

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری

نیکروز باقری*، علیرضا کیهانی، سید سعید محتسبی و رضا علیمردانی**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ص. پ. ۴۱۱۱، تلفن: ۰۲۶۱(۰۲۶۱)۲۸۰۸۱۳۸،

پيام‌نگار: nikroozbagheri@yahoo.com.au

** به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ استاد؛ و دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی

دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۳/۳؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۲۳

چکیده

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن محصول به منظور ارزیابی و بررسی دقیق عملکرد سیستم در شرایط واقعی ضروری است. برای بررسی عملکرد خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری طراحی شده جهت خشک کردن سبزی‌های برگی و گیاهان دارویی، یک سیستم پایش ساخته شد. که در آن چند حسگر دما دیجیتالی در نقاط ورودی هوا به جمع‌کننده، خروجی هوا از استفاده از خروجی هوا از محفظه خشک‌کن قرار داده شده است. برای ثبت اطلاعات حسگرها و انجام محاسبات، برنامه‌ای با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک ۶ نوشته شد. آزمایش‌ها در سه تکرار و هر تکرار به مدت ۸ ساعت از ۱۰ صبح تا ۶ بعد از ظهر در فصل تابستان اجرا شد. در تمامی آزمایش‌ها، محصول (نعنا) به ارتفاع ۵ سانتی‌متر روی سینی‌های محفظه خشک‌کن قرار داده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که انرژی تابشی در صفحه جمع‌کننده، انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده، و انرژی لازم برای تبخیر محصول رابطه‌ای خطی و مستقیم با دما دارند و نیز در فرایند خشک‌شدن، انرژی تابشی ابتدا روند افزایشی و سپس کاهش‌ی دارد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها همچنین نشان می‌دهد که میانگین دماها در ورودی جمع‌کننده، خروجی جمع‌کننده، و خروجی هوا از محفظه خشک‌کن به ترتیب ۳۸/۱، ۵۴/۷ و ۴۵/۵ درجه سانتی‌گراد است. میانگین حداکثر و حداقل بازده انرژی در آزمایش‌ها به ترتیب ۴۹ و ۱۴/۷ درصد و دامنه نوسانات آن در محدوده ۱۴ تا ۵۳ درصد است. میانگین انرژی تابشی و انرژی لازم برای تبخیر رطوبت محصول به ترتیب ۴/۵۷۲ و ۲/۲۷۷۲ کیلوژول به دست آمد. منحنی خشک شدن محصول نیز به صورت رابطه‌ای نمایی با رابطه $M_{wb} = 1.827e^{-0.4857t}$ و $R^2 = 0.945$ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

پارامترهای خشک کردن، پایش، خشک‌کن خورشیدی، همرفت اجباری

مقدمه

این پارامترها، ضمن آنکه نحوه خشک‌شدن محصول، تعیین بهترین شرایط کاری دستگاه، ارزیابی کارایی خشک‌کن، و تشخیص نحوه بهینه‌سازی را اطلاع می‌دهد می‌تواند گامی نخست برای کنترل فرایند خشک‌شدن نیز به حساب آید.

ایوانوا و آنتونوف (Ivanoa & Andonov, 2001) یک مدل رطوبت-دما را برای خشک‌کن خورشیدی همرفت

در به‌کارگیری انرژی خورشید برای خشک کردن محصولات غذایی مختلف تاکنون پژوهش‌های گوناگونی شده است. اغلب این پژوهش‌ها در زمینه طراحی و ساخت انواع خشک‌کن‌های خورشیدی بوده اما در خصوص پارامترهای مؤثر بر خشک‌شدن محصول در این خشک‌کن‌ها مطالعات کمتری صورت گرفته است. بررسی

موج‌دار را مطالعه کردند. این محققان با تعیین بده بهینه برای هوای عبوری از جمع‌کننده و تأثیر آن بر کارایی جمع‌کننده، بهترین شرایط کاری این سه نوع جمع‌کننده را به دست آوردند. نتایج نشان داد که جمع‌کننده نوع موج‌دار بالاترین بازده و نوع صفحه تخت کمترین بازده را دارد.

عرفانی‌فر و زمردیان (Erfani far & Zomorodian, 2005) تأثیر دو نوع پوشش شیشه‌ای پله‌ای و تخت را بر بازده حرارتی یک هوا گرم‌کن خورشیدی با جاذب متخلخل در بده‌های مختلف هوا ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش بده جرمی هوا موجب افزایش بازده حرارتی هر دو نوع پوشش می‌شود و بازده حرارتی هوا گرم‌کن با پوشش پله‌ای در تمام بده‌های مورد آزمایش از نوع پوشش تخت بیشتر است. بیشترین بازده حرارتی هوا گرم‌کن با پوشش پله‌ای و تخت به ترتیب ۶۳ و ۵۱ درصد به دست آمد.

زارع و همکاران (Zare et al., 2005)، در یک خشک‌کن نیمه پیوسته خورشیدی تأثیر بده جرمی هوای ورودی و زمان تخلیه محصول را بر روند کاهش رطوبت شلتوک بررسی کردند. نتایج نشان داد که بده جرمی هوای خشک‌کننده و فاصله زمانی تخلیه محصول، اثر معنی‌داری بر کاهش رطوبت شلتوک خروجی دارد.

کارسلی (Karsli, 2006) با تجزیه و تحلیل عملکرد ۴ نوع جمع‌کننده خورشیدی تخت هواگرم، رابطه بین برخی از پارامترهای مؤثر بر خشک‌شدن محصول را در خشک‌کن و به ویژه جمع‌کننده به دست آورد. در این تحقیق قوانین اول و دوم بازده برای جمع‌کننده‌ها تعیین و مقایسه شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بازده جمع‌کننده‌ها وابسته به تابش خورشید و ساختمان جمع‌کننده است و با افزایش تابش، دما به صورت خطی افزایش می‌یابد.

باها و همکاران (Baha et al., 2007) رفتار یک خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی را که برای خشک کردن محصولات نظیر انبه و موز طراحی شده بود بررسی

اجباری طراحی شده برای خشک کردن میوه و سبزی ارائه دادند. این محققان پارامترهای مؤثر بر خشک‌شدن محصول، از قبیل انرژی تابشی خورشید، دما، رطوبت هوای محیط، و سرعت هوا را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدل ارائه شده برای بررسی رفتار خشک‌شدن محصول مناسب است.

یلدیز و همکاران (Yaldiz et al., 2001) یک مدل ریاضی برای خشک‌شدن انگور در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری غیر مستقیم به دست آوردند. در این پژوهش مقادیر مختلف دما و سرعت هوا بر ثابت‌ها و ضرایب مدل با استفاده از مدل‌های رگرسیونی بررسی و با توجه به مقدار ضریب همبستگی، بهترین مدل انتخاب شد.

