

تحلیل اثر انرژی و اکسرژی در خشک‌کن خورشیدی با هوای اجباری برای ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی

هادی باقری*^۱، اکبر عرب‌حسینی^۲، محمدحسین کیانمهر^۳

۱. کارشناس ارشد، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. استاد، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۱)

چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل انرژی و اکسرژی محفظه خشک‌کن خورشیدی آزمایشگاهی با هوای اجباری برای ورقه‌های نازک گوجه‌فرنگی صورت گرفته است. خشک‌کردن در ضخامت‌های ۵ و ۷ میلی‌متر و در دو سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه صورت پذیرفت. در شرایط آزمایش دمای محیط بین ۲۲ تا ۳۶ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی محیط بین ۱۴ تا ۵۰ درصد و میزان تابش خورشیدی بین ۱۵۰ تا ۸۵۰ وات بر مترمربع متغیر بود. با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک اثر متغیرهای خشک‌شدن روی مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی، اتلاف اکسرژی، و بازده اکسرژی بررسی شد. برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۵ میلی‌متر در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه محدوده تغییرات میزان انرژی مصرف شده ۶/۶۲ تا ۱۵۲/۷۲ وات، نسبت مصرف انرژی ۰/۰۲ تا ۰/۴۵ وات، میزان تلفات اکسرژی ۲/۴۲ تا ۰/۱۳ وات، و بازده اکسرژی در محفظه خشک‌کن خورشیدی ۳۲ الی ۸۰ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت هوای عبوری و کاهش ضخامت، نسبت مصرف انرژی و تلفات اکسرژی سیستم را کاهش و میزان بازده اکسرژی، مصرف انرژی سیستم را افزایش می‌دهد.

کلیدواژگان: اکسرژی، انرژی، خشک‌کن خورشیدی، ورقه نازک گوجه‌فرنگی.

مقدمه

خشک‌کردن از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است. کاهش محتوای رطوبتی به کاهش یا توقف فعالیت‌های آنزیمی یا میکروبی و همچنین کاهش وزن محصولات و در نتیجه جابه‌جایی و فرآوری آسان‌تر محصولات می‌انجامد (Stanislowski, 2005). مصرف مقادیر زیاد انرژی در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی، آن را به پر مصرف‌ترین و مهم‌ترین عملیات صنعتی تبدیل کرده است. بنابراین یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در صنایع تولید خشک‌بار، کاهش هزینه منابع انرژی برای تولید محصولات خشک با کیفیت مطلوب است. از این رو تحلیل مؤثر ترمودینامیکی برای خشک‌کن‌های خورشیدی، با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهینه‌سازی متغیرهای فرایند، لازم و ضروری است (Syahrul et al., 2002). اکسرژی، انرژی قابل دسترس در نقاط گوناگون سیستم را ارزیابی می‌کند. در طراحی سیستم، روش تحلیل اکسرژی اطلاعات ارزنده‌ای را در انتخاب مناسب اجزای طراحی و روش‌های کاربرد فراهم می‌آورد. این اطلاعات در تعیین طرح و هزینه عملیات، ذخیره انرژی، قابلیت تغییر

سوخت، و آلودگی نقش خیلی مؤثرتری دارند (Dincer & Sahin, 2004). تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از انرژی خورشیدی مانند پسته (Midilli & Kucuk, 2003)، لوبیاسبز (Doymaz, 2005)، بامیه (Doymaz, 2005)، هویج (Doymaz, 2004)، موز (Karim & Hawlader, 2005)، سیب، سیب‌زمینی و فلفل قرمز (Akpınar, 2003, Akpınar et al., 2006)، انجیر (Babalıs & Belessiotis, 2004)، و برگ نعناع (Doymaz, 2006) صورت پذیرفته است، و همچنین تحقیقاتی در زمینه انرژی و اکسرژی خشک‌کن‌های خورشیدی همچون فلفل، سیب‌زمینی، و بامیه (Akinola & Apetu, 2006)، زیتون (Celma & Cuadros, 2009)، توت (Akbulut & Durmus, 2010)، برگ جعفری (Akpınar, 2011)، ذرت (Bolaji, 2011)، و علف هرز دریای سرخ (Chowdhury et al, 2011) صورت پذیرفته است.

گوجه‌فرنگی گیاه لطیف گرمسیری و چندساله است که بیشتر در قاره آمریکا در باغ‌های تابستانی به‌صورت سالیانه رشد می‌کند. بنابر اطلاعات سازمان خواربار و کشاورزی جهانی^۲

هر آزمایش، محصول خشک شده بلافاصله به داخل آون انتقال یافت و به منظور تعیین میزان ماده خشک، به مدت ۴ ساعت، در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و درصد رطوبت گوجه‌فرنگی‌ها محاسبه شد (Doymaz, 2007).

