



ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (کرج)

۲۴ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹



طراحی، ساخت و ارزیابی مدل آزمایشگاهی خشک کن خورشیدی

هادی باقری^۱، اکبر عرب حسینی^۲، محمد حسین کیان مهر^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد و استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه

تهران (پردیس ابوریحان)

h_b13179@yahoo.com

چکیده

هدف از این تحقیق، مطالعه طراحی و ساخت و ارزیابی خشک‌کن خورشیدی جهت خشک‌کردن سبزیجاتی از جمله ورقه‌های نازک گوجه فرنگی می‌باشد. برای این هدف خشک‌کن خورشیدی در گروه امور فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران ساخته شد. این خشک‌کن دارای یک جمع‌کننده خورشیدی، فن الکتریکی، محفظه حامل سینی‌های محصول و شاسی جهت حمل و نقل دستگاه می‌باشد. جمع‌کننده خورشیدی از نوع صفحه جاذب ساده بوده، مساحت آن برابر ۱/۹۵ مترمربع بود. آزمایش‌ها در سه سطح ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر و در دو سطح سرعت هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه انجام شد. مدت زمان لازم برای خشک‌کردن گوجه فرنگی در خشک‌کن خورشیدی در ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر به ترتیب برابر ۲۷۰ دقیقه، ۳۹۰ دقیقه و ۴۵۰ دقیقه بود. بازده کلی سیستم برابر ۲۶٪ بود.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، خشک‌شدن لایه نازک، جمع‌کننده خورشیدی، بازده سیستم

مقدمه

فناوری ساده، کاهش آلودگی هوا و محیط زیست و از همه مهمتر ذخیره شدن سوختهای فسیلی برای آینده، از دلایل لزوم استفاده از انرژی خورشیدی در کشور هستند. خشک کردن خورشیدی مواد غذایی در مناطقی که رطوبت نسبی هوا کمتر از ۶۰ درصد و دمای هوا بالاتر از ۲۲ درجه سانتیگراد و دارای تعداد زیادی روز آفتابی است، قابل اجراست. به همین دلیل کشور ما منطقه‌ای بسیار مستعد برای استفاده از انرژی خورشیدی در خشک کردن مواد غذایی است. یکی از راههای استفاده از این انرژی، ساخت خشک کن خورشیدی و خشک کردن محصولات کشاورزی توسط این سیستم می باشد. خشک کردن با خشک کن خورشیدی یک روش خوب برای کم کردن رطوبت مواد غذایی بوده که جهت جلوگیری از تخریب آنها به کار می رود. از میان سبزیجات جهت خشک شدن گوجه فرنگی (به دلیل بالا بودن میزان رطوبت) انتخاب شد. تا کنون تحقیقات فراوانی در زمینه ساخت خشک کن خورشیدی صورت پذیرفته که از بین آنها می توان به نمونه های زیر اشاره کرد. در سال ۱۹۸۴ Mittal و Lapp به بررسی در مورد خشک کن های خورشیدی غلات همراه با منبع ذخیره انرژی پرداختند. ایشان دریافتند که شن برای خشک کردن گندم از رطوبت ۱۷٪ به ۱۴/۵٪ بدون از بین رفتن کیفیت گندم، بهترین منبع ذخیره انرژی میباشد (Mittal و همکاران، ۱۹۸۴). در سال ۱۹۸۶ Muhammad و همکاران نوعی خشک کن برای رطوبت زدایی از سبزیجات را طراحی و آزمایش نمودند. ساختمان اولیه خشک کن از مواد محلی و در دسترس ساخته شده بود. هوای داغ مورد نیاز، از کوره گاز حرارتی تامین می گردید. ظرفیت این خشک کن ۳ تا ۵ تن سبزیجات بود که در ۳ مرحله در روز در داخل خشک کن قرار می گرفت. میزان رطوبت و درجه حرارت سیستم توسط یک کنترلر نصب شده در روی سیستم کنترل می شد (Muhammad Jamil و همکاران، ۱۹۸۶). هدف از پژوهش انجام گردیده، طراحی و ساخت یک خشک کن خورشیدی از نوع مختلط برای سبزیجات می باشد، که در انتها به ارزیابی سیستم می پردازیم.

