

## بررسی عملکرد خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی برای خشک کردن نعناع

میلاد هدایت<sup>۱</sup>، حمید مرتضی پور<sup>۲\*</sup>، حسین مقصودی<sup>۳</sup>، محسن شمسی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. استادیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. استادیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. دانشیار، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۸)

### چکیده

خشک کردن محصولات کشاورزی فرایندی پیچیده با مصرف انرژی فراوان است. تأمین انرژی لازم برای ادامه حیات، از چالش‌های پیش روی بشر است. در پژوهش حاضر، عملکرد خشک کنی خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی بررسی می‌شود. نرخ خشک شدن، بازده جمع کننده، مقدار مصرف انرژی، سهم انرژی خورشیدی، و سهم انرژی بازیافتی در سه سطح دما (۴۵، ۵۵، و ۶۵ درجه سلسیوس) و سه سطح دبی هوای خشک کننده (۰/۰۴، ۰/۰۶، و ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه) محاسبه و مقایسه شدند. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک کننده، مصرف انرژی ۲۵ درصد کاهش یافت. همچنین، بالابردن دمای هوای خشک کننده از ۴۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس موجب کاهش ۲۴ درصدی در سهم انرژی خورشیدی و افزایش ۲۰ درصدی سهم انرژی بازیافتی شد. بازده جمع کننده خورشیدی با افزایش دبی هوای عبوری و کاهش دمای خشک کنی بهبود یافت.

**کلیدواژگان:** بازده جمع کننده، خشک کن خورشیدی، سامانه بازیافت حرارتی.

### مقدمه

گیاه نعناع به خانواده لابیئاتا متعلق است که بالغ بر ۲۵ تا ۳۰ گونه دارد و به صورت گسترده‌ای در نواحی مرطوب می‌روید. نعناع به طور معمول در دنیا برای تهیه اسانس کشت می‌شود و به صورت گسترده‌ای به عنوان طعم دهنده و خوش بوکننده در صنعت قنادی و پزشکی استفاده می‌شود. علاوه بر اسانس و عصاره، بعضی از گونه‌های نعناع اثر آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی دارند (Golluce *et al.*, 2007).

خشک کردن روشی مرسوم برای نگهداری مواد غذایی و سبزیجات است. از مهمترین مزایای خشک کردن مواد غذایی علاوه بر جلوگیری از ضایعات شیمیایی در آن، کاهش هزینه نگهداری و حمل و نقل است (Ekechukwu & Norton, 1998). بسیاری از سبزیجات به طور طبیعی فصلی‌اند و ممکن است در یک دوره زمانی خاص در منطقه‌ای ویژه به صورت فراوان تولید شود و عرضه آن‌ها در بازار افزایش یابد. بنابراین به دلیل فسادپذیر بودن، مقادیر زیادی از آن‌ها در یک دوره زمانی کوتاه از بین می‌روند. ضایعات پس از برداشت سبزی‌ها در اثر کمبود

امکانات حمل و نقل، نبود زیرساخت‌های مناسب فراوری و نگهداری، و همچنین مشکلات بازاریابی حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد تخمین زده شده‌اند. فراوری سبزیجات می‌تواند نقش حیاتی را در کاهش ضایعات و بالابردن ارزش آن‌ها داشته باشد (Ekechukwu & Norton, 1997).

استفاده از انرژی خورشید برای تأمین حرارت لازم در فرایندهای با دمای پایین، جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌آید. در این راستا، یکی از پرکاربردترین موارد استفاده از انرژی خورشید، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، خشک کن‌های خورشیدی هستند. زمان خشک شدن محصول در خشک کن‌های خورشیدی در مقایسه با روش خشک کردن سنتی، در آفتاب یا سایه، کمتر و کیفیت محصول نهایی بالاتر است. همچنین، خشک کن‌های خورشیدی از نظر مصرف انرژی عملکرد مناسب‌تری به نسبت خشک کن‌های صنعتی با سوخت فسیلی دارند (Altobelli *et al.*, 2014). تحقیقات فراوانی در زمینه انواع خشک کن‌های خورشیدی صورت گرفته است. برای نمونه، در تحقیقی یک خشک کن خورشیدی فعال غیرمستقیم با یک خشک کن هوای گرم با منبع حرارت الکتریکی مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش دمای هوای خشک کننده از ۵۰ به ۷۵ درجه سلسیوس می‌توان زمان

به کاررفته در این نوع خشک‌کن‌ها محدود است. بنابراین، این مواد پس از مدتی به حالت اشباع می‌رسند و توانایی آن‌ها در جذب رطوبت هوای خشک‌کننده کاهش می‌یابد. در این شرایط، به‌طور معمول برای احیای دوباره آن‌ها از آون استفاده می‌شود که مستلزم صرف زمان و هزینه است. در تحقیق حاضر به‌منظور بازیافت حرارت تلف‌شده خشک‌کن، افزایش بازده انرژی آن، و رفع محدودیت‌های خشک‌کن‌های دارای سامانه گردش هوای بسته، از یک سامانه بازیافت حرارتی دارای مبدل حرارتی آب به هوا استفاده شد. با توجه به بومی بودن گیاه نعنای ایران، دسترسی آسان، و ارزان بودن این گیاه، در تحقیق حاضر از این محصول استفاده شد. از آنجا که نتایج بررسی کیفیت خشک‌شدن نعنای در خشک‌کن‌های جریان هوای گرم در تحقیقات پیشین موجود است (Rocha et al., 1993; Therdtthai & Zhou, 2009)، بنابراین در این پژوهش تمرکز اصلی بر ارزیابی عملکرد خشک‌کن از نظر مصرف انرژی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت

#### حرارتی

طرح‌واره‌ای از خشک‌کن خورشیدی مورد نظر در تحقیق حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای اصلی یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی شامل: جمع‌کننده خورشیدی، پوشش محافظ، محفظه محصول، مبدل حرارتی، شاسی اصلی، گرم‌کن الکتریکی کمکی، مکنده، و سامانه اندازه‌گیری و کنترل است. در این خشک‌کن هوای خشک‌کننده در ابتدا از روی مبدل حرارتی و جمع‌کننده عبور می‌کند و دمای آن افزایش می‌یابد. پس از آن، چنانچه دمای خروجی از جمع‌کننده خورشیدی کمتر از دمای تنظیم‌شده برای خشک‌کردن باشد، سامانه کنترل گرم‌کن الکتریکی، که توان آن از برق شهری تأمین می‌شود، را روشن می‌کند و دمای هوا را تا مقدار مطلوب افزایش می‌دهد. در ادامه، هوای گرم با دمای مشخص از میان سینی که محصول به‌صورت لایه نازک روی آن گسترده شده است، عبور می‌کند و با جذب رطوبت محصول، آن را خشک می‌کند. هوای گرم و مرطوب خارج‌شده از محفظه محصول، با عبور از داخل مبدل حرارتی، بخشی از گرمای خود را به آن می‌دهد که موجب گرم‌شدن آب موجود در سامانه بازیافت می‌شود. آب گرم‌شده به‌دلیل کاهش چگالی با جریان طبیعی به مبدل دوم منتقل و باعث گرم‌شدن مبدل و هوای ورودی به جمع‌کننده می‌شود. جمع‌کننده به‌کاررفته در خشک‌کن صفحه جاذب تخت از جنس آلومینیوم به ابعاد

