد خشک‌کن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار نسبت به صفحه تخت ۱۱ درصد افزایش بازده حرارتی را در برداشت و بیشترین بازده حرارتی در بالاترین دبی هوای عبوری به‌دست آمد. با افزایش دما و کاهش اندازه قطعات محصول کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد شد. با افزایش دما سهم انرژی خورشیدی نیز کاهش یافت. در نهایت بیشترین بازده خشک‌کن در حالت مختلط و با اندازه قطعات ۳ سانتی‌متر در دمای ۶۵ درجه‌ی سلسیوس برابر با ۷۰٪ مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: جمع‌کننده‌ی پره‌دار سوراخ‌دار، خشک‌کن خورشیدی، شوید

مقدمه

جلوگیری کردن از ضایعات شیمیایی در آن، باعث کاهش هزینه نگهداری و حمل و نقل آن می‌شود (Ekechukwu and Norton, 1999). سوخت‌های فسیلی غیر قابل تجدید بوده و رو به اتمام می‌باشند به‌همین دلیل انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی، جایگزین مناسبی برای انرژی‌های فسیلی است (Mahapatra and Imre, 1990). طرح‌های فراوانی برای خشک‌کن‌های خورشیدی توسط محققین ارائه شده است که از آن جمله می‌توان، خشک‌کن خورشیدی کابینتی انگور (Dadashzadeh et al., 2008)، خشک‌کن خورشیدی میوه‌جات با صفحه متمرکزکننده (Stiling et al., 2012)، خشک‌کن خورشیدی برای محصولات کشاورزی (Montero et al., 2010)، خشک‌کن خورشیدی برای خشک کردن فلفل قرمز (Banout et al., 2011) و خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت (Aghkhani et al., 2013) را نام برد.

یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در سامانه‌های خورشیدی حرارتی، جمع‌کننده‌ی آن‌ها می‌باشد. تاکنون طرح‌های متعددی به‌منظور بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی ارائه شده است؛ مانند

شوید با نام علمی *Anethum graveolens* و با نام عمومی Dill گیاهی است یک‌ساله یا دوساله دارای برگ‌های سبز که گاهی بلندی آن به یک متر نیز می‌رسد. از مواد آن در درمان درد معده، سرماخوردگی و تشنج استفاده می‌شود و یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی در جهان است. امروزه به‌خاطر داشتن خواص دارویی و همچنین استفاده از آن به‌عنوان سبزی در بیشتر نقاط ایران از اهمیت خاصی برخوردار است (Setayesh-Mehr and Ganjeali, 2013). خشک کردن یک روش مرسوم برای نگهداری مواد غذایی و سبزیجات بوده و از مهم‌ترین مزایای خشک کردن مواد غذایی کاهش رطوبت درونی آن‌ها تا رسیدن به سطح اطمینان به‌منظور افزایش عمر انبارمانی می‌باشد. حذف رطوبت اضافی در مواد غذایی علاوه بر

۱- به ترتیب دانش آموخته، دانشیار، استادیار و استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهید باهنر کرمان
* - نویسنده مسئول:
(Email: nalavi@uk.ac.ir)

