علمی پژوهشی

تحلیل ترودینامیکی فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی در یک خشک‌کن مایکروویو

هادی عظیمی نژادیان[1*]، احسان هوشیار[2]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

(تاریخ دریافت: ۹۹ /۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰٤/۰۷)

چکیده

در پژوهش حاضر، فرآیند خشک کردن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با توان مایکروویو از جنبه ترمودینامیکی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. در طی آزمایش‌ها، ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت‌های ۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر با توان‌های ۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ وات خشکانده شدند. انرژی مصرفی ویژه در محدوده ۸۳/ تا ۳/۲۹ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد و با افزایش ضخامت نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) افزایش یافت. راندمان انرژی فرآیند (۱۳/۲۳ تا ۳۵/۵۹ درصد) با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵) بهبود یافت. انرژی تلف شده ویژه در طی فرآیند از۰/٦۹ تا ۲/۷۱ مگاژول بر کیلوگرم متغیر بود. راندمان اگزرژی و شاخص پایداری فرآیند به ترتیب از ۱۰/۰۳ تا ۲۸/۱۷ درصد و از ۱/۱۱ تا ۱/۳۹ متغیر بودند. در مجموع، بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، استفاده از توان‌های بالاتر مایکروویو برای خشکاندن نمونه‌های نازک‌تر باعث بهبود عملکرد ترمودینامیکی و کاهش اثرات زیست محیطی فرآیند شد.

کلید واژگان: توان مایکروویو، خشک کردن لایه نازک، راندمان انرژی، راندمان اگزرژی، شاخص پایداری

*مسئول مکاتبات: h.aziminejadian@shirazu.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

۱- مقدمه

به دلیل محتوی رطوبتی زیاد، معمولاً، نگهداری محصولات تازه کشاورزی بسیار دشوار و حتی غیرممکن است. آب موجود در این محصولات مهمترین عامل در بروز تغییرات گسترده شیمیایی، فیزیکی و تغذیه‌ای بوده و باعث افت کیفیت و فساد سریع آنها می‌شود [۱]. فرآیند خشک کردن، به عنوان یکی از قدیمی‌ترین ومهم‌ترین روش‌های نگهداری، از اهمیت و کارایی ویژه‌ای در افزایش قابلیت انبارمانی و حفظ کیفیت ظاهری و غذایی محصولات کشاورزی برخوردار است. کاهش محتوی رطوبتی به یک سطح قابل قبول، فعالیت میکروبی و افت کیفیت محصولات را به حداقل رسانده و انبارداری آسان‌تر وایمن‌تر آنها را امکان‌پذیر می‌سازد. کاهش هزینه‌های حمل و نقل و افزایش تنوع مصرف از دیگر مزایای خشک کردن محصولات کشاوری و غذایی است [۲].

در طی چند دهه اخیر، استفاده از فرآیند خشک کردن و انواع خشک‌کن‌ها در صنایع مختلف مانند صنایع شیمیایی و پتروشیمی، بخش کشاورزی و غذایی، صنایع دارویی، صنعت نساجی و غیره به صورت فزآینده‌ای گسترش یافته است. علی‌رغم قابلیت‌های فوق‌العاده و کاربرد وسیع، فرآیند خشک کردن نیاز صرف به انرژی زیادی دارد به طوری که ۱۰ تا ۲۵ درصد کل انرژی مصرفی در کشورهای پیشرفته مانند کانادا، آمریکا، فرانسه و آلمان در این بخش مصرف می‌شود [۳]. در طی فرآیند خشک کردن حرارتی مواد جامد پدیده‌های انتقال حرارت و انتقال جرم به طور هم‌زمان رخ می‌دهند. گرمای نهان زیاد تبخیر آب و عدم کارایی انرژی مطلوب خشک‌کن‌ها مهمترین عوامل مصرف انرژی زیاد در این فرآیند هستند. علاوه بر هزینه زیاد، مصرف بی‌رویه انرژی اثرات مخرب زیست محیطی بسیاری را در پی دارد. بنابراین، به منظور دستیابی به سیستم‌ها و شرایط بهینه برای کاهش مصرف انرژی، انجام تحلیل‌های انرژی و اگزرژی فرآیند خشک کردن ضروری است [٤].