میزان دما و رطوبت هوای محیط، دمای خروجی جمع‌کننده خورشیدی، دمای خروجی محفظه خشک‌کن، و دمای صفحه جاذب در فواصل زمانی ۵ دقیقه، به‌طور جداگانه با رطوبت‌سنج (Tiwan, HT.3006 با دقت ± 0.1 RH) و دماسنج‌های (دماسنج نوع K با دقت ± 1 درجه سلسیوس) نصب شده در سیستم قرائت شد. برای قرائت میزان دمای صفحه جاذب از دو دماسنج استفاده گردید، یکی در فاصله ۵۰ سانتیمتر از قسمت بالا و دیگری در فاصله ۵۰ سانتیمتر از پایین جمع‌کننده نصب شده بود. مقدار متوسط داده‌های برداشت شده به‌عنوان دمای صفحه جاذب استفاده شد. برای قرائت میزان دمای ورودی و خروجی در محفظه اصلی خشک‌کن از دماسنج‌هایی که دقیقاً یکی در قسمت ورودی محفظه خشک‌کن بعد از کانال انتقال هوا از جمع‌کننده به خشک‌کن بود و دیگری در قسمت خروجی محفظه خشک‌کن قبل از فن قرار گرفته داشت، استفاده شد. برای قرائت میزان تابش خورشیدی در هر ساعت، از دستگاه شیدسنج (مدل PSP-EPPLY با دقت ۱ کالری در دقیقه بر سانتیمترمربع) استفاده شد. همچنین برای ثبت میزان دمای هوای محیط از دماسنج جیوه‌ای (مدل ALLA فرانسه با دقت ± 0.1 درجه سلسیوس) و برای ثبت سرعت هوای محیط نیز از سرعت‌سنج (مدل Taiwan, AVM-07 با دقت $\pm 0.1 + 3\%$ در صد متر بر ثانیه) استفاده شد.

تحلیل انرژی

مصرف انرژی (Eu) با قانون اول ترمودینامیک به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود (Syahrul et al., 2003).

$$Eu = \dot{m}_{da}(h_{dai} - h_{dao}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

دبی جرمی هوا \dot{m}_{da} با رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Ceylan

et al., 2007).

$$\dot{m}_{da} = \rho_a V_a A_{ac} \quad (\text{رابطه ۲})$$

آنتالپی هوای محفظه خشک‌کن خورشیدی را می‌توان

به‌صورت رابطه ۳ بیان کرد (Corzo et al., 2008):

$$h_{da} = C_{pda}(T - T_{\infty}) + h_{fg}w \quad (\text{رابطه ۳})$$

گرمای ویژه هوای ورودی و خروجی (C_{pda}) از رابطه ۴

به‌دست می‌آید (Corzo et al., 2008):

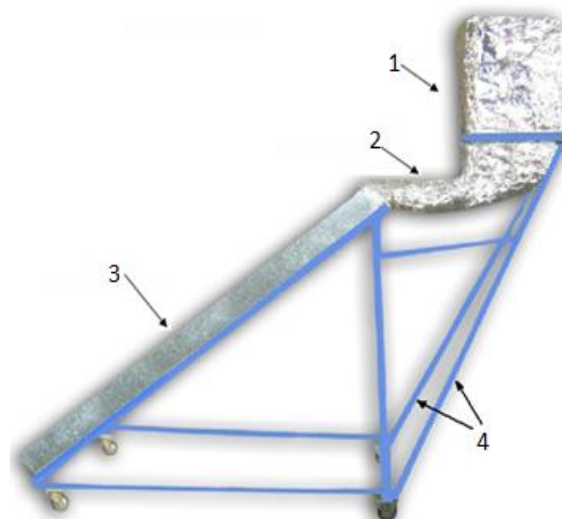
میزان سطح زراعی زیر کشت گوجه‌فرنگی در جهان، در سال ۲۰۰۹ برابر ۴/۴ میلیون هکتار بوده است که تولیدی برابر ۱۵۳ میلیون تن در سال را به خود اختصاص داده است. در حالی که سطح زیر کشت در ایران در سال ۱۳۸۹ برابر ۰/۱۶۴ میلیون هکتار و میزان تولید محصول برابر ۵/۹ میلیون تن بوده است (Anonymous, 2011).

تاکنون تحقیقاتی در زمینه آنالیز انرژی و اکسرژی گوجه‌فرنگی خشک‌شده در خشک‌کن خورشیدی صورت نپذیرفته است، بدین منظور خشک‌کن خورشیدی در پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران ساخته شد و آزمایش‌هایی روی محصول گوجه‌فرنگی با دستگاه خشک‌کن خورشیدی انجام و میزان انرژی و اکسرژی محفظه خشک‌کن خورشیدی محاسبه شد (Bagheri et al., 2010).