مواد و روش ها

دستگاه دارای سه قسمت اصلی جمع کننده خورشیدی، محفظه اصلی خشک کردن و فن الکتریکی می باشد. بدین منظور برای طراحی قسمت های مختلف خشک کن خورشیدی باید به دو پارامتر اساسی زیر توجه نمود: نوع محصول و میزان حجمی که از محصول خشک می شود و شرایط آب و هوای منطقه (از جمله میزان تابش خورشید، دما و رطوبت محیط، . . .). در ابتدا گوجه فرنگی با میزان حجمی برابر ۱۰ کیلوگرم محصول تازه، در منطقه ورامین برای خشک کردن انتخاب گردید. در قسمت طراحی از طریق تعیین میزان محصول جهت خشک شدن توسط دستگاه، محاسبه ضریب انتقال حرارت جمع کننده خورشیدی و میزان انرژی تابشی دریافتی توسط جمع کننده، به محاسبه سطح مفید جمع کننده خورشیدی و سپس به طراحی محفظه اصلی خشک کن پرداخته شد. همچنین در ادامه با توجه به شرایط محیطی، میزان جرم و هوای مورد نیاز جهت خشک کردن محصول تعیین گردید و با توجه به میزان دبی هوای مورد نیاز و مدت زمان خشک شدن محصول به طراحی و انتخاب پارامترهای مختلف فن پرداخته شد. بر اساس اطلاعات سازمان هواشناسی کشور در یک دوره پنج ساله برای فصل تابستان در شهرستان پاکدشت، شرایط اقلیمی برداشت گردیده شد. نتایج در جدول ۱ گردآوری شده است (بی نام، ۱۳۸۷).

جدول ۱- شرایط آب و هوای پاکدشت در فصل تابستان (سال ۲۰۰۰ - ۲۰۰۵ میلادی)

ماه	تیر	مرداد	شهریور	میانگین
ریش باران (mm)	1/4	1/06	1/63	1/36
رطوبت نسبی هوا (%)	26	30/6	31/8	29/4
حداقل دما (°C)	22/28	24/9	25/1	24/1
حداکثر دما (°C)	34.3	36/6	36/4	35/8
جمع ساعات آفتابی (h)	341/04	356	350/2	350

برای بدست آوردن میزان دبی حجمی هوای مورد نیاز، میانگین مقادیر دبی هوای بدست آمده، از رابطه تراز انرژی جهت فرآیند خشک شدن و مقدار دبی هوای بدست آمده از طریق جدول سایکرومتریکی، در نظر گرفته شد. برای محاسبه مقدار دبی هوا توسط جدول سایکرومتریکی فرضیات زیر مفروض است:

رطوبت اولیه محصول ۹۳٪، رطوبت نهایی محصول ۱۰٪، دمای ورودی محفظه خشک کن ۵۰ درجه سلسیوس، دمای خروجی محفظه خشک کن ۳۴ درجه سلسیوس، رطوبت نهایی هوای خروجی از محفظه خشک کن ۳۸٪. از طریق محاسبات انجام شده جرم هوا مورد نیاز برابر ۱۵۸۰ کیلوگرم بوده، حال از طریق رابطه ۱ میزان حجم هوا مورد نیاز برابر است با:

$$V_a = \frac{m_{avr} RT_3}{\rho_a} \quad (1)$$

V_a حجم هوای مورد نیاز (m^3)، R ثابت جهانی گازها ($287/055 \text{ J/kg.K}$)، T_3 دمای مطلق خروجی خشک کن (K)، ρ_a چگالی هوای خشک (kg/m^3)

برای بدست آوردن میزان دبی هوای لازم، نیاز به محاسبه زمان لازم برای خشک کردن محصول (گوجه فرنگی) میباشد، بدین منظور از طریق رابطه ۲ زمان مورد نیاز بدست می آید (Doymaz, ۲۰۰۷).

$$\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = e^{-k_1 t_d} \quad (2)$$

M_e رطوبت تعادلی محصول ($kgH_2O/kgDrySolid$)، M_t رطوبت محصول در هر لحظه ($kgH_2O/kgDrySolid$)، k_1 ثابت زمان خشک کردن، t_d مدت زمان خشک شدن محصول (h)

با توجه به جرم هوا و زمان مورد نیاز جهت خشک شدن محصول دبی جرمی هوای مورد نیاز برابر ۱۴۰۶ متر مکعب بر ساعت می باشد. برای تعیین میزان سطح موثر جمع کننده خورشیدی نیاز به محاسبه پارامترهای حاصلضرب ضریب پوشش- ضریب جذب، ضریب انتقال حرارت جمع کننده خورشیدی، نرخ شدت تابش در واحد سطح روی صفحه جمع کننده شیبدار و گرمای نهان تبخیر آب می باشد. سطح موثر جمع کننده از رابطه زیر بدست می آید (El-Lamush, ۱۹۹۸):

$$A_{collector} = \frac{W(m_i - m_f)L_v}{F_R(\tau\alpha)_e \int_0^t I_T dt} \quad (3)$$