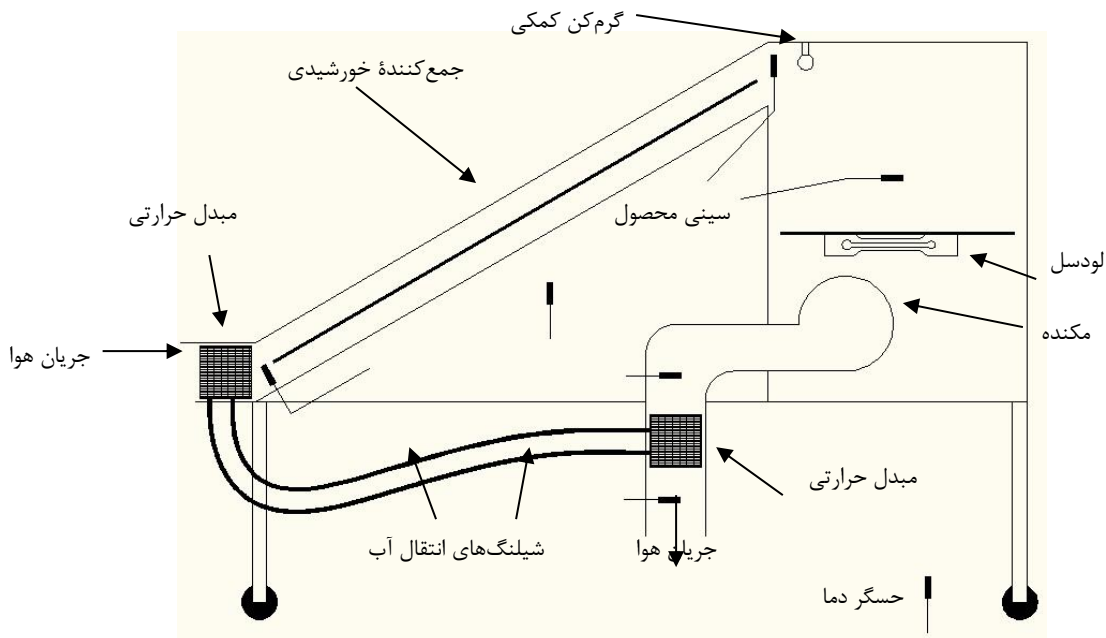
خشک‌شدن را تا حدود ۸ ساعت کاهش داد (Boughali et al., 2009). در مطالعه دیگری از یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی برای خشک‌کردن انگور ارزیابی شد (Dadashzadeh et al., 2008). در تحقیقی دیگر عملکردهای شش نوع جمع‌کننده خورشیدی تحت قابل استفاده در خشک‌کن‌های خورشیدی مقایسه شدند (Koyuncu, 2006). در پژوهشی دیگر یک خشک‌کن با جمع‌کننده دوره‌های طراحی و با حالت سنتی مقایسه شد، در این تحقیق علاوه بر کیفیت، رنگ محصولات در خشک‌کن‌های دوره‌های بهتر از حالت سنتی بود. همچنین با استفاده از خشک‌کن خورشیدی در این تحقیق، زمان خشک‌شدن محصول از بیش از ۹۳ ساعت به ۳۲ ساعت کاهش یافت و بازده خشک‌کن مجهز به جمع‌کننده دوره‌های حدود ۲۴ درصد محاسبه شد (Banout et al., 2011).

شرایط اقلیمی (شامل: شدت تابش خورشید، دما، و رطوبت نسبی هوای محیط) تأثیر فراوانی بر عملکرد خشک‌کن‌های خورشیدی و کاهش ظرفیت آن‌ها دارد (Altobelli et al., 2014). از این رو، طرح‌های متفاوتی به‌منظور بهبود بازده انرژی و در نتیجه بالا بردن ظرفیت این خشک‌کن‌ها ارائه شده است. در این راستا، می‌توان به مطالعات انجام‌شده با هدف افزایش بازده جمع‌کننده‌های خورشیدی اشاره کرد که سوراخ‌دار کردن صفحه جاذب جمع‌کننده (Zomorodian & Barati, 2010)، تغییر در زاویه متصل‌شدن پره به صفحه جاذب، و استفاده از جمع‌کننده لوله‌ای (Lamnatou et al., 2012) برخی از روش‌های به‌کارگرفته‌شده هستند. به‌منظور افزایش بازده انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی، سامانه گردش هوای بسته پیشنهاد شده است (Punlek et al., 2009). در خشک‌کن‌های مجهز به سامانه گردش هوای بسته، هوای گرم پس از عبور از روی محصول و جذب رطوبت آن، به محیط بیرون منتقل نمی‌شود بلکه از داخل جمع‌کننده خورشیدی عبور می‌کند و پس از گرم‌شدن، دوباره به‌صورت یک چرخه بسته برای خشک‌کردن وارد محفظه می‌شود. با توجه به اینکه رطوبت نسبی هوای عبوری در این نوع خشک‌کن، پس از مدتی به‌علت جذب رطوبت محصول بالا می‌رود و قدرت جذب رطوبت آن کاهش می‌یابد، از مواد جاذب رطوبت در این نوع خشک‌کن استفاده شده است. از دیگر مزایای استفاده از خشک‌کن مجهز به سامانه گردش هوای بسته، کاهش آلودگی میکروبی در محصول به‌دلیل کاهش استفاده از هوای آزاد محیط است (Aghkhani et al., 2013).

