

تحلیل اثر انرژی و اکسرژی در یک خشک کن خورشیدی با هوای اجباری برای ورقه های نازک گوجه فرنگی  
هادی باقری<sup>۱\*</sup>، اکبر عرب حسینی<sup>۲</sup> و محمد حسین کیانمهر<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۷

### چکیده

در تحقیق حاضر تحلیل انرژی و اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی آزمایشگاهی با هوای اجباری برای ورقه های نازک گوجه فرنگی صورت گرفته است. خشک کردن در ضخامتهای ۵ میلیمتر و ۷ میلیمتر و در دو سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه صورت پذیرفت. در شرایط آزمایش درجه حرارت محیط بین ۲۲ درجه سلسیوس تا ۳۶ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی محیط بین ۱۴ درصد تا ۵۰ درصد و میزان تابش خورشیدی بین ۱۵۰ وات بر متر مربع تا ۸۵۰ وات بر متر مربع متغیر بود. با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک اثر متغیرهای خشک شدن روی مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی، اتلاف اکسرژی و بازده اکسرژی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که سرعت بالاتر هوای عبوری و کاهش ضخامت، نسبت مصرف انرژی و تلفات اکسرژی سیستم را کاهش و میزان بازده اکسرژی، مصرف انرژی سیستم را افزایش می دهد.

واژگان کلیدی: اکسرژی، انرژی، خشک کن خورشیدی، ورقه نازک گوجه فرنگی

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناس ارشد مکانیک ماشینهای کشاورزی- ایران-تهران- پاکدشت- دانشگاه تهران (پردیس ابوریحان)- گروه فنی کشاورزی

<sup>۱</sup> دانشیار (دکتری مکانیک ماشینهای کشاورزی)، ایران- تهران- پاکدشت- دانشگاه تهران (پردیس ابوریحان)- گروه فنی کشاورزی

\* (نویسنده مسئول hadibagheri@uma.ac.ir)

## مقدمه

پرمصرفترین عملیات و با اهمیت زیاد صنعتی تبدیل کرده است. بنابراین یکی از مهمترین چالش ها در صنایع تولید خشکبار، کاهش هزینه منابع انرژی برای تولید محصولات خشک با کیفیت مطلوب می باشد. از اینرو تحلیل موثر ترمودینامیکی برای خشک کن های خورشیدی، با هدف صرفه جویی در مصرف انرژی و بهینه سازی متغیرهای فرآیند، لازم و ضروری می باشد (Syahrul et al., 2002).

یکی از انواع سبزیجات گوجه فرنگی می باشد. گوجه فرنگی گیاهی لطیف گرمسیری و چند ساله که بیشتر در قاره آمریکا در باغ های تابستانی به صورت سالیانه رشد می کند. بنابر اطلاعات سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO) میزان سطح زراعی زیر کشت گوجه فرنگی 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 حالیکه 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 گوجه فرنگی خشک شده در خشک کن خورشیدی صورت پذیرفته است، بدین منظور خشک کن خورشیدی در پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران ساخته شد و آزمایشاتی بر روی محصول گوجه فرنگی با استفاده از دستگاه خشک کن خورشیدی انجام شد و سپس میزان انرژی و اکسرژی سیستم محاسبه شد (Bagheri et al., 2010).

خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های نگهداری مواد غذایی می باشد. کاهش محتوی رطوبتی منجر به کاهش یا توقف فعالیت های آنزیمی یا میکروبی و همچنین کاهش وزن محصولات و در نتیجه جابجایی و فرآوری آسانتر محصولات می گردد (Stanislawski, 2005). مصرف مقادیر زیاد انرژی در صنعت خشک کردن مواد غذایی، آنرا به اکسرژی، انرژی قابل دسترس در نقاط مختلف یک سیستم را ارزیابی می کند. در طراحی یک سیستم، روش تحلیل اکسرژی اطلاعات ارزنده ای در انتخاب مناسب اجزای طراحی و روشهای کاربرد را فراهم می آورد. این اطلاعات در تعیین طرح و هزینه عملیات، ذخیره انرژی، قابلیت تغییر سوخت و آلودگی نقش خیلی موثرتری دارند (Dincer and Sahin, 2004). تا کنون تحقیقات فراوانی در زمینه خشک کن های خورشیدی صورت پذیرفته است از جمله تحقیقاتی که در زمینه خشک کردن و مدل کردن محصولات کشاورزی، از جمله پسته (Midilli and Kucuk, 2003), لویا سبز (Doymaz, 2005)، بامیه (Doymaz, 2005)، هویج (Doymaz, 2004)، موز (Karim and Hawlader, 2005)، سیب و سیب زمینی، فلفل قرمز (Akpınar, 2005) (Babalıs and Akpınar et al., 2003)، انجیر (Belessiotis, 2004) و برگ نعنا (Doymaz, 2006) صورت پذیرفته است. ولی تحقیقات محدودی در زمینه انرژی و اکسرژی سیستم صورت پذیرفته است (Celma and Cuadros, 2009; Prommas et al., 2010; Akpınar et al., 2006; Akpınar, 2005).

علائم (Nomenclature)	
مساحت سطح (متر مربع)	رطوبت نسبی (درصد)
گرمای ویژه (کیلو ژول بر کیلوگرم بر درجه کلونین)	بازده (درصد)
نسبت مصرف انرژی	هوا
اکسرژی (کیلو وات)	داده های آزمایش
آنتالپی (کیلو ژول بر کیلوگرم)	هوای خشک کن
دبی جرمی (کیلو گرم بر ثانیه)	ورودی
میزان انتقال حرارت (وات)	محفظه خشک کن
دما (درجه سلسیوس)	تلفات
انرژی ورودی	خروجی
سرعت (متر بر ثانیه)	محیط

## مواد و روش‌ها

### روش انجام آزمایش

برای قرائت میزان دمای صفحه جاذب از دو ترموکوپل (نوع T با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس) استفاده گردید، یکی در فاصله ۵۰ سانتیمتر از قسمت بالا و دیگری در فاصله ۵۰ سانتیمتر از پایین جمع کننده نصب شده بود. مقدار متوسط داده های برداشت شده بعنوان دمای صفحه جاذب مورد استفاده قرار گرفت. برای قرائت میزان دمای ورودی و خروجی در محفظه اصلی خشک کن از ترموکوپل استفاده شد. برای قرائت میزان تابش خورشیدی در هر ساعت، از دستگاه شیدسنج (مدل PSP-EPPLY با دقت ۱ کالری در دقیقه بر سانتیمتر مربع) استفاده شد. همچنین برای ثبت میزان دمای هوای محیط از دماسنج جیوه ای و برای ثبت سرعت هوای محیط نیز از سرعت سنج (مدل Taivan,AVM-07 با دقت  $\pm 3\% + 0.1$  متر بر ثانیه) استفاده شد.

### تحلیل انرژی

مصرف انرژی (Eu) با استفاده از قانون اول ترمودینامیک به صورت رابطه ۱ بیان میشود. (Syahrul et al., 2003)

$$E \quad (1)$$

برای انجام آزمایش، خشک کن خورشیدی در محوطه باز زیر نور مستقیم خورشید قرار داده شد. گوجه فرنگی به صورت تازه از بازار تهیه و کاملاً شسته شده و در ضخامت های ۵ میلیمتر و ۷ میلیمتر بریده شد. نمونه ها در توری های مخصوص قرار گرفته و در داخل دستگاه خشک کن قرار داده شد. همچنین رطوبت اولیه نمونه ها با خشک کردن محصول به روش آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت محاسبه شد که برابر  $\pm 0.5\%$  ۹۳٪ بدست آمد (Hawlder et al., 1991). در پایان هر آزمایش نیز محصول خشک شده بلافاصله به داخل آون انتقال یافت و به منظور تعیین میزان ماده خشک، به مدت ۲۴ ساعت، در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد و درصد رطوبت گوجه فرنگی‌ها محاسبه شد. میزان دما و رطوبت هوای محیط، دمای خروجی جمع کننده خورشیدی، دمای خروجی محفظه خشک کن و دمای صفحه جاذب در فواصل زمانی ۵ دقیقه، بطور جداگانه توسط رطوبت سنج و ترموکوپل های نصب شده در سیستم قرائت شد.