مواد و روش‌ها

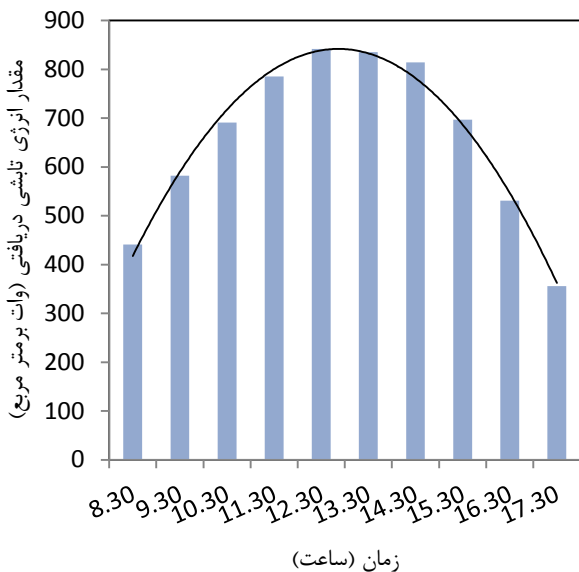
روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش، خشک‌کن خورشیدی شکل ۱ در محوطه باز زیر نور مستقیم خورشید قرار داده شد.



شکل ۱. خشک‌کن خورشیدی استفاده شده: ۱. محفظه خشک‌کن، ۲. کانال ارتباطی هوا، ۳. جمع‌کننده خورشیدی، و ۴. شاسی

گوجه‌فرنگی (رقم Red Cloud) به‌صورت تازه از بازار تهیه و کاملاً شسته شد و در ضخامت‌های ۵ و ۷ میلیمتر بریده شد. نمونه‌ها در توری‌های مخصوص قرار گرفت و داخل دستگاه خشک‌کن قرار داده شد. همچنین رطوبت اولیه نمونه‌ها با خشک‌کردن محصول به روش آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت محاسبه شد که برابر $93 \pm 0.5\%$ درصد به‌دست آمد (Hawlder et al., 1991). در پایان



شکل ۲. میزان انرژی تابشی دریافتی توسط جمع‌کننده خورشیدی

میزان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۵ میلی‌متر در سرعت‌های هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل‌های ۳، ۴، و ۵ نشان داده شده است. در سیستم خورشیدی در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب‌شده توسط هوای عبوری از جمع‌کننده خورشیدی ۱۵۶/۰۴ تا ۳۶۵/۲ وات، میزان انرژی مصرف‌شده ۶/۶۲ تا ۱۵۲/۷۲ وات، و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک‌کن خورشیدی از ۰/۰۲ الی ۰/۴۵ متغیر بود و نیز در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب‌شده توسط هوای عبوری از جمع‌کننده خورشیدی ۱۰۰/۲ تا ۱۹۳/۷۲ وات، میزان انرژی مصرف‌شده ۲۰/۰۴ تا ۱۱۳/۵۶ وات، و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک‌کن خورشیدی ۰/۱۳ الی ۰/۷۲ متغیر بود.

میزان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۷ میلی‌متر در سرعت‌های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه، در شکل‌های ۶، ۷، و ۸ نشان داده شده است. در سیستم خورشیدی در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب‌شده توسط هوای عبوری از جمع‌کننده خورشیدی ۱۶۹/۳۲ تا ۴۶۱/۴۸ وات، میزان انرژی مصرف‌شده ۳۰ تا ۲۲۹ وات، و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک‌کن خورشیدی ۰/۱۱ تا ۰/۴۲ متغیر بود و نیز در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب‌شده توسط هوای عبوری از جمع‌کننده خورشیدی ۵۰/۱ تا ۲۵۰/۵ وات، میزان مصرف انرژی ۹ تا ۱۶۷ وات، و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک‌کن خورشیدی ۰/۰۶ الی ۰/۶۶ متغیر بود.

$$C_{pda} = 1.004 + 1.88w \quad (\text{رابطه ۴})$$

در حین تحلیل انرژی و اکسرژی فرایند خشک‌شدن ورقه‌های گوجه‌فرنگی، رابطه ۵ برای تبدیل رطوبت نسبی به نسبت رطوبت هوا استفاده شد. (Topic, 1995)

$$w = 0.622 \frac{\phi P_{vs}}{P - P_{vs}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