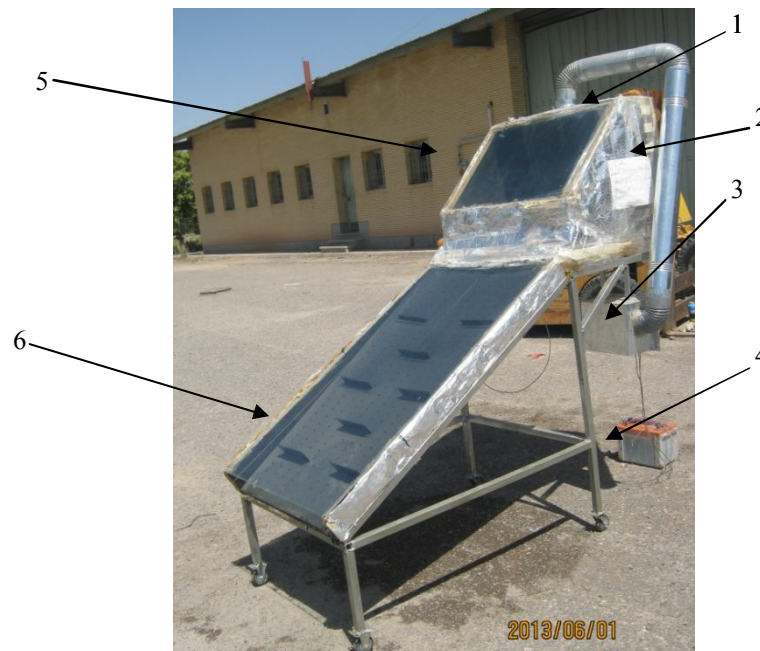
مواد و روش‌ها

مشخصات خشک کن خورشیدی

تصویر خشک کن خورشیدی با صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای اصلی این خشک کن شامل محفظه خشک کن، مکنده، جمع کننده و سامانه‌ی کنترل کننده‌ی دمای هوای خشک کردن می‌باشد. جمع کننده از یک صفحه جاذب آلومینیومی به مساحت ۱/۱ متر مربع ساخته شد و روی آن تعداد ۳۰۰ سوراخ با قطر ۱۲ میلی‌متر برای دستیابی به تخلخل ۰/۰۳ (Zomorodian and Barati, 2010) ایجاد گردید. صفحه جاذب به صورت مورب در داخل محفظه‌ی جمع کننده قرار گرفت تا تمام جریان هوای خشک کننده از داخل سوراخ‌های روی صفحه عبور کنند. همچنین تعدادی پره‌ی آلومینیومی با طول ۲۵ سانتی‌متر با مجموع مساحت ۱۰۰۰ سانتی‌متر مربع، عمود بر محور طولی صفحه‌ی جاذب، روی آن نصب گردید. دیواره‌های جمع کننده از جنس چوب بود که با پوشش پشم شیشه به ضخامت ۴ سانتی‌متر عایق گردید و روی یک شاسی فلزی قابل حمل تحت زاویه ۳۰ درجه برابر عرض جغرافیایی منطقه آزمایش نصب شد. یک شیشه معمولی ساختمانی به ضخامت ۳ میلی‌متر به عنوان پوشش روی جمع کننده قرار گرفت.

جمع کننده‌های دو مسیره (Fudholi *et al.*, 2013; Othman *et al.*, 2007)، جمع کننده‌های با صفحه جاذب لوله‌ای (Ho and *al.*, 2007)، و جمع کننده‌های با صفحه جاذب تخت پره‌دار (Chen, 2008; Liang *et al.*, 2013; Badescu, 2006; Harmim *et al.*, 2010; Omara *et al.*, 2011). در پژوهشی از سه صفحه آلومینیومی سوراخ‌دار با تخلخل‌های متفاوت به منظور جاذب تابش خورشید در جمع کننده استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که جمع کننده‌ی حاوی صفحه جاذب با بیشترین تخلخل در دبی هوای بالا دارای بازده حرارتی مطلوب (۸۴ درصد) بود (Zomorodian and Barati, 2010).

در تحقیق حاضر با توجه به این که تابش خورشید و دما در طول روز ثابت نیست و دمای خروجی جمع کننده متغیر است، از یک سامانه‌ی کنترل دما برای تنظیم کردن دمای هوای داخل خشک کن استفاده گردید. هر چند تحقیقات زیادی در مورد جمع کننده‌های خورشیدی انجام شده، اما تاکنون مطالعه‌ی اثر استفاده از ترکیب جمع کننده‌ی پره‌دار و سوراخ‌دار صورت نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر ساخت و ارزیابی یک خشک کن خورشیدی دارای جمع کننده با صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار مجهز به سامانه‌ی کنترل هوای خشک کننده، برای خشک کردن شوید مدنظر قرار گرفت.



شکل ۱- خشک کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش حاضر؛ (۱) محفظه محصول، (۲) کانال خروج هوا از جمع کننده، (۳) مکنده، (۴) باتری، (۵) پوشش شیشه‌ای، (۶) جمع کننده خورشیدی

Fig.1. The solar dryer used in the present study; (1) Drying chamber, (2) Air outlet duct, (3) Fan, (4) Battery, (5) Glass cover, (6) Solar collector

سرعت سنج هوایی پره‌ای مدل SKY Watch نوع explorer با دقت ۰/۵ متر بر ثانیه استفاده گردید. یکی از کمیت‌های مهم برای محاسبه بازده حرارتی جمع‌کننده‌های خورشیدی، میزان توان تابشی خورشید می‌باشد. برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از یک دستگاه سولاری متر مدل (TES 1333 R, TES Corp) با دقت ۱۰ وات بر متر مربع استفاده گردید. توان مکنده با استفاده از یک مولتی‌متر اندازه‌گیری شد. و همچنین برای اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها از یک ترازوی دقیق دیجیتالی مدل A&D با دقت ۰/۱ g استفاده گردید. برای ثابت نگاه داشتن دمای هوای داخل خشک‌کن، سامانه‌ی کنترل مجهز به یک کنترل‌کننده‌ی AVR (Advanced Virtual RISC) به کار گرفته شد. حسگرهای دما به‌طور مستقیم به دستگاه کنترل مرکزی که وظیفه کنترل کردن دمای داخل و ثبت اطلاعات اندازه‌گیری شده را بر عهده داشت، متصل می‌شدند. طرز کار سامانه‌ی کنترل به این ترتیب بود که دمای هوای خشک‌کننده در فاصله‌های زمانی یک دقیقه‌ای توسط حسگر نصب شده بعد از جمع‌کننده، اندازه‌گیری و به کنترل‌کننده منتقل می‌شد. در ادامه اگر دمای خوانده شده از دمای مطلوب بیشتر بود، کنترل‌کننده فرمان افزایش سرعت مکنده (افزایش دبی هوای عبوری) را صادر می‌کرد. برعکس اگر دمای خوانده شده کمتر از دمای مورد نظر بود، سرعت مکنده کاهش می‌یافت تا دمای هوا در حین عبور از جمع‌کننده افزایش بیشتری یابد. پارامترهای عملکرد خشک‌کن که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند شامل؛ بازده حرارتی جمع‌کننده (%، انرژی مصرفی (J)، سهم خورشیدی و بازده خشک‌کن (%، بودند که طبق رابطه‌های (۱) تا (۷) تعریف می‌شوند.

بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی (%، از رابطه (۱) به‌دست آمد (Ramani et al., 2010).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{A \times I_t} \times 100(\%) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، \dot{Q} گرمای مفید جمع‌کننده ($W m^{-2}$) می‌باشد که از رابطه (۲) به‌دست آمد (Pal and Khan, 2008).

$$\dot{Q} = m C_p \Delta T \quad (2)$$

از طرفی انرژی خورشیدی و انرژی الکتریکی مصرفی مکنده از رابطه‌های (۳) و (۴) به‌دست آمدند (Duffie and Beckman, 2013).

$$E_{ei} = P_{fan} \times t \quad (3)$$

$$E_S = \int_0^t \dot{Q} \times dt \quad (4)$$

مجموع انرژی الکتریکی مصرفی مکنده با انرژی خورشیدی را انرژی کل می‌نامند که با استفاده از رابطه (۵) بیان می‌شود (Sarhaddi et al., 2010).

بدنه محفظه خشک‌کن از جنس چوب به ابعاد ۸۰×۷۰×۶۰ سانتی‌متر ساخته و توسط پیچ و مهره به نبشی شاسی اصلی متصل گردید. برای بهره‌گیری از تابش مستقیم نور خورشید در حالت‌هایی که از دستگاه به‌صورت مختلط استفاده می‌گردد، پوشش شیشه‌ای روی قسمت بالایی محفظه نصب شد. درحالت غیر مستقیم پارچه‌ای روی این شیشه قرار می‌گرفت تا از تابش مستقیم نور خورشید جلوگیری شود. در قسمت عقب محفظه دربی جهت قرار دادن سینی حامل محصول در داخل محفظه تعبیه شد. برای به جریان درآوردن هوای خشک‌کننده از قسمت‌های مختلف خشک‌کن از یک مکنده گریز از مرکز استفاده گردید و این مکنده که دارای ولتاژ تغذیه ۱۲ ولت DC بود توسط یک باطری تغذیه شد.

روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در دو بخش اصلی، آزمایش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد جمع‌کننده و آزمایش‌های مربوط به عملکرد خشک‌کن خورشیدی انجام شد. در آزمایش‌های مربوط به عملکرد جمع‌کننده خورشیدی، به‌منظور مقایسه بازده حرارتی جمع‌کننده‌ی پره‌دار سوراخ‌دار با جمع‌کننده‌ی دارای صفحه جاذب تخت، آزمایش‌ها در سه سطح دبی هوای عبوری (۰/۵۲۵، ۰/۶۸۷ و ۱/۰۲۵ کیلوگرم بر ثانیه بر متر مربع) انجام شد. پارامترهایی که اندازه‌گیری می‌شدند شامل: دمای هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده، سرعت هوا و شدت تابش خورشیدی بودند. در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد خشک‌کن، در هر آزمایش ۰/۵ کیلوگرم سبزی شوید تازه با محتوای رطوبتی اولیه ۸۵ درصد به طول‌های مورد نظر بر روی یک سینی پخش و داخل محفظه خشک‌کن قرار داده شده و بعد از هر نیم ساعت محصول توزین می‌گردید. فاکتورهای بررسی شده شامل: دمای هوای خشک‌کردن در سه سطح (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس)، اندازه محصول در سه سطح (۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر) و دو حالت مختلف خشک‌کن (مختلط و غیرمستقیم) بودند. پارامترهایی که اندازه‌گیری می‌شدند عبارت بودند از: جرم لحظه‌ای محصول و توان مصرفی مکنده، دمای هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده، سرعت هوا، شدت تابش.