### تحلیل اکسرژی

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

$$E \quad (8)$$

اکسرژی تلف شده در محفظه خشک کن به صورت رابطه ۹ محاسبه شد: (Akpınar, 2004)

$$E \quad (9)$$

بازده اکسرژی می تواند به صورت اکسرژی مصرف شده برای خشک کردن محصول نسبت به اکسرژی هوای خشک کننده در سیستم خشک کن به صورت رابطه ۱۰ تعریف شود: (Corzo et al., 2008)

$$E \quad (10)$$

### نتایج و بحث

میزان تابش انرژی خورشیدی در زمان آزمایش در شکل ۱ نشان داده است.

دبی جرمی هوا  $\dot{m}_{da}$  با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می شود. (Ceylan et al., 2007)

$$\dot{m} \quad (2)$$

آنتالپی هوای محفظه خشک کن خورشیدی را میتوان به صورت رابطه ۳ بیان نمود: (Corzo et al., 2008)

$$h \quad (3)$$

گرمای ویژه هوای ورودی و خروجی ( $C_{pda}$ ) از رابطه ۴ بدست می آید: (Corzo et al., 2008)

$$C \quad (4)$$

در حین تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی، رابطه ۵ جهت تبدیل رطوبت نسبی به نسبت رطوبت هوا استفاده شد. (Topic, 1995)

$$\omega \quad (5)$$

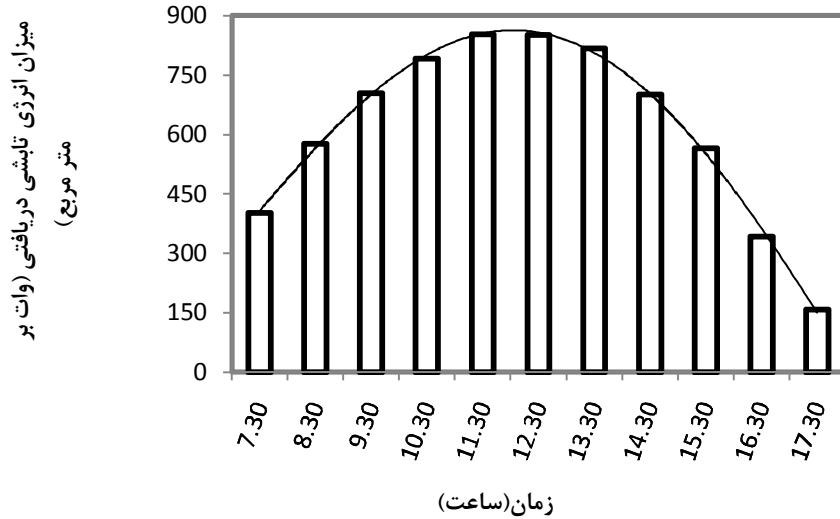
میزان انتقال حرارت ناشی از تغییر فاز محتوی رطوبتی گوجه فرنگی ها طبق رابطه ۶ برابر است با:

$$(Syahrul et al., 2002)$$

$$Q = m \cdot w \cdot h_{fg} \quad (6)$$

نسبت انرژی مصرفی محفظه خشک کن (EUR) از رابطه ۷ محاسبه می گردد: (Corzo et al., 2008)