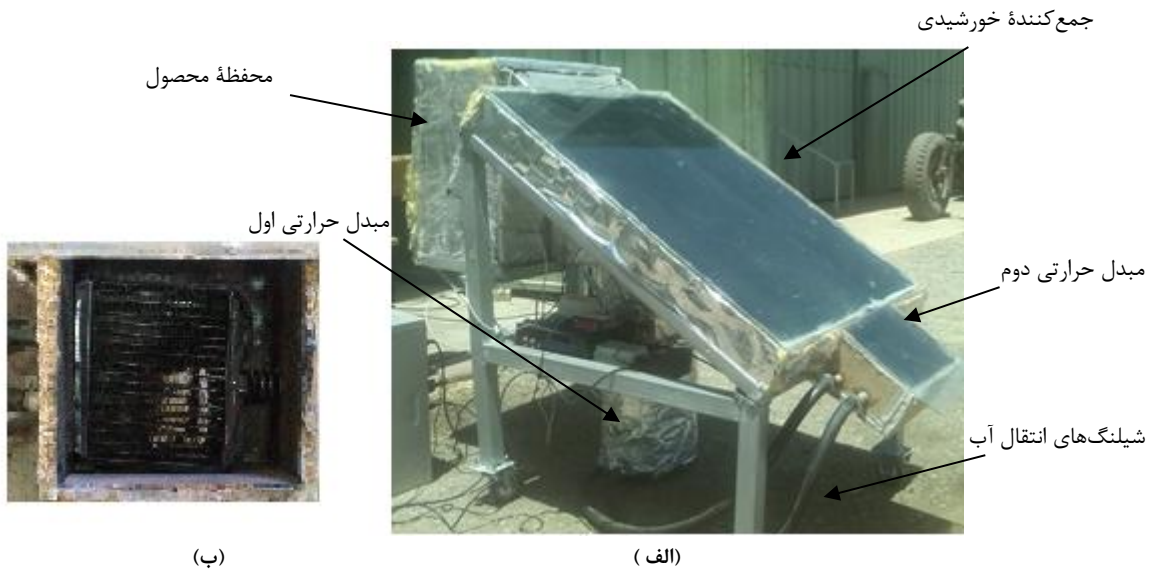
از معایب خشک‌کن‌های دارای چرخه گردش هوای بسته این است که ظرفیت جذب رطوبت مواد جاذب رطوبت

ولت تغذیه می‌شد به داخل محفظه انتقال پیدا می‌کرد. شکل ۲ تصویری از خشک‌کن خورشیدی ساخته‌شده و مبدل حرارتی به‌کاررفته در خشک‌کن را نشان می‌دهد.

۰/۹×۰/۶۲ متر داشت که در یک محفظه چوبی قرار گرفت. محفظه خشک‌کن از جنس چوب بود که با یک لایه پشم‌شیشه عایق شد. محلی برای قرارگرفتن سینی محصول در محفظه تعبیه شد. جریان هوا با یک مکنده DC که توسط یک باتری ۱۲



شکل ۱. طرح‌واره خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی و محل قرارگیری حسگرهای دما روی آن



شکل ۲. الف) تصویر اجزای گوناگون خشک‌کن خورشیدی، ب) تصویری از مبدل حرارتی استفاده‌شده در تحقیق

محل مورد نظر و به سمت جنوب مستقر شد. جهت خشک‌کن در تمام مراحل خشک‌شدن ثابت بود.

تأثیر دمای هوای خشک‌کننده در سه سطح ۴۵، ۵۵، و ۶۵ درجه سلسیوس و دبی هوای عبوری در سه سطح ۰/۵، ۱، و ۱/۵ برابر دبی محاسبه‌شده در طراحی خشک‌کن (۰/۰۴، ۰/۰۶، و ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه) بر عملکرد خشک‌کن بررسی شد.

### روش انجام آزمایش

پس از اتمام مراحل ساخت خشک‌کن، آزمایش‌های مربوط به ارزیابی آن از ۱۵ تیر تا ۲۸ مردادماه ۱۳۹۳ در دانشگاه شهید باهنر کرمان از ساعت ۹ تا ۱۵ انجام گرفت. در هر آزمایش ۰/۵ کیلوگرم نعنای تازه پس از شستشو و آبیگری، برای خشک‌کردن استفاده شد. یک ساعت قبل از انجام آزمایش، خشک‌کن در

بهمنظور تعیین عملکرد خشک‌کن طراحی‌شده، بازده حرارتی جمع‌کننده، انرژی کل مصرفی، سهم خورشیدی، و سهم انرژی بازیافتی طبق رابطه‌های ۱ و ۲ به‌دست آمدند:

بازده جمع‌کننده خورشیدی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

(Biondi et al., 1988)

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_c}{A \times I_t} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن:  $\eta_{th}$ : بازده جمع‌کننده (درصد)،  $A$  مساحت جمع‌کننده خورشیدی ( $m^2$ )،  $I_t$  شدت تابش خورشیدی ( $W/m^2$ )، و  $\dot{Q}_c$  نرخ گرمای مفید جمع‌کننده (W) است که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} c_p (T_{oc} - T_{ic}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن:  $\dot{m}$  دبی جرمی هوای عبوری ( $kg/m^2$ )،  $c_p$  گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ( $J/kg^\circ C$ )،  $T_{ic}$  دمای هوای ورودی به جمع‌کننده ( $^\circ C$ )،  $T_{oc}$  دمای خروجی از جمع‌کننده ( $^\circ C$ ) هستند. مجموع انرژی مصرفی در فرایند خشک‌شدن از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$E_T = E_S + E_{el} + E_r \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن:  $E_T$  انرژی کل مصرفی (kJ)،  $E_S$  انرژی حرارتی فراهم‌شده توسط خورشیدی در جمع‌کننده (kJ)، که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود، شامل انرژی مصرفی مکنده و گرمکن الکتریکی (kJ)، که به‌وسیله ترانس‌میتور وات‌متر به‌دست می‌آید، و  $E_r$  انرژی بازیافتی (kJ) است که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$E_S = \int \dot{Q}_c \cdot dt \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$E_r = \int \dot{Q}_r \cdot dt \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن:  $dt$  بازه زمانی اندازه‌گیری توان مفید (s)، و  $\dot{Q}_r$  نرخ گرمای بازیافتی (W) است که از رابطه ۶ به‌دست می‌آید.

$$\dot{Q}_r = \dot{m} c_p (T_{ox} - T_{ix}) \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه:  $T_{ix}$  دمای هوای ورودی به مبدل حرارتی ( $^\circ C$ ) و  $T_{ox}$  دمای خروجی از مبدل حرارتی ( $^\circ C$ ) است. سهم خورشیدی<sup>۱</sup> (SF)، بیان‌گر بخشی از انرژی مصرفی است که توسط جمع‌کننده خورشیدی تأمین شده است و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$SF = \frac{E_s}{E_T} \times 100 \quad (\text{رابطه ۷})$$

سهم انرژی بازیافت‌شده<sup>۲</sup> (RF)، نشان‌دهنده سهمی از انرژی مصرفی است که توسط گرمای بازیافت‌شده تأمین می‌شود، و از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

آزمایش‌ها در قالب یک طرح فاکتوریل به‌صورت تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد.

پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در هر آزمایش شامل دمای هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده و مبدل حرارتی، شدت تابش خورشید، وزن لحظه‌ای محصول، و توان مصرفی گرم‌کن الکتریکی بودند.