میزان انتقال حرارت ناشی از تغییر فاز محتوی رطوبتی گوجه‌فرنگی ها طبق رابطه ۶ برابر است با (Syahrul et al., 2002)

$$Q = m \cdot w \cdot h_{fg} \quad (\text{رابطه ۶})$$

نسبت انرژی مصرفی محفظه خشک‌کن (EUR) از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد (Corzo et al., 2008):

$$EUR = \frac{\dot{m}_{da} (h_{dai} - h_{dao})}{\dot{m}_{da} (h_{dai} - h_{dae})} \quad (\text{رابطه ۷})$$

تحلیل اکسرژی

اکسرژی کل ورودی و خروجی و نیز اتلاف اکسرژی با تحلیل قانون دوم ترمودینامیک تعیین شد. شیوه اصلی برای تحلیل اکسرژی محفظه خشک‌کن، محاسبه مقادیر اکسرژی در نقاط پایدار و تعیین علت تغییر اکسرژی برای فرایند بود. بدین منظور فرم کلی معادله اکسرژی کاربردی برای سیستم با جریان ثابت طبق رابطه ۸ به کار گرفته شد (Midilli & Kucuk, 2003)

$$Ex = \dot{m}_{da} C_{pda} \left[(T - T_{\infty}) - \frac{T_{\infty} \ln T}{T_{\infty}} \right] \quad (\text{رابطه ۸})$$

اکسرژی تلف‌شده در محفظه خشک‌کن به صورت رابطه ۹ محاسبه شد (Akpınar, 2006):

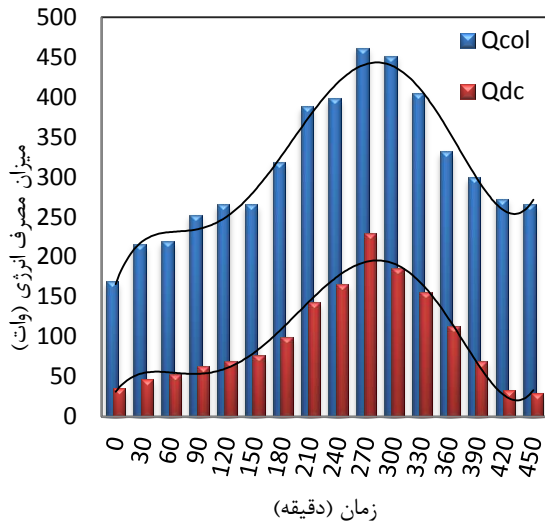
$$Ex_l = Ex_i - Ex_o \quad (\text{رابطه ۹})$$

بازده اکسرژی محفظه خشک‌کن خورشیدی می‌تواند به صورت اکسرژی مصرف‌شده برای خشک‌کردن محصول در مقایسه با اکسرژی هوای خشک‌کننده در محفظه خشک‌کن خورشیدی به صورت رابطه ۱۰ تعریف شود (Akbulut & Durmus, 2010):

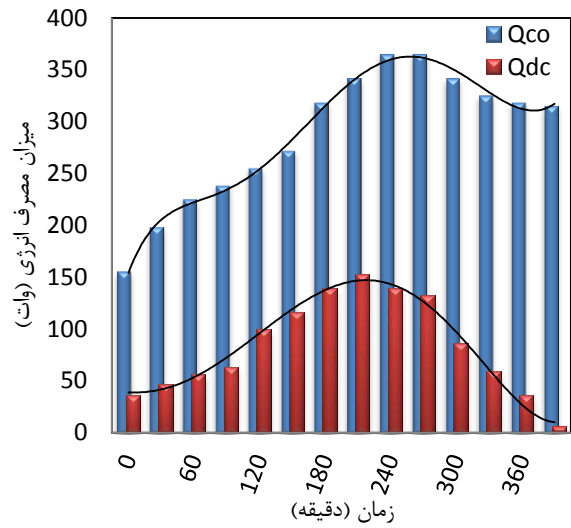
$$Ex_{eff} = \frac{Ex_i - Ex_l}{Ex_i} = 1 - \frac{Ex_l}{Ex_i} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

نتایج و بحث

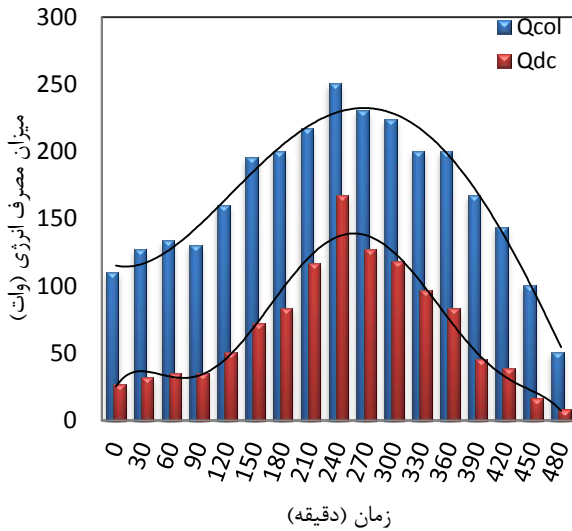
میزان تابش انرژی خورشیدی در زمان آزمایش در شکل ۲ نشان داده است.