L_v گرمای نهان تبخیر آب (kJ/kg) ، W وزن خشک ماده (kg) ، I_T نرخ شدت تابش در واحد سطح روی صفحه جمع کننده شیبدار (W/m^2) ، $(\tau\alpha)_e$ حاصل ضرب ضریب عبور شیشه - ضریب جذب، m_f رطوبت نهایی محصول (kg) ، m_i رطوبت اولیه محصول (kg) ، F_R ضریب انتقال حرارت جمع کننده خورشیدی.

با انجام محاسبات انجام شده، سطح موثر مورد نیاز برابر $1.7 m^2$ بدست می آید. برای تعیین میزان حجم خشک کن و تعداد سینی های لازم برای خشک کردن محصول، نیاز به تعیین چگالی ظاهری محصول (گوجه فرنگی) و ضخامت محصول، تعیین دبی و سرعت هوا در محفظه اصلی خشک کن می باشد. میزان چگالی ظاهری گوجه فرنگی $500 \frac{kg}{m^2}$ تعیین گردید و ضخامت سه، پنج و هفت میلیمتر برای لایه های محصول جهت خشک کردن، در نظر گرفته شد. بنابراین حجم مورد نیاز برابر است با:

$$V_{crop} = \frac{M}{M_{bd}} \quad (4)$$

M_{bd} چگالی ظاهری محصول $(\frac{kg}{m^3})$ ، M وزن محصول (kg) ، V_{crop} حجم محصول مورد نیاز (m^3)

حال با توجه به حجم مورد نیاز، به محاسبه سطح (تعداد سینی ها) مورد نیاز می پردازیم:

$$A_i = \frac{V_{crop}}{L_i} \quad (5)$$

L_i ارتفاع محصول (m) ، A_i مساحت سینی مخصوص محصول (m^2) .

پس از انجام محاسبات مربوطه حجم محفظه اصلی خشک کن برابر با $50 \times 40 \times 30 cm^3$ در نظر گرفته شد. توان الکتریکی فن از رابطه ۶ بدست می آید (Benson, ۱۹۸۹):

$$P_{fan} = \frac{V_{blower} \times \Delta P_{Total}}{\eta_{fan}} \quad (6)$$

ΔP_{Total} افت فشار کلی $(\frac{W}{m^2})$ ، P_{fan} توان الکتریکی فن (W) ، η_{fan} بازده فن، V_{blower} دبی دمنده $(\frac{m^3}{h})$

برای طراحی فن نیاز به محاسبه افت فشار در سیستم می باشد. افت فشار هوا در این سیستم شامل دو افت فشار استاتیکی و دینامیکی می باشد. حال با فرض بازده ۶۰٪ برای فن و انجام محاسبات مربوطه قدرت فن برابر ۲۰ وات میباشد.

محاسبه بازده جمع کننده خورشیدی

میزان اتلاف حرارتی از جمع کننده خورشیدی به محیط به وسیله ضریب انتقال حرارت کلی U_L ، مساحت جاذب جمع کننده A_c و اختلاف دمای $(T - T_\infty)$ بین صفحه جاذب و محیط تعیین می شود. بنابراین نرخ که در آن جمع کننده خورشیدی حرارت را از دست می دهد، برابر است با:

$$Q = U_L A_c (T - T_\infty) \quad (7)$$

Q اتلاف حرارت توسط جمع کننده خورشیدی (W) ، ضریب انتقال حرارت کلی جمع کننده خورشیدی U_L ، $(W/m^2 \cdot ^\circ C)$ ، A_c سطح مقطع کانال (m^2) ، T دما (K) ، T_∞ دمای محیط (K)

محاسبه بازده کلی سیستم

با توجه به محاسبات انرژی انجام شده، بازده کلی سیستم از رابطه ۸ بدست می آید (Ozturk1، ۲۰۰۴):

$$\eta_{drying} = \frac{(m_w \times L_v)}{(I_T \times A_c) + P_{fan}} \quad (8)$$

η_{drying} بازده کلی خشک کن، P_{fan} توان الکتریکی فن (W) ، L_v گرمای نهان تبخیر آب (J/kg) ، m_w جرم رطوبت تبخیر شده (kg)