### سامانه اندازه‌گیری و کنترل

به‌منظور اندازه‌گیری دمای هوای محیط و قسمت‌های گوناگون خشک‌کن، از ۵ حسگر دما مدل LM35 استفاده شد. این حسگرها در نقاط متفاوت از جمله ورودی و خروجی جمع‌کننده، درون محفظه خشک‌کن، و قبل و بعد از مبدل حرارتی اول نصب شدند (شکل ۱). داده‌های هر یک از حسگرها در فاصله‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای ثبت و ذخیره می‌شود. از دو لودسل (مدل L6D، شرکت ZEMIC، ساخت چین) برای اندازه‌گیری تغییرات وزن محصول در طول زمان خشک‌شدن استفاده شد. این حسگرها در داخل محفظه و زیر سینی محصول نصب شدند. به‌منظور اندازه‌گیری توان مصرفی الکتریکی مصرفی مکنده و گرم‌کن الکتریکی موجود در خشک‌کن، از یک ترانس‌میتور وات‌متر (TM-1510، شرکت تیکا، ایران) استفاده شد. یک کابل سریال، تمام این حسگرها را به رایانه متصل می‌کرد و داده‌های مربوط به هر حسگر، با نرم‌افزار نمایش و کنترل (که برای این سامانه تهیه شده بود) نمایش داده می‌شدند. سامانه کنترل استفاده‌شده در خشک‌کن، شامل کنترل گرم‌کن کمکی الکتریکی بود. برای این منظور، از یک کنترل‌کننده دووضعیتی (روشن/خاموش) استفاده شد. چنانچه دمای هوای خروجی از جمع‌کننده از دمای مورد نظر برای خشک‌کردن (که در ابتدای آزمایش از طریق نرم‌افزار کنترل خشک‌کن تنظیم می‌شد) کمتر بود، کنترل‌کننده در حالت روشن قرار می‌گرفت و گرم‌کن روشن می‌شد. این وضعیت تا رسیدن دمای هوا به اندازه مطلوب ادامه داشت و پس از آن، کنترل‌کننده گرم‌کن را خاموش می‌کرد. از یک سرعت‌سنج هوایی پره‌ای (مدل BE816A، شرکت BESTONE، ساخت هنگ‌کنگ) برای اندازه‌گیری سرعت و دبی هوا استفاده شد. یکی از کمیت‌های مهم برای محاسبه بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی، مقدار توان تابشی خورشید در واحد سطح جمع‌کننده است. سولاری‌مترها از متداول‌ترین تجهیزات برای اندازه‌گیری انرژی تابشی خورشید در سطح زمین هستند. برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از یک دستگاه سولاری‌متر (مدل TES 1333 R، شرکت TES، ساخت تایوان) استفاده شد.

1. Solar fraction  
2. Recovery fraction

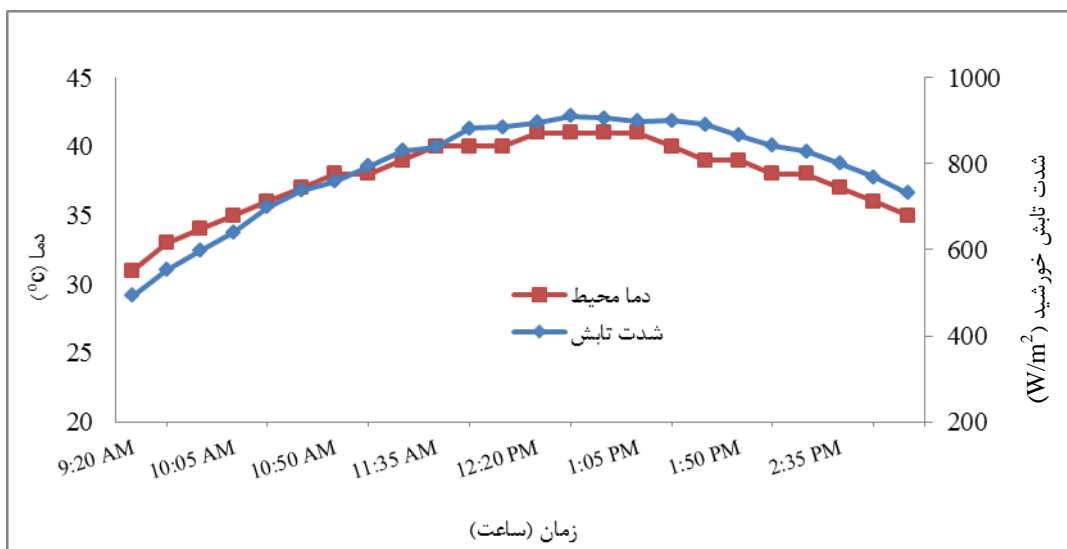
۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش دمای خشک‌کنی، دمای هوای ورودی به جمع‌کننده افزایش می‌یابد. دلیل آن این است که با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، دمای هوای خروجی از محفظهٔ محصول زیاد می‌شود که افزایش نرخ انتقال حرارت به مبدل حرارتی اول و در نتیجه افزایش دمای سیال موجود در سامانهٔ بازیافت و مبدل حرارتی دوم را به دنبال دارد. این امر باعث می‌شود که هوا هنگام عبور از مبدل دوم با سطح گرم‌تری در تماس باشد ( Incropera *et al.*, 2011).