ایزار اندازه‌گیری و سامانه‌ی کنترل

تعداد ۳ حسگر دما برای اندازه‌گیری دما در مجرای ورودی و خروجی جمع‌کننده و در محیط صفحه نصب گردید. دمای خوانده شده توسط این حسگرها در فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه ثبت و ذخیره می‌شد. مدل این حسگرها (LM35) و محدوده کاری آن‌ها ۳۰- تا ۱۴۰ °C بود. برای اندازه‌گیری دبی هوای عبوری از خشک‌کن از یک

$$M_w = \frac{W_w}{W_w + W_D} \times 100 \quad (۸)$$

نتایج و بحث

آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خشک کن خورشیدی با جمع کننده پره‌دار سوراخ‌دار ساخته شده در طرح حاضر در دانشگاه شهید باهنر کرمان از ساعت ۹ صبح تا ۳ عصر و در ماه‌های تیر و خرداد سال ۱۳۹۲ انجام شد. شکل ۲ تغییرات شدت تابش و درجه حرارت محیط در طول یک روز معمول در این مدت شهر کرمان را نشان می‌دهد. میانگین شدت تابش ۸۹۹ وات بر متر مربع و دما ۲۲/۶ درجه سلسیوس به دست آمد. که بیشترین تابش در ساعت ۱۲ ظهر می‌باشد.

$$E_t = E_{el} + E_s \quad (۵)$$

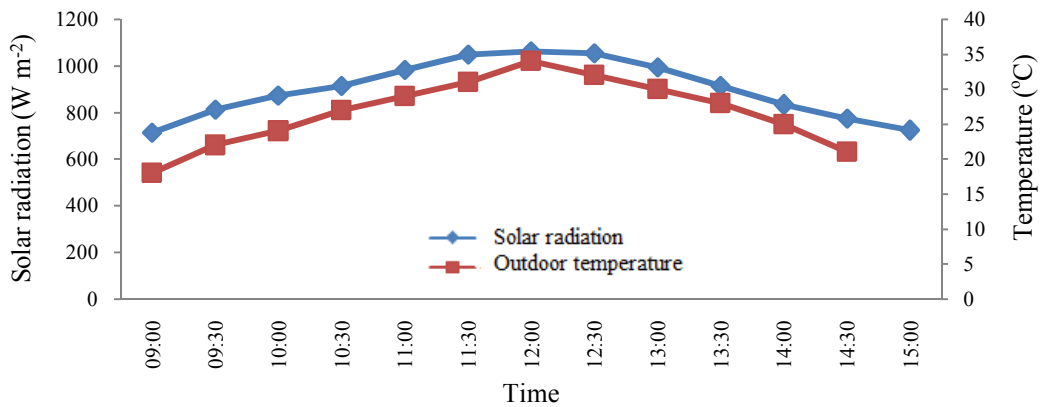
سهام انرژی خورشیدی بیانگر سهمی از کل انرژی مصرفی است که توسط انرژی خورشید تأمین گردیده است و از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

$$SF = \frac{E_s}{E_t} \quad (۶)$$

بازده خشک کن از رابطه (۷) به دست آمد (Biondi *et al.*, 1988).

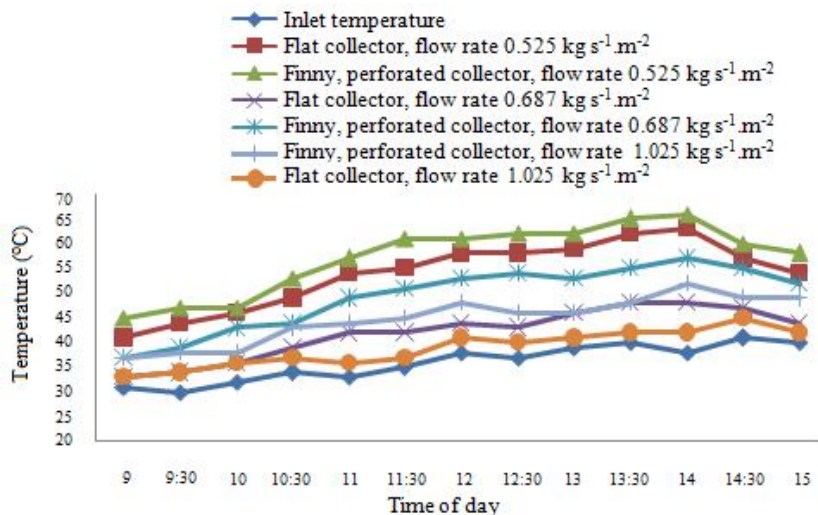
$$\eta_{Dryer} = \frac{Q_{Drying}}{E_t} \quad (۷)$$

رطوبت براساس وزن تر با نسبت وزن آب موجود در نمونه به وزن نمونه مرطوب که به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود برابر است.