بنامون و بلهامری (Bennamoun & Belhamri, 2002) به مطالعه پارامترهای یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری پرداختند و از جمع‌کننده صفحه تخت و از گرم‌کننده‌های الکتریکی به عنوان منبع حرارتی کمکی استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش سطح جمع‌کننده حرارت بیشتری ایجاد می‌کند که این امر به کاهش زمان خشک‌شدن می‌انجامد. نتایج دیگر نشان داد که افزودن گرم‌کن، به ویژه در شرایط جوی نامناسب، موجب افزایش بازده خشک‌کن می‌شود.

زمردیان و علامه (Zomorodian & Allameh, 2002) فرایند خشک‌شدن برنج را به صورت لایه نازک در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی مختلط بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بستر با ضخامت ۲ سانتی‌متری شرایط بستر لایه نازک را برای خشک کردن با استفاده از این نوع خشک‌کن داراست و دلیل یکنواخت نبودن خشک‌شدن نیز مربوط به نوع محصول و حالت توزیع دما در محفظه خشک‌کن شد.

کریم و هاوالادر (Karim & Hawlader, 2003) سه نوع جمع‌کننده خورشیدی با صفحه جاذب تخت، پره‌دار، و

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

گرافیکی می‌تواند در طراحی خشک‌کن‌های خورشیدی ابزاری مهم باشد.

هدف از این پژوهش، تعیین پارامترهای مؤثر بر خشک‌شدن نعنا در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری، بررسی اثر این پارامترها بر یکدیگر، و ارزیابی عملکرد خشک‌کن است. از نتایج این پژوهش برای انتخاب پارامترهای مناسب جهت کنترل فرایند خشک‌شدن محصول با استفاده از یک سیستم کنترل خودکار استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

پارامترهای اصلی مؤثر بر خشک‌شدن محصول که در این پژوهش اندازه‌گیری و ارزیابی شدند عبارت‌اند از: دمای هوای ورودی به جمع‌کننده (T_1)، دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن (T_2)، دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن (T_3)، انرژی تابشی در سطح جمع‌کننده (I_t)، بازده انرژی خشک‌کن (E)، انرژی حرارتی جذب شده در صفحه جمع‌کننده (Q_{co})، انرژی مورد نیاز برای تبخیر محصول (Q_{out})، و تغییرات رطوبت محصول (M_{wb}). خشک‌کن مورد نظر دو قسمت اصلی دارد: جمع‌کننده و محفظه خشک‌کن. سطح جمع‌کننده انرژی خورشیدی از پروفیل آلومینیم و نوع صفحه تخت پره‌دار به ابعاد $1 \times 1/83$ متر است. زاویه شیب جمع‌کننده به راحتی بین ۳۲ و ۳۶ درجه تغییر می‌کند.

محفظه خشک‌کن از آلومینیم و ورق گالوانیزه و دارای دو عدد سینی و یک فن مکنده است. اتصال محفظه خشک‌کن به جمع‌کننده از طریق یک کانال از جنس پارچه برزنتی ضد آب است که به طور ثابت روی محفظه نصب شده است. فن انتخاب شده از نوع لوله‌ای جریان محوری با قطر پروانه ۱۲ سانتی‌متر

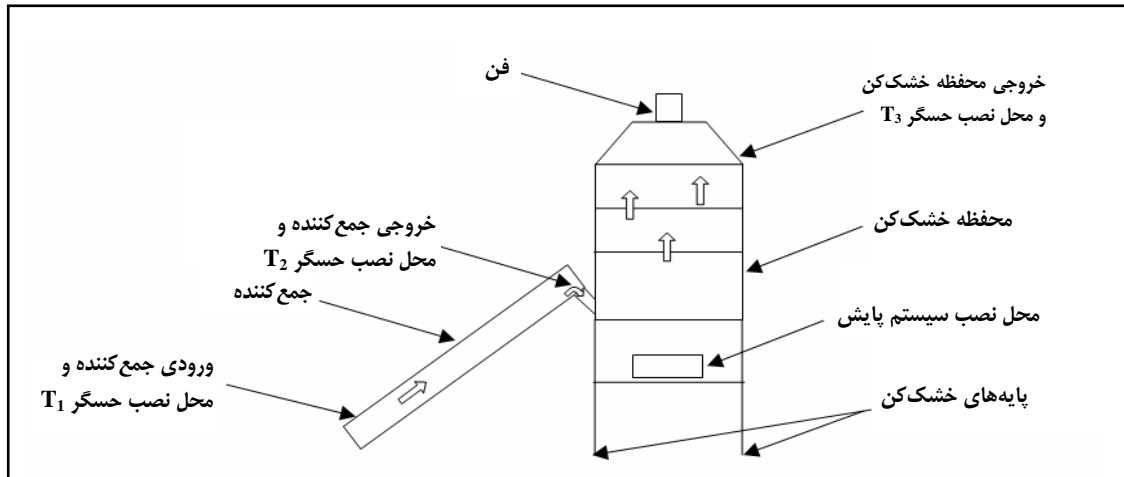
کردند. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای مهم در عملکرد خشک‌کن از قبیل دمای محیط، انرژی تابشی، بده هوا، و غیره مطالعه شد. نتایج نشان داد که دمای هوا مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر سینتیک خشک‌شدن است و با افزایش دمای محیط و بده هوا، سرعت خشک‌شدن افزایش می‌یابد. این محققان روابط تجربی را برای پارامترهای مختلف در فرایند خشک‌شدن به دست آوردند و نیز نشان دادند که مدت زمان لازم برای خشک‌شدن موز و رسیدن رطوبت اولیه آن از ۸۰ درصد به ۱۳ درصد، ۱۹ تا ۲۲ ساعت است.

داداش‌زاده و همکاران (Dadashzadeh *et al.*, 2008)

عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی کابینتی همرفت اجباری را که برای خشک کردن سبزی و میوه طراحی شده بود ارزیابی کردند. بررسی تأثیر بده هوای خشک‌کن و نحوه به‌کارگیری آن بر روند کاهش رطوبت انگور و یکنواختی فرایند خشک‌شدن روی سینی‌ها و بین سینی‌ها نشان داد که مدت زمان لازم برای خشک‌شدن محصول چهار روز و هر روز به مدت ۶ ساعت و میانگین شدت تابش انرژی خورشید ۸۷۰ وات بر متر مربع است. همچنین مشخص شد که بده هوا اثر معنی‌داری بر کاهش رطوبت محصول دارد و اختلاف اثر مکان نمونه‌برداری در بین سینی‌ها معنی‌دار و در داخل سینی‌ها غیر معنی‌دار است.