ساخت خشک کن خورشیدی

ساخت جمع کننده

در این قسمت انرژی خورشیدی رسیده به سطح جمع کننده به انرژی گرمایی تبدیل می گردد. جمع کننده ساخته شده در این سیستم از نوع صفحه تخت ساده می باشد که هوا با عبور از زیر صفحه جاذب نور، گرم شده و به محفظه اصلی خشک کن می رسد. مساحت کلی جمع کننده $1/95$ متر مربع می باشد، که با توجه به عرض جغرافیایی محل و شرایط محیطی آزمایش، در زاویه 36° درجه بر روی سیستم قرار می گیرد.

ساخت محفظه ی اصلی خشک کن

محفظه اصلی خشک کن ابعادی برابر با $50 \times 40 \times 30 \text{ cm}^3$ را دارد. برای ساخت محفظه ذکر شده از ورق گالوانیزه در اطراف و بالای محفظه استفاده شده است. برای قرار دادن محصول در داخل خشک کن از توری های فلزی به ابعاد 40×30 سانتیمتر مربع استفاده شد. فاصله سینی ها از هم برابر 10 سانتیمتر می باشد. تمام قسمت های مختلف محفظه خشک کن توسط چسب آکواریوم کاملاً درزبندی شد و کل مجموعه نیز برای کمترین اتلافات حرارتی بوسیله عایق حرارتی پشم شیشه پوشانده شد (شکل ۱).



شکل ۱- محفظه اصلی خشک کن

انتخاب فن

بنابر محاسبات انجام شده از میان فن های موجود در بازار، از یک فن با جریان محوری با قطر ۱۰۰ میلیمتر، دبی ۱۸۰ متر مکعب بر ساعت و توان ۴۰ وات استفاده شد. برای کنترل دبی جریان هوا در خروجی فن از یک دریچه که در داخل لوله خروجی هوا در قسمت خروجی محفظه خشک کن نصب شده استفاده شد.

ابزارها و روش اندازه گیری

چهار پارامتر اصلی که در تست دستگاه اندازه گیری شد، عبارتند از:

- ۱- اندازه گیری دما در قسمتهای ورودی و خروجی جمع کننده خورشیدی و محفظه اصلی خشک کن، ۲- تعیین دبی جرمی هوا، ۳- اندازه گیری میزان تابش خورشیدی، ۴- میزان رطوبت اولیه و انتهایی در محفظه خشک کن.
- برای تست قسمت های مختلف سیستم و داده گیری شرایط مختلف محیطی و سایر متغیرهای خشک شدن محصول، از وسایل بیان شده در جدول ۲ استفاده شد.

جدول ۲- وسایل بکار رفته در تست دستگاه

وسيله	دقت
شیدسنج (PSP- EPPLY)	$1 \frac{cal. min}{cm^2}$
رطوبت سنج (Tivan, HT.3006)	$\pm 3\% RH$
سرعت سنج (Taivan, AVM-07)	$\pm 3\% + 0.1 \frac{m}{s}$
دماسنج جیوه ای	$\pm 1 C^{\circ}$
ترموکوپل نوع K	$\pm 1 C^{\circ}$
ترازو دیجیتال ۲۰۰ گرم (Japan, D=961738)	$\pm 0.01 gr$

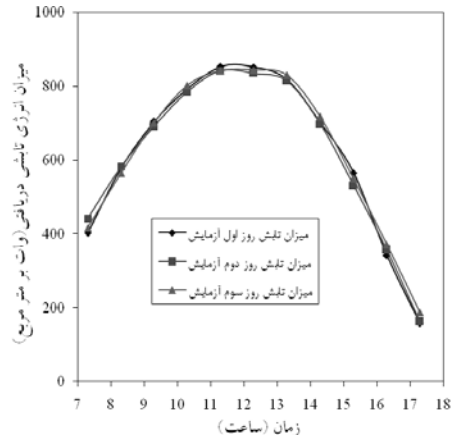
روش انجام آزمایش

برای آزمایش سیستم، دستگاه در محوطه باز دانشگاه زیر نور مستقیم قرار داده شد. در هنگام آزمایش سعی شد که شرایط اولیه محصول از لحاظ رطوبت ثابت نگه داشته شود. بدین منظور در روز آزمایش، محصول گوجه فرنگی به صورت تازه از بازار تهیه شده، در آزمایشگاه ابتدا کاملاً شسته شد و سپس در ضخامت های مورد نیاز (۳، ۵ و ۷ میلیمتر) بریده شده و در داخل دستگاه خشک کن قرار گرفت. برای ثبت میزان تابش رسیده به سطح جمع کننده خورشیدی، در هر ساعت یک بار، از شیدسنج داده برداری شد، ثبت دیگر پارامترها مثل میزان دمای هوای محیط، دمای خروجی جمع کننده خورشیدی، دمای خروجی محفظه خشک کن و دمای صفحه جاذب به فاصله زمانی ۱۵ دقیقه صورت گرفت. آزمایشات سه بار تکرار شد.