$$RF = \frac{E_r}{E_T} \times 100 \quad (\text{رابطه ۸})$$

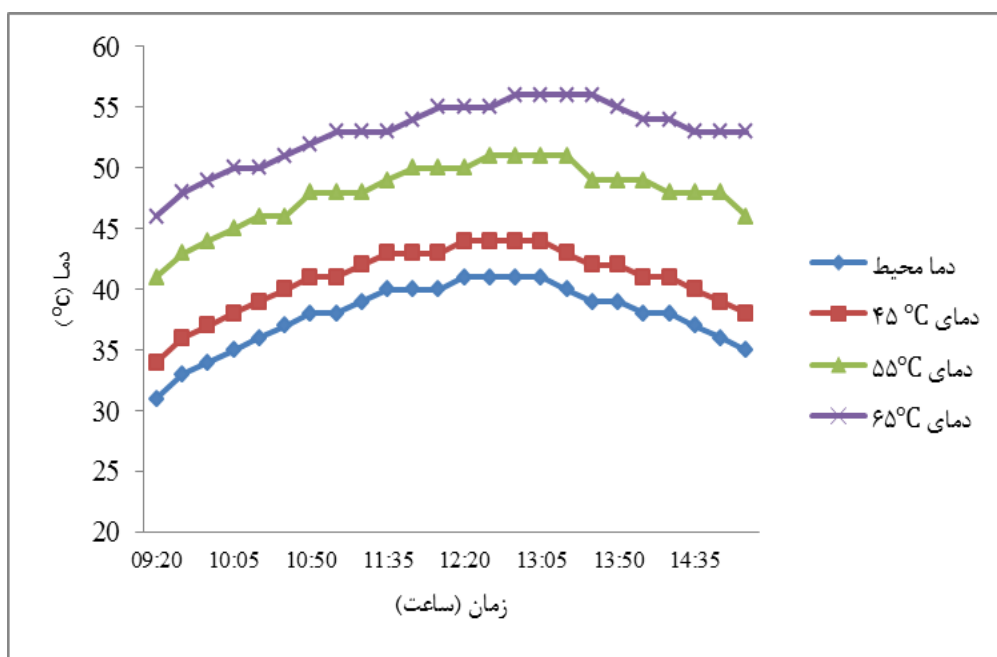
### نتایج و بحث

شکل ۳ تغییرات متوسط شدت تابش و درجهٔ حرارت محیط در طول یک روز، در محل انجام آزمایش را نشان می‌دهد. در طول مدت زمان انجام آزمایش، میانگین شدت تابش ۷۸۹ وات بر مترمربع و تغییرات دما بین ۳۱-۴۱ درجهٔ سلسیوس به دست آمد. بیشترین تابش در ساعت ۱۲:۳۰ بود.

در شکل ۴ تغییرات دمای ورودی به خشک‌کن، هنگام عبور از مبدل حرارتی، در ۳ دمای متفاوت خشک‌کردن و دبی



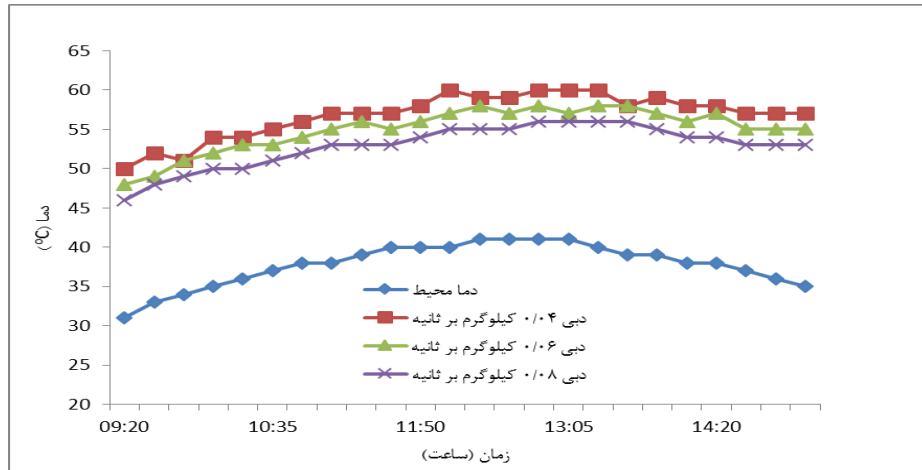
شکل ۳. تغییرات شدت تابش در طول یک روز در مدت انجام آزمایش



شکل ۴. تغییرات دمای هوای ورودی به جمع‌کننده بعد از عبور از مبدل حرارتی در دبی ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه

هوای ورودی به جمع‌کننده اندکی کم شد. افزایش دبی هوا، باعث می‌شود که هوا زمان کمتری با مبدل حرارتی در تماس باشد در نتیجه انتقال گرما به مبدل حرارتی کمتر می‌شود و این امر باعث کاهش دمای هوای ورودی به خشک‌کن می‌شود.

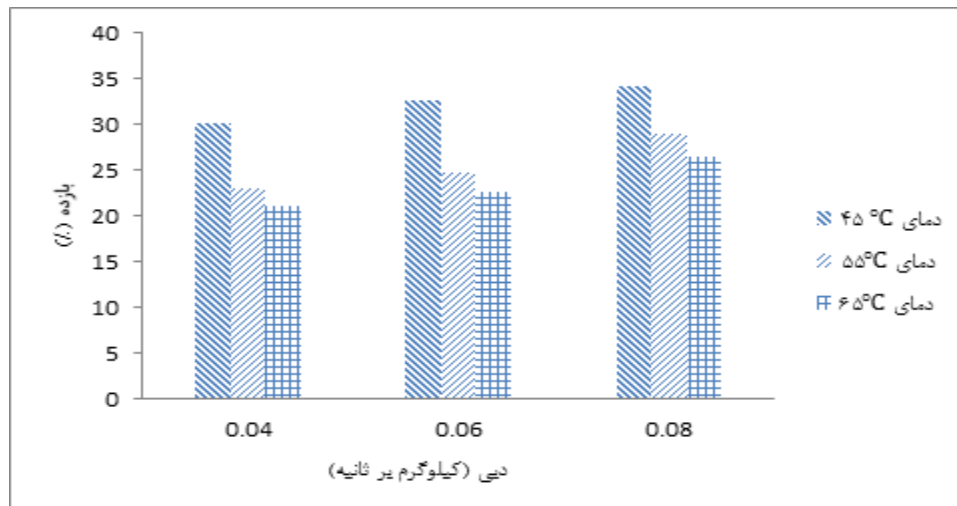
در شکل ۵ تغییر دمای هوای ورودی به خشک‌کن هنگام عبور از مبدل حرارتی در دبی‌های گوناگون و دمای هوای خشک‌کننده ۶۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش دبی عبوری خشک‌کن، افزایش دمای



شکل ۵. تغییر دمای هوای ورودی هنگام عبور از مبدل حرارتی در دمای هوای خشک‌کننده ۶۵ درجه سلسیوس

دبی هوای عبوری، بازده جمع‌کننده تا حدودی افزایش یافت که دلیل اصلی آن، افزایش ضریب انتقال حرارت هوای عبوری با زیاد شدن سرعت آن است. با زیاد شدن دمای خشک‌کردن هم بازده جمع‌کننده دچار افت شد. دلیل این امر، افزایش دمای هوای ورودی به جمع‌کننده، با افزایش دمای هوای خشک‌کننده است (شکل ۳) که کاهش بازده جمع‌کننده را به دنبال دارد. نتایج مشابهی توسط (Ho et al., Ben-Amara et al., 2005; Hu et al., 2011; González et al., 2014) گزارش شده است.

در شکل ۶ بازده جمع‌کننده در سه دبی و سه دمای مختلف هوای خشک‌کننده با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، بازده جمع‌کننده بین ۳۱ تا ۳۶ درصد تغییر کرد و میانگین آن در طول مدت آزمایش ۳۴ درصد محاسبه شد. بازده جمع‌کننده خورشیدی به جنس و رنگ صفحه جاذب نور خورشید، نوع پوشش شیشه‌ای، میزان عایق کاری آن، و دمای هوای ورودی بستگی دارد. در پژوهشی دیگر، متوسط بازده جمع‌کننده خورشیدی در دبی حجمی هوای عبوری ۰/۰۸۵ کیلوگرم بر ثانیه برابر ۳۱ درصد محاسبه شد (Dadashzadeh et al., 2008). با توجه به شکل ۶ با افزایش



شکل ۶. تغییرات بازده جمع‌کننده دبی و دماهای گوناگون هوای خشک‌کننده

کل محاسبه شده است. نتایج آنالیز واریانس، تأثیر دما، و دبی هوای خشک کننده بر انرژی مصرفی، سهم خورشیدی، و سهم انرژی بازیافتی در جدول ۱ آورده شده است.