تحلیل انرژی در ارزیابی کمی نیازهای انرژی سیستم‌های تولید و انتقال و همچنین در تشخیص چگونگی و مقدار اتلاف انرژی مفید است. از اطلاعات به دست آمده از تحلیل انرژی می‌توان در طراحی سیستم‌ها و فرآیندهای حفظ انرژی استفاده کرد. قانون اول ترمودینامیک که بر اصل بقاء انرژی تأکید دارد معمولاً برای تحلیل سیستم‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، تحلیل انرژی دارای برخی ناکارآمدی‌ها است. اساساً، مفهوم انرژی به جهت انجام فرآیند حساس نیست و تجربه و تحلیل انرژی برای سیستمی که در آن دما خودبه‌خود در حال افزایش باشد موضوعیت ندارد. همچنین، تحلیل انرژی هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد عدم توانایی فرآیندهای ترمودینامیکی در تبدیل گرما به کار مکانیکی با راندمان کامل و عدم جدایش خودبه‌خودی مخلوط‌ها ارائه نمی‌کند. در تحلیل انرژی، کیفیت انرژی در نظر گرفته نمی‌شود و به تجزیه و تحلیل انرژی (به تنهایی و بدون در نظر گرفتن اگزرژی) ممکن است برخی از فرآیندها را نادرست تفسیر کند [۵].

اگزرژی کاری است که می توان از یک جریان ماده، گرما و یا کار وقتی که با یک محیط مرجع به تعادل می‌رسد به دست آورد، و نشانگر توانایی یک جریان برای ایجاد تغییر، در نتیجه عدم دستیابی به پایداری کامل نسبت به محیط مرجع، است. اگزرژی ترکیبی از ویژگی یک سیستم و محیط اطراف آن است زیرا هم به سیستم و هم به محیط وابسته است. بر خلاف انرژی، تابع قانون بقاء نیست؛ بلکه اگزرژی مصرف می‌شود و یا به خاطر برگشت‌ناپذیری‌های موجود در فرآیندهای واقعی مانند خشک کردن از بین می‌رود. تجزیه و تحلیل اگزرژی روشی است که از اصول بقای جرم و انرژی و قانون دوم ترمودینامیک برای تحلیل، طراحی و بهبود سیستم‌های انرژی استفاده می‌کند. در برخی اوقات، نتایج حاصل از تحلیل اگزرژی به طور چشمگیری متفاوت از نتایج تحلیل انرژی است [٦].

محققان بسیاری فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی و غذایی در سیستم‌های مختلف را از جنبه ترمودینامیکی مطالعه کرده‌اند. باقری و همکاران (۱۳۹٤) [۷]، سایدور و همکاران (۲۰۱۲) [۸] و مختاریان و کلباسی اشتری (۱۳۹۷) [۹] و به تحلیل انرژی و اگزرژی خشک‌کن‌های خورشیدی پرداختند. خشک‌کن‌هوای گرم توسط پوهشگران

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

زیادی از قبیل نازقلیچی و همکاران (۲۰۱۰) [۱۰]، اربای و ایچیر (۲۰۱۱) [۱۱] و بیگی و همکاران (۲۰۱۷) [٤] بررسی شدند. آغباشلو و همکاران (۲۰۱۲) [۱۲] و سایگی و همکاران (۲۰۱۵) [۱۳] این تحلیل‌ها را برای خشک‌کن پاششی ارائه کردند. در پژوهشی، ایچیر و همکاران (۲۰۱۰) شاخص‌های اگزرژی فرآیند خشک شدن گل‌کلم در سه خشک‌کن قفسه‌ای، بستر سیال و مجهز به پمپ حرارتی را مطالعه و مقایسه کردند [١٤]. فرهودی و همکاران (۱۳۹٦) تحلیل انرژی و اگزرژی فرآیند خشک شدن گیاه مرزه در یک خشک‌کن پیوسته ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم با ساختار بستر همسو را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. به طور کلی، نتایج گزارش شده توسط پژوهشگران نشان داده است که راندمان انرژی از راندمان اگزرژی بوده و شاخص‌های انرژی و اگزرژی به محصول و همچنین سیستم و شرایط خشک کردن بستگی دارند.