تری پاتی و کمار (Tripathy & Kumar, 2009) با استفاده از ضرایب دیفیوژن رطوبت و انتقال جرم و کاربرد روشی گرافیکی، فرایند خشک‌شدن در یک خشک‌کن خورشیدی همرفت طبیعی را شبیه‌سازی کردند و ضرایب مفروض را با به‌کار بردن پارامترهای متغیر خشک کردن به دست آوردند. نتایج نشان داد که در طول فرایند خشک‌شدن، دیفیوژن رطوبت و ضرایب انتقال جرم با افزایش دمای محصول، افزایش می‌یابد و تعیین ضرایب انتقال جرم و پارامترهای خشک‌کن با استفاده از روش

و مشخصات آن چنین است: بده هوا: ۲۱۰ متر مکعب در ساعت، توان مصرفی: ۳۸ وات، ولتاژ: ۲۲۰ ولت، جریان: ۰/۲۵ آمپر، دور بر دقیقه اسمی: ۲۳۰۰، فشار استاتیکی: ۸ میلی‌متر ستون آب و فرکانس: ۵۰ هرتز - AC (Soheili et al., 2006). شکل ۱ طرح‌واره خشک‌کن و مسیر حرکت هوا در آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱- طرح‌واره خشک‌کن و مسیر حرکت هوا در آن

انجام شده در نرم‌افزار اکسل را دارد. برنامه‌نویسی میکروکنترلر نیز با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C و کامپایلر AVR CodeVision انجام و توسط پروگرامر در حافظه FLASH میکروکنترلر ذخیره شد. به منظور پایش پارامترهای مورد مطالعه، یک سیستم پایش طراحی شد. اجزای این سیستم عبارتند از: میکروکنترلر ATMEGA 8535-16 PI، حسگرهای دما دیجیتال SMT160-30 (برای انتقال داده در فواصل زیاد با دقت ± 0.7 درجه سانتی‌گراد)، رگولاتور ۵ ولت 7805cv (به منظور تأمین ولتاژ در محدوده کاری حسگرها)، کریستال ۱۶ مگاهرتز (برای ایجاد پالس)، مدار مجتمع MAX 232 (برای تبدیل پالس‌های ایجاد شده با میکروکنترلر به پالس‌های مورد استفاده در استاندارد RS232)، و آداپتور 9V برای تغذیه سیستم.

برای کسب اطمینان از دقت مدل ارائه شده و ارزیابی حسگرها در اندازه‌گیری دماها، از ترموکوپل Nicr-Ni با حساسیت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. این

تمامی آزمایش‌ها در ۳ روز کاملاً آفتابی و گرم شهرستان کرج در نیمه دوم تیرماه به مدت ۸ ساعت (از ساعت ۱۰ صبح تا ۶ بعد از ظهر) اجرا شد. نعنای محصول مورد آزمایش روی سینی‌های خشک‌کن به ضخامت ۵ سانتی‌متر کاملاً پهن شد. برای پایش دما از حسگرهای دما دیجیتال استفاده شد. حسگر دما T_1 برای اندازه‌گیری دمای هوا در ورودی جمع‌کننده (دمای محیط)، حسگر دما T_2 برای اندازه‌گیری دمای هوای در خروجی جمع‌کننده، و حسگر دما T_3 برای اندازه‌گیری دمای هوای خروجی از محفله خشک‌کن به کار رفت. محل نصب این حسگرها در شکل ۱ نشان داده شده است. تایمر سیستم به گونه‌ای تنظیم شد تا این حسگرها داده‌های دما را در هر ثانیه بخوانند و ثبت کنند.

برای ثبت اطلاعات دما از طریق حسگرها و انجام دادن محاسبات، از نرم‌افزار ویژوال بیسیک ۶ استفاده و یک برنامه با واسط گرافیکی طراحی و پیاده‌سازی شد. این برنامه قابلیت ذخیره خودکار اطلاعات و محاسبات

بایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

گرمای نهان ویژه تبخیر از اندازه‌گیری میانگین دمای هوا در محفظه خشک‌کن (دماهای T_2 و T_3) و استفاده از جداول ترمودینامیکی بخار آب اشباع به دست آمد و برابر با $2443/4$ کیلوژول بر کیلوگرم است.

محاسبه مجموع انرژی تابشی در صفحه جمع‌کننده

مقدار انرژی تابشی در سطح جمع‌کننده برابر با انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده است (Duffie & Beckman, 1991) که عبارت است از:

$$\sum I_t \cdot A_c = \sum \frac{Q_{co}}{E_c} \quad (2)$$

که در آن،

$I_t \cdot A_c$ = مجموع انرژی تابشی در صفحه جمع‌کننده (کیلوژول)؛ Q_{co} = انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده (کیلوژول)؛ و E_c = بازده جمع‌کننده است که این مقدار برای خشک‌کن مورد نظر ۴۰ درصد است (Soheili et al., 2006).

طبق معادله موازنه انرژی که از جذب رطوبت توسط هوا طی فرایند اشباع بی‌دررو (آدیباتیک) به دست می‌آید (Singh & Heldman, 2009):

$$Q_{co} = M \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

که در آن،

M = جرم هوا، مخلوط هوای خشک و تر (کیلوگرم)؛ C_p = گرمای ویژه هوا در فشار و محدوده دمایی مورد نظر $1/004$ کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلونین؛ T_2 = دمای هوای خروجی از جمع‌کننده (درجه سانتی‌گراد)؛ و T_1 = دمای هوای ورودی به جمع‌کننده (درجه سانتی‌گراد) است.

ترموکوپل در نقاط اندازه‌گیری دما توسط حسگرها قرار داده شد و هر پنج دقیقه اعداد دما ثبت و از این طریق با اعداد حسگرها مقایسه شدند. نتایج، ضریب همبستگی $R^2 = 0/99$ را بین مقادیر دمای حسگرها و ترموکوپل نشان داد. بنابراین می‌توان از نحوه دقت دستگاه در طول آزمایش اطمینان داشت.

برای تعیین تغییرات رطوبت در طول فرایند خشک‌شدن، در فواصل زمانی یک ساعته از سه قسمت سینی پایینی، سه نمونه نعنای برداشته شده و پس از وزن کردن با ترازوی دیجیتالی دقیق (دقت $\pm 0/1$ گرم) به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای 10.3 درجه سلسیوس در ظروف جداگانه خشک شد.

محاسبات

بازده انرژی کل خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری

بازده کلی سیستم خشک‌کن، کسری از مقدار انرژی کل است که صرف تبخیر آب محصول می‌شود. انرژی کل در خشک‌کن‌های خورشیدی همرفت اجباری مجموع انرژی تابشی رسیده به جمع‌کننده و انرژی الکتریکی مصرف شده در فن است (Augustus et al., 2002). در نتیجه خواهیم داشت:

$$E = \frac{M_w \cdot L}{I_t \cdot A_c + E_f} \quad (1)$$

که در آن،

E = بازده انرژی کل خشک‌کن خورشیدی، (درصد)؛ M_w = جرم رطوبت تبخیر شده از محصول، (کیلوگرم)؛ L = گرمای نهان ویژه تبخیر (کیلوژول بر کیلوگرم)؛ I_t = انرژی تابشی بر واحد سطح جمع‌کننده (کیلوژول بر متر مربع)؛ A_c = مساحت جمع‌کننده ($1/83$ متر مربع)؛ و E_f = انرژی الکتریکی فن (کیلوژول) است.

$$n = n_w + n_a = 28.96 + 18.01 = 46.97 \quad (7) \quad \text{جرم هوا نیز از رابطه ۴ به دست می‌آید که عبارت}$$

است از:

دبی هوای عبوری از جمع‌کننده برابر است با:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (8) \quad M = \rho \cdot V \quad (4)$$

که در آن،

که در آن،

ρ = چگالی هوا در دمای محیط (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ و Q = دبی هوا (متر مکعب بر ساعت)؛ t = زمان خشک شدن (ساعت)؛ و V = حجم هوای عبوری از جمع‌کننده (متر مکعب) است. V = حجم هوای عبوری از جمع‌کننده (متر مکعب) است. از طرفی، چگالی هوا برابر است با (Holman, 1980):

$$\rho = \frac{P \cdot n}{R \cdot T} \quad (5)$$

سهیلی و همکاران (Soheili et al., 2006) مقدار بده هوا را برای خشک‌کن مورد نظر ۲۰۲/۸ متر مکعب در ساعت به دست آوردند.