انرژی لازم برای خشک شدن محصول، شامل انرژی الکتریکی مصرفی (انرژی لازم برای گرم کن کمکی و مکنده موجود) و انرژی فراهم شده توسط جمع کننده خورشیدی در هر یک از تیمارهای آزمایش، به تفکیک اندازه گیری و انرژی مصرفی

جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر دما و دبی هوای خشک کننده بر انرژی مصرفی، سهم خورشیدی، و سهم انرژی بازیافتی

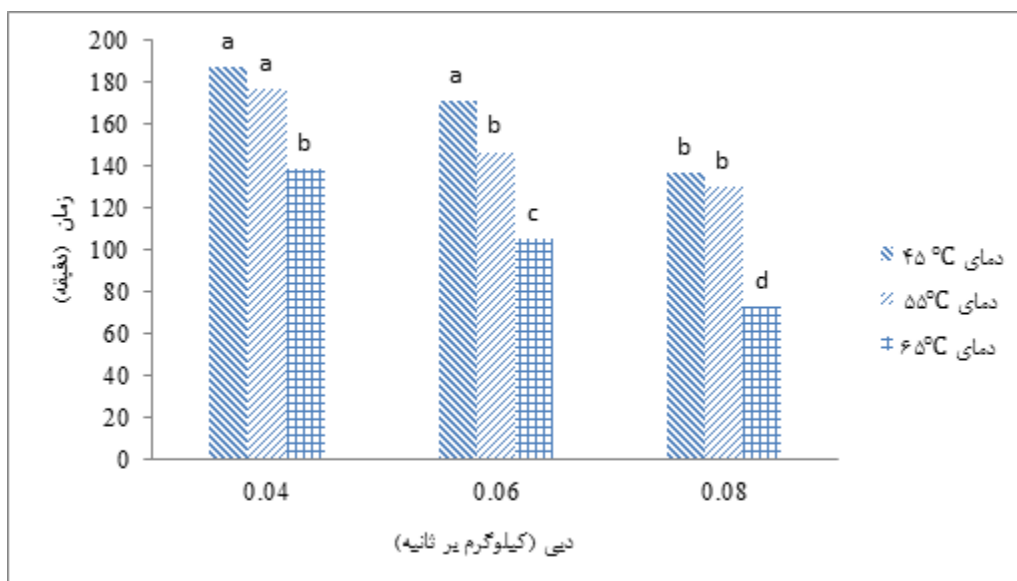
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		سهم انرژی بازیافتی	سهم خورشیدی	انرژی کل
دما	۲	۱/۲۴۵**	۰/۰۲۵**	۶/۵۲۳×۱۰ <sup>۱۲</sup> **
دبی	۲	۰/۴۸۴**	۹/۰۵۵×۱۰ <sup>-۵ns</sup>	۲/۰۹۱×۱۰ <sup>۱۲</sup> **
دما×دبی	۸	۰/۵۰۴**	۰/۰۰۷**	۲/۴۲۶×۱۰ <sup>۱۲</sup> **
خطا	۱۸	۰/۱۱۵	۰/۰۰۱	۴۵۶۶۰۲۳۰۴۷۹
زمان				۱۱۹/۵۱۹

\*\* و ns به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال ادرصد و عدم اختلاف معنی دار

از سطح محصول و خشک شدن سریع تر آن می شود. با افزایش دبی جریان عبوری از ۰/۰۴ به ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه، زمان خشک شدن ۳۲ درصد کاهش پیدا کرد. با افزایش دبی، رطوبت محصول سریع تر از خشک کن خارج می شود که این امر دلیل بر کاهش زمان خشک شدن است. این نتایج مطابق با یافته های پیشین است ( Fatouh et al., 2006; Vega-Gálvez et al., 2012; Ortiz et al., 2013; Ahmad-Qasem et al., 2013). در مجموع کمترین زمان خشک شدن، ۷۳ دقیقه بود که در دبی ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه با دمای خشک کنی ۶۵ درجه سلسیوس مشاهده شد.

با توجه به جدول ۱ اثر دما بر زمان، انرژی کل، سهم خورشیدی، و سهم انرژی بازیافتی در سطح ادرصد معنی دار شده است. دبی هوای عبوری بر زمان، انرژی کل، و سهم انرژی بازیافتی در سطح ادرصد اثر معنی دار گذاشته ولی تأثیر آن بر سهم خورشیدی معنی دار نشده است.

با توجه به شکل ۷ با افزایش دما زمان خشک شدن کوتاه تر شد. به طوری که، افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس به کاهش ۵۶ درصدی زمان خشک شدن انجامید. علت آن است که با زیاد کردن دمای خشک کردن اختلاف فشار جزئی بین هوا و محصول افزایش می یابد، که باعث بهبود سرعت تبخیر



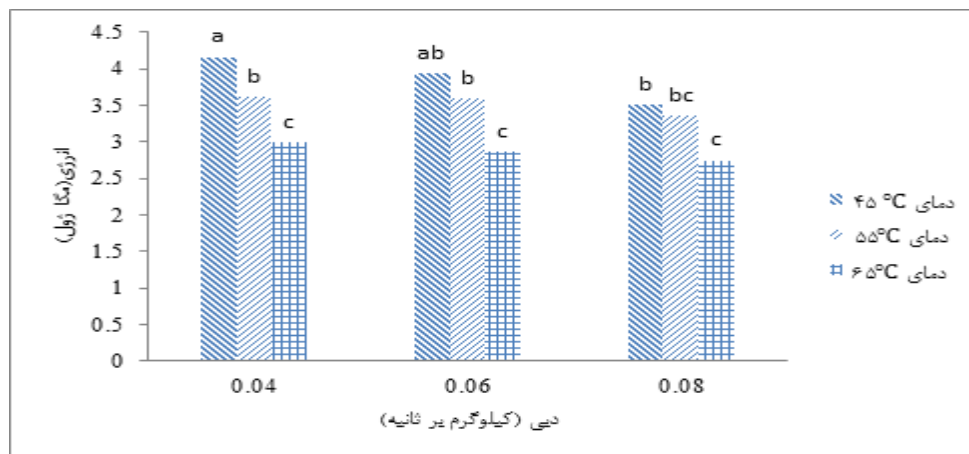
شکل ۷. اثر دما و دبی هوای خشک کننده بر زمان خشک شدن