نتایج و بحث

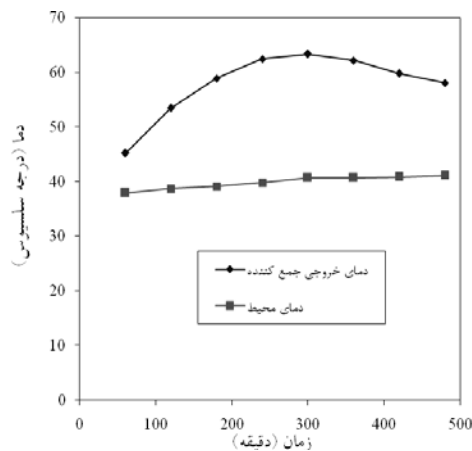
ارزیابی جمع کننده خورشیدی

در ابتدا به ارزیابی جمع کننده خورشیدی و ارزیابی کل سیستم می پردازیم. شکل ۳ میزان تابش رسیده به سطح جمع کننده را در روزهای آزمایش نشان می دهد.



شکل ۲- میزان تابش رسیده به سطح جمع کننده خورشیدی در روزهای آزمایش

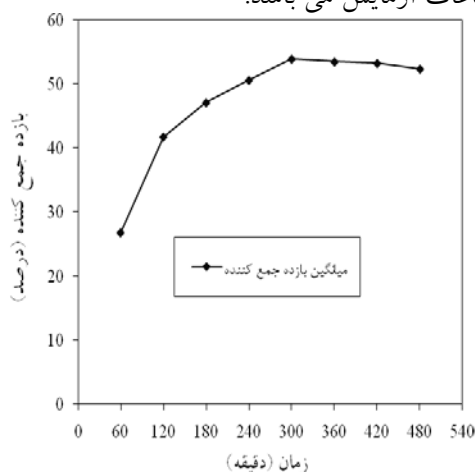
همان طور که از شکل ۲ بدست می آید، در ساعات اولیه و انتهایی آزمایش، میزان انرژی تابشی دریافتی توسط سطح جمع کننده خورشیدی کمترین مقدار خود را دارا می باشد و در ساعات ۱۱/۲۰ الی ۱۲/۲۰ بیشترین میزان تابش خورشیدی را دارا می باشد. علت این است که اشعه های منعکس شده تابش خورشید در این زمان، به طور قائم بر جمع کننده تابیده شده و در نتیجه میزان انعکاس اشعه خورشیدی به حداقل خود می رسد.



شکل ۳- میزان دمای محیط و دمای خروجی جمع کننده خورشیدی

انرژی دریافتی سبب بالا رفتن دمای صفحه جاذب شده و این امر سبب بالا رفتن دمای هوای عبوری از روی صفحه جاذب می گردد. شکل ۳ بیانگر افزایش دمای هوای محیط توسط سطح جمع کننده می باشد. همانطور که اشکال مربوطه نشان می دهند، بیشترین انرژی تابشی دریافتی در ساعات ۱۱/۲۰ الی ۱۲/۲۰ اتفاق می افتد، ولی بیشترین افزایش دما خروجی جمع کننده خورشیدی در ساعت ۱۲/۲۰ الی ۱۳/۲۰ اتفاق افتاده است و این امر را بدینگونه میتوان بیان نمود که به دلیل ضخامت صفحه جاذب، مدت زمان بیشتری برای افزایش دما این صفحه نیاز می باشد. سهیلی مهدیزاده و نادى نیز در تحقیقات خود به نتایجی مشابه دست یافته اند (سهیلی مهدیزاده، ۱۳۸۸؛ نادى، ۱۳۸۵). بر اساس محاسبات انجام شده، اتلاف حرارت از قسمت بالایی جمع کننده خورشیدی بیشترین مقدار یعنی حدود ۷۲٪ و از قسمت پایینی و قسمت جوانب حدود ۱۴٪ می باشد. جدول ۳ نشان دهنده میزان انرژی خورشیدی جذب

شده (S)، میزان ضریب انتقال حرارت جمع کننده (F_R)، میزان دبی جرمی هوا (\dot{m})، ظرفیت گرمایی ویژه هوا (C_p)، چگالی هوا (ρ)، میزان انرژی مفید جمع کننده (Q_u)، مساحت جمع کننده خورشیدی (A_c) و میزان بازده جمع کننده ($\eta_{Collector}$) در ساعات آزمایش می باشد.