$$E \quad (7)$$

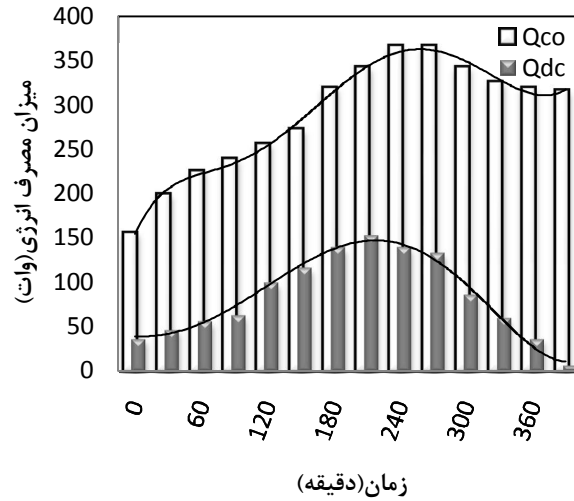


شکل ۱- تغییرات میزان انرژی تابشی در خشک کن خورشیدی

Fig. 1. The variation of solar radiation values in the solar dryer

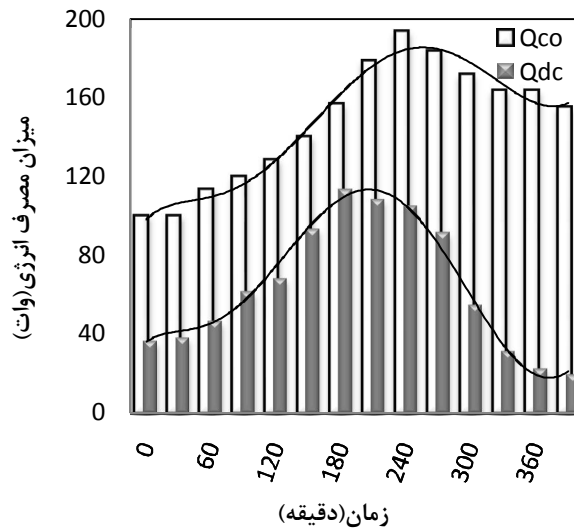
بترتیب ۱۵۶.۰۴ وات الی ۳۶۵.۲ وات، ۶.۶۲ وات الی ۱۵۲.۷۲ وات و ۰.۰۲ الی ۰.۴۵ متغییر بود و همچنین در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب شده توسط هوای عبوری جمع کننده خورشیدی، میزان انرژی مصرف شده و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک کن خورشیدی بترتیب ۱۰۰.۲ وات الی ۱۹۳.۷۲ وات، ۲۰.۰۴ وات الی ۱۱۳.۵۶ وات و ۰.۱۳ الی ۰.۷۲ متغییر بود.

میزان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای ورقه های گوجه فرنگی با ضخامت ۵ میلیمتر در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. در سیستم خورشیدی در سرعت ۱ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب شده توسط هوای عبوری از جمع کننده خورشیدی، میزان انرژی مصرف شده و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک کن خورشیدی



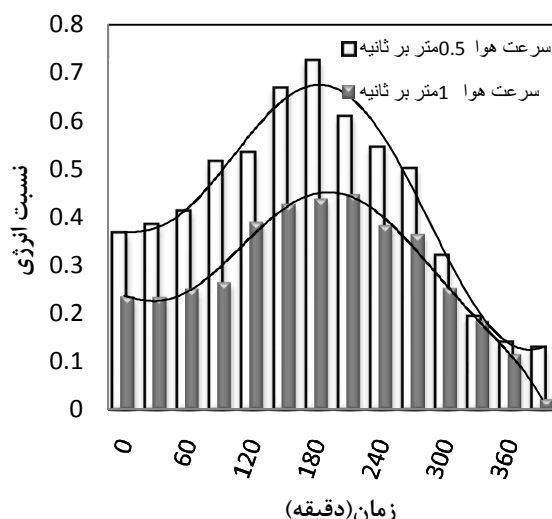
شکل ۲- تغییرات انرژی مصرف شده در سرعت ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۵ میلیمتر

Fig. 2. The results of the energy analysis for air velocity of  $1 \text{ ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 5mm



شکل ۳- تغییرات انرژی مصرف شده در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۵ میلیمتر

Fig. 3. The results of the energy analysis for air velocity of  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 5 mm

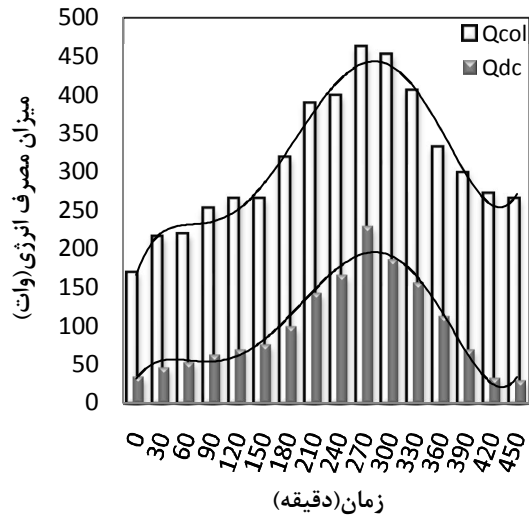


شکل ۴- نسبت انرژی مصرف شده در سرعت های ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۵ میلیمتر