تغییرات مجموع انرژی مصرفی فرایند خشک شدن محصول در شرایط گوناگون هوای خشک کننده، در شکل ۸ ارائه

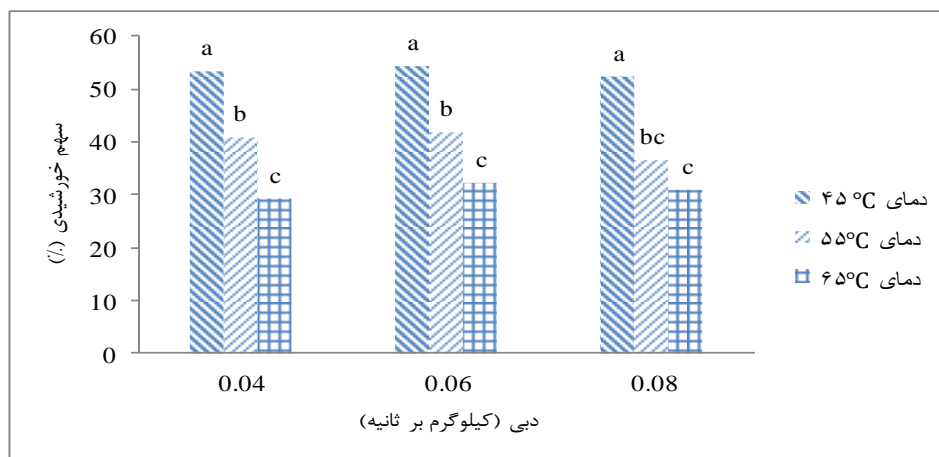
دارد و از طرف دیگر، بالا بردن دبی هوای عبوری با کاهش زمان خشک کردن (و در واقع کاهش فرصت استفاده از انرژی خورشیدی)، موجب افت سهم خورشیدی می‌شود. این امر باعث شده است که در مجموع افزایش دبی هوای عبوری اثر معنی‌داری بر سهم خورشیدی نداشته باشد. همچنین با افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، سهم خورشیدی ۲۴ درصد کم شد. بالا بردن دمای خشک کردن، با توجه به آنچه بیان شد، موجب کاهش بازده جمع‌کننده خورشیدی می‌شود. افزون بر آن، با افزایش دمای هوای خشک‌کننده، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد که این دو عامل در مجموع کاهش سهم خورشیدی را در پی دارند. که این نتایج مطابق با یافته‌های (Mortezapour *et al.*, 2012) است. در نهایت می‌توان گفت، بیشترین سهم خورشیدی در شرایط گوناگون خشک کردن، ۵۶ درصد است که در دبی ۰/۰۶ کیلوگرم بر ثانیه و دمای هوای خشک‌کننده ۴۵ درجه سلسیوس مشاهده شد.

شده است. با توجه به این شکل، با افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس، انرژی مصرفی کل ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. از آنجا که مصرف انرژی در خشک‌کن رابطه مستقیم با زمان خشک شدن محصول دارد و با افزایش دمای خشک کردن، زمان خشک شدن محصول کاهش می‌یابد، در نتیجه انرژی مصرفی کم شده است. با افزایش دبی جریان عبوری از ۰/۰۴ به ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه انرژی مصرفی ۱۰ درصد کاهش یافت که دلیل اصلی آن کوتاه شدن زمان خشک کردن با زیاد شدن دبی هوای عبوری است. نتایج مشابهی نیز توسط (Mortezapour *et al.* (2006) & Fatouh *et al.* (2012) گزارش شده است.

اثر تغییرات دما و دبی هوای خشک‌کننده بر سهم خورشیدی در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با توجه به شکل دبی تأثیر معنی‌داری بر سهم خورشیدی ندارد. با توجه به آنچه گفته شد، افزایش دبی هوای عبوری، از یک طرف سبب بهبود بازده جمع‌کننده می‌شود که افزایش سهم خورشیدی را در بر



شکل ۸. اثر دما و دبی هوای خشک‌کننده بر انرژی مصرفی



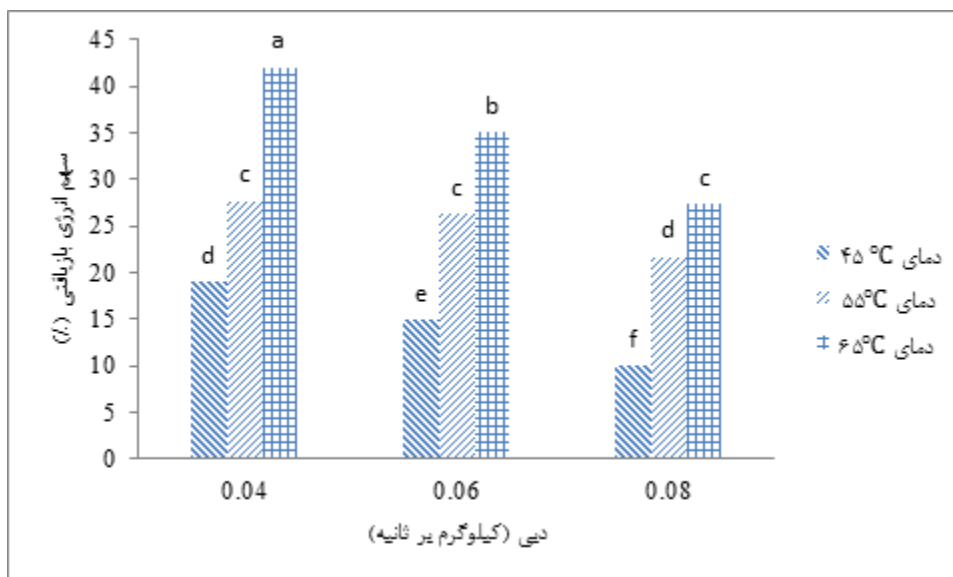
شکل ۹. اثر دما و دبی هوای خشک‌کننده بر سهم خورشیدی

نحوه تغییر سهم انرژی بازیافتی در شرایط گوناگون خشک کردن، در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به شکل



عبوری خشک کن، باعث می شود که هوا زمان کمتری با مبدل حرارتی در تماس باشد که این امر باعث کاهش انرژی بازیافتی می شود. در مجموع، بالاترین سهم انرژی بازیافتی ۴۲ درصد بود که در دبی ۰/۰۴ کیلوگرم بر ثانیه و دمای ۴۵ درجه سلسیوس محاسبه شد.