شکل ۴- میانگین بازده جمع کننده خورشیدی در سه آزمایش

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، در آزمایش های انجام شده در روزهای مختلف، میزان بازده جمع کننده خورشیدی در ابتدا به صورت صعودی و از ساعت پنجم آزمایش به بعد به صورت نزولی می باشد. بیشترین میزان بازده کالکتور در ساعت ۱۲/۳۰ تا ۱۳/۳۰ اتفاق می افتد، دلیل این امر را می توان چنین توجیح کرد که با فرض ثابت بودن میزان چگالی هوا، به دلیل افزایش میزان ضریب انتقال حرارتی جمع کننده (که خود بدلیل افزایش میزان اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع کننده و کاهش میزان انرژی مفید تابشی رسیده به جمع کننده خورشیدی است)، میزان انرژی مفید جمع کننده خورشیدی. افزایش پیدا کرده و به واسطه این امر میزان بازده جمع کننده افزایش پیدا کرده است. در شکل ۴ نتایج حاصله به صورت نمودار بیان گردیده شده است.

محاسبه بازده کلی سیستم

طبق محاسبات انجام شده توسط رابطه ۱۸ میزان بازده کلی سیستم برابر ۲۶٪ می باشد. در دستگاه خورشیدی ساخته شده مشابه، نتایج Al-Juamily به بازده کلی سیستم برابر ۲۰٪ و زارع به بازده سیستم برابر ۲۲٪ اشاره کرده اند (زارع و همکاران، ۱۳۸۳)

خشک شدن لایه نازک ورقه های گوجه فرنگی

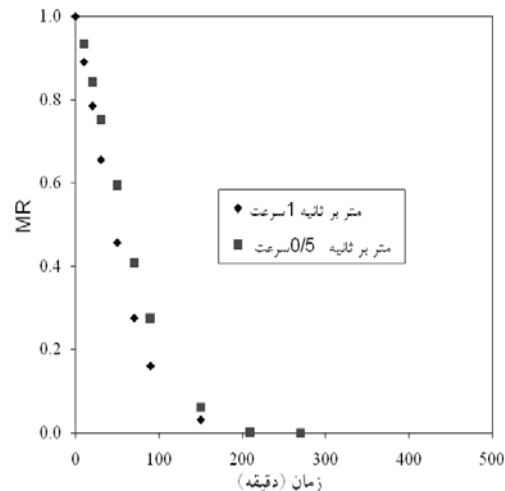
سینتیک خشک شدن لایه نازک ورقه های گوجه فرنگی

محتوی رطوبت اولیه ورقه های گوجه فرنگی با استفاده از روش خشک کردن در آون، ۹۶ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) بدست آمد. داده های بدست آمده محتوی رطوبت در شرایط مختلف خشک کردن به نسبت رطوبت (MR) تبدیل شدند.

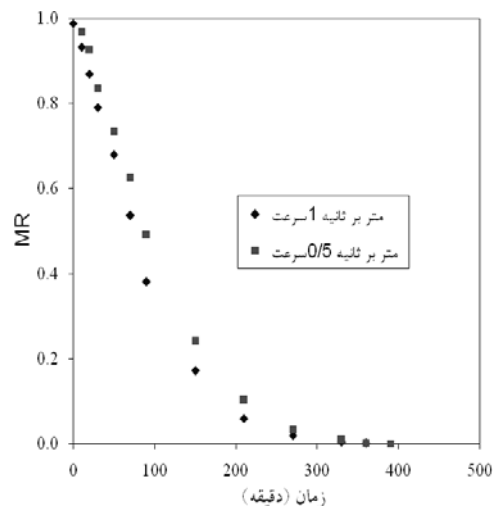
جدول ۳- میزان انرژی جذب شده، کار مفید و بازده جمع کننده خورشیدی ساخته شده در روزهای آزمایش (مساحت سطح مؤثر جمع کننده $(A_c = 1.7 m^2)$)