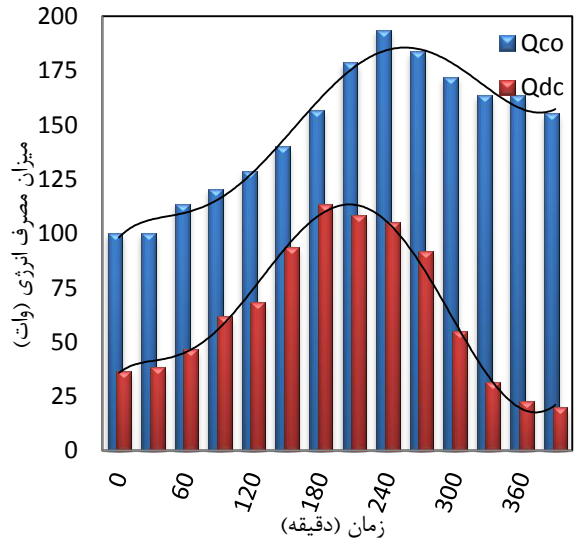
شکل ۲. تغییرات انرژی مصرف شده محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۷ میلیمتر



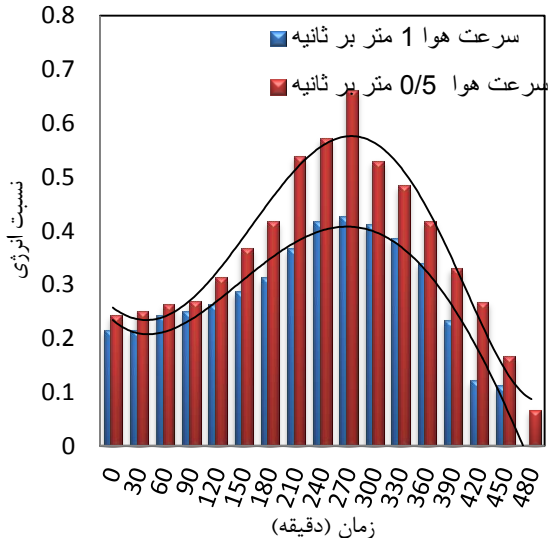
شکل ۳. تغییرات انرژی مصرف شده محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر



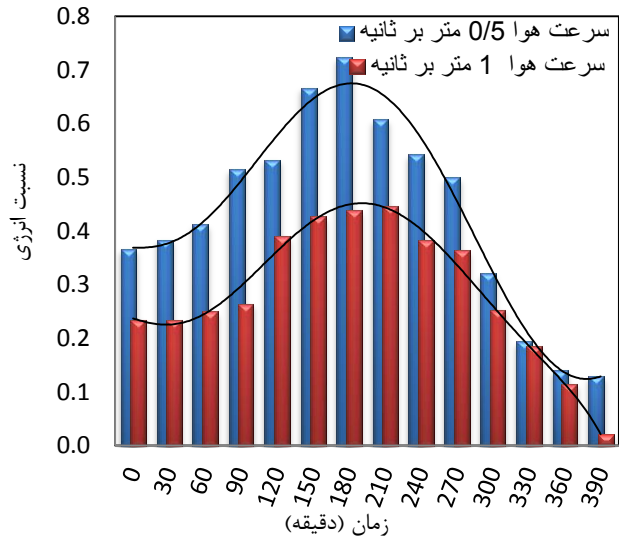
شکل ۴. تغییرات انرژی مصرف شده محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ضخامت ۷ میلیمتر



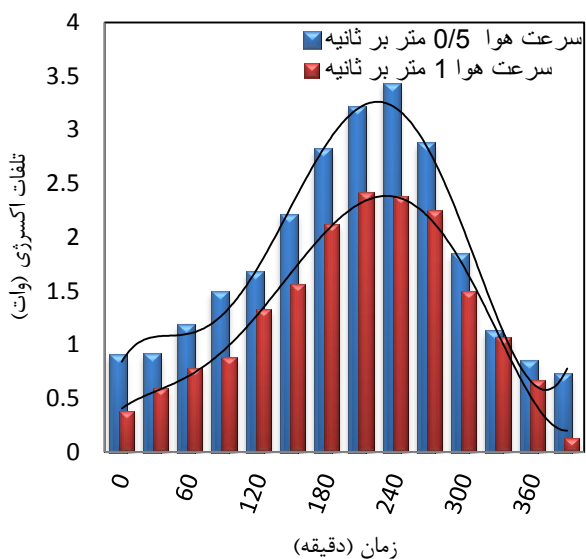
شکل ۵. تغییرات انرژی مصرف شده محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر



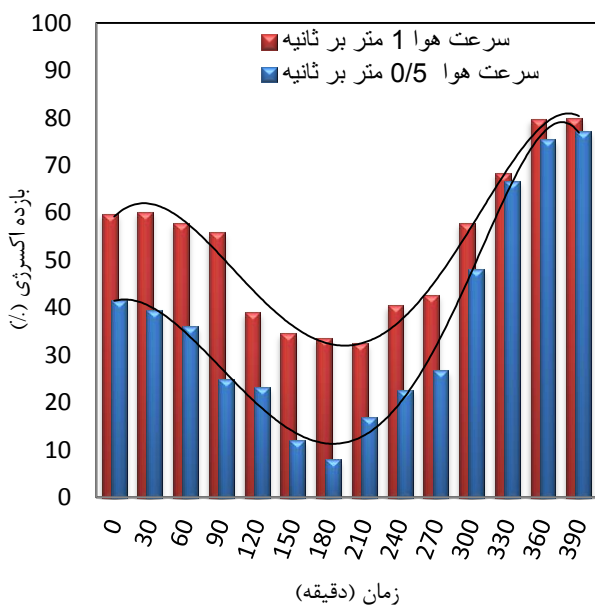
شکل ۶. نسبت انرژی مصرف شده در محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۷ میلیمتر



شکل ۷. نسبت انرژی مصرف شده در محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر



شکل ۹. تغییرات تلفات اکسرژی در محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر



شکل ۱۰. تغییرات بازده اکسرژی در محفظه خشک کن در مقایسه با زمان خشک شدن در سرعت های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۵ میلیمتر

تلفات اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی با گذشت زمان خشک شدن ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. این امر را این گونه می توان توجیه کرد که میزان تفاوت دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در ابتدا افزایش می یابد که خود سبب تبخیر بیشتر آب موجود در ورقه های گوجه فرنگی و مصرف اکسرژی بیشتر و اتلاف اکسرژی بیشتر می شود و سپس میزان تفاوت دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن کاهش می یابد، در نتیجه تبخیر کمتر و به تبع آن مصرف اکسرژی کمتر و اتلاف اکسرژی کمتر می شود. بازده تلفات اکسرژی در محفظه

با افزایش میزان تابش خورشید به سطح جمع کننده خورشیدی تا ساعات چهارم و پنجم آزمایش، میزان دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن افزایش می یابد و در نتیجه، باعث ازدیاد مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی محفظه خشک کن خورشیدی می شود و به عبارتی با افزایش دمای هوای جمع کننده خورشیدی و به تبع آن دمای محفظه خشک کن خورشیدی، مصرف انرژی، و نسبت مصرف انرژی افزایش می یابد، زیرا در دماهای بالاتر باعث کاهش بیشتر مقدار رطوبت می شود. به عبارت دیگر دماهای بالاتر باعث انتقال بیشتر حرارت و جرم می شود و در نتیجه مقدار رطوبت بیشتری از ورقه های گوجه فرنگی گرفته می شود.

همچنین در ساعات بعدی تا پایان آزمایش میزان تابش به سطح جمع کننده خورشیدی کاهش می یابد، در نتیجه حرارت هوای رسیده به محفظه جمع کننده کم می شود و باعث تقلیل میزان جذب رطوبت از ورقه های گوجه فرنگی می شود، در نتیجه مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد. از طرفی با افزایش سرعت فن سیستم و کاهش ضخامت نمونه ها، مدت زمان کمتری برای خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی نیاز است، زیرا اختلاف فشار جزئی بخار آب بین محصول و هوای خشک کننده عبوری افزایش می یابد و در نتیجه سرعت انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک کننده بیشتر و محصول زودتر خشک می شود، سرانجام با افزایش سرعت فن و کاهش ضخامت نمونه ها و به عبارتی افزایش انتقال جرم و حرارت، مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش می یابد. نتایج آزمایش با یافته های دیگر محققان مطابقت دارد (Akbulut and Durmus, 2010). میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، برای ورقه های گوجه فرنگی در ضخامت ۵ میلیمتر، در سرعت های هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. میزان تلفات اکسرژی ۲/۴۲ تا ۰/۱۳ وات و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی ۳۲ الی ۸۰ متغیر بود و نیز در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۰/۷ تا ۳/۴۲ وات و ۸ الی ۷۷ متغیر بود.