افزایش دما از ۴۵ به ۶۵ درجه سلسیوس باعث شد، انرژی بازیافتی ۲۰ درصد افزایش یابد. با افزایش دمای خشک کردن، همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شد، تغییر دمای هوای ورودی هنگام عبور از مبدل حرارتی اول و در نتیجه نرخ انتقال حرارت از مبدل به هوا افزایش می یابد. افزایش دبی هوای عبوری از ۰/۰۴ به ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه باعث شد که سهم انرژی بازیافتی ۱۰ درصد کاهش پیدا کند. افزایش دبی هوای



شکل ۱۰. اثر دما و دبی هوای خشک کننده بر سهم انرژی بازیافتی

کاهش ۳۲ درصدی زمان خشک شدن، صرفه جویی ۱۰ درصدی در انرژی مصرفی، و کاهش ۱۰ درصدی انرژی بازیافتی شد. افزایش دما، کاهش بازده جمع کننده، و افزایش دبی، افزایش بازده آن را به دنبال داشت. میانگین بازده جمع کننده ۳۴ درصد به دست آمد.

در نهایت با توجه به اینکه اکثر خشک کن های استفاده شده در صنعت، برای خشک کردن محصولات کشاورزی و صنایع غذایی، از نوع جریان هوای گرم هستند، که در آن ها بخش شایان توجهی از انرژی داده شده به جریان هوای خشک کننده، به هدر می رود، استفاده از سامانه بازیافت حرارتی می تواند راه حل مناسبی در زمینه کاهش مصرف سوخت و بهبود بازده انرژی در این خشک کن ها به شمار آید.

## نتیجه گیری

به منظور فراهم کردن سامانه ای برای خشک کردن محصولات کشاورزی، خشک کن خورشیدی مجهز به سامانه بازیافت حرارتی ساخته شد. اثر تغییر دما در سه سطح ۴۵، ۵۵، و ۶۵ درجه سلسیوس و دبی هوای عبوری در سه سطح ۰/۰۴، ۰/۰۶، و ۰/۰۸ کیلوگرم بر ثانیه بر عملکرد خشک کن مورد نظر طی آزمایش هایی بررسی شد. نتایج به دست آمده از تحقیق به طور خلاصه عبارت اند از:

افزایش دمای هوای خشک کننده در دامنه مطالعه شده، باعث کاهش زمان متوسط خشک شدن از ۱۶۴ به ۱۰۵ دقیقه، صرفه جویی ۲۵ درصدی در انرژی مصرفی، افت ۲۴ درصدی سهم خورشیدی، و ۲۰ درصد افزایش در بازیافت انرژی شد. افزایش دبی جریان عبوری در محدوده مطالعه شده، باعث

## REFERENCES

Aghkhani, M. H., Abbaspour-fard, M. H., Bayat, M. R., Morteza-pour, H. Saedi, S. I. and Moghimi, A., (2013). Performance Analysis of a Solar Dryer Equipped with a Recycling Air System and Desiccant Chamber. *Journal of Agricultural*

*Machinery*, 3 (2), 92-103. (In Farsi)  
Ahmad-Qasem, M. H., Barrajon-Catalan, E., Micol, V., Cárceles, J. A. and Garcia-Perez, J. V. (2013). Influence of air temperature on drying kinetics and antioxidant potential of olive pomace.

- Journal of Food Engineering*, 119, 516-524
- Altobelli, F., Condorí, M., Duran, G. and Martinez, C. (2014). Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina. *Solar Energy*, 105, 742-759
- Banout, J., Ehl, P., Havlik, J., Lojka, B., Polesny, Z., and Verner, V. (2011). Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum L.*). *Solar Energy*, 85, 506-515
- Ben-Amara, M., Houcine, I., Guizani, A. A. and Maalej, M. (2005). Efficiency investigation of a new-design air solar plate collector used in a humidification–dehumidification desalination process. *Renewable Energy*, 30, 1309-1327
- Biondi, P., Cicala, L., and Farina, G. (1988). Performance analysis of solar air heaters of conventional design. *Solar Energy*, 41, 101-107
- Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., and Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, 83, 2223-2232
- Dadashzadeh, M., Zomorrodian, A., and Mesbahi, G. (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*, 22, 23-34.
- Ekechukwu, O. V., and Norton, B. (1997). Design and measured performance of a solar chimney for natural-circulation solar-energy dryers. *Renewable Energy*, 10, 81-90.
- Ekechukwu, O. V., and Norton, B. (1998). Review of solar energy drying systems II: an over view of solar drying technology. *Energy Conservation and Management*. 615 -655.
- Fatouh, M., Metwally, M. N., Helali, A. B., and Shedid, M. H. (2006). Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy Conversion and Management* 47, 2629-2643.
- Golluce, M., Sahin, F., Sokmen, M., Ozer, H., Daferera, D., Sokmen, A., Polissiou, M., and Adiguzel, A. and Ozken. H. (2007). Antimicrobial and antioxidant properties of the essential oils and methanol extract from *Mentha longifolia L.ssp.longifolia*. *Food Chemistry*, 103, 1449-1456.
- González, S.M., Larsen, S.F.,Hernández, A. and Lesino, G. (2014). Thermal Evaluation and Modeling of a Double-pass Solar Collector for Air Heating. *Energy Procedia*, 57, 2275-2284.
- Ho, C.-D., Yeh, H. M. and Chen, T. C. (2011). Collector efficiency of upward-type double-pass solar air heaters with fins attached. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 49-56.
- Hu, J., Sun, X., Xu, J. and Li, Z. (2013). Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles. *Energy and Buildings*, 62, 230-238.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Koyuncu, T. (2006). Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*, 31, 1073-1088.
- Lamnatou, C., Papanicolaou, E., Belessiotis, V., and Kyriakis, N. (2012). Experimental investigation and thermodynamic performance analysis of a solar dryer using an evacuated-tube air collector. *Applied Energy*, 94, 232-243.
- Mortezapour, H., Ghobadian, B., Minaei, S., and Khoshtaghaza, M. H. (2012). Saffron Drying with a Heat Pump–Assisted Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Dryer. *Drying Technology*, 30, 560-566
- Ortiz, J., Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Puente-Diaz, L., Zura-Bravo, L. and Aubourg, S. (2013). Influence of air-drying temperature on drying kinetics, colour, firmness and biochemical characteristics of Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) fillets. *Food Chemistry*, 139,162-169.
- Punlek, C., Pairintra, R., Chindaraksa, S., and Maneewan, S. (2009). Simulation design and evaluation of hybrid PV/T assisted desiccant integrated HA-IR drying system (HPIRD). *Food and Bioproducts Processing*, 87, 77-86.
- Rocha, T., Marty-Audouin, C. and Lebert, A. (1993). Effect of drying temperature and blanching on the degradation of chlorophyll a and b in mint (*Mentha spicata Huds.*) and basil (*Ocimum basilicum*): Analysis by high performance liquid chromatography with photodiode array detection. *Chromatographia*, 36, 152-156.
- Therdthai, N. and Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia Opiz ex Fresen*). *Journal of Food Engineering*, 91, 482-489.
- Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R. and Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132, 51-59.
- Zomorrodian, A., and Barati, M. (2010). Efficient solar air heater with perforated absorber for crop drying. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 569-577.