

تحلیل انرژی و انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب در یک خشک‌کن هوای گرم

محسن بیگی^{*۱}

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

در این تحقیق، شاخص‌های انرژی و انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب در یک خشک‌کن هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت و اثر پارامترهای هوای خشک‌کردن بر آنها مطالعه شد. آزمایش‌های خشک کردن در سه سطح دمای هوای ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه انجام شد. متوسط نرخ مصرف انرژی فرآیند در محدوده ۰/۳۲۴ تا ۱/۵۴۳ کیلووات به دست آمد. مقادیر کمینه و بیشینه انرژی ویژه مصرفی به ترتیب در شرایط خشک کردن با دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه به دست آمد. میانگین نرخ انرژی ورودی، انرژی خروجی و انرژی تلف شده به ترتیب از ۰/۹۱۰۶ تا ۰/۵۲۰۹۵ کیلوژول بر ثانیه، از ۰/۶۴۰۱ تا ۰/۴۶۱۳۵ کیلوژول بر ثانیه و از ۰/۲۷۰۵ تا ۰/۵۹۶۰ کیلوژول بر ثانیه به دست آمد. متوسط نرخ قابلیت بهبود انرژی با افزایش دمای هوا و سرعت هوا افزایش یافت و از ۰/۰۸۰۴ تا ۰/۱۱۷۵ کیلوژول بر ثانیه متغیر بود.

کلید واژگان: خشک کردن، سیب، مصرف انرژی، راندمان انرژی

* مسئول مکاتبات: mohsenbeigi59@gmail.com

۱- مقدمه

خشک کردن یک فرآیند ضروری و مهم در صنایع مختلف از قبیل صنایع شیمیایی، کشاورزی، غذایی، بیوتکنولوژی و داروسازی است که اغلب به عنوان آخرین مرحله تولید و قبل از بسته‌بندی و یا فروش محصول انجام می‌شود [۱]. این فرآیند یکی از مرسوم‌ترین و بهترین روش‌ها برای نگهداری محصولات کشاورزی و غذایی است و باعث افزایش مدت انبارداری، کاهش ضایعات، حمل و نقل آسان‌تر و همچنین تنوع در مصرف این محصولات می‌شود [۲]. اگر چه هنوز روش‌های سنتی مانند استفاده از آفتاب و سایه، به خاطر سادگی و هزینه‌های اندک، در خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما به دلیل برخی معایب از قبیل مدت زمان طولانی فرآیند، آلودگی‌های میکروبی و افت کیفیت محصول، در دهه‌های اخیر استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی به صورت گسترده مورد توجه واقع شده است [۳].

علی‌رغم مزایای بسیار، مصرف انرژی زیاد یکی از اصلی‌ترین معایب خشک‌کن‌های صنعتی است که باید مورد نظر قرار گیرد. گرمای نهان تبخیر زیاد آب و راندمان انرژی پایین خشک‌کن‌های صنعتی، از جمله مهم‌ترین عوامل مصرف بالای انرژی در فرآیند خشک کردن هستند. بنابراین، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در صنعت خشک کردن، تولید محصولات با کیفیت مطلوب با کمترین هزینه ممکن است. از این رو، به منظور بهینه‌سازی شرایط خشک کردن و کاهش هزینه‌ها، انجام تحلیل‌های انرژی و انرژی لازم است [۴].

دانش ترمودینامیک نقش مهمی در تحلیل‌های انرژی و انرژی فرآیندهای صنعتی دارد. قانون اول ترمودینامیک بر اصل بقا انرژی بنا شده و به طور معمول در مسائل مهندسی به منظور بررسی و بهبود عملکرد سیستم‌های تبدیل انرژی به کار برده می‌شود. علی‌رغم مزایای متعدد، قانون اول ترمودینامیک هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد برگشت‌ناپذیری فرآیندهای ترمودینامیکی و کیفیت صورت‌های مختلف انرژی ارائه نمی‌دهد و بنابراین، برای

طراحی پایدار و یا بهینه‌سازی سیستم کافی نیست. انرژی، انرژی یا کار قابل تحصیل در نقاط مختلف یک سیستم در حال تعادل با محیط مرجع را تعیین می‌کند و ترکیبی از خصوصیات سیستم و محیط اطراف آن است زیرا هم به سیستم و هم به محیط اطراف سیستم وابسته است [۵]. بر خلاف انرژی، انرژی تابع قانون بقا نیست، بلکه به دلیل وجود برخی برگشت‌ناپذیری‌ها در فرآیندهای واقعی مانند خشک کردن، مصرف و یا تلف می‌شود. تحلیل انرژی روشی کارآمدتر در ارزیابی استفاده موثر از منابع انرژی است، زیرا نمای واقعی‌تری از فرآیند ارائه می‌دهد که حتی در برخی موارد در مقایسه با تحلیل‌های استاندارد انرژی متفاوت است [۶]. برای تحلیل انرژی از قانون دوم دینامیک استفاده می‌شود.