که در آن،

برای اندازه‌گیری انرژی تابشی بر واحد سطح جمع‌کننده، ابتدا باید مقدار Q_{co} (انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده) محاسبه شود. به این منظور، دماهای T_1 و T_2 با حسگرهای دما اندازه‌گیری شد. مقدار M از روابط ۴ تا ۸ به دست می‌آید. پس از به دست آوردن Q_{co} و قرار دادن آن در رابطه ۲ مقدار I_t به دست می‌آید.

P = فشار محیط (پاسکال)؛ n = وزن مولکولی هوا (کیلوگرم بر کیلومول)؛ R = ثابت گازها، ۸۱۳۴/۴ ژول بر کیلومول درجه کلونین؛ و T = دمای محیط مورد نظر (و در اینجا دمای هوای ورودی به جمع‌کننده) (کیلوگرم) است. مقدار P نیز از رابطه زیر به دست می‌آید (Anon, 2006):

$$P = 101.325(1 - 2.25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5.2559} \quad (6)$$

که در آن،

انرژی مورد نیاز برای تبخیر رطوبت محصول
طبق معادله موازنه انرژی، انرژی لازم برای تبخیر رطوبت محصول برابر با (Singh & Heldman, 2009):

$$Q_{out} = M_w \cdot L = M \cdot C_p (T_2 - T_3) \quad (9)$$

که در آن،

Z = ارتفاع از سطح دریا است که برای شهرستان کرج ۱۳۱۲/۵ متر در نظر گرفته شد (Soheili et al., 2006). بنابراین، طبق رابطه ۶ فشار برابر ۸۶۵۲۰ پاسکال به دست می‌آید. وزن مولکولی هوا که از مجموع وزن مولکولی هوای خشک و تر به دست می‌آید (Anon, 2006) برابر است با:

T_2 = دمای هوای خروجی از جمع‌کننده (درجه سانتی‌گراد)؛
 T_3 = دمای هوای خروجی محفظه (درجه سانتی‌گراد)؛ و
 Q_{out} = انرژی لازم برای تبخیر محصول (کیلوژول) است.

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

بحث و نتایج

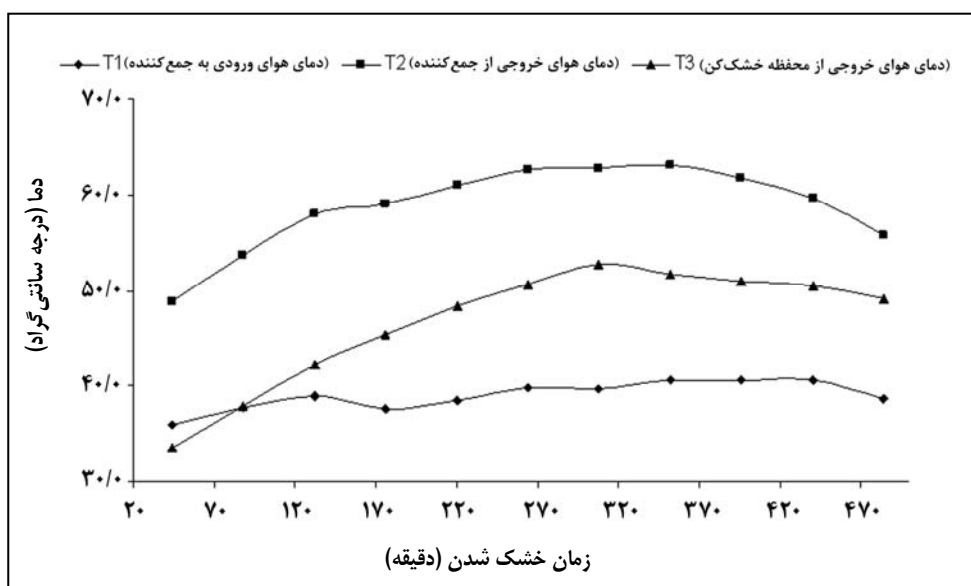
جمع‌کننده، در خروجی جمع‌کننده، و در خروجی محفظه خشک‌کن، تغییرات دمای خشک‌کن در دوره خشک کردن نعنا اندازه‌گیری شد. حسگرها قادر به ثبت داده‌ها در هر یک ثانیه بودند. شکل ۲، نمودار تغییرات میانگین دما را در هر سه آزمایش نشان می‌دهد.

نتایج بررسی تغییرات دما نشان می‌دهد که هر سه دما (دمای هوای ورودی جمع‌کننده، دمای هوای خروجی از جمع‌کننده، و دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن) ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی دارند؛ این نتایج با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Baha et al., 2007; Tripathy & Kumar, 2009) مطابقت دارد.

فرایند کلی خشک کردن نعنا در خشک‌کن خورشیدی همرفت اجباری مورد نظر به این صورت است که ابتدا هوای محیط پس از عبور از جمع‌کننده گرم و به محفظه خشک‌کن منتقل می‌شود. با عبور هوای گرم از محصول پخش شده روی سینی‌های توری، رطوبت آن تبخیر و از طریق مجرای خروجی به بیرون از خشک‌کن منتقل می‌شود. فن مکنده به منظور انتقال سریع تر هوای مرطوب به خارج از خشک‌کن تعبیه شده است.

تغییرات دما در خشک‌کن

با استفاده از حسگرهای نصب شده در ورودی



شکل ۲- نمودار تغییرات دما با زمان خشک شدن

جمع‌کننده است که با بالا رفتن آن، افزایش می‌یابد. در آزمایش‌ها حداکثر، حداقل، و میانگین دما برای T_1 به ترتیب ۴۰/۷، ۳۶، ۳۹ درجه سانتی‌گراد، برای T_2 به ترتیب ۶۳/۱، ۴۸/۸ و ۵۸/۸ درجه سانتی‌گراد و برای T_3 به ترتیب ۵۲/۸، ۳۳/۷ و ۴۶/۷ درجه سانتی‌گراد به دست

دمای هوای ورودی به جمع‌کننده در واقع همان دمای محیط است که در روزهای تابستان با افزایش تابش خورشید بالا می‌رود و با کاهش آن پایین می‌آید. دمای هوای خروجی از جمع‌کننده و دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن نیز تابع دمای هوای ورودی به