**Fig.4. The results of the energy utilization ratio for air velocity of 0.5 and 1 ms<sup>-1</sup> of the drying air in thickness 5 mm**

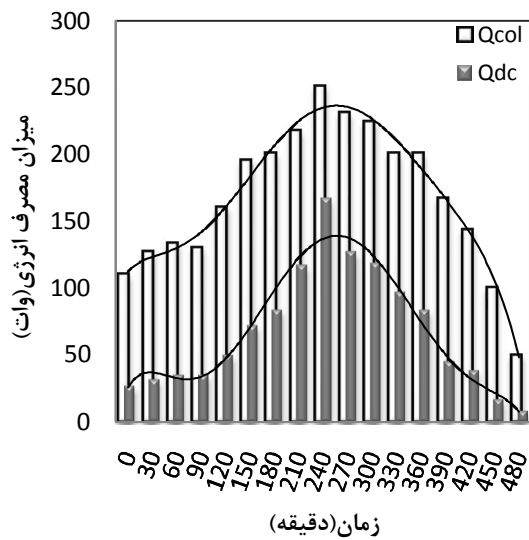
چهارم و پنجم آزمایش، میزان دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن بالاتر رفته و در نتیجه مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی محفظه خشک کن خورشیدی افزایش یافته و به عبارتی با افزایش دمای هوای جمع کننده خورشیدی و به تبع آن با افزایش دمای محفظه خشک کن خورشیدی، مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش می یابد، زیرا دماهای 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 دیگر تا پایان آزمایش میزان تابش به سطح جمع کننده خورشیدی کاهش یافته، در نتیجه دمای هوای رسیده به محفظه جمع کننده کاهش یافته و میزان جذب رطوبت از ورقه های گوجه فرنگی کم شده، در نتیجه مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی کاهش می یابد.

در میزان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی برای ورقه های گوجه فرنگی با ضخامت ۷ میلیمتر ۷ سرعت های ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه، در شکل های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. در سیستم خورشیدی در سرعت ۱ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب شده توسط هوای عبوری از جمع کننده خورشیدی، میزان انرژی مصرف شده و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک کن خورشیدی به ترتیب ۱۶۹.۳۲ وات الی ۴۶۱.۴۸، ۳۰ وات الی ۲۲۹ وات و ۰.۱۱ الی ۰.۴۲ متغیر بود و همچنین در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه میزان نرخ انرژی جذب شده توسط هوای عبوری از جمع کننده خورشیدی، میزان انرژی مصرف شده و نسبت مصرف انرژی در محفظه خشک کن خورشیدی به ترتیب ۵۰.۱ وات الی ۲۵۰.۵ وات، ۹ وات الی ۱۶۷ وات و ۰.۰۶ الی ۰.۶۶ متغیر بود. با افزایش میزان تابش به سطح جمع کننده خورشیدی تا ساعات



شکل ۵- تغییرات انرژی مصرف شده در سرعت ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۷ میلیمتر

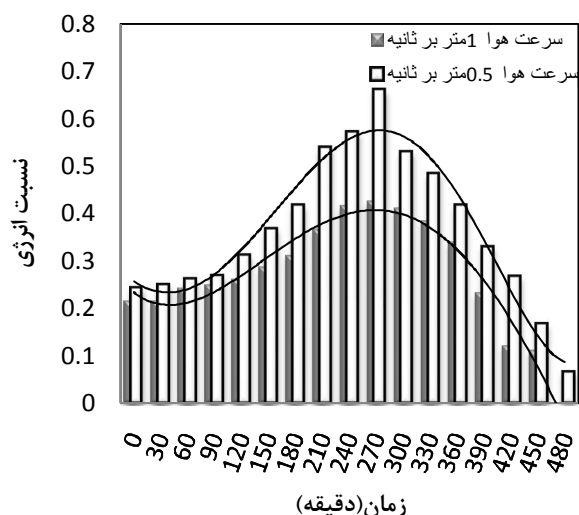
Fig.5. The results of the energy analysis for air velocity of  $1 \text{ ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 7 mm