اخیراً مطالعات متعددی درباره بررسی و تحلیل راندمان انرژی و انرژی فرآیند خشک کردن محصولات گوناگون کشاورزی از قبیل ورقه‌های گوجه فرنگی [۷]، گندم [۸]، فلفل قرمز [۹]، ورقه‌های بادمجان [۱۰]، ورقه‌های کدو تنبل [۱۱]، برگ زیتون [۱۲]، برگ جعفری [۱۳]، دانه‌های انار [۱۴]، قطعات هویج [۱۵]، سویا [۱۶]، شلتوک برنج [۱۷]، پسته [۱۸]، قره قاط، ازگیل و گیلاس [۱۹]، سیب زمینی [۲۰] و کلم بروکلی [۲۱] توسط خشک‌کن‌های مختلف گزارش شده است. با این حال، اطلاعات گزارش شده در مورد تحلیل‌های انرژی و انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب بسیار کم است. آکپینار و همکاران (۲۰۰۵) قطعات سیب را در یک خشک‌کن سیکلونی در شرایط مختلف خشک و شاخص‌های نسبت مصرف انرژی و اتلاف انرژی را بررسی کردند [۲۱]. قاسم‌خانی و همکاران (۲۰۱۶) پارامترهای انرژی فرآیند خشک شدن ورقه‌های سیب در یک خشک‌کن دوار مجهز به مبدل حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. اهداف اصلی تحقیق حاضر عبارتند از خشک کردن قطعات سیب با استفاده از یک خشک‌کن هوای گرم در دماها و سرعت‌های مختلف هوا، بررسی شاخص‌های انرژی و انرژی فرآیند با استفاده از قوانین اول و دوم ترمودینامیک و همچنین ارائه روابط

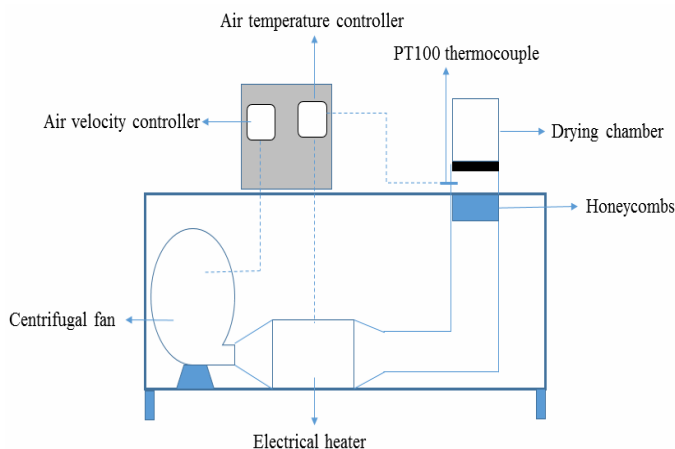


Fig 1 A schematic of the experimental set-up.

۲-۳- آزمایش‌های خشک کردن

قبل از شروع هر آزمایش، حدود ۳ کیلوگرم از محصول ذخیره شده از یخچال خارج و برای رسیدن به تعادل دمایی با محیط به مدت ۲ ساعت در اتاق آزمایش قرار داده شد. سیب‌ها با آب شسته شده، با دست پوست کنده شدند و با استفاده از یک اسلایسر دست‌ساز به قطعاتی مکعبی شکل با ابعاد ۴ میلی‌متر تقسیم شدند. برای هر آزمایش، حدود ۳۰۰ گرم از نمونه‌ها داخل محفظه خشک‌کن قرار داده شد به طوری که ارتفاع اولیه نمونه‌ها درون محفظه خشک‌کن حدود ۴ سانتیمتر بود. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و در سه سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه انجام شد. در حین آزمایش‌ها، توزین نمونه‌ها در فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (Shimadzu, UW6200H, Japan) انجام و محتوی رطوبتی لحظه‌ای با استفاده از موازنه جرم (رابطه ۲) محاسبه شد:

$$M = \left(\frac{(M_0 - 1) \times W_0}{W} + 1 \right) \quad (2)$$

که، M و W به ترتیب محتوی رطوبتی لحظه‌ای (بر پایه تر) و جرم لحظه‌ای (کیلوگرم) نمونه‌های در حال خشک شدن هستند. آزمایش‌های خشک کردن قطعات سیب تا رسیدن محتوی رطوبتی نمونه‌ها به حدود ۰/۱۰ بر پایه تر ادامه پیدا کردند. همچنین، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی از محفظه خشک‌کن با استفاده از یک حسگر دما-رطوبت نسبی (SHT15, USA) در فواصل زمانی منظم ۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد.

ریاضی بیانگر نحوه تأثیر پارامترهای خشک کردن بر شاخص‌های مورد مطالعه.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه‌ها

سیب‌های تازه برداشت شده رقم گلدن دلشس (Golden Delicious) از باغات شهر سمیرم در سال ۱۳۹۵ از یک مغازه محلی خریداری و در سردخانه در دمای ۴ تا ۸ درجه سلسیوس ذخیره شدند. با قرار دادن ۵ نمونه حداقل ۵ گرمی درون آون در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و خشک کردن تا رسیدن به وزن ثابت [۲۳]، میانگین محتوی رطوبت اولیه سیب‌های تازه با استفاده از رابطه ۱ تعیین و حدود ۰/۸۴ بر پایه تر به دست آمد.

$$M_0 = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \quad (1)$$

که، M_0 رطوبت اولیه (بر پایه تر) و W_0 و W_d به ترتیب جرم نمونه‌های تازه و خشک شده (کیلوگرم) هستند.