شکل ۲- تغییرات شدت تابش و دمای محیط در کرمان طی مدت زمان انجام آزمایش

Fig.2. Variations of solar radiation and outdoor temperature of a typical day during the tests in the city of Kerman



شکل ۳- تغییرات دمای هوای خروجی جمع کننده‌ها در دبی‌های مختلف

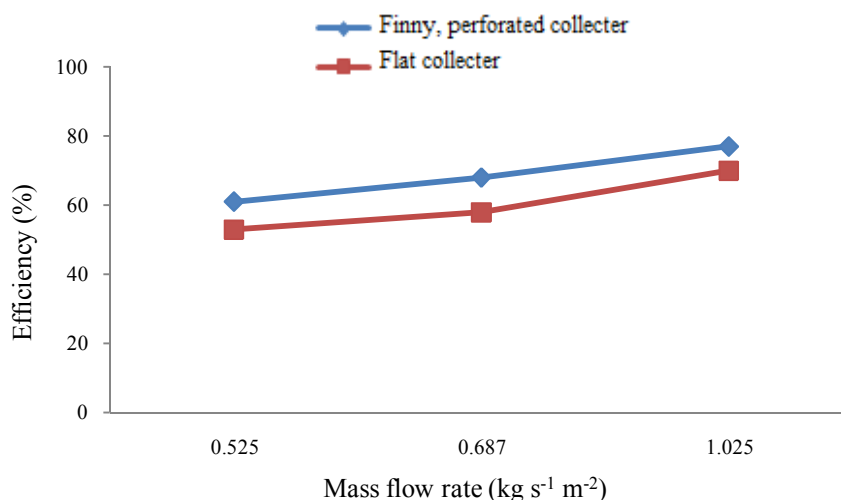
Fig.3. Variations of collector outlet temperature at different air flow rates

جدول، تغییرات دما باعث ایجاد تغییرات معنی‌داری در انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی گردیده، در حالی که تأثیر ناچیزی بر زمان خشک شدن داشته است. اثر فاکتورهای اندازه‌ی قطعات محصول و حالت خشک شدن نیز بر صفت‌های مورد مطالعه معنی‌دار بوده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اثرات متقابل فاکتورهای آزمایش در زمان خشک شدن، انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی معنی‌دار نمی‌باشد.

نتایج جدول ۱ نشان داد که افزایش دما موجب تغییرات جزئی در زمان خشک شدن گردید. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان کرد که سامانه کنترل‌کننده طوری طراحی شده بود که با افزایش دما (که باعث کاهش زمان خشک شدن می‌شود)، دبی هوای عبوری را کم می‌کرد (که این خود افزایش زمان را در بر داشت). تأثیر حالت‌های مختلف خشک کردن بر زمان خشک شدن محصول در جدول ۲ نشان داده شده است. با افزایش اندازه قطعات محصول، مدت زمان لازم برای خشک شدن افزایش یافت. دلیل این امر آن است که با کوچک‌تر شدن اندازه محصول، سطح تماس آن با هوا بیشتر شده که این امر منجر به افزایش سرعت تبخیر رطوبت می‌شود. نتایج مشابهی در تحقیقات پیشین گزارش شده است (Krokida *et al.*, 2003). در حالت مختلط نسبت به حالت غیر مستقیم مدت زمان کمتری طول کشید تا محصول خشک شود. دلیل این امر را می‌توان استفاده از تابش مستقیم نور خورشید که باعث افزایش دما در سطح محصول و تبخیر رطوبت از سطح ماده آن می‌شود، دانست. که این امر با تحقیقات گذشته مطابقت دارد (Toğrul and Pehlivan, 2002).

در شکل ۳ تغییرات درجه حرارت هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده‌های تخت و پره‌دار سوراخ‌دار با دبی‌های متفاوت هوای عبوری نسبت به زمان را نشان می‌دهد. مشخص است که درجه حرارت هوای خروجی از جمع‌کننده‌ها در دبی‌های پایین درجه حرارت هوای خروجی از جمع‌کننده‌ها بیشتر بوده است. دلیل آن این است که هوا با سرعت کمتر، فرصت بیشتری برای جذب گرما از صفحه جاذب را دارد. نکته قابل توجه در شکل ۳ این است که دمای هوای خروجی جمع‌کننده پره‌دار سوراخ‌دار بیشتر از دمای خروجی صفحه جاذب تخت در دبی‌های یکسان بود. دلیل آن را می‌توان چنین بیان نمود که سطح تبادل حرارت بین صفحه جاذب و هوای عبوری در جمع‌کننده پره‌دار سوراخ‌دار بیشتر است. بیشترین دمای خروجی در کمترین دبی هوا (۰/۵۲۵ کیلوگرم بر ثانیه بر متر مربع) و با صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار برابر با ۶۶ درجه سلسیوس به دست آمد. این نتایج با تحقیقات گذشته مطابقت دارد (Dubey *et al.*, 2009).