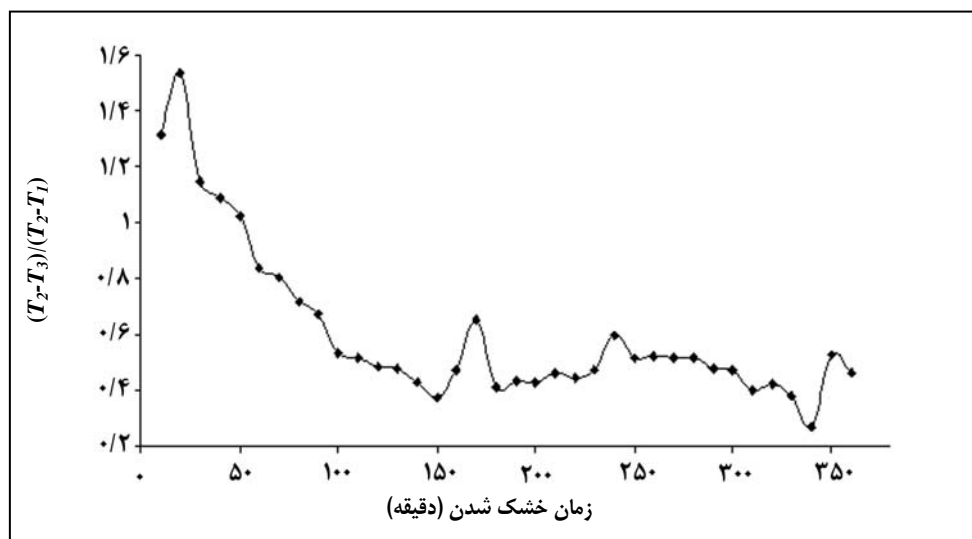
خشک شدن نشان می‌دهد. نمودار نشان‌دهنده نوسانات دمایی زیادی است، اما می‌توان روند این تغییرات را نزولی دانست. تغییر دماها موجب می‌شود که بازده خشک‌کن نیز ثابت نباشد و در فرایند خشک شدن محصول تغییر کند. هر چه صورت کسر (T_2-T_3) از مخرج کسر (T_2-T_1) بیشتر باشد، بازده بیشتر است و محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

در ساعات اولیه آزمایش، به دلیل بالا بودن مقدار T_2 و افزایش سرعت از دست دادن رطوبت محصول، مقدار این کسر بیشتر اما در ساعات آخر خشک شدن محصول (از ساعت ۳ بعد از ظهر به بعد) رو به کاهش است.

آمد. مقایسه میانگین دمای T_1 و T_2 نشان می‌دهد که صفحه جمع‌کننده قادر است به طور میانگین دمای محیط را به میزان $19/8$ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد که به عدد $13/2$ نزدیک است که سهیلی و همکاران به دست آورده‌اند (Soheili et al., 2006).

تغییرات دما در جمع‌کننده و محفظه خشک‌کن با زمان خشک شدن محصول

طبق روابط ۱، ۲، ۳، و ۸ نسبت مقادیر (T_2-T_1) و (T_2-T_3) از عوامل مهم در خشک شدن محصول است و تغییرات آن بر بازده انرژی تأثیر می‌گذارد. شکل ۳ نمودار تغییرات مقدار $\frac{(T_2-T_3)}{(T_2-T_1)}$ را در طول زمان



شکل ۳- تغییرات دما در جمع‌کننده و محفظه خشک‌کن با زمان خشک شدن

ورودی به جمع‌کننده، دمای هوای خروجی از جمع‌کننده، و دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن). سیر نزولی بازده انرژی به دلیل کاهش دماهاست. نتایج نشان می‌دهد که معمولاً در ساعات اول آزمایش که رطوبت اولیه‌ی معنا بالا و میزان تبخیر از سطح محصول زیاد است، مقدار (T_2-T_3) نیز بیشتر و همین امر موجب افزایش بازده خشک‌کن می‌شود.

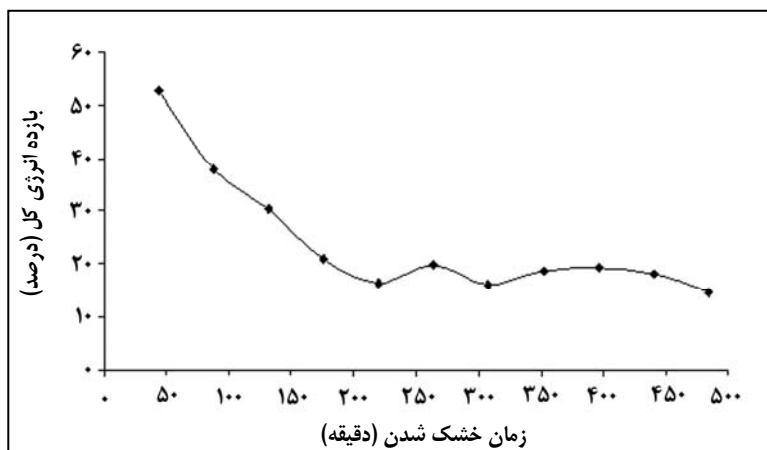
تغییرات بازده انرژی خشک‌کن

شکل ۴، میانگین تغییرات بازده انرژی کل خشک‌کن را در هر سه آزمایش نشان می‌دهد. در شکل می‌بینیم که بازده انرژی با زمان متغیر است و روند نزولی دارد. در پژوهش باها و همکاران (Baha et al., 2007) نیز بر همین موضوع تأکید شده است. متغیر بودن بازده به سبب متغیر بودن دماست (دمای هوای

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

همین امر موجب کاهش بازده محصول می‌شود. مقادیر حداکثر و حداقل بازده انرژی در آزمایش‌ها به ترتیب ۴۹ و ۱۴/۷ درصد و دامنه نوسانات آن بین ۱۴ تا ۵۳ درصد به دست آمد.

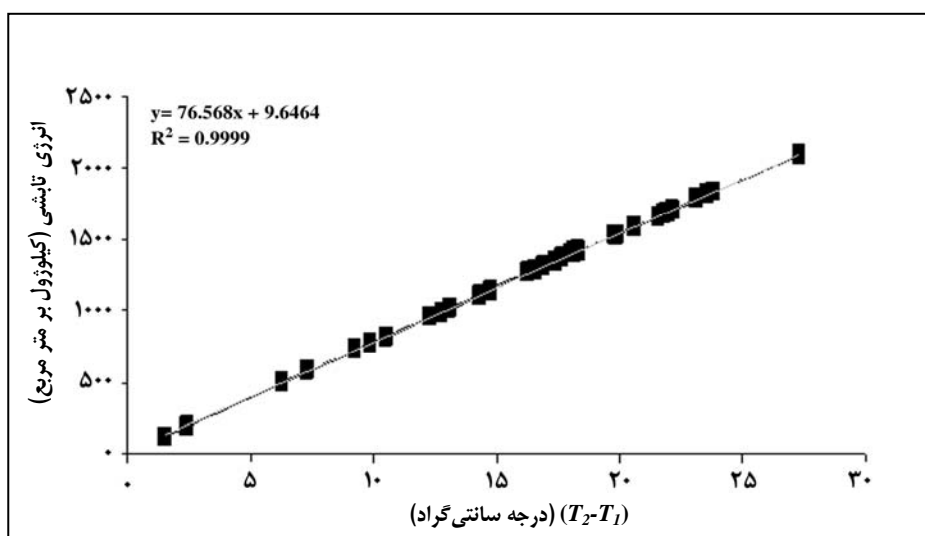
درحالی‌که در ساعات آخر خشک شدن که میزان رطوبت محصول کم است اختلاف دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن با دمای هوا پس از عبور از توده محصول (دمای هوای خروجی از محفظه خشک‌کن) کم است و



شکل ۴- میانگین تغییرات بازده انرژی خشک‌کن با زمان خشک شدن

نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Karsli, 2006; Baha *et al.*, 2007) مطابقت دارد. به عبارت دیگر، هرچه انرژی تابشی در صفحه جمع‌کننده بیشتر باشد، دمای هوای ورودی به جمع‌کننده بیشتر و در نتیجه صفحه جمع‌کننده گرم‌تر است.