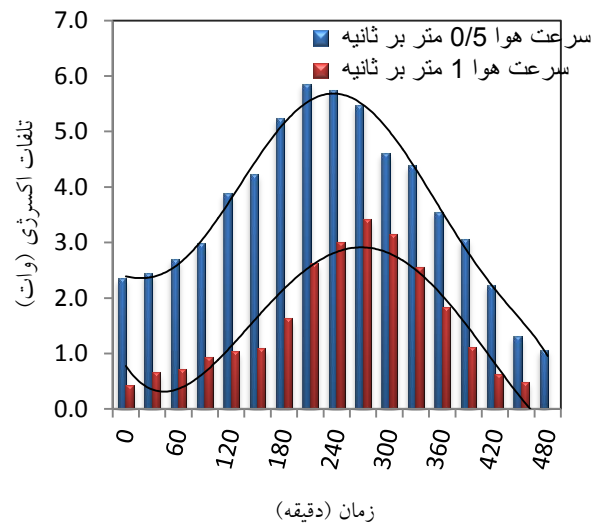
میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، برای ورقه های گوجه فرنگی در ضخامت ۷ میلیمتر، در سرعت های هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. میزان تلفات اکسرژی ۰/۴۸ تا ۳/۴۲ وات و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی ۲۷/۶ الی ۸۰/۷ متغیر بود و همچنین در سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۱/۱ تا ۵/۹ وات و ۲۰/۳۱ الی ۵۲/۲۰ متغیر بود.

نتیجه‌گیری

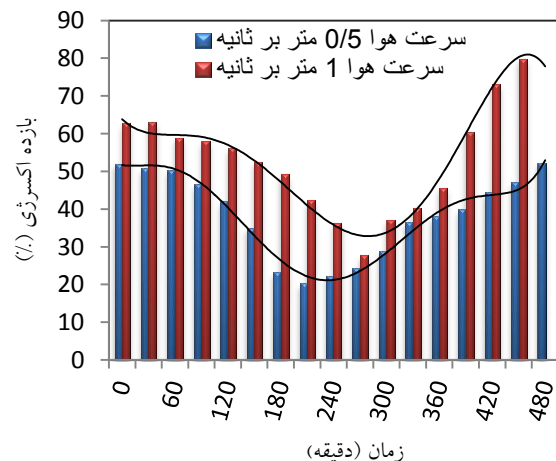
تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که در تیمارهای آزمایش‌شده در محفظه خشک‌کن برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۵ میلی‌متر، درصد تغییرات مقادیر مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی، تلفات اکسرژی، و بازده اکسرژی برای سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه در مقایسه با سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه، به ترتیب عبارت از ۱۹/۲۶ درصد افزایش، ۴۴/۷ درصد کاهش، ۵۷/۴ درصد کاهش، و ۳۱/۷۶ درصد افزایش، و همچنین برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت ۷ میلی‌متر به ترتیب ۴۷/۱۵ درصد افزایش، ۵۷/۹۳ درصد کاهش، ۴۴/۲۸ درصد کاهش و ۴۹/۳۵ درصد افزایش، است. همچنین در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه، در محفظه خشک‌کن برای ورقه‌های گوجه‌فرنگی با ضخامت‌های ۵ و ۷ میلی‌متر، میزان درصد تغییرات تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی به ترتیب ۵۲ درصد کاهش و ۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد. در شرایط حاکم، تغییرات مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی، و تلفات اکسرژی محفظه خشک‌کن خورشیدی، ابتدا افزایش و سپس کاهش و همچنین بازده اکسرژی ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند. بنابراین می‌توان بیان داشت که، به‌طور کلی افزایش سرعت هوا و کاهش ضخامت ورقه‌های گوجه‌فرنگی، میزان مصرف انرژی و بازده اکسرژی را در محفظه خشک‌کن خورشیدی افزایش و تلفات اکسرژی و میزان نسبت مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. با عایق‌بندی محفظه خشک‌کن خورشیدی، طراحی و انتخاب اجزای مناسب، و همچنین انتخاب شرایط بهینه خشک‌کردن می‌توان به افزایش بازده ترمودینامیک خشک‌کن‌های خورشیدی کمک کرد. بازده اکسرژی ابزار ارزشمندی برای تشخیص دادن تلفات کلیدی سیستم و عملکرد بهینه خشک‌کن‌های خورشیدی است.