تاریخ آزمایش	Time	m	C_p	ρ	S	F_R	Q_u	$\eta_{Collector}$
1387/5/13	8.20-9.20	0.036	1007.1	1.1202	503	0.307	262.85	0.2679
	9.20-10.20	0.0356	1007.3	1.1066	613	0.509	530.73	0.4434
	10.20-11.20	0.0353	1007.45	1.0964	690	0.6	704.14	0.5229
	11.20-12.20	0.0331	1007.25	1.0284	743	0.617	780.15	0.538
	12.20-13.20	0.0332	1007.6	1.0318	742	0.628	792.81	0.5473
	13.20-14.20	0.0331	1007.55	1.0284	712	0.591	717.02	0.5156
	14.20-15.20	0.033	1007.5	1.025	611	0.589	611.75	0.5133
	15.20-16.20	0.033	1007.5	1.025	579	0.573	656.2	0.4999
1387/5/14	8.20-9.20	0.0361	1007.05	1.1236	507	0.305	263.57	0.2663
	9.20-10.20	0.0356	1007.3	1.1066	602	0.427	437.49	0.3724
	10.20-11.20	0.0328	1007.4	1.0182	684	0.48	558.42	0.4184
	11.20-12.20	0.0322	1007.6	1.0318	733	0.519	647.64	0.4524
	12.20-13.20	0.0332	1007.6	1.0318	727	0.571	706.51	0.4977
1387/5/15	8.20-9.20	0.0361	1007.05	1.1236	491	0.309	258.4	0.2695
	9.20-10.20	0.0357	1007.25	1.11	611	0.501	519.96	0.4363
	10.20-11.20	0.0328	1007.4	1.0182	699	0.541	642.68	0.4713
	11.20-12.20	0.033	1007.5	1.025	733	0.605	754.71	0.5272
	12.20-13.20	0.0351	1007.55	1.0896	735	0.667	834.61	0.5816
	13.20-14.20	0.0351	1007.55	1.0896	723	0.635	781.56	0.5539
	14.20-15.20	0.0351	1007.55	1.0896	677	0.633	728.51	0.5515
15.20-16.20	0.0351	1007.55	1.0896	636	0.628	679.01	0.5705	

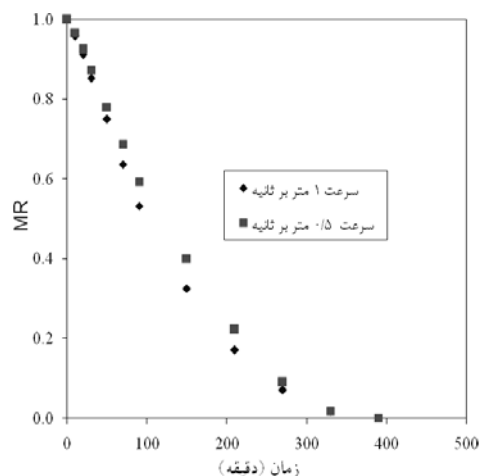
اشکال شماره ۵، ۶ و ۷ تاثیر سرعت هوا بر سینتیک خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی را در محفظه خشک کن خورشیدی نشان می دهد. با توجه به این اشکال، هر چه سرعت افزایش پیدا کند، مدت زمان کمتری برای خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی نیاز می باشد، علت آن است که هر چه میزان سرعت هوا بالا رود اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک کننده عبوری افزایش یافته و در نتیجه سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک کننده بیشتر شده و محصول زودتر خشک می شود. با توجه به شیب منحنی و تغییرات نمودارها میتوان نتیجه گیری کرد که سرعت خشک شدن در ابتدایی عملیات سریعتر بوده و با گذشت زمان کاهش می یابد و قسمت اولیه خشک شدن به صورت خطی می باشد. محققین دیگر نیز به نتایجی مشابه دست یافته اند (گازر و همکاران، ۱۳۸۷). آنالیز واریانس نشان داد که محتوی رطوبت، با افزایش سرعت هوا در ضخامت های مختلف کاهش می یابد ($p < 0/05$). بطوریکه مدت زمان لازم برای خشک کردن گوجه فرنگی در خشک کن خورشیدی در ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر به ترتیب برابر ۲۷۰ دقیقه، ۳۹۰ دقیقه و ۴۵۰ دقیقه می باشد. محققین دیگر نیز به نتایجی مشابه دست یافته اند (Praditwong و همکاران، ۱۹۹۰؛ Ramana، ۲۰۰۸)