رابطه انرژی تابشی با تغییرات دما در صفحه جمع‌کننده
شکل ۵، رابطه انرژی تابشی و تغییرات دما در صفحه جمع‌کننده نشان می‌دهد. طبق شکل، انرژی تابشی دارای رابطه خطی و مستقیم با دمای جمع‌کننده است که با

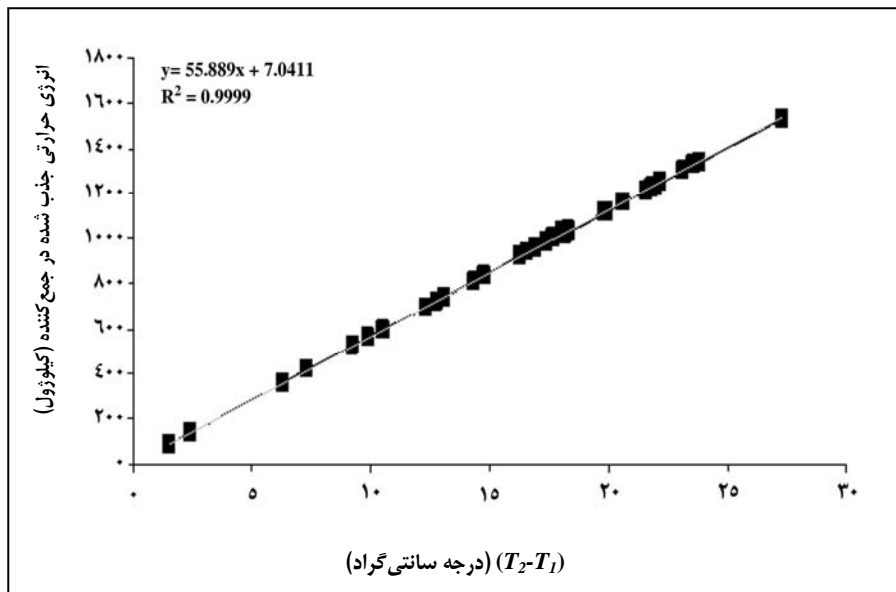


شکل ۵- رابطه انرژی تابشی با تغییرات دما در صفحه جمع‌کننده

شده در جمع‌کننده دارای رابطه خطی و مستقیم با دمای جمع‌کننده است که با پژوهش‌های دیگر محققان (Karsli, 2006; Baha et al., 2007) مطابقت دارد. افزایش مقدار (T_2-T_1) به افزایش انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده منجر می‌شود.

رابطه انرژی حرارتی جذب شده با تغییرات دما در جمع‌کننده

شکل ۶، رابطه انرژی حرارتی جذب شده و تغییرات دما را در صفحه جمع‌کننده، بر اساس رابطه ۳، نشان می‌دهد. در این شکل می‌بینیم که، انرژی حرارتی جذب



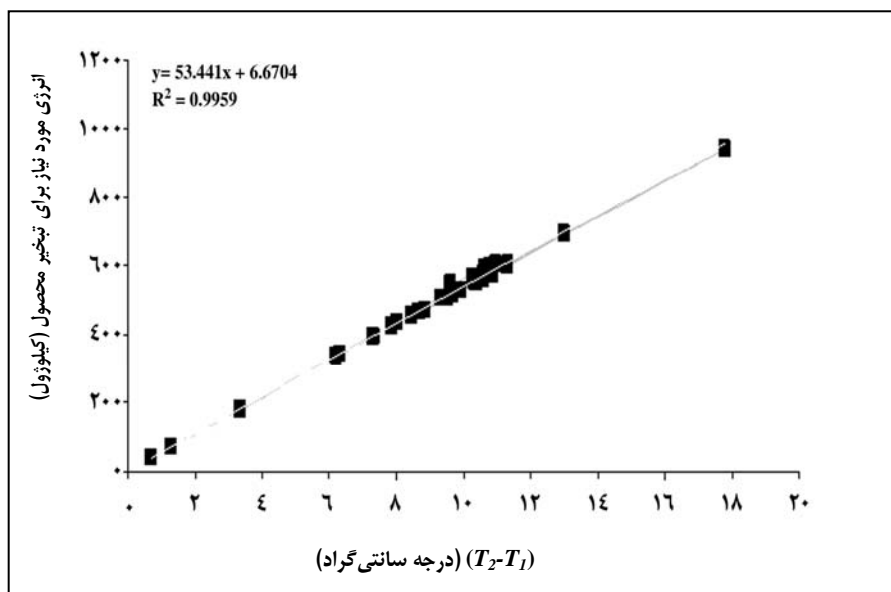
شکل ۶- رابطه انرژی حرارتی جذب شده و تغییرات دما در جمع‌کننده

این شکل، انرژی لازم برای تبخیر محصول دارای رابطه خطی و مستقیم با دمای محفظه خشک‌کن است و با افزایش مقدار (T_2-T_3) ، میزان انرژی لازم برای تبخیر محصول بیشتر است و محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

رابطه میزان انرژی مورد نیاز برای تبخیر محصول با تغییرات دما در محفظه خشک‌کن

شکل ۷، رابطه میزان انرژی مورد نیاز برای تبخیر محصول را با تغییرات دما در محفظه خشک‌کن، بر اساس رابطه ۹، نشان می‌دهد. مطابق