علائم		
φ	رطوبت نسبی (درصد)	A مساحت سطح (متر مربع)
eff	بازده (درصد)	C_p گرمای ویژه (کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه کلوین)
a	هوا	EUR نسبت مصرف انرژی
e	داده‌های آزمایش	Ex اکسرژی (کیلووات)
da	هوای خشک‌کن	h آنتالپی (کیلوژول بر کیلوگرم)
i	ورودی	\dot{m} دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)
dc	محفظه خشک‌کن	Q میزان انتقال حرارت (وات)
l	تلفات	T دما (درجه سلسیوس)
o	خروجی	Eu انرژی ورودی
∞	محیط	V سرعت (متر بر ثانیه)
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	p_{vs} فشار اشباع (کیلو پاسکال)
w	نسبت رطوبت (گرم بر گرم)	h_{fg} گرمای نهان تبخیر بخار آب (کیلوژول بر کیلوگرم)
		p فشار اتمسفر (کیلو پاسکال)

خشک‌کن خورشیدی، نیز در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و دلیل این امر را می‌توان چنین بیان کرد که در ابتدا اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع‌کننده خورشیدی، در مقایسه با اختلاف دمای ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن خورشیدی، حالت نزولی دارد که این امر سبب افزایش بیشتر اتلاف اکسرژی در محفظه خشک‌کن در مقایسه با اتلاف اکسرژی در جمع‌کننده خورشیدی می‌شود و در نتیجه بازده اکسرژی سیستم کاهش می‌یابد و در مرحله بعد از آنجا که اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع‌کننده خورشیدی، در مقایسه با اختلاف دمای ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن خورشیدی، حالت صعودی دارد، این امر سبب کاهش بیشتر اتلاف اکسرژی در محفظه خشک‌کن، در مقایسه با اتلاف اکسرژی در جمع‌کننده خورشیدی می‌شود و بازده اکسرژی سیستم افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش با یافته‌های دیگر محققان مطابقت دارد (Akbulut & Durmus, 2010).



شکل ۱۱. تغییرات تلفات اکسرژی در محفظه خشک‌کن در مقایسه با زمان خشک‌شدن در سرعت‌های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۷ میلی‌متر



شکل ۱۲. تغییرات بازده اکسرژی در محفظه خشک‌کن در مقایسه با زمان خشک‌شدن در سرعت‌های هوای ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه و ضخامت ۷ میلی‌متر

REFERENCES

- Akbulut A and Durmus A. (2010). Energy exergy analysis of thinlayer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*. 35(4), 1754-1763.
- Akpinar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*. 59(1), 99–104.
- Akpinar, E.K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*. 73(1), 75–84.
- Akpinar EK. (2011). Drying of parsley leaves in a solar dryer and under open sun: modeling, energy and exergy aspects. *Journal Food Process Engineering*. 34(1), 27-48.
- Anonymous, (2008). (www.faostat.com).
- Babalıs, S.J. and Belessiotis, V.G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*. 65(3), 449–458.
- Bagheri, H., Arabhosseini, A. and Kianmehr, M.H. (2010). Design, Development and Evaluation of a Laboratory Solar Dryer. 6th national conference on agricultural machinery engineering and mechanization Conf., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University – Karaj, Iran. (In Farsi).
- Bolaji B. (2011). Exergetic analysis of solar energy drying systems. *Natural Resources*. 2(2), 92-97.
- Celma, A.R. (2009). Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*. 34(3), 660–666.
- Ceylan, I., Aktas, M. and Dogan, H. (2007). Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering*. 27(1), 216–222.
- Corzo, O., Bracho, N. Vasquez, A. and Pereira, A. (2008). Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. *Journal of Food Engineering*. 86(2), 151–161.
- Dincer, I. and Sahin, A. Z. (2004). A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47(4), 645–652.
- Doymaz I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61(3), 359–364.
- Doymaz, I. (2005). Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*. 69(2), 161–165.
- Doymaz, I. (2005). Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*. 69(3), 275–279.
- Doymaz, I. (2006). Thin layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*. 74(3), 370–375.
- Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 78(4), 1291–1297.
- Fudholi A., Sopian K., Othman, MY. and Ruslan, MH. (2014). Energy and exergy analyses of solar drying of red sea weed. *Energy Build*. 68(A), 121-129.
- Karim, M.D.A. and Hawlader, M.N.A. (2005). Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*. 70(1), 35–45.
- Midilli, A. and Kucuk, H. (2003). Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 44(7), 1111–1122.
- Prommas, R., Rattanadecho, P. and Cholaseuk, D. (2010). Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37(4), 372–378.
- Stanislowski, J. (2005). Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer. *Drying Technology*. 23(8), 1711–1721.
- Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. (2002). exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*. 2(2), 87-98.
- Topic, R. (1995). Mathematical model for exergy analysis of drying plants. *Drying Technology*. 13(1–2), 437–444.