شکل ۶- تغییرات انرژی مصرف شده در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۷ میلیمتر

Fig.6. The results of the energy analysis for air velocity of  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 7mm



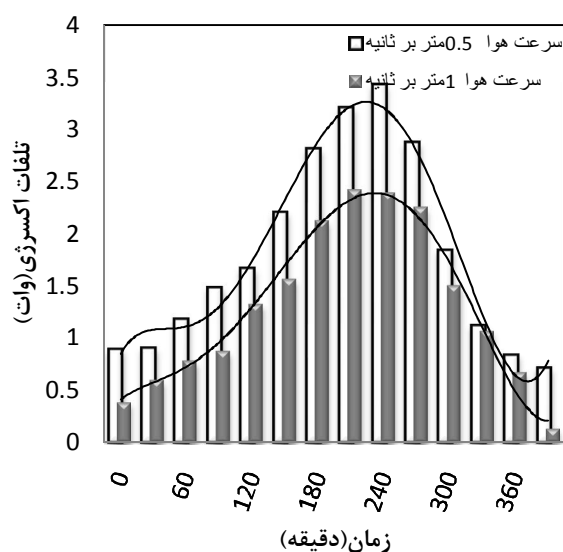


شکل ۷- نسبت انرژی مصرف شده در سرعت های ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۷ میلیمتر

Fig.7. The results of the energy utilization ratio for air velocity of 0.5 and 1 ms-1of the drying air in thickness 7 mm

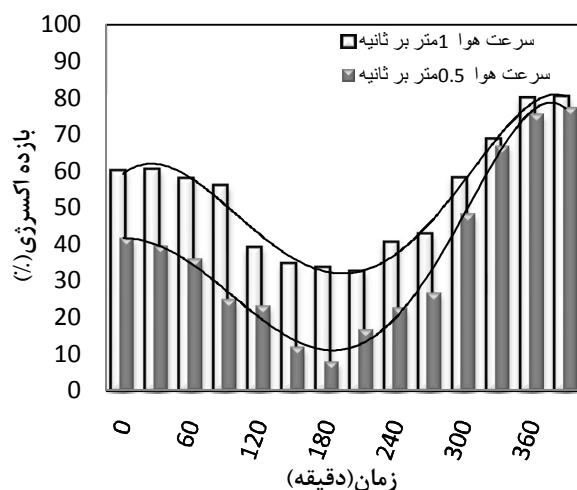
بیشتر شده و محصول زودتر خشک می شود، در نتیجه با افزایش سرعت فن و کاهش ضخامت نمونه ها و بعبارتی افزایش انتقال جرم و حرارت، مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش می یابد. نتایج آزمایش با یافته های دیگر محققین مطابقت دارد (Akbulut and Durmus. 2010).

از طرفی با افزایش سرعت فن و کاهش ضخامت نمونه ها، مدت زمان کمتری برای خشک شدن ورقه های گوجه فرنگی نیاز می باشد، زیرا 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



شکل ۸- تغییرات تلفات اکسرژی در سرعت های ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۵ میلیمتر

Fig.8. The results of the exergy loss for air velocity of 0.5 and 1 ms-1of the drying air in thickness 5 mm

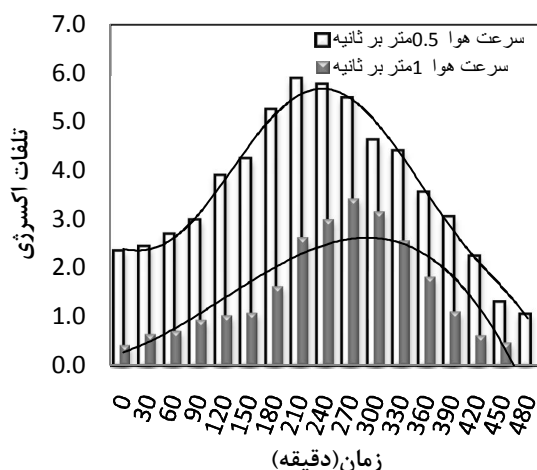


شکل ۹- تغییرات بازده اکسرژی در سرعت های ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۵ میلیمتر

**Fig. 9. The results of exergetic efficiency for air velocity of 0.5 and 1 ms<sup>-1</sup> of the drying air in thickness 5 mm**

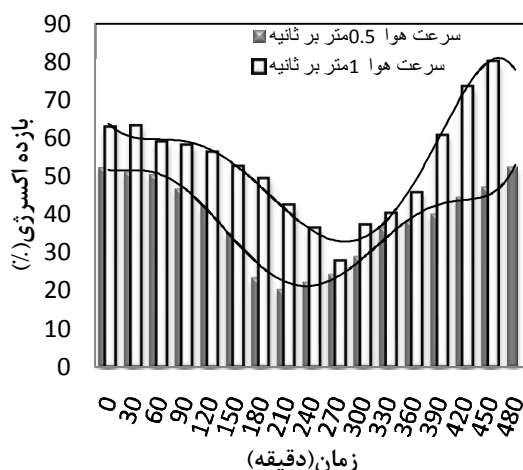
در ضخامت ۷ میلیمتر، در سرعت های ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، در سرعت ۱ متر بر ثانیه به ترتیب ۰.۴۸ وات الی ۳.۴۲ وات و ۲۷.۶ الی ۸۰.۷ متغیر بود و همچنین در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۱.۱ وات الی ۵.۹ وات و ۲۰.۳۱ الی ۵۲.۲۰ متغیر بود. تلفات اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی با گذشت زمان خشک شدن ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.

میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، برای ورقه های گوجه فرنگی در ضخامت ۵ میلیمتر، در سرعت های ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، در سرعت ۱ متر بر ثانیه به ترتیب ۲.۴۲ وات الی ۰.۱۳ وات و ۳۲ الی ۸۰ متغیر بود و همچنین در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه به ترتیب ۰.۷ وات الی ۳.۴۲ وات و ۸ الی ۷۷ متغیر بود. میزان تلفات اکسرژی و بازده اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، برای ورقه های گوجه فرنگی



شکل ۱۰- تغییرات تلفات اکسرژی در سرعت های ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۷ میلیمتر

Fig.10. The results of the exergy loss for air velocity of 0.5 and 1  $\text{ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 7 mm



شکل ۱۱- تغییرات بازده اکسرژی در سرعت ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه هوای محفظه خشک کن نسبت به زمان خشک شدن در ضخامت ۷ میلیمتر

Fig. 11. The results of exergetic efficiency for air velocity of 0.5 and 1  $\text{ms}^{-1}$  of the drying air in thickness 7 mm

مصرف اکسرژی کمتر و اتلاف اکسرژی کمتر می-شود. بازده محفظه خشک کن خورشیدی، نیز در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و دلیل این امر را می‌توان توجیه نمود که در ابتدا اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع کننده خورشیدی، نسبت به اختلاف دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن خورشیدی، حالت نزولی دارد که این امر سبب

این امر را اینگونه می‌توان توجیه نمود که میزان تفاوت دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن در ابتدا افزایش که خود سبب تبخیر بیشتر آب موجود در ورقه‌های گوجه فرنگی و مصرف اکسرژی بیشتر و اتلاف اکسرژی بیشتر و سپس میزان تفاوت دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن کاهش می‌یابد، در نتیجه تبخیر کمتر و به تبع آن

## References

- 1- Akbulut, A. and Durmus, A. 2010. Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer. *Energy*. 35, 1754–1764.
- 2- Akpınar, E.K., Bicer, Y. and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*. 59, 99–104.
- 3- Akpınar, E.K. 2005. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*. 73, 75–84.
- 4- Anonymous, 2008; ([www.faostat.com](http://www.faostat.com)).
- 5- Babalis, 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, 449–458.
- 6- Bagheri, H., Arabhosseini, A. and Kianmehr, M.H. 2010. Design, Development and Evaluation of a Laboratory Solar Dryer. 6<sup>th</sup> national conference on agricultural machinery engineering and mechanization Conf., College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University – Karaj, Iran. (In Farsi).
- 7- Celma, A.R. 2009. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process. *Renewable Energy*. 34(3): 660–666.
- 8- Ceylan, I., Aktas, M. and Dogan, H. 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering*. 27, 216–222.
- 9- 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, 151–161.
- 10- 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.
- 11- Doymaz I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61, 359–364.
- 12- Doymaz, I. 2005. Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*. 69, 161–165.

افزایش بیشتر اتلاف اکسرژی در محفظه خشک کن نسبت به اتلاف اکسرژی در جمع کننده خورشیدی شده و در نتیجه بازده اکسرژی سیستم کاهش می‌یابد و در مرحله بعد از آنجایی که اختلاف دمای ورودی و خروجی جمع کننده خورشیدی، نسبت به اختلاف دمای ورودی و خروجی محفظه خشک کن خورشیدی، حالت صعودی دارد، این امر سبب کاهش بیشتر اتلاف اکسرژی در محفظه خشک کن، نسبت به اتلاف اکسرژی در جمع کننده خورشیدی شده و در نتیجه بازده اکسرژی سیستم افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش با یافته‌های دیگر محققین مطابقت دارد (Akbulut and Durmus. 2010).

## نتیجه‌گیری

تحلیل داده نشان می‌دهد در شرایط حاکم تغییرات مصرف انرژی، نسبت مصرف انرژی و تلفات اکسرژی محفظه خشک کن خورشیدی، ابتدا بصورت صعودی افزایش و سپس بصورت نزولی کاهش و همچنین بازده اکسرژی ابتدا بصورت نزولی کاهش و سپس بصورت صعودی افزایش می‌یابند. همچنین افزایش سرعت هوا و کاهش ضخامت لایه‌های گوجه فرنگی، میزان مصرف انرژی و بازده اکسرژی را در محفظه خشک کن خورشیدی افزایش و تلفات اکسرژی و میزان نسبت مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. با عایق‌بندی محفظه خشک کن خورشیدی، طراحی و انتخاب اجزا مناسب، انتخاب شرایط بهینه خشک کردن می‌توان به افزایش بازده ترمودینامیک خشک کن‌های خورشیدی کمک کرد. در انتها بازده اکسرژی ابزار ارزشمندی برای تشخیص دادن تلفات کلیدی سیستم و عملکرد بهینه خشک کن‌های خورشیدی است.

- 13- Doymaz, I. 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*. 69, 275–279.
- 14- Doymaz, I. 2006. Thin layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*. 74, 370–375.
- 15- Karim, M.D.A. and Hawlader, M.N.A. 2005. Drying characteristics of banana theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering*. 70, 35–45.
- 16- Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 44, 1111–1122.
- 17- 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, 372–378.
- 18- Stanislawski, J. 2005. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer. *Drying Technology*. 23(8): 1711–1721.
- 19- Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. *Exergy, an International Journal*. 2, 87–98.
- 20- Topic, R. 1995. Mathematical model for exergy analysis of drying plants. *Drying Technology*. 13(1–2): 437–444

## Energy and exergy analyses of thin layer drying of tomato in a forced Solar Dryer

Hadi bagheri<sup>\*1</sup>, Akbar Arabhosseini<sup>2</sup> and Mohammad H. Kianmehr<sup>2</sup>

Received: 11 June 2013

Accept: 6 August 2013

### Abstract

In this paper the energy and exergy analyses in chamber drying process of thin layer tomato in a forced solar drying was investigated. The experiments were carried out with two thickness 5mm and 7 mm and two airflow  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  and  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . During the experimental process, Ambient Temperature between  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , air relative humidity between 14% and 50%, and solar radiation ranged from  $150 \text{ w.m}^{-2}$  to  $850 \text{ w.m}^{-2}$ . The effects of drying variables on energy utilization, energy utilization ratio, exergy loss and exergy efficiency were studied by applying the first law of thermodynamics. In addition, the results showed that both energy utilization rate and exergy loss efficiency of the drying chamber decreased with increasing drying mass flow rate and drying thickness while the exergetic efficiency and energy utilization of the drying chamber increased.

**Keywords:** Energy, Exergy, Thin layer tomato, Solar dryer.