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

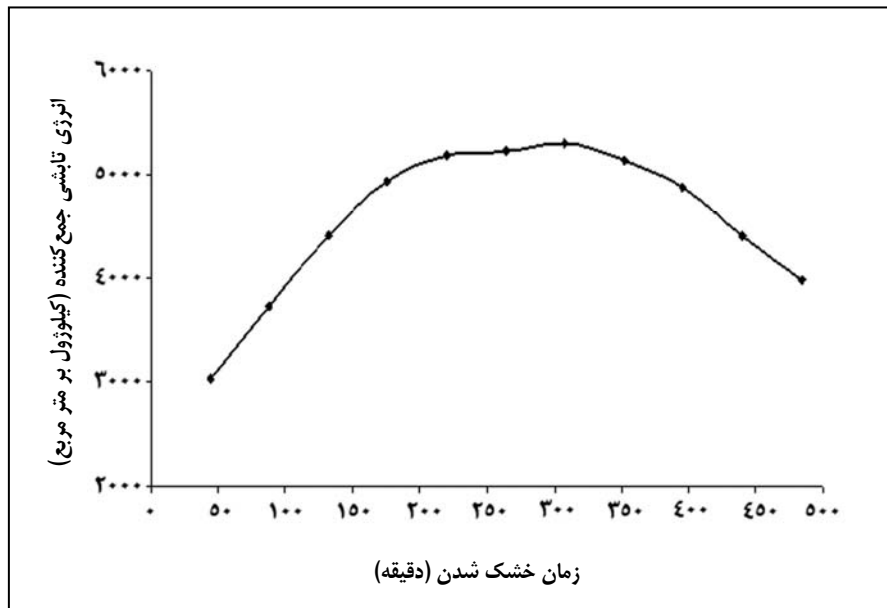


شکل ۷- رابطه میزان انرژی مورد نیاز برای تبخیر محصول با تغییرات دما در محفظه خشک‌کن

تغییرات انرژی تابشی با زمان خشک‌شدن

شکل ۸، نمودار تغییرات انرژی تابشی جمع‌کننده را با زمان خشک‌شدن نشان می‌دهد. در این شکل پیداست که، انرژی تابشی جمع‌کننده ابتدا روند افزایشی و سپس کاهش‌ی دارد که دلیل آن تغییر انرژی تابشی خورشید است که در از صبح تا بعد از ظهر افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. حداکثر، حداقل، و میانگین انرژی تابشی به ترتیب $۵۳۰۵/۲$ ، $۳۰۳۵/۱$ و $۴۵۷۲/۴$ کیلوژول بر متر

مربع است. سهیلی و همکاران (Soheili *et al.*, 2006) دامنه تغییرات انرژی تابشی در سطح جمع‌کننده را در محدوده ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلوژول بر متر مربع به دست آورده‌اند. دلیل این اختلاف، زمان اجرای آزمایش‌هاست که به ترتیب در تیرماه و آذرماه بوده است؛ بالاتر بودن شدت تابش خورشید در تابستان نسبت به پاییز کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

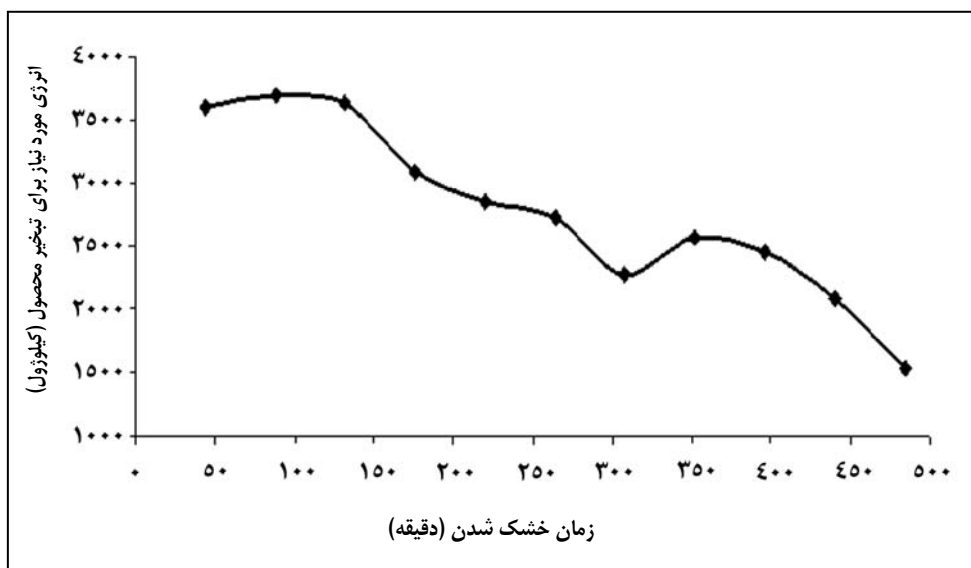


شکل ۸- نمودار تغییرات انرژی تابشی در صفحه جمع کننده با زمان خشک شدن

رابطه ۸، است. این مقدار در ساعات اول آزمایش (که تبخیر از سطح محصول بیشتر است)، نسبت به ساعات آخر خشک شدن، بیشتر است. مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین برای Q_{out} به ترتیب $۳۶۹۶/۶$ ، $۱۵۲۷/۹$ و $۲۷۷۲/۲$ کیلووات بر متر مربع است.

تغییرات انرژی لازم برای تبخیر محصول با زمان خشک شدن

شکل ۹، رابطه انرژی لازم برای تبخیر محصول را با زمان خشک شدن نشان می دهد. مقدار Q_{out} وابسته به مقدار (T_2-T_3) و میزان رطوبت محصول، بر اساس



شکل ۹- انرژی لازم برای تبخیر محصول با زمان خشک شدن

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

در خشک‌کن خورشیدی مورد آزمایش یک رابطه‌ی نمایی به صورت $M_{wb} = 1.827e^{-0.4857t}$ با $R^2 = 0.945$ به دست آمد.

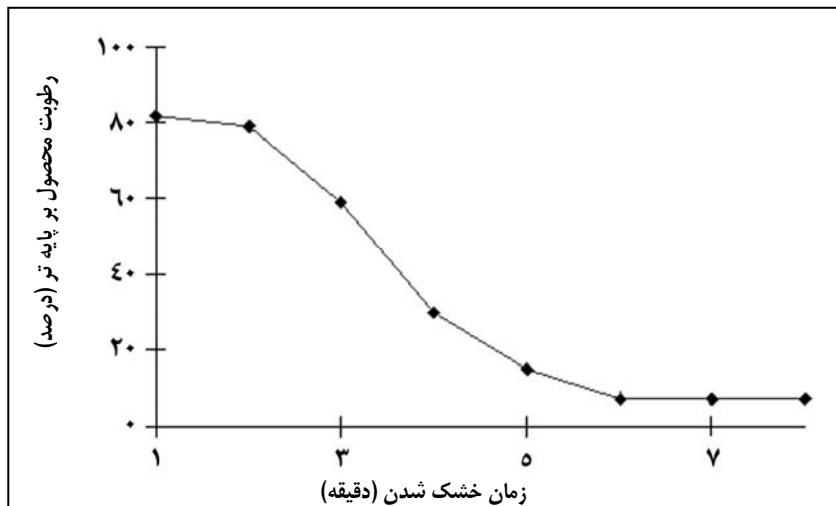
$$M_{wb} = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (10)$$

که در آن،

M_{wb} = میزان رطوبت بر پایه‌ی وزن تر (درصد)؛ W_w = وزن محصول تر (گرم)؛ و W_d = وزن محصول خشک (گرم) است.