شکل ۵- منحنی خشک شدن گوجه فرنگی برای ضخامت ۳ میلیمتر در دو سرعت ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه



شکل ۶- منحنی خشک شدن گوجه فرنگی برای ضخامت ۵ میلیمتر در دو سرعت ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه



شکل ۷- منحنی خشک شدن گوجه فرنگی برای ضخامت ۷ میلیمتر در دو سرعت ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه

نتیجه گیری

بعد از انجام آزمایش های بر روی ورقه های گوجه فرنگی مدت زمان لازم برای خشک کردن گوجه فرنگی در خشک کن خورشیدی در ضخامت ۳، ۵ و ۷ میلیمتر به ترتیب برابر ۲۷۰ دقیقه، ۳۹۰ دقیقه و ۴۵۰ دقیقه بدست آمد، تغییر سرعت فن اثر چندانی بر روی سینتیک خشک شدن نداشت، تغییر ضخامت اثری معنادار در سینتیک خشک شدن نداشت، بطوریکه هر چه ضخامت محصول افزایش پیدا کند، مدت خشک شدن زیاد می گردد، بیشترین اتلاف حرارتی از قسمت پوشش جمع کننده خورشیدی بود، بیشترین میزان بازده جمع کننده خورشیدی در ساعات ۱۲/۳۰ تا ۱۳/۳۰ رخ داد.

منابع و مأخذ

- ۱- سهیلی مهدیزاده، ا. ۱۳۸۸. طراحی خشک کن خورشیدی با همرفت اجباری برای سبزی های برگی. پایان نامه کارشناسی ارشد. مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران.
- ۲- نادی، ف. ۱۳۸۵. طراحی، ساخت و ارزیابی خشک کن خورشیدی فعال غیر مستقیم انگور. پایان نامه کارشناسی ارشد. مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- زارع، د. و همکاران. ۱۳۸۳. تاثیر دبی جرمی هوای ورودی و زمان تخلیه محصول بر روند کاهش رطوبت شلتوک در یک خشک کن نیمه پیوسته خورشیدی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال نهم، شماره اول، ص ۲۵۱-۲۶۳.
- ۴- گازر، ح. مینایی، س. ۱۳۸۷. تاثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر سینتیک خشک شدن کلزا. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون. دانشگاه فردوسی مشهد.
- 5-Mittal. G. S and H.M. Lapp. 1984. Grain Drying with solid heat transfer media. Vol 15(3), 45-50.
- 6-Muhammad Jamil, A, F.M. Ehteshamuddin, N. Muhammad and M. Anwar. 1986. Commercial Dehydration of Vegetables. Energy Res. Vol 29(6), 470-475.
- 7-Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering. Vol 78, 1291-1297.

- 8-El-Lamushe, H.Y. 1998. A Numerical and Experimental Study of A Phtovoltaic Power Solar Rice Dryer. Department of Mechanical Engineering in conformity with the Requirements for the degree of Master of Scienceheater. Solar Energy. Vol 50, 351–363.
- 9-Benson, G. 1989. Improving Fan System Performance. U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy. Vol 40, 181–195.
- 10-Ozturk1, H and Y. Demirel. 2004. Exergy-based performance analysis of packed-bed solar air heaters. Int. J. Energy Res. Vol 28, 423–432.
- 11-Praditwong.P and S. Janjai. 1990. Performance studies of a solar drying storage system for paddy .Energy and the environment.Into the 90s. Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress. Reading. UK. 23-28.
- 12-Ramana Murthy, M.V. 2008. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. RSER-548-558
- 13-www.weather.ir(1387).

Abstract

The objective of this research is designation, construction and evaluation of solar dryer that is used for drying thin layers of tomato in different laboratory conditions such as different spaces, thicknesses, entrée airflow rate. Hence, a solar energy dryer was constructed in Tehran University, College of Aboureihan. The dryer consists of four separate parts, solar collector, drying chamber, fan and structure. The solar collector is structured of absorbent plate with area of 1.95 m^2 . The experiments were carried out with three thickness 3, 5 and 7 mm and two airflow 0.5 and 1 m/s. The drying study for solar dryer showed that the time taken for drying of tomato slices of 3, 5, and 7 mm was 270, 390, and 450 min in solar dryer respectively. The Efficiency of the solar dryer was 20%.

Keywords: Solar dryer; Thin-layer dryer; Solar collector; Efficiency.