در شکل ۴ مقایسه بین بازده حرارتی جمع‌کننده پره‌دار سوراخ‌دار و تخت در دبی‌های مختلف آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که صفحه جاذب پره‌دار سوراخ‌دار حدود ۱۱ درصد نسبت به صفحه جاذب تخت افزایش بازده حرارتی را در بر داشته است. با توجه به این شکل همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دبی هوای عبوری در هر یک از جمع‌کننده‌ها بازده حرارتی آن افزایش یافته است. این نتیجه با یافته‌های گذشته مطابقت دارد (Yeh *et al.*, 2002). نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای مختلف آزمایش و اثرات متقابل آن‌ها بر صفت‌های زمان خشک شدن، انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این



شکل ۴- تغییرات بازده حرارتی جمع‌کننده‌ها در دبی‌های مختلف

Fig.4. Variation of collectors efficiency at different air flow rates

جدول ۱ - نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر زمان، انرژی مصرفی و سهم انرژی خورشیدی

Table 1- Analysis of variance of the factors effect on time, energy consumption and solar fraction

میانگین مربعات		درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
سهم انرژی خورشیدی $\times 10^{-4}$	انرژی کل $\times 10^{12}$		
Solar fraction $\times 10^{-4}$	Energy consumption $\times 10^{12}$	زمان Time	
58.71**	6.87**	2166.6 ^{ns}	2 دما Temperature
8.22**	20.03**	13616.66**	2 اندازه Size (cm)
56.92**	124.19**	91266.6**	1 حالت خشک شدن Drying mode
0.0018 ^{ns}	1.71 ^{ns}	316.66 ^{ns}	1 اندازه محصول \times حالت خشک شدن Size \times Drying mode
6.19 ^{ns}	0.63 ^{ns}	116.66 ^{ns}	2 دما \times حالت خشک شدن Temperature \times Drying mode
3.16 ^{ns}	76.18 ^{ns}	91.66 ^{ns}	4 دما \times اندازه محصول Temperature \times Size
4.72 ^{ns}	65.07 ^{ns}	291.66 ^{ns}	4 دما \times حالت خشک شدن \times اندازه محصول Temperature \times Drying mode \times Size
31.99 ^{ns}	34.15 ^{ns}	25800 ^{ns}	36 خطا Error

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ^{ns} غیر معنی‌دار
** Significant at 1% of probability levels, ^{ns} Non. Significant

جدول ۳ - اثر سطوح مختلف فاکتورهای آزمایش بر انرژی مصرفی

Table 3- Effect of different levels of the factors on the energy consumption

انرژی مصرفی Energy consumption (kJ)	سطوح فاکتور Levels of factor	فاکتور Factor
4596.2A*	45	دما
3519.9B	55	Temperature
3362.6B	65	(°C)
2932.7C	3	اندازه
3901.5B	5	Size (cm)
5042.1A	7	حالت خشک شدن
5474.6B	Mixed	Drying mode
5751.6A	Indirect	

* میانگین‌های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد نمی‌باشند.
* Means with the same letters are not significantly different at 1% level.

جدول ۴ تأثیر شرایط مختلف خشک کردن بر سهم خورشیدی را نشان می‌دهد. با توجه به این که افزایش دما در خشک کن طرح حاضر به وسیله‌ی کم کردن دبی هوای عبوری انجام می‌شود، لذا کاهش بازده حرارتی جمع‌کننده را در پی دارد که این منجر به کاهش سهم انرژی خورشیدی شده است. این نتایج با یافته‌های تحقیقات گذشته مطابقت دارد (Mortezapour *et al.*, 2012). با افزایش اندازه‌ی

جدول ۳ تأثیر شرایط مختلف خشک کردن بر مصرف انرژی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دما انرژی کل کاهش پیدا کرد. این نتیجه مطابق با یافته‌های (Motevali *et al.*, 2011) است. از آنجا که مصرف انرژی در خشک کن رابطه‌ی مستقیمی با زمان خشک شدن محصول دارد، لذا با افزایش اندازه قطعات محصول و روش خشک کردن غیر مستقیم، به دلیل افزایش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی نیز افزایش یافته است.

جدول ۲ - اثر سطوح مختلف فاکتورهای آزمایش بر زمان خشک شدن

Table 2- Effect of different levels of the factors on the time of drying

زمان Time (min)	سطوح فاکتور Levels of factor	فاکتور Factor
90.0C*	3	اندازه
118.0B	5	Size (cm)
145.0A	7	حالت خشک شدن
158.8B	Mixed	Drying mode
176.6A	Indirect	

* میانگین‌های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد نمی‌باشند.
* Means with the same letters are not significantly different at 1% level.