تغییرات رطوبت محصول در خشک‌کن

شکل ۱۰، منحنی رطوبت محصول را بر پایه‌ی تر بر حسب زمان خشک‌شدن نشان می‌دهد. در این نمودار نشان داده شده است که میزان از دست رفتن رطوبت با گذشت زمان کاهش می‌یابد که با پژوهش‌های دیگر محققان (Soheili et al., 2006) مطابقت دارد. منحنی نزولی نشان می‌دهد که در ابتدای خشک‌شدن محصول، سرعت از دست دادن رطوبت، به دلیل افزایش انتشار رطوبت از درون به سطح محصول، بیشتر است. منحنی خشک شدن محصول



شکل ۱۰- تغییرات رطوبت محصول با زمان خشک شدن

۱۹/۸ درجه‌ سانتی‌گراد است و بازده انرژی خشک‌کن به هنگام خشک‌شدن محصول متغیر است و با گذشت زمان، سیر نزولی دارد. حداکثر و حداقل بازده انرژی در آزمایش‌ها به ترتیب ۴۹ و ۱۴/۷ درصد به دست آمد. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان می‌دهد که انرژی تابشی، انرژی حرارتی جذب شده در جمع‌کننده، و انرژی لازم برای تبخیر محصول رابطه‌ای خطی و مستقیم با تغییرات دما دارند. انرژی تابشی جمع‌کننده به هنگام خشک‌شدن، ابتدا روند

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که دمای هوای ورودی به جمع‌کننده، دمای هوای خروجی از جمع‌کننده، و دمای هوای خروجی از محفظه‌ی خشک‌کن به هنگام اجرای آزمایش متغیر است: هرچه دمای هوای ورودی به جمع‌کننده بیشتر باشد، دمای هوای خروجی نیز بیشتر است. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان می‌دهد که جمع‌کننده مورد آزمایش قادر به گرم کردن هوا به میزان

افزایشی و سپس کاهش دارد. میانگین انرژی تابشی در جمع‌کننده ۴۵۷۲/۴ کیلوژول و میانگین انرژی لازم برای تبخیر محصول ۲۷۷۲/۲ کیلوژول به دست آمد. بنابراین با توجه به ارزیابی این خشک‌کن می‌توان نتیجه گرفت که این دستگاه کارایی لازم و عملکرد مناسب را برای خشک‌کردن سبزی‌های برگی دارد.

در خصوص بازده انرژی، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد نشان داد که این بازده متغیر است و در فرایند خشک‌شدن روند نزولی دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود به منظور تأمین بازده انرژی بهینه در خشک‌کن، یک سیستم کنترل ساخته شود تا با تغییر پارامترها، مقدار بازده انرژی را در حد بهینه نگه دارد.

قدردانی

از دانشگاه تهران به خاطر تأمین اعتبارات مورد نیاز و همچنین از جناب آقای مهندس سید امیرعباس مؤذن برای مساعدت در اجرای این تحقیق سپاسگزار می‌شود.

مراجع

- Anon. 2006. ASHRAE Psychrometrics charts. <http://www.ashrae.org/>.
- Augustus Leon, M. Kumar, S. and Bhattacharya, S. C. 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *J. Renew. Sustain. Energy Rev.* 6, 367-393.
- Baha, P. Andoh, Y. H. Saraka, K. J. Koua, K. B. and Toure, S. 2007. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *J. Renew. Energy.* 32, 1817-1829.
- Bennamoun, L. and Belhamri, A. 2002. Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *J. Food Eng.* 59, 259-266.
- Dadashzadeh, M. Zomorodian, A. and Mesbahi, Gh. R. 2008. The effect of drying airflow rates and modes of drying on moisture content reduction for grapes in a cabinet type solar dryer. *J. Hort. Sci.* 22(1): 23-34. (in Farsi)
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes.* John Wiley & Sons, NY.
- Erfani far, A. and Zomorodian, A. 2005. The effect of two different glass covers (flat and slatted) on thermal efficiency of a porous absorber solar air heater. *J. Scie. Agric.* 28(1): 63-82. (in Farsi)
- Holman, J. P. 1980. *Thermodynamics.* The 3rd Ed. McGraw-Hill. NY.
- Ivanoa, D. and Andonov, K. 2001. Analytical and experimental study of combined fruit and vegetable dryer. *J. Energy Conv. Manag.* 42, 975-983.
- Karim, M. A. and Hawlader, M. N. A. 2003. Development of solar air collectors for drying application. *J. Energy Conv. Manag.* 45(3): 329-344.
- Karsli, S. 2006. Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications. *J. Renew. Energy.* 32, 1645-1660.
- Singh, D. and Heldman, R. 2009. *Introduction to Food Engineering.* The 4th Ed. Academic Press.

پایش پارامترهای مؤثر بر خشک شدن سبزی‌های برگی در ...

- Soheili Mehdizadeh, A., Keyhani, A. R., Abbaspoursani, K. and Akram, A. 2006. Design of a forced convection solar dryer for leafy vegetables and evaluation of the solar energy collector performance. J. Agric. Eng. Res. 7(27): 147-163. (in Farsi)**
- Tripathy, P. P. and Kumar, S. 2009. A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying. J. Food Eng. 90, 212-218.**
- Yaldiz, O. Ertekin, C. and Ibrahim Uzun, H. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. J. Energy. 26, 457-465.**
- Zare, D., Zomorodian, A. and Ghasem Khani, H. 2005. The effect of mass flow rate and time of crop discharge, on the rate of rough rice drying in semi-continuous solar dryer. J. Sci. Technol. Agric. Natural Res. 9(1): 251-264. (in Farsi)**
- Zomorodian, A. and Allameh, A. 2002. Evaluation of thin layer drying process for paddies and determining an appropriate grain thin layer depth using a natural convection pilot solar dryer. J. Sci. Technol. Agric. Natural Res. 6(1): 209-218. (in Farsi)**



Monitoring Effective Parameters of Drying Leafy Vegetables in a Forced-Convection Solar Dryer

N. Bagheri*, A. R. Keyhani, S. S. Mohtasebi and R. Alimardani

*Corresponding Author: M.Sc. Graduate, Tehran University, P. O. Box: 4111, Karaj, Iran. E-mail: nikroozbagheri@yahoo.com.au

Monitoring the effective parameters of drying crops is necessary to evaluate and determine system performance under real conditions. Hence, a monitoring system was constructed to determine the performance of a vegetation forced-convection solar dryer. Digital temperature sensors were set up in the air inlet and outlet of the collector and the air outlet of the drying chamber. A program was written using visual Basic 6 software to register sensor data and make calculations. To evaluate the dryer, experiments were carried out over eight hours between 10 am and 6 pm during the summer. Mint was used for drying in all experiments on 5Cm high trays of the dryer chamber. The results showed that the radiation energy, the heat energy absorbed by the collector and the energy required for product evaporation had linear relationships with temperature. Radiation energy increased at first and decreased later during the drying time. The results showed that the average temperature in the collector air inlet, outlet and drying chamber air outlet were 38.1°C, 54.7°C and 45.5°C, respectively. The average maximum and minimum energy efficiency were 49% and 14.7%, respectively. The average radiation energy and required energy for product evaporation were 4572.4 and 2772.2 KJ, respectively. The drying curve was $M_{wb} = 1.827e^{-0.4857t}$ with $R^2 = 0.945$.

Key Words: Drying Parameters, Forced-Convection, Monitoring, Solar Dryer