۲-۲- دستگاه خشک‌کن

به منظور انجام آزمایش‌های خشک کردن از یک دستگاه خشک‌کن هوای گرم آزمایشگاهی (شکل ۱) استفاده شد. در این دستگاه، هوای ورودی به محفظه خشک‌کن توسط یک دمنده گریز مجهز به یک موتور سه فاز با توان ۱/۵ کیلو وات (موتورژن تبریز) و پروانه‌ای به قطر ۴۲ سانتی‌متر تأمین می‌شود. به منظور گرم کردن هوا از یک گرم‌کن الکتریکی با توان ۶۰۰۰ وات (شامل ۶ المنت ۱۰۰۰ وات) استفاده شد. سرعت هوا با استفاده از یک سرعت‌سنج سیم داغ با دقت ۰/۰۱ متر بر ثانیه (testo, AG 435, Germany) اندازه‌گیری و به کمک یک دستگاه اینورتر فرکانسی (TECO, 7300 CV, Taiwan) تنظیم و کنترل می‌شد. دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن با استفاده از حسگر PT100 با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس اندازه‌گیری و توسط یک کنترلر PI تنظیم می‌شد. محفظه قرارگیری محصول از جنس پلکسی‌گلاس به قطر ۱۴ سانتی‌متر و به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بود.

$$C_{pa} = 1.0029 + 5.4 \times 10^{-5} T_a \quad (8)$$

با استفاده از رابطه ۹ نیز می‌توان رطوبت نسبی (RH) را به نسبت رطوبت (X) تبدیل کرد [۲۵]:

$$X = \frac{0.62189 P_{vs} \cdot RH}{101.3 - RH \cdot P_{vs}} \quad (9)$$

که، P_{vs} فشار بخار اشباع است و توسط رابطه ۱۰ به صورت تابعی از دمای هوا تعریف می‌شود [۲۵]:

$$(10)$$

$$P_{vs} = 0.1 \exp \left(27.0214 - \frac{6887}{T_a + 273.16} - 5.31 \ln \left(\frac{T_a + 273.16}{273.16} \right) \right)$$

نسبت انرژی مصرف شده طی فرآیند به انرژی تأمین شده در سیستم توسط شاخص نسبت مصرف انرژی تعریف و با رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [۴]:

$$EUR = \frac{(h_{a,i} - h_{a,o})}{(h_{a,i} - h_{a,\infty})} \times 100 \quad (11)$$

که، $h_{a,\infty}$ آنتالپی هوای خشک در دمای محیط (کیلوژول بر کیلوگرم هوای خشک) است.

همچنین، انرژی ویژه مصرف شده در حین فرآیند خشک کردن (ژول بر کیلوگرم آب تبخیر شده)، که عبارت است از مقدار انرژی مصرفی برای تبخیر یک کیلوگرم آب از محصول، با استفاده از رابطه ۱۲ به دست آمد:

$$SEC = \frac{\dot{M}_a (h_{a,i} - h_{a,o})}{m_w} \times t \quad (12)$$

که، t مدت زمان فرآیند (ثانیه) است. همچنین، m_w مقدار آب تبخیر شده از محصول (کیلوگرم) است که از رابطه ۱۳ محاسبه شد:

$$m_w = W_i - W_f \quad (13)$$

که، W_i و W_f به ترتیب جرم اولیه و جرم نهایی نمونه‌های مورد آزمایش (کیلوگرم) هستند.

۲-۵- تحلیل آگرژی

تحلیل آگرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک انجام می‌شود. این قانون عنوان می‌کند که انرژی افزون بر کمیت، دارای کیفیت نیز است و یک فرآیند واقعی ترمودینامیکی در جهت کاهش کیفیت انرژی اتفاق می‌افتد. با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک، مقادیر نرخ آگرژی ورودی به محفظه خشک‌کن ($\dot{E}x_i$)، ژول بر

۲-۴- تحلیل انرژی

به منظور انجام تحلیل‌های انرژی و آگرژی، خشک کردن قطعات سیب صورت یک فرآیند جریان پایدار در نظر گرفته شد و اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های خشک کردن استفاده شدند. بر اساس قانون اول ترمودینامیک، نرخ مصرف انرژی به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود [۶]:

$$\dot{Q} = \dot{M}_a (h_{a,i} - h_{a,o}) \quad (3)$$

که، \dot{Q} نرخ مصرف انرژی (ژول بر ثانیه)، \dot{M}_a دبی جرمی هوای خشک (کیلوگرم بر ثانیه)، $h_{a,i}$ آنتالپی ویژه هوا در ورودی محفظه خشک‌کن (ژول بر کیلوگرم) و $h_{a,o}$ آنتالپی ویژه هوا در خروجی محفظه خشک‌کن (ژول بر کیلوگرم) است. دبی جرمی هوا با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\dot{M}_a = AV_a \rho_a \quad (4)$$

که، A و V_a به ترتیب سطح مقطع محفظه خشک‌کن (متر مربع) و سرعت خطی جریان هوای ورودی به محفظه خشک‌کن (متر بر ثانیه) هستند. همچنین، ρ_a چگالی هوای خشک (کیلوگرم بر متر مکعب) است که می‌توان آن را به صورت رابطه ۵ بیان کرد [۲۴]:

$$\rho_a = \frac{101.325}{0.287(T_a + 273.16)} \quad (5)$$

که، T_a دمای هوا (درجه سلسیوس) است.

آنتالپی هوا در ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن به ترتیب با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود [۵]:

$$h_{a,i} = C_{pa} T_{a,i} + X_{a,i} h_w \quad (6)$$

$$h_{a,o} = C_{pa} T_{a,o} + X_{a,o} h_w \quad (7)$$

که، C_{pa} گرمای ویژه هوا در فشار ثابت (کیلوژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس) و $X_{a,i}$ و $X_{a,o}$ به ترتیب نسبت رطوبت هوای مرطوب (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک) در ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن هستند. همچنین، h_w آنتالپی ویژه بخار آب (کیلوژول بر کیلوگرم بخار آب) و $T_{a,i}$ و $T_{a,o}$ به ترتیب دمای هوا در ورودی و خروجی محفظه خشک‌کن (درجه سلسیوس) هستند.

گرمای ویژه هوا در فشار ثابت را می‌توان از رابطه ۸ محاسبه کرد [۶]:

کمینه باشد. نرخ قابلیت بهبود آگرزری برای فرآیند خشک کردن نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱۸ محاسبه شد [۲۶]:

$$EIPR = (1 - \eta_{exergy})(\dot{E}x_i - \dot{E}x_o) \quad (18)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نرخ مصرف انرژی و انرژی ویژه مصرف

شده

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌ها، تحلیل انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب انجام شد. مقادیر متوسط نرخ مصرف انرژی (\dot{Q}) و انرژی ویژه مصرفی (SEC) برای شرایط مختلف خشک کردن به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۱۲ محاسبه شدند و نتایج به دست آمده در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

ثانیه)، نرخ آگرزری خروجی از محفظه خشک‌کن ($\dot{E}x_o$)، ژول بر ثانیه) و نرخ اتلاف آگرزری در سیستم ($\dot{E}x_i$)، ژول بر ثانیه) به ترتیب توسط روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شوند [۶]:

$$\dot{E}x_i = \dot{M}_a C_{pa} \left[(T_{a,i} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{a,i}}{T_\infty} \right] \quad (14)$$

$$\dot{E}x_o = \dot{M}_a C_{pa} \left[(T_{a,o} - T_\infty) - T_\infty \ln \frac{T_{a,o}}{T_\infty} \right] \quad (15)$$

$$\dot{E}x_i = \dot{E}x_i - \dot{E}x_o \quad (16)$$

راندمان آگرزری (η_{exergy}) نیز به صورت نسبت آگرزری خروجی به آگرزری ورودی به محفظه خشک‌کن تعریف و با استفاده از رابطه ۱۷ محاسبه شد:

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{E}x_o}{\dot{E}x_i} \quad (17)$$

بیشینه بهبود راندمان آگرزری برای یک سیستم یا یک فرآیند هنگامی حاصل می‌شود که اتلاف آگرزری یا برگشت‌ناپذیری

Table 1 Average values of energy consumption rate (\dot{Q}) and specific energy consumption (SEC) during drying process of the apple cubes.

Temperature (°C)	Velocity (m s ⁻¹)	Average value of consumed energy rate (kJ s ⁻¹)	Specific energy consumption (kW h kg ⁻¹)
45	1	0.324	4.762
	1.5	0.413	5.986
	2	0.525	6.686
55	1	0.528	3.347
	1.5	0.708	4.129
	2	0.954	4.769
65	1	0.952	2.379
	1.5	1.287	2.807
	2	1.543	3.173

همکاران (۲۰۱۰) نرخ مصرف انرژی در خشک کردن بستر سیال قطعات هویج در شرایط مختلف را در محدوده ۰/۱۰۵ تا ۱/۹۴۹ کیلوژول بر ثانیه به دست آوردند [۴]. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهند که با افزایش دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، نرخ مصرف انرژی افزایش یافته است که با یافته‌های گزارش شده توسط برخی از محققان [۲۱،۱۲،۱۰] مطابقت دارد.

بعلاوه، رابطه ریاضی بیانگر نحوه تغییرات متوسط نرخ انرژی مصرفی فرآیند خشک کردن قطعات سیب به صورت تابعی از دما و سرعت هوا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB, R2012a و با روش حداقل خطا به صورت رابطه ۱۹ به دست آمد:

متوسط نرخ مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن قطعات سیب در شرایط مختلف دما و سرعت هوا از ۰/۳۲۴ تا ۱/۵۴۳ کیلوژول بر ثانیه متغیر بود. مقادیر به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط دیگر محققان قابل مقایسه است. آکینپار (۲۰۰۴)، متوسط نرخ مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن ورقه‌های لفل قمرز در سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه و دماهای ۵۵، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس را به ترتیب ۰/۸۹۴، ۱/۱۰۷ و ۱/۵۸۷ کیلوژول بر ثانیه گزارش کرد [۹]. متوسط نرخ مصرف انرژی خشک کردن ورقه‌های بادمجان در سرعت‌های هوای ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سلسیوس در محدوده ۱/۳۸۲ تا ۲/۱۷۵ کیلوژول بر ثانیه گزارش شده است [۱۰]. نازقلیچی و

$\dot{Q} = 0.001038T^2 - 0.1013T - 0.655V + 0.01931TV + 2.557$
 ورودی به محفظه خشک‌کن افزایش می‌یابد. با این حال، شدت کاهش زمان فرآیند در دماهای بالاتر هوا بسیار بیشتر از افزایش میزان گرمای ورودی می‌باشد که این امر منجر به کاهش انرژی کل مصرفی و کاهش انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک کردن می‌شود. در حالی که در سرعت‌های بیشتر هوا، نرخ افزایش مقدار گرمای ورودی بیشتر از کاهش مدت زمان فرآیند است و باعث افزایش انرژی ویژه مورد نیاز می‌شود. محققین نتایج مشابهی در ارتباط با تأثیر دما و سرعت هوا بر انرژی ویژه مصرفی خشک کردن محصولات کشاورزی گزارش کرده‌اند [۲۸، ۲۷].

بعلاوه، رابطه ریاضی بیانگر نحوه تغییرات انرژی ویژه فرآیند خشک کردن قطعات سیب به صورت تابعی از دما و سرعت هوا به صورت رابطه ۲۰ به دست آمد:

$$SEC = 0.002175T^2 - 0.3058T + 4.487V - 0.0565TV + 12.25$$

سلسیوس و دو سرعت هوای ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه خشک و اعلام کردند که افزایش دمای هوا منجر به کاهش نسبت مصرف انرژی شد [۱۰]. همچنین، با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که در هر دمای هوا، افزایش سرعت هوا منجر به کاهش نسبت مصرف انرژی شده است. مشاهدات مشابهی توسط محققین گزارش شده است. آویازا و همکاران (۲۰۱۴) نشانسته طبیعی را در یک خشک‌کن قفسه‌ای خشک و اعلام کردند با افزایش دما در محدوده ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس، نسبت مصرف انرژی کاهش یافت [۶]. در دیگر مطالعات، اربای و ایجیر (۲۰۱۱) در فرآیند خشک کردن برگ زیتون [۱۲]، آکپینار (۲۰۰۵) در خشک کردن ورقه‌های بادمجان [۱۰] و متولی و مینایی (۲۰۱۲) در خشک کردن دانه‌های انار [۱۴] به نتایج مشابهی دست یافتند.

رابطه بین نسبت مصرف انرژی و دما و سرعت هوا به شکل تابع چندجمله‌ای مرتبه دوم و به صورت رابطه ۲۱ تعیین شد:

$$EUR = 0.001967T^2 - 0.4632T + 0.9467V^2 - 9.392V + 0.0915TV + 28.22 \quad SSE = 0.27760 \quad R^2 = 0.977 \quad (21)$$

$$R^2 = 0.999 \quad SSE = 0.001298 \quad (19)$$

که، \dot{Q} متوسط نرخ مصرف انرژی (کیلوژول بر ثانیه)، T دمای هوا (درجه سلسیوس) و V سرعت هوا (متر بر ثانیه) است. همچنین R^2 و SSE به ترتیب ضریب تبیین و مجموع مربعات خطا می‌باشند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در دمای ثابت، افزایش سرعت جریان هوای ورودی به محفظه خشک‌کن منجر به افزایش انرژی ویژه مصرفی فرآیند شده است. همچنین در سرعت ثابت، دماهای بالاتر هوا باعث کاهش انرژی ویژه مصرفی شده است. کمینه و بیشینه انرژی مورد نیاز برای حذف یک کیلوگرم آب از نمونه‌های مورد آزمایش به ترتیب برابر با ۲/۳۷۹ و ۶/۶۸۶ کیلووات ساعت بوده که به ترتیب در شرایط خشک کردن با هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه و دمای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه به دست آمدند. با افزایش دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، زمان فرآیند کاهش و گرمای

$$R^2 = 0.997 \quad SSE = 0.050950 \quad (20)$$

که، SEC انرژی ویژه مصرف شده (کیلووات ساعت بر کیلوگرم آب) است.

۳-۲- نسبت مصرف انرژی

نسبت مصرف انرژی برای خشک کردن قطعات سیب با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه و مقادیر میانگین آن در محدوده ۳/۱۲ تا ۷/۲۴ درصد به دست آمد. شکل ۱ تغییرات متوسط نسبت مصرف انرژی با دما و سرعت هوا را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، در هر سرعت هوا، با افزایش دما از ۴۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس، نسبت مصرف انرژی کاهش یافته است. این یافته با مشاهدات گزارش شده توسط آکپینار و همکاران (۲۰۰۵) [۲۱] و آکپینار (۲۰۰۵) [۱۰] مطابقت دارد. آکپینار و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند که نسبت مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن قطعات سیب با استفاده از خشک‌کن سیکلونی با افزایش دما کاهش یافت [۲۱]. آکپینار (۲۰۰۵) قطعات بادمجان را در یک خشک‌کن سیکلونی در دماهای هوای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه

که، EUR نسبت مصرف انرژی (درصد) است.

تلف شده به ترتیب از ۰/۰۶۴۰۱ تا ۰/۳۸۶۵۶ کیلوژول بر ثانیه و از ۰/۰۲۷۰۵ تا ۰/۱۳۴۳۹ کیلوژول بر ثانیه به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند نرخ انرژی ورودی، خروجی و تلف شده با افزایش دما و سرعت هوا افزایش یافته است. نتایج مشابهی برای خشک کردن فلفل قرمز [۹]، برگ نعناع [۲۹] و قطعات سیب [۲۱] گزارش شده است.

۳-۳- انرژی ورودی، انرژی خروجی و اتلاف انرژی

جدول ۲ نتایج به دست آمده از تحلیل انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب در شرایط مختلف دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار میانگین نرخ انرژی خروجی و انرژی

Table 2 Average rates for exergy input (\dot{Ex}_i), exergy output (\dot{Ex}_o) and exergy loss (\dot{Ex}_l) during drying process of the apple cubes.

Temperature (°C)	Velocity (m s ⁻¹)	\dot{Ex}_i (kJ s ⁻¹)	\dot{Ex}_o (kJ s ⁻¹)	\dot{Ex}_l (kJ s ⁻¹)
45	1	0.09106	0.06401	0.02705
	1.5	0.13659	0.10084	0.03575
	2	0.18212	0.13721	0.04491
55	1	0.17131	0.13112	0.04019
	1.5	0.25696	0.20338	0.05358
	2	0.34261	0.27916	0.06345
65	1	0.26048	0.21107	0.04941
	1.5	0.39072	0.32707	0.06365
	2	0.52095	0.44626	0.07439

انرژی به ترتیب به صورت روابط ۲۲، ۲۳ و ۲۴ به دست آمد:

روابط ریاضی توصیف کننده اثر پارامترهای هوای خشک کردن بر متوسط نرخ انرژی ورودی، انرژی خروجی و اتلاف

$$\begin{aligned} (22) \quad SSE = 0.00000665 \quad R^2 = 0.999 \quad \dot{Ex}_i &= 0.0268V^2 - 0.0039V - 0.2921T + 0.0085VT + 0.1556 \\ (23) \quad SSE = 0.0000384 \quad R^2 = 0.997 \quad \dot{Ex}_o &= 0.0401V^2 - 0.3377V - 0.0045T + 0.00825VT + 0.1945 \\ (24) \quad SSE = 0.0000148 \quad R^2 = 0.985 \quad \dot{Ex}_l &= -0.0133V^2 - 0.0456V - 0.0005T + 0.0003VT - 0.0389 \end{aligned}$$

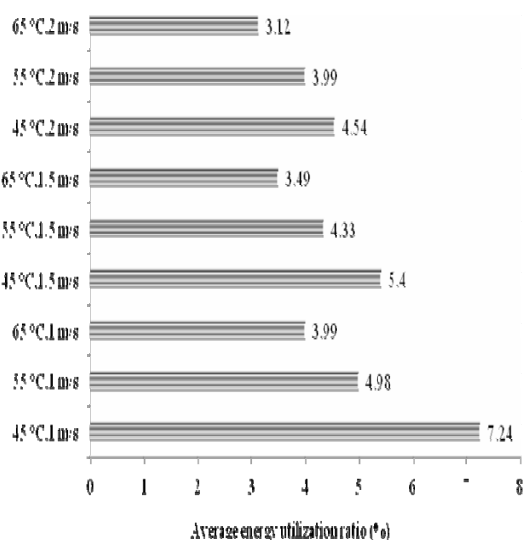


Fig 2 Effect of drying air temperature and velocity on average value of energy utilization ratio (EUR) during drying process of the apple cubes.

که، \dot{Ex}_i ، \dot{Ex}_o و \dot{Ex}_l به ترتیب نرخ انرژی ورودی، انرژی خروجی و انرژی تلف شده (کیلوژول بر ثانیه) هستند.

۳-۴- راندمان انرژی

متوسط راندمان انرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب در شرایط مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر متوسط راندمان انرژی از ۷۰/۲۹ درصد برای دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه تا ۸۵/۷۲ درصد برای دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه متغیر بوده است. محدوده به دست آمده برای متوسط راندمان انرژی به خوبی با نتایج گزارش شده در منابع برای فرآیند خشک کردن محصولات مختلف از قبیل گوجه فرنگی [۷]، کدو تنبل [۱۱] و قطعات هویج [۴] مطابقت دارد.

$$(25) \quad SSE = 0.000194 \quad R^2 = 0.991 \quad \eta_{exergy} = -0.0172V^2 - 0.109V + 0.0054T - 0.0002VT + 0.3798$$

و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و بیشینه مقدار آن (۰/۰۱۱۷۵ کیلوژول بر ثانیه) در دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه حاصل شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که افزایش دما و سرعت هوا باعث افزایش نرخ قابلیت بهبود

انرژی شده است. نتایج به دست آمده با مشاهدات گزارش شده توسط محققین قابل مقایسه است. آغاشلو و همکاران (۲۰۱۲) متوسط نرخ قابلیت بهبود انرژی برای فرآیند خشک کردن پاشی روغن ماهی را در محدوده ۰/۰۸۱۴۱ تا ۰/۱۲۵۷۱ کیلوژول بر ثانیه محاسبه و اعلام کردند با افزایش دمای خشک کردن از ۱۴۰ به ۱۶۰ و از ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس، مقدار این شاخص افزایش یافت [۲۶]. ارباب و ایجیر (۲۰۱۱) برگ‌های زیتون را با استفاده از هوای داغ خشک و مشاهده کردند که افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ و از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس باعث افزایش قابلیت بهبود انرژی شد. همچنین ایشان اعلام کردند که افزایش سرعت هوای خشک‌کن از ۰/۵ به ۱ متر بر ثانیه باعث افزایش قابلیت بهبود انرژی و از ۱ به ۱/۵ متر بر ثانیه باعث کاهش این شاخص شد [۱۲].

بعلاوه، رابطه بین متوسط راندمان انرژی با دما و سرعت هوا به شکل تابع چندجمله‌ای و به صورت رابطه ۲۵ تعیین شد: که، η_{exergy} راندمان انرژی (درصد) است.

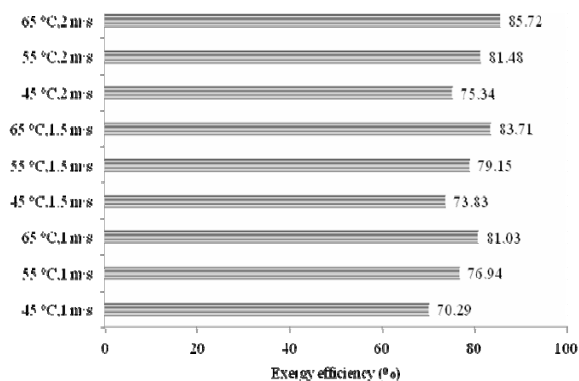


Fig 3 Effect of drying air temperature and velocity on average value of exergy efficiency (η_{exergy}) during drying process of the apple cubes

۳-۵- نرخ قابلیت بهبود انرژی

متوسط نرخ قابلیت بهبود انرژی با استفاده از رابطه ۱۸ محاسبه و مقادیر به دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کمینه مقدار متوسط نرخ قابلیت بهبود انرژی (۰/۰۸۰۴ کیلوژول بر ثانیه) در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس

Table 3 Average value of exergetic improvement potential rate during drying process of the apple cubes.

Drying air temperature (°C)	Average exergetic improvement potential rate (kJ s^{-1})		
	Drying air velocity (m s^{-1})		
	1	1.5	2
45	0.00804	0.00936	0.01062
55	0.00911	0.01037	0.01108
65	0.00937	0.01117	0.01175

که، نرخ قابلیت بهبود انرژی (کیلوژول بر ثانیه) است.

بعلاوه، رابطه بین متوسط نرخ قابلیت بهبود انرژی با دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن به صورت زیر تعیین شد:

$$(26) \quad SSE = 0.00000021 \quad R^2 = 0.982 \quad EIPR = -0.0012V^2 + 0.0065V + 0.0002T - 0.0046$$

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، قطعات سیب در شرایط مختلف خشک شدند و شاخص‌های انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گرفتند. بر طبق تحلیل‌های ترمودینامیکی مشخص شد که با افزایش دما و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، نرخ مصرف انرژی افزایش یافت. در حالی که انرژی ویژه مصرفی با افزایش سرعت هوا افزایش و با افزایش دمای هوا کاهش یافت. کمینه و بیشینه انرژی ویژه مصرفی به ترتیب برابر با ۲/۳۷۹ و ۶/۶۸۶ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم آب بود. نسبت مصرف انرژی در محدوده ۳/۱۲ تا ۷/۲۴ درصد به دست آمد و در دماها و سرعت‌های پایین‌تر هوا، بیشتر بود. افزایش دما و سرعت هوای خشک کردن منجر به افزایش نرخ اگزرژی ورودی، اگزرژی خروجی و اتلاف اگزرژی شد. متوسط راندمان اگزرژی فرآیند خشک کردن قطعات سیب از ۷۲/۲۹ درصد برای دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه تا ۸۵/۷۲ درصد برای دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه متغیر بود. کمینه مقدار متوسط نرخ قابلیت بهبود اگزرژی در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و بیشینه مقدار آن در دمای هوای ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه به دست آمد.

۵- منابع

- [1] Toriki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi Pirbalouti, A., Sadeghi, M. 2016. Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58, 407-418.
- [2] Beigi, M. 2016. Hot air drying of apple slices: dehydration characteristics and quality assessment, *Heat and Mass Transfer*. 52, 1435-1442.
- [3] Demiray, E., Tulek, Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. Rio Grande) slices in a convective hot air dryer, *Heat and Mass Transfer*. 48, 841-847.
- [4] Nazghelichi, T., Kianmehr, M. H., Aghbashlo, M. 2010. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes, *Energy*. 35, 4679-4684.
- [5] Corzo, O., Bracho, N., Vásquez, A., Pereira, A. 2008. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices, *Journal of Food Engineering*. 86, 151-161.
- [6] Aviara, N. A., Onuoha, L. N., Falola, O. E., Igbeka J. C. 2014. Energy and exergy analyses of native cassava starch drying in a tray dryer, *Energy*. 73:809-817.
- [7] Bagheri, H., Arabhoseini, A., Kianmehr, M. H. 2015. Energy and exergy analyses of thin layer drying of tomato in a forced solar dryer, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 46, 39-45.
- [8] Varteparvar, V., Kianmehr, M. H., Hasan Beigi, S. R. 2014. Energy analysis of combined fluidized-batch bed, *Innovation in Food Science and Technology*. 5, 17-23.
- [9] Akpınar, E. K. 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer, *International communications in Heat and Mass Transfer*. 31, 1165-1176.
- [10] Akpınar, E. K. 2005. Energy and exergy analyses of drying of eggplant slices in a cyclone type dryer, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 19, 692-703.
- [11] Akpınar, E. K., Midilli, A., Bicer, Y. 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process, *Journal of Food Engineering*. 72, 320-331.
- [12] Erbay, Z., Icier, F. 2011. Energy and exergy analysis on drying of olive leaves (*Olea europaea* L.) in tray dryer, *Journal of Food Process Engineering*. 34, 2105-2123.
- [13] Hancioglu, E., Hepbasli, A., Icier, F., Erbay, Z., Colak, N. 2010. Performance investigation of the drying of parsley in a tray dryer system, *International Journal of Exergy*. 7, 193-210.
- [14] Motevali, A., Minaei, S. 2012. Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 18, 63-72.
- [15] Ranjbaran, M., Zare, D. 2013. Simulation of energetic and exergetic performance of

- ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper, *Journal of Food Engineering*. 108, 103-110.
- [24] Naghavi, Z., Moheb, A., Ziaei-rad, S. 2010. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model, *Energy Conversion and Management*. 51, 258-264.
- [25] Zare, D., Minaei, S., Mohamad Zadeh, M., Khoshtaghaza, M. H. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer, *Energy Conversion and Management*. 47, 3241-3254.
- [26] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madadlou, A. 2012. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation, *Biosystems Engineering*. 111, 229-241.
- [27] Aghbaslo, M., Kianmehr, M. H., Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*), *Energy Conversion and Management*. 49, 2865-2871.
- [28] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H. 2014. Comparison of energy parameters in various dryers, *Energy Conversion and Management*. 87, 711-725.
- [29] Akpinar, E. K. 2010. Drying of mint leaves in a solar dryer and under open sun: modelling, performance analyses, *Energy Conversion and Management*. 51, 2407-2418.
- microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans, *Energy*. 59, 484-493.
- [16] Sarker, M. S. H., Ibrahim, M. N., Abdul Aziz, N., Punan, M. S. 2015. Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy, *Energy*. 84, 131-138.
- [17] Mokhtarian, M., Tavakolipour, H., Kalbasi-Ashtari, A. 2016. Energy and exergy analysis in solar drying of pistachio with air recycling system, *Drying Technology*. 34, 1484-1500.
- [18] Ergün, A., Ceylan, I., Acar, B., Erkamaz, O. 2017. Energy-exergy-Ann analyses of solar-assisted fluidized bed dryer, *Drying Technology*. 35, 1711-1720.
- [19] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. 2008. Energy and exergy analyses of thin-layer drying of potato slices in a semi-industrial continuous band dryer, *Drying Technology*. 26, 1501-1508.
- [20] Icier, F., Colak, N., Erbay, Z., Kuzgunkaya, E. H., Hepbasli, A. 2010. A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems, *Drying Technology*. 28, 193-204.
- [21] Akpinar, E. K., Midilli, A., Bicer, Y. 2005. Thermodynamic analysis of the apple drying process, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 219(1), 1-14.
- [22] Ghasemkhani, H., Keyhani, A., Aghbashlo, M., Rafiee, S., Mujumdar, A. S. 2016. Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer *via* a simple heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*. 94, 13-23.
- [23] Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D. 2012. Effect of continuous and intermittent

Energy and Exergy Analyses for Drying Process of Apple Cubes in a Hot Air Dryer

Beigi, M. ^{1*}

1. Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Tiran, Iran

In this study, energy and exergy indices for convective hot air drying of apple cubes were investigated and effect of the air parameters on them were assessed. Drying experiments were carried out at the air temperature levels of 45, 55 and 65 °C, and the air velocity levels of 1, 1.5 and 2 m s⁻¹. Average values of energy utilization were obtained to be in the range of 0.324-1.543 kW. The minimum and the maximum values of specific energy consumption were obtained for drying at air temperature of 65 °C and air velocity of 1 m s⁻¹, and at air temperature of 45 °C and air velocity of 2 m s⁻¹, respectively. Average values of input exergy, output exergy and lost exergy were obtained to be in the range of 0.09106-0.52095 kJ s⁻¹, 0.06401-0.46135 kJ s⁻¹ and 0.02705-0.05960 kJ s⁻¹, respectively. Average exergy improvement potential rate was increased with increasing air temperature and air velocity, and varied from 0.00804 kJ s⁻¹ to 0.01175 kJ s⁻¹.

Keywords: Drying, Apple, Energy utilization, Exergy efficiency

* Corresponding Author E-Mail Address: mohsenbeigi59@gmail.com