معکوس با انرژی مصرفی دارد، لذا با افزایش دما و کاهش اندازه قطعات محصول در روش خشک شدن مختلط به دلیل کاهش انرژی مصرفی، بازده خشک‌کن افزایش یافت. در نهایت بیشترین بازده خشک‌کن در تیماری با دمای ۶۵ درجه سلسیوس و اندازه قطعات ۳ سانتی‌متر در روش مختلط برابر ۷۰٪ به دست آمد.

محصول، زمان خشک شدن طولانی‌تر و در نتیجه سهم کل انرژی مصرفی که از خورشید تأمین می‌گردد، افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی برای حالت خشک شدن غیر مستقیم مشاهده گردید. تأثیر شرایط مختلف خشک‌کردن بر بازده خشک‌کن در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این‌که بازده خشک‌کن رابطه‌ای

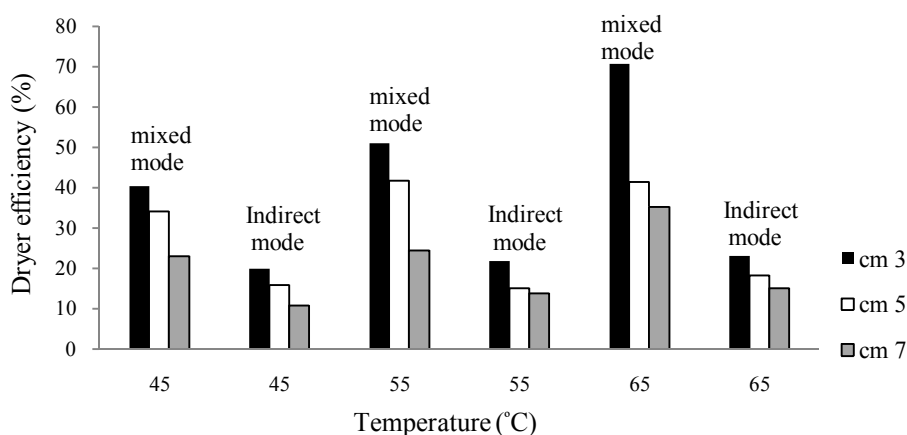
جدول ۴- اثر سطوح مختلف فاکتورهای آزمایش بر سهم خورشیدی

Table 4- Effect of different factor levels on the solar fraction

سهم خورشیدی	سطوح فاکتور	فاکتور
Solar fraction	Levels of factor	Factor
0.956A*	45	دما
0.928B	55	Temperature (°C)
0.892C	65	
0.929B	3	
0.932B	5	اندازه
0.942A	7	Size (cm)
0.924B	Mixed	حالت خشک شدن
0.944A	Indirect	Drying mode

* میانگین‌های با حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد نمی‌باشند.

* Means with the same letters are not significantly different at 1% level.



شکل ۵- تأثیر شرایط مختلف خشک‌کردن بر بازده خشک‌کن

Fig.5. Effect of different drying condition on dryer efficiency

۴- با افزایش دما تغییر قابل ملاحظه‌ای در زمان خشک شدن مشاهده نشد.

۵- بالا بردن دمای هوای خشک‌کننده موجب کاهش سهم خورشیدی گردید.

۶- بیشترین بازده در خشک‌کن در حالت مختلط و با اندازه قطعات ۳ سانتی‌متر و دمای ۶۵ درجه‌ی سلسیوس، برابر با ۷۰٪ مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش دبی هوای عبوری بازده جمع‌کننده افزایش یافت.
- ۲- استفاده از صفحه جذب پره‌دار سوراخ‌دار نسبت به صفحه تخت ۱۱ درصد افزایش بازده حرارتی در برداشت.
- ۳- با افزایش اندازه قطعات محصول، زمان خشک شدن افزایش پیدا کرده در نتیجه انرژی مصرفی و سهم خورشیدی افزایش و بازده خشک‌کن کاهش یافت.

فهرست نمادها Nomenclature		
شرح Explanation	واحد Unit	نماد Symbol
مساحت سطح جمع کننده Area of collector	m ²	A
شدت تابش در سطح جمع کننده خورشیدی Radiation on solar collector surface	W m ⁻²	I _t
دبی جرمی هوای عبوری Air mass flow rate	kg s ⁻¹	m
گرمای ویژه هوا در فشار ثابت Specific heat of air at constant pressure	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	c _p
انرژی الکتریکی Electrical energy	J	E _{el}
توان فن مکنده Fan power	W	P _{fan}
زمان خشک شدن محصول Drying time	s	T
انرژی خورشیدی Solar Energy	kJ	E _s
سهم خورشیدی Solar fraction	-	SF
انرژی کل Total energy	kJ	E _t
محتوای رطوبت Moisture content	%	M _w
جرم آب موجود در محصول Product moisture mass	kg	W _w
جرم ماده خشک Dry matter mass	kg	W _d
اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی از جمع کننده Temperature difference between collector inlet and outlet	°C	ΔT
بازده خشک کن خورشیدی Dryer efficiency	%	η _{dryer}
گرمای مورد نیاز برای خشک کردن Required heat for drying	kJ	Q _{drying}
بازده جمع کننده خورشیدی Solar collector Efficiency	%	η _{th}

منابع

1. Aghkhani, M. H., M. H. Abasspour-Fard, M. R. Bayati, H. Morteza pour, S. I. Saedi, and A. Moghimi. 2013. Performance analysis of a solar dryer equipped with a recycling air system and desiccant chamber. *Journal of Agricultural Machinery* 3: 92-103. (In Farsi).
2. Badescu, V. 2006. Optimum fin geometry in flat plate solar collector systems. *Energy Conversion and Management* 47: 2397-2413.
3. Banout, J., P. Ehl, J. Havlik, B. 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* 85: 506-515.
4. Biondi, P., L. Cicala, and G. Farina. 1988. Performance analysis of solar air heaters of conventional design. *Solar Energy* 41: 101-107.
5. Dadashzadeh, M., A. Zomorodian, and G. R. Mesbahi. 2008. The effect of drying airflow rates and modes of drying on moisture content reduction for grapes in a cabinet type solar dryer. *Journal of*

- Agricultural Science and Technology 22: 23-34.
6. Dubey, S., S. C. Solanki, and A. Tiwari. 2009. Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series. *Energy and Buildings* 41: 863-870.
 7. Duffie, J. A., and W. A. Beckman. 2013. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
 8. Ekechukwu, O. V., and B. Norton. 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management* 40: 615-655.
 9. Fudholi, A., K. Sopian, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, and B. Bakhtyar. 2013. Energy analysis and improvement potential of finned double-pass solar collector. *Energy Conversion and Management* 75: 234-240.
 10. Harmim, A., M. Belhamel, M. Boukar, and M. Amar. 2010. Experimental investigation of a box-type solar cooker with a finned absorber plate. *Energy* 35: 3799-3802.
 11. Ho, C. D., and T. C. Chen. 2008. Collector efficiency improvement of recyclic double-pass sheet-and-tube solar water heaters with internal fins attached. *Renewable Energy* 33: 655-664.
 12. Krokida, M. K., V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59: 391-403.
 13. Liang, R., L. Ma, J. Zhang, and L. Zhao. 2013. Performance analysis of a new-design filled-type solar collector with double U-tubes. *Energy and Buildings* 57: 220-226.
 14. Mahapatra, A., and L. Imre. 1990. Role of solar agricultural-drying in developing countries. *International Journal of Ambient Energy* 11: 205-210.
 15. Montero, I., J. Blanco, T. Miranda, S. Rojas, and A. R. Celma. 2010. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products. *Energy Conversion and Management* 51: 1510-1521.
 16. Morteza pour, H., B. Ghobadian, S. Minaei, and M. H. Khoshtaghaza. 2012. Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. *Drying Technology* 30: 560-566.
 17. Motevali, A., S. Minaei, M. H. Khoshtaghaza, and H. Amirnejat. 2011. Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy* 36: 6433-6441.
 18. Omara, Z. M., M. H. Hamed, and A. E. Kabeel. 2011. Performance of finned and corrugated absorbers solar stills under Egyptian conditions. *Desalination* 277: 281-287.
 19. Othman, M. Y., B. Yatim, K. Sopian, and M. N. Abu Bakar. 2007. Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination* 209: 43-49.
 20. Pal, U., and M. K. Khan. 2008. Calculation steps for the design of different components of heat pump dryers under constant drying rate condition. *Drying Technology* 26: 864-872.
 21. Ramani, B. M., A. Gupta, and R. Kumar. 2010. Performance of a double pass solar air collector. *Solar Energy* 84: 1929-1937.
 22. Sarhaddi, F., S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. Mahdavi Adeli. 2010. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy* 87: 2328-2339.
 23. Setayesh-Mehr, Z., and A. Ganjeali. 2013. Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of dill (*Anethum graveolens* L.). *Journal of Horticulture Science* 27: 27-35.
 24. Stiling, J., S. Li, P. Stroeve, J. Thompson, B. Mjawa, K. Kornbluth, and D. M. Barrett. 2012. Performance evaluation of an enhanced fruit solar dryer using concentrating panels. *Energy for Sustainable Development* 16: 224-230.
 25. Toğrul, İ. T., and D. Pehlivan. 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 55: 209-216.
 26. Yeh, H. M., C. D. Ho, and J. Z. Hou. 2002. Collector efficiency of double-flow solar air heaters with fins attached. *Energy* 27: 715-727.
 27. Zomorodian, A., and M. Barati. 2010. Efficient solar air heater with perforated absorber for crop drying. *Journal of Agricultural Science and Technology* 12: 569-577.