بررسی مطالعات گزارش شده نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی در منابع علمی برای تحلیل ترمودینامیکی خشک‌کن مایکروویو گزارش شده است. در تحقیقی، درویشی و همکاران (۲۰۱٤) از توان مایکروویو برای خشکاندن توت سفید استفاده و شاخص‌های ترمودینامیکی فرآیند را گزارش کردند [١٦]. درویشی و همکاران (۲۰۱٦) به مطالعه شاخص‌های انرژی و اگزرژی فرآیند خشک شدن ورقه‌های کیوی پرداختند [۱۷]. جعفری و همکاران (۲۰۱۷) از یک دستگاه خشک‌کن پیوسته مایکروویو برای خشک کردن دانه‌های شلتوک استفاده و فرآیند را از جنبه ترمودینامیکی مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. سورندار و همکاران (۲۰۱۹) پارامترهای انرژی و اگزرژی فرآیند خشک کردن ورقه‌های زردچوبه در یک خشک‌کن مایکروویو را مطالعه کردند [۱۹]. بنابراین، در این پژوهش، ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با استفاده از توان مایکروویو خشکانده شدند و تأثیر ضخامت نمونه‌ها و توان مایکروویو بر شاخص‌های انرژی و اگزرژی فرآیند مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌های تازه

سیب زمینی‌های تازه از یک فروشگاه محلی در شهر شیراز تهیه و در سردخانه در دمای ٤ درجه سلسیوس نگهداری شدند. به منظور تعیین محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها از روش استاندارد آون استفاده شد [۲۰] و میانگین محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها حدود ۵/٦۷ (بر پایه خشک) به دست آمد.

۲-۲- آزمایش‌های خشک کردن

از یک دستگاه مایکروویو خانگی تجاری (LG MG-4012، ساخت کره) برای انجام آزمایش‌های خشک کردن استفاده شد. قبل از انجام هر آزمایش، حدود دو کیلوگرم از نمونه‌های ذخیره شده از سردخانه خارج، با آب شسته شده و، به منظور دستیابی به تعادل دمایی، به مدت دو ساعت در محیط انجام آزمایش قرار داده شد. پوست سیب‌زمینی‌ها با دست به دقت کنده شده و به صورت ورقه‌هایی با ضخامت مورد نظر در آورده شدند. آزمایش‌ها در چهار سطح ضخامت نمونه‌های ۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر و چهار سطح مختلف توان مایکروویو ۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ وات انجام شد.

برای هر آزمایش، حدود ۳۵۰ گرم از ورقه‌های آماده شده به صورت یک لایه و درون محفظه مایکروویو قرار داده شد. در حین فرآیند خشک شدن، سینی حاوی نمونه‌ها به ترازوی نصب شده بر روی محفظه متصل و وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی منظم ۲۰ ثانیه‌ای و با استفاده از یک ترازوی دیجیتال (Shimadzu UW6200H، ساخت ژاپن)، بدون متوقف کردن فرآیند و خروج نمونه‌ها از درون محفظه، توزین شدند. همچنین، دمای سطح نمونه‌ها با استفاده از یک دماسنج لیزری (Testo 860-T3، ساخت آلمان) به صورت برخط اندازه‌گیری شد.

فرآیند خشکاندن تا رسیدن ورقه‌های سیب‌زمینی به رطوبت نهایت (حدود ۰/۲ بر پایه خشک) ادامه پیدا کرد. هر یک از تیمارهای آزمایش سه بار تکرار و میانگین محاسبه و برای تحلیل‌ها بعدی استفاده شدند.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

۲-۳- تحلیل انرژی

برای تحلیل انرژی و اگزرژی، محفظه مایکروویو به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شد. فرآیند خشک کردن به صورت یک جریان پایدار در نظر گرفته و از داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش‌ها استفاده شد.

بقای جرم برای محفظه خشک‌کن به عنوان حجم کنترل مورد مطالعه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$m_{wp} = m_{dp} + m_w \quad (۱)$$

که، m_{wp} جرم محصول مرطوب (کیلوگرم)، m_{dp} جرم محصول خشک (کیلوگرم) است. همچنین، m_w جرم آب تبخیر شده از محصول (کیلوگرم) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m_w = m_d \times (M_o - M_t) \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، m_d جرم محصول خشک (کیلوگرم) است. همچنین، M_0 و M_t به ترتیب رطوبت اولیه (بر پایه خشک) و رطوبت لحظه‌ای (بر پایه خشک) نمونه‌ها هستند.

بقای انرژی برای حجم کنترل در نظر گرفته شده به صورت رابطه (۳) خواهد بود [۲۱]:

(۳)

$$P \times t = \underbrace{\left[\overbrace{(mC_pT)_{dp}}^{\text{انرژی ماده خشک}} - \overbrace{(mC_pT)_{wp}}^{\text{انرژی ماده تر}} + \overbrace{\lambda m_w}^{\text{گرمای نهان محصول}}\right]}_{\text{انرژی جذب شده}} + \overbrace{[E_{ref} + E_{tra}]}^{\text{انرژی تلف شده}}$$

سمت چپ رابطه (۳) بیانگر انرژی ورودی (ژول) به حجم کنترل و سمت راست آن بیانگر انرژی خروجی (ژول) از حجم کنترل است. زیرنویس‌های dp و wp به ترتیب بیانگر ماه خشک و ماده تر هستند.

در رابطه (۳)، P توان مایکروویو (وات)، t زمان فرآیند (ثانیه)، m جرم محصول (کیلوگرم)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه محصول (ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، T دمای محصول (درجه سلسیوس) و λ گرمای نهان محصول (ژول بر کیلوگرم) هستند. E_{ref} و E_{tra} نیز به ترتیب انرژی‌های (ژول) بازتابش شده و منتقل شده هستند.

گرمای نهان سیب‌زمینی با استفاده از رابطه (٤) محاسبه شد [۱۷]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = 1 + 23\exp(-40\,M_t) \quad (٤)$$

گرمای نهان تبخیر آب آزاد (λ_w) توسط رابطه (۵) به صورت تابعی از دما تعریف می‌شود [۱۷]:

$$\lambda_w = 2503 - 2.386(T) \quad (۵)$$

ظرفیت گرمایی ویژه محصول سیب‌زمینی به صورت تابعی از دما و رطوبت آن با استفاده از رابطه (٦) محاسبه شد [۲۲]:

(٦)

$$C_p = 4187[0.406 + 0.00146T + 0.203M_t - 0.0249M_t^2]$$

انرژی مصرفی ویژه (SEC) که معرف مقدار انرژی مصرفی (ژول) برای حذف یک کیلوگرم آب از محصول است به صورت زیر به دست آمد:

$$SEC = \frac{P \times t}{m_w} \quad (۷)$$

در نهایت، راندمان انرژی (η_{en}) و انرژی تلف شده ویژه (SEn_{loss}) به ترتیب با استفاده از روابط (۸) و (۹) به دست آمدند [۱۷]:

$$\eta_{en} = \frac{E_{abs}}{E_{in}} \quad (۸)$$

$$SEn_{loss} = \frac{En_{in} - En_{abs}}{m_w} \quad (۹)$$

۲-٤- تحلیل اگزرژی

قانