

تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک شدن موز با استفاده از خشک‌کن هیبریدی

میثم زارعی^۱، علی نجات لرستانی^{۲*} و اسماعیل میرزایی قلعه^۳

چکیده

مصرف انرژی در صنعت خشک کردن، موجب شده است که خشک کردن، یک عمل با مصرف انرژی زیاد باشد. در این پژوهش، آنالیز انرژی و اکسرژی خشک شدن موز با استفاده از خشک‌کن هیبریدی انجام شد. آزمایش‌ها در سه سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و سه دمای هوای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۵ میلی‌متر انجام شد. طرح آزمایشی انتخاب شده، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی بود. با افزایش دمای هوا و سرعت هوا، میزان مصرف انرژی، گرمای تبخیر شده، مجموع اکسرژی خروجی، اتلاف اکسرژی افزایش یافت؛ در حالیکه بازده اکسرژی کاهش یافت. نتایج حاصل از تحلیل انرژی و اکسرژی نشان داد که بیشترین میزان مصرف انرژی و میزان اتلاف اکسرژی برای دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۰/۴۱ کیلوژول بر ثانیه بوده است. همچنین کمترین مقدار میزان مصرف انرژی و میزان اتلاف اکسرژی برای دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۰/۱۰ و ۰/۰۲ کیلوژول بر ثانیه به دست آمد. بیشترین مقدار راندمان اکسرژی طی فرآیند خشک شدن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه برابر ۹۱٪ بود و کمترین مقدار آن در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۳٪ بود.

واژه‌های کلیدی: انرژی، اکسرژی، خشک‌کن هیبریدی، ورقه‌های موز.

ارجاع: زارعی م. لرستانی ع. ن. و میرزایی قلعه ا. ۱۳۹۶. تحلیل انرژی و اکسرژی فرآیند خشک شدن موز با استفاده از خشک‌کن هیبریدی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۶(۱): ۴۱-۴۸.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

* نویسنده مسئول: lorestani@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۲۱

مقدمه

از کلیدی‌ترین مسائل خشک کردن، کاهش قیمت منابع انرژی به منظور افزایش راندمان خشک شدن برای بهبود کیفیت محصولات خشک شده است (Nazghelichi et al., 2010). کاربرد آنالیز انرژی و اکسرژی برای هر نوع محصولی به منظور تعیین کمیت انرژی مورد نیاز برای خشک کردن و تعیین اتلاف اکسرژی در هر مرحله از فرآیند است. تمرکز کردن روی آنالیز انرژی و اکسرژی اهمیت زیادی دارد (Hepbasli, 2008) و مفهوم اکسرژی با استفاده از مفهوم کار برگشت‌پذیر تعریف می‌شود. مفهوم برگشت‌پذیری بدون در نظر گرفتن کاهش کیفیت انرژی (اتلاف اکسرژی) به تعادل انرژی و جرم وابسته است (Oliveira, 2013).

موز یکی از میوه‌هایی است که در حال حاضر بیشترین تلفات پس از برداشت را دارد که ناشی از فساد سریع آن است. برای حفظ و نگهداری موز یکی از روش‌های ذخیره‌سازی، خشک کردن است (Fernandes et al., 2005). میدیلی و کوکاک کوکوک انرژی و اکسرژی خشک شدن پسته در خشک‌کن خورشیدی را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساختار و محتوی رطوبتی عامل مهمی در افزایش مصرف انرژی و کاهش تلفات است (Midilli & Kucuk, 2003). آکپینار انرژی و اکسرژی برای خشک شدن ورقه‌های فلفل قرمز در یک خشک‌کن آزمایشگاهی را بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها، با افزایش دما مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی افزایش؛ در حالیکه با گذشت زمان مصرف انرژی و نسبت مصرف انرژی کاهش پیدا کرد. تلفات اکسرژی با افزایش دما افزایش پیدا کرد و بازده اکسرژی روند خاصی نداشت (Akpınar, 2004). رامیرز و همکاران انرژی و اتلاف اکسرژی محصول گوجه‌فرنگی را آنالیز و کردند. آن‌ها رطوبت بعد از خشک شدن را تعیین کردند تا شاخص اکسرژی را تخمین بزنند. نتایج آن‌ها بر پایه میانگین کاهش دما در مقادیر ۱۲/۸ و ۸/۷ درجه سانتی‌گراد و افزایش رطوبت نسبی ۷ و ۹ درصد گزارش شد (Ramirez et al., 2014).

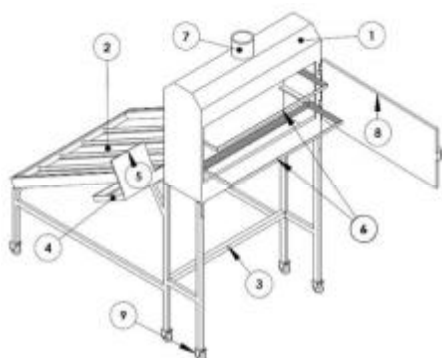
موز محصولی است که به سرعت فاسد می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش عمر مفید آن، خشک کردن است. در فرآیند خشک کردن، معمولاً تمام انرژی صرف خشک شدن محصول نمی‌شود؛ بلکه بخشی از آن به

صورت اکسرژی در قسمت‌های بدنه خشک‌کن از دست می‌رود. مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از: ارزیابی و آنالیز انرژی و اکسرژی خشک شدن موز با استفاده از خشک‌کن هیبریدی و محاسبه بیشینه میزان مصرف انرژی، بیشینه تلفات اکسرژی و بیشینه بازده اکسرژی.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن هیبریدی

این خشک‌کن قابلیت کاربرد در تمام طول شبانه‌روز و ساعات غیرآفتابی را نیز دارد. هوای گرم مورد نیاز خشک کن در طول روز با استفاده از جمع‌کننده‌های خورشیدی هوا گرم و در ساعاتی که تابش نامناسب است، از طریق سیستم گرمایشی مکمل تأمین می‌شود. (Karami, 2014). در شکل ۱ قطعات خشک‌کن هیبریدی نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک ساده از قطعات خشک‌کن مورد استفاده

- ۱- محفظه خشک‌کن، ۲- جمع‌کننده خورشیدی، ۳- شاسی، ۴- سلول خورشیدی، ۵- جعبه کنترلر، ۶- سینی‌ها، ۷- دمپر، ۸- درب محفظه و ۹- چرخ (Karami, 2014)

در این پژوهش، آزمایش‌ها در سه دمای ۷۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سرعت هوای ورودی ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و به ضخامت ۵ میلی‌متر برای ورقه‌های نازک موز (*Musa sapientum*) در سه تکرار انجام شد. برای تهیه ۳۰۰ گرم ورقه‌های نازک موز با ضخامت ۵ میلی‌متر از تی‌زبر و کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. برای اندازه‌گیری درصد رطوبت از ترازوی دیجیتال به دقت ۰/۰۱ گرم و آون (با دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) استفاده شد (ASAE, 2002). هنگام انجام آزمایش‌ها، دما و رطوبت هوای ورودی، دما و رطوبت

$$\dot{m}_a = \rho_a U_a A_{dc} \quad (۳)$$

$$\rho_a = \frac{P}{RT} \quad (۴)$$

که در آن \dot{m}_{ai} میزان دبی هوای ورودی (kg/s)، \dot{m}_{ao} میزان دبی هوای خروجی (kg/s)، ρ_a چگالی هوا (kg/m^3)، U_a سرعت هوای ورودی (m/s)، A_{dc} سطح مقطع محفظه خشک کننده (m^2)، P معادل فشار هوای محیط که معادل $1.01 \times 10^5 Pa$ ، R ثابت گازها که برای هوا معادل $290 \frac{J}{kgK}$ و T دمای ورودی به محفظه خشک کن است.

آنتالپی هوای ورودی یا خروجی برابر است با آنتالپی هوای خشک به علاوه آنتالپی بخار آب. با به دست آمدن این شاخص‌ها با معادله (۵)، اکسرژی از دست رفته تحلیل و بررسی شد (Corzo et al., 2008):

$$h_a = C_a(T_a - T_\infty) + h_{fg}w \quad (۵)$$

که در آن h_a آنتالپی هوای ورودی یا خروجی (kJ/kg)، C_a گرمای ویژه هوای ورودی یا خروجی ($kJ/kg^\circ C$)، T_a دمای هوای ورودی یا خروجی ($^\circ C$)، T_∞ دمای محیط ($^\circ C$)، h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب (kJ/kg) و w رطوبت مطلق هوای ورودی یا خروجی است.

نرخ انتقال گرما که منجر به تبخیر در خشک کن می‌شود، از معادله (۶) به دست آمد (Syahrul et al., 2002):

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ai} h_{fg}w \quad (۶)$$

که در آن \dot{Q}_{evap} گرمای تبخیر شده (kJ/s)، \dot{m}_{ai} میزان دبی هوای ورودی (kg/s)، h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب (kJ/kg) و w رطوبت مطلق هوای ورودی یا خروجی است.

برای به دست آوردن گرمای ویژه محصول از معادله (۷) استفاده شد (Choi & Okos, 1986):

$$C_p = 4.187 X_m + 1.424 X_c + 1.549 X_p + 1.675 X_f + 0.837 X_a \quad (۷)$$

که در آن C_p گرمای ویژه محصول، X_m میزان رطوبت (%)، X_c نسبت کربوهیدرات (%)، X_p نسبت پروتئین، X_f نسبت چربی و X_a نسبت خاکستر است.

میزان ترکیبات مختلف برای ۱۰۰ گرم موز که در محاسبه گرمای ویژه استفاده شده است، در جدول ۱ ارائه شده است.

برای به دست آوردن آنتالپی محصول تازه و خشک شده، ابتدا باید گرمای ویژه محصول ورودی یا خروجی را از معادله (۸) محاسبه و دمای محصول ورودی یا خروجی و

هوای خروجی و رطوبت و هوای محیط یادداشت شد. آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک کامل تصادفی آزمون فاکتوریل 3×3 (سه دما، سه سرعت هوای ورودی و سه تکرار) انجام شد. برای اندازه‌گیری دمای هوای خروجی از محفظه از دستگاه رطوبت‌سنج-دماسنج مدل ۱۳۶۵ استفاده شد (شکل ۲-الف). برای اندازه‌گیری سرعت هوای ورودی به محفظه از سرعت‌سنج پره‌ای با دقت اندازه‌گیری $\pm 1\%$ و حساسیت 0.1 متر بر ثانیه استفاده گردید (شکل ۲-ب). آنالیز آماری این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 20 و Microsoft Excel 2010 انجام گرفت.



شکل ۲- دستگاه رطوبت‌سنج - الف) دماسنج و ب) دستگاه سرعت‌سنج پره‌ای جهت اندازه‌گیری سرعت هوا

تحلیل انرژی

در این پژوهش میزان مصرف انرژی در هنگام خشک شدن موز با استفاده از معادله (۱) بررسی شد (Corzo et al., 2008):

$$EU = \dot{m}_{ai} h_{ai} + \dot{m}_{PF} h_{PF} - \dot{m}_{ao} h_{ao} - \dot{m}_{PD} h_{PD} - \dot{Q}_{defl} \quad (۱)$$

در این معادله، EU میزان مصرف انرژی (kJ/s)، \dot{m}_{ai} میزان دبی هوای ورودی (kg/s)، h_{ai} آنتالپی هوای ورودی (kJ/kg)، \dot{m}_{PF} میزان دبی محصول تازه (kg/s)، h_{PF} آنتالپی محصول تازه ورودی (kJ/kg)، \dot{m}_{ao} میزان دبی هوای خروجی (kg/s)، h_{ao} آنتالپی هوای خروجی (kJ/kg)، \dot{m}_{PD} میزان دبی محصول خشک شده (kg/s)، h_{PD} آنتالپی محصول خشک شده (kJ/kg) و \dot{Q}_{defl} نرخ تلفات حرارت از بدنه (kJ/s) است.

برای به دست آوردن دبی هوای ورودی یا خروجی و چگالی هوا از معادلات (۲)، (۳) و (۴) استفاده شد (Ceylan et al., 2007):

$$\dot{m}_{ai} = \dot{m}_{ao} \quad (۲)$$

که در آن \dot{Q}_{defl} ، نرخ گرمای تلف شده از بدنه خشک‌کن (kJ/s) ، U_{def} ، ضریب تلفات حرارتی بدنه خشک‌کن $(kW/m^2 \cdot ^\circ C)$ ، A_{def} ، سطح در تماس بدنه خشک‌کن (m^2) و $T_{m\dot{v}def}$ ، دمای میانگین بدنه خشک‌کن (در سه نقطه) $(^\circ C)$ است.

در نهایت می‌توان ضریب تلفات حرارتی بدنه خشک‌کن را با مساوی قرار دادن معادلات (۱۰) و (۱۱) به دست آورد. همان‌گونه که ذکر شد، ضریب تلفات حرارتی از بدنه خشک‌کن را می‌توان با استفاده از معادله (۱۲) به دست آورد (Aghbashlo et al., 2008):

$$U_{def} = \frac{\dot{m}_{ai} c_{ai} (T_{ai} - T_{ao})}{A_{def} (T_{m\dot{v}def} - T_{\infty})} \quad (12)$$

تحلیل اکسرژی

مجموع اکسرژی هوای ورودی و خروجی محصول تازه و خشک از طریق قانون دوم ترمودینامیک قابل محاسبه است. روش اساسی برای تحلیل اکسرژی محفظه خشک‌کن، محاسبه اکسرژی در شرایط پایدار است برای این هدف، فرم کلی قابل استفاده معادله اکسرژی برای شرایط پایدار قابل استفاده می‌باشد (Akpınar et al., 2006).

اکسرژی هوای ورودی یا خروجی و اکسرژی محصول ورودی یا خروجی را می‌توان با استفاده از معادله (۱۳) به دست آورد (Akpınar, 2004):

$$Ex = \dot{m} C \left[(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \left(\frac{T}{T_{\infty}} \right) \right] \quad (13)$$

که در آن Ex ، اکسرژی هوا و یا محصول ورودی یا خروجی (kJ/s) ، \dot{m} ، دبی جرمی هوا و یا محصول ورودی یا خروجی (kg/s) ، C ، گرمای ویژه هوای ورودی یا خروجی و محصول ورودی یا خروجی $(kJ/kg \cdot ^\circ C)$ ، T ، دمای هوا و یا محصول ورودی یا خروجی $(^\circ C)$ و T_{∞} ، دمای محیط $(^\circ C)$ است.

مهم‌ترین مرحله تحلیل اکسرژی، میزان اکسرژی تلف شده از بدنه است که اکسرژی تلف شده از بدنه خشک‌کن از طریق معادله (۱۴) محاسبه می‌شود (Syahrul et al., 2002):

$$Ex_{defl} = \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{m\dot{v}def}} \right) \dot{Q}_{defl} \quad (14)$$

که در آن Ex_{defl} ، اکسرژی تلف شده از بدنه خشک‌کن (kJ/s) ، T_{∞} ، دمای محیط $(^\circ C)$ و $T_{m\dot{v}def}$ ، دمای میانگین بدنه خشک‌کن (در سه نقطه) $(^\circ C)$ است.

همچنین دمای محیط را با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج-دماسنج اندازه‌گیری کرد (Aghbashlo et al., 2008):

$$h_p = C_p (T_p - T_{\infty}) \quad (8)$$

که در آن h_p ، آنتالپی محصول ورودی یا خروجی (kJ/kg) ، C_p ، گرمای ویژه محصول ورودی یا خروجی $(kJ/kg \cdot ^\circ C)$ و T_p ، دمای محصول ورودی یا خروجی $(^\circ C)$ است.

جدول ۱- ترکیبات موز برای محاسبه گرمای ویژه (Islam et al., 2012; Hassanian, 2009)

ترکیبات	نسبت جرمی (%)
آب	۷۳/۱۱
پروتئین	۱/۲
چربی	۰/۲
خاکستر	۲/۴۹
کربوهیدرات	۲۳

گرمای ویژه هوا در حالت خشک برابر $(kJ/kg \cdot ^\circ C)$ $1/0.04$ است؛ ولی در حالت مرطوب باید مقدار رطوبت هوای ورودی و خروجی را نیز در اختیار داشت. این شاخص (معادله (۹)) در تعیین آنتالپی هوای ورودی یا خروجی به کار می‌رود (Corzo et al., 2008):

$$C_a = 1.004 + 1.88 w \quad (9)$$

که در آن C_a ، گرمای ویژه هوای ورودی یا خروجی $(kJ/kg \cdot ^\circ C)$ و w ، رطوبت هوای ورودی یا خروجی است. نرخ گرمای تلف شده از هوای خروجی به شاخص‌های دبی هوای ورودی، گرمای ویژه هوای ورودی، دمای هوای ورودی و خروجی وابسته است. نرخ گرمای تلف شده از هوای خروجی را می‌توان با استفاده از معادله (۱۰) به دست آورد (Aghbashlo et al., 2008):

$$\dot{Q}_{aol} = \dot{m}_{ai} C_{ai} (T_{ai} - T_{ao}) \quad (10)$$

که در آن \dot{Q}_{aol} ، نرخ گرمای تلف شده از هوای خروجی (kJ/s) ، \dot{m}_{ai} ، میزان دبی هوای ورودی (kg/s) ، C_{ai} ، گرمای ویژه هوای ورودی $(kJ/kg \cdot ^\circ C)$ ، T_{ai} ، دمای هوای ورودی $(^\circ C)$ و T_{ao} ، دمای هوای خروجی $(^\circ C)$ است.

نرخ گرمای تلف شده از بدنه خشک‌کن را می‌توان از معادله (۱۱) به دست آورد (El-Sebaï et al., 2002):

$$\dot{Q}_{defl} = U_{def} A_{def} (T_{m\dot{v}def} - T_{\infty}) \quad (11)$$

در نهایت بازده اکسرژی براساس معادله (۱۸) محاسبه شد (Aghbashlo et al., 2008):

$$Ex_{eff} = \frac{\sum Ex_i - \sum Ex_l}{\sum Ex_i} = 1 - \frac{\sum Ex_l}{\sum Ex_i} \quad (18)$$

که در آن Ex_{eff} ، بازده اکسرژی می‌باشد. بازده اکسرژی موقعی که عمل خشک کردن صورت نمی‌گیرد، ۱۰۰٪ است و به تدریج با شروع خشک شدن از میزان آن کاسته می‌شود.

نتایج و بحث

در جدول ۲ مقایسه میانگین به روش آزمون دانکن روی داده‌ها نشان داده شده است.

برای به دست آوردن میزان اکسرژی تلف شده از بدنه خشک‌کن از معادلات (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) استفاده شد (Aghbashlo et al., 2008):

$$\sum Ex_l = \sum Ex_i - \sum Ex_o \quad (15)$$

$$\sum Ex_i = Ex_{ai} + Ex_{PF} \quad (16)$$

$$\sum Ex_o = Ex_{ao} + Ex_{PD} + Ex_{defl} \quad (17)$$

که در آن $\sum Ex_l$ ، مجموع اکسرژی تلف شده، $\sum Ex_i$ ، مجموع اکسرژی ورودی، $\sum Ex_o$ ، مجموع اکسرژی خروجی، Ex_{ai} ، اکسرژی هوای ورودی، Ex_{PF} ، اکسرژی محصول تازه، Ex_{ao} ، اکسرژی هوای خروجی، Ex_{PD} ، اکسرژی محصول خروجی و Ex_{defl} ، اکسرژی تلف شده از بدنه خشک‌کن است. شایان ذکر است که همه این پارامترها دارای واحد مشترک (kJ/s) هستند.

جدول ۲- اثر تیمارهای سرعت هوا و دما بر صفت‌های مورد بررسی

صفت	دمای ۶۰°C	دمای ۷۰°C	دمای ۸۰°C	سرعت ۱m/s	سرعت ۱/۵ m/s	سرعت ۲ m/s
دبی هوا (kg/s)	۰/۴۰۳ ^a	۰/۴۰۱ ^a	۰/۳۹۹ ^a	۰/۲۶۷ ^a	۰/۴۰۱ ^b	۰/۵۳۴ ^c
آنتالپی هوای ورودی (kJ/kg)	۲۵/۲۶۶ ^a	۳۰/۷۲۵ ^{ab}	۳۲/۵۹۳ ^b	۳۰/۹۳۷ ^a	۲۸/۵۳۳ ^a	۲۹/۱۱۵ ^a
آنتالپی هوای خروجی (kJ/kg)	۴۶/۸۵۵ ^a	۴۹/۵۱۰ ^b	۵۰/۲۰۹ ^b	۴۹/۶۰۵ ^a	۴۸/۲۷۹ ^a	۴۸/۶۹۰ ^a
آنتالپی محصول ورودی (kJ/kg)	۰/۵۲۸ ^a	۰/۵۱۳ ^a	۰/۵۲۴ ^a	۰/۴۹۷ ^a	۰/۵۰۹ ^a	۰/۵۵۸ ^a
آنتالپی محصول خروجی (kJ/kg)	۰/۴۳۹ ^a	۰/۴۷۴ ^a	۰/۴۴۷ ^a	۰/۴۷۳ ^a	۰/۴۱۸ ^a	۰/۴۷۰ ^a
نرخ گرمای تلف شده از هوای خروجی (kg/s)	۰/۵۸۴ ^a	۰/۵۹۱ ^a	۰/۶۳۳ ^a	۰/۴۵۳ ^a	۰/۶۵۶ ^b	۰/۶۹۷ ^b
ضریب تلفات حرارتی از بدنه خشک‌کن (kW/m ² °C)	۰/۲۳۸ ^a	۰/۳۶۹ ^a	۰/۴۵۳ ^a	۰/۲۸۰ ^a	۰/۳۶۵ ^a	۰/۴۱۶ ^a
گرمای تبخیر شده (kJ/s)	۰/۰۵۹ ^a	۰/۰۶۱ ^a	۰/۰۶۳ ^a	۰/۰۶۷ ^a	۰/۰۷۰ ^a	۰/۰۷۳ ^a
نرخ گرمای تلف شده از بدنه خشک‌کن (kg/s)	۰/۲۴۵ ^a	۰/۳۴۷ ^{ab}	۰/۴۴۹ ^b	۰/۲۹۶ ^a	۰/۳۶۰ ^a	۰/۳۸۵ ^a
میزان مصرف انرژی (kJ/s)	۰/۷۱۵ ^a	۰/۷۲۵ ^a	۰/۷۳۳ ^a	۰/۵۸۲ ^a	۰/۶۵۴ ^a	۰/۷۹۷ ^b
اکسرژی هوای ورودی (kJ/s)	۰/۴۶۴ ^a	۰/۵۲۸ ^a	۰/۵۵۰ ^a	۰/۴۴۰ ^a	۰/۵۳۵ ^{ab}	۰/۵۶۸ ^b
اکسرژی هوای خروجی (kJ/s)	۰/۳۹۴ ^a	۰/۴۱۶ ^a	۰/۴۶۵ ^a	۰/۲۸۹ ^a	۰/۳۹۸ ^b	۰/۵۸۷ ^c
اکسرژی محصول ورودی (kJ/s)	۰/۴۶۵ ^a	۰/۵۰۴ ^a	۰/۴۳۱ ^a	۰/۴۳۰ ^a	۰/۴۸۷ ^a	۰/۴۸۴ ^a
اکسرژی محصول خروجی (kJ/s)	۰/۲۸۴ ^a	۰/۳۰۵ ^a	۰/۳۰۹ ^a	۰/۳۴۳ ^a	۰/۲۸۸ ^a	۰/۳۴۳ ^a
اکسرژی تلف شده از بدنه خشک‌کن (kJ/s)	۰/۲۹۹ ^a	۰/۳۲۵ ^a	۰/۳۴۹ ^a	۰/۳۹۰ ^a	۰/۳۲۰ ^a	۰/۲۶۴ ^a
مجموع اکسرژی ورودی (kJ/s)	۰/۲۸۸ ^a	۰/۳۰۳ ^a	۰/۲۹۶ ^a	۰/۲۶۱ ^a	۰/۳۰۳ ^a	۰/۳۲۴ ^a
مجموع اکسرژی خروجی (kJ/s)	۰/۴۳۷ ^a	۰/۴۷۱ ^a	۰/۵۰۸ ^a	۰/۴۰۷ ^a	۰/۴۶۴ ^{ab}	۰/۵۴۴ ^b
مجموع اکسرژی تلف شده (kJ/s)	۰/۲۸۵ ^a	۰/۳۲۳ ^a	۰/۳۵۶ ^a	۰/۳۲۲ ^a	۰/۳۲۸ ^a	۰/۳۳۶ ^a
بازده اکسرژی	۰/۴۰۱ ^a	۰/۳۹۷ ^a	۰/۳۹۳ ^a	۰/۴۳۱ ^a	۰/۴۲۰ ^a	۰/۴۰۷ ^a

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین اثرات هستند.

هوا از ۱ به ۱/۵ و ۱/۵ به ۲ متر بر ثانیه میزان مصرف انرژی افزایش پیدا کرده است. هنگام افزایش دما هیچ تفاوت معناداری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. این در

تحلیل واریانس نشان داد که در همه سرعت‌های هوای با دماهای مختلف با افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس و از ۷۰ به ۸۰ درجه سلسیوس و افزایش سرعت

اکسرژی افزایش پیدا کرد. همچنین طی این افزایش دما و سرعت هوا هیچ تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری ایجاد نشد. بیشینه اتلاف اکسرژی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۴۱ یافت شد و کمینه مقدار مجموع اکسرژی تلف شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه برابر ۰/۰۲ به دست آمد.

میزان کمی از اکسرژی مهیا شده در محفظه خشک‌کن تخریب شده و انرژی در هوای خروجی موجود است. این مطلب نشان‌دهنده این است که تخریب اکسرژی در محفظه خشک‌کن در دما و سرعت هوای بالا بیشتر بوده؛ در حالیکه تخریب اکسرژی در محفظه خشک‌کن در دما و سرعت هوای پایین کمتر است.

بر اساس نتایج، بیشینه مقدار راندمان اکسرژی طی فرآیند خشک شدن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه برابر ۹۱٪ و کمینه مقدار آن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه برابر ۳٪ است. زمانی که فرآیند خشک شدن شروع نشده، راندمان خشک شدن برابر ۱۰۰٪ بوده است و به تدریج از میزان آن کاسته می‌شود؛ به گونه‌ای که با گذشت زمان خشک شدن راندمان اکسرژی به صورت مداوم کاهش پیدا کرد. تحلیل واریانس نشان داد که با افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ و ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش سرعت هوا از ۱ به ۱/۵ و ۱/۵ به ۲ متر بر ثانیه، بازده اکسرژی کاهش پیدا کرد. طی این افزایش دما و سرعت هوا، هیچ‌گونه تفاوت معنی‌داری دیده نشد.

می‌توان دریافت که دلیل عدم بازدهی ترمودینامیکی خشک‌کن‌ها مربوط به اکسرژی هوای خروجی است و این که بخش عمده‌ای از اکسرژی مهیا شده به صورت اکسرژی هوای خروجی تلف می‌شود. عامل دیگر عدم بازدهی تلفات اکسرژی (تلفات گرما از بدنه) از بدنه است. شایان ذکر است که تلفات اکسرژی از بدنه زمانی اتفاق می‌افتد که دمای بدنه خیلی بالاتر از دمای محیط باشد. بنابراین جلوگیری از انتقال حرارت از بدنه می‌تواند تلفات اکسرژی از بدنه را کاهش دهد. عایق کردن بدنه، آب‌بندی بدنه، برگرداندن هوای خروجی، انتخاب شرایط بهینه خشک کردن و انتخاب اجزا و ترکیبات مناسب، می‌تواند تلفات اکسرژی از بدنه را کاهش دهد و بازده ترمودینامیکی را زیاد کند.

حالی است که حین افزایش سرعت هوا تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ ایجاد شد ($P < 0.05$). بر اساس نتایج، بیشترین میزان مصرف انرژی برای دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۹۱ کیلوژول بر ثانیه به دست آمد و کمترین میزان مصرف انرژی برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱ متر بر ثانیه برابر ۰/۱۰ محاسبه شد که با نتایج Corzo et al., 2008 مطابقت داشت.

تحلیل واریانس نشان داد که در افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ و ۷۰ به ۸۰ درجه سلسیوس و افزایش سرعت هوا از ۱ به ۱/۵ و ۱/۵ به ۲ متر بر ثانیه، گرمای تبخیر شده افزایش یافت. شایان ذکر است که در حین این افزایش‌ها هیچ‌گونه تفاوت آماری مشاهده نشد. بر اساس نتایج، بیشینه مقدار گرمای تبخیر شده در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۱۲ کیلو ژول بر ثانیه به دست آمد. همچنین کمینه این پارامتر، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه ۰/۰۱ کیلو ژول بر ثانیه به دست آمد که با نتایج Corzo et al. (2008) مطابقت داشت.

تحلیل اکسرژی

تحلیل واریانس نشان داد که با افزایش سرعت هوا از ۱ به ۱/۵ و ۱/۵ به ۲ متر بر ثانیه مجموع اکسرژی خروجی افزایش پیدا کرد ($P < 0.05$). همچنین با افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ و از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی‌گراد مجموع اکسرژی خروجی افزایش پیدا کرد، ولی تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری مشاهده نشد.

بیشینه مجموع اکسرژی خروجی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۳۸ به دست آمد. این در حالی است که کمینه این شاخص در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه برابر ۰/۲۱ یافت شد. چون، شاخص اکسرژی طی فرآیند خشک شدن به مصرف می‌رسد، مقدار کمی از اکسرژی قابل دسترسی است. این تفسیر برای انرژی خلاف واقع و پارامتر انرژی همچنان در بخش خروجی قابل دسترسی است (Corzo et al., 2008).

تحلیل واریانس نشان داد که با افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ درجه و ۷۰ به ۸۰ درجه سلسیوس و افزایش سرعت هوا از ۱ به ۱/۵ متر بر ثانیه و ۱/۵ به ۲ متر بر ثانیه اتلاف

- Journal of Heat and Mass Transfer, 31: 1165-1176.
3. Akpınar, E. K. Midilli, A. and Bicer, Y. 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. Journal of Food Engineering, 72: 320-331.
 4. ASAE Standards. 2002. S385.2: Moisture measurement - forages. St. Joseph, Mich.
 5. Ceylan, I. Aktas, M. and Dogan H. 2007. Energy and Exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. Applied Thermal Engineering, 27: 216-222.
 6. Choi, Y. and Okos, M. R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. Food engineering and process applications. Elsevier, 1: 3-101.
 7. 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.
 8. El-Sebaii, A. A. Aboul-Enein, S. Ramadan, M. R. I. El-Gogary, and H. G. 2002. Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables. Energy, 27: 845-859.
 9. Fernandes, F. A. N. Rodrigues, S. Gaspareto, O. C. P. and Oliveira, E. L. 2005. Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. Journal of Food Engineering, 77: 188-193.
 10. Hassanain, A. A. 2009. Simple solar drying system for banana fruit. World Journal of Agricultural Sciences, 5: 446-455.
 11. Hepbasli, A. 2008. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12: 593-661.
 12. Islam, M. S. Hague, M. A. and Islam, M. N. 2012. Effects of drying parameters on dehydration of green banana (*Musa Sapientum*) and its Use in Potato (*Solanum tuberosum*) chips formulation. A Scientific Journal of Krishi Foundation, 10: 87-97.
 13. Karami, H. 2014. Design, manufacturing and evaluation of Hybrid dryer for herbal plants. MSc Dissertation, Razi university. (In Farsi).
 14. Midilli, A. and Kucuk, H. 2003. Energy and Exergy Analyses of Solar Drying Process of Pistachio. Energy, 28: 539-556.
 15. Nazghelichi, T. Kianmehr, M. H. and Aghbashlo, M. 2010. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. Energy, 35: 4679-4684.
 16. Oliveira Jr. S. D. 2013. Exergy Production Cost and Renewability. Springer Publication. 340 p.
 17. Ramirez, T. Meas, Y. and Gottschalk, K.

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

۱. با افزایش زمان خشک شدن، وزن نمونه‌ها، درصد رطوبت، میزان مصرف انرژی، گرمای تبخیر شده، مجموع اکسرژی خروجی و راندمان اکسرژی کاهش یافت؛ در حالی که اتلاف اکسرژی افزایش یافت.
۲. با افزایش دمای هوا و سرعت هوا، میزان مصرف انرژی، گرمای تبخیر شده، مجموع اکسرژی خروجی، اتلاف اکسرژی افزایش یافت؛ در حالیکه راندمان اکسرژی کاهش یافت.
۳. بیشترین میزان مصرف انرژی برای دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۹۱ کیلوژول بر ثانیه به دست آمد و همچنین کمترین میزان مصرف انرژی برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۱ متر بر ثانیه برابر ۰/۱۰ کیلوژول بر ثانیه محاسبه شد.
۴. بیشترین مقدار راندمان اکسرژی طی فرآیند خشک شدن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ برابر ۹۱٪ بود.
۵. بیشترین مقدار گرمای تبخیر شده در دمای ۸۰ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه برابر ۰/۱۲ کیلو ژول بر ثانیه به دست آمد. همچنین کمترین مقدار این پارامتر در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه ۰/۰۱ کیلو ژول بر ثانیه به دست آمد.
۶. محدوده تغییرات مجموع انرژی خروجی بین ۰/۲۱ و ۰/۳۸ کیلو ژول بر ثانیه بود.
۷. بیشینه و کمینه اتلاف اکسرژی به ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۰۲ کیلو ژول بر ثانیه بود.

منابع

1. Aghbashlo, M. Kianmehr, M. H. and Samimi-Akhiljahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of barberries fruit (*Berberidaceae*). Energy Conversion and Management, 49: 2865-2871.
2. Akpınar E. K. 2004. Energy and Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Slices in Convective Type Dryer. International

2014. Energy Interaction of Sub Processes in Drying Value Chain Using Exergy Waste. Study Case: Drying and Greenhouse Growing of Tomato. Energy Procedia, 57: 1437-1446.
18. Syahrul, S. Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2002. Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. Exergy an International Journal, 2: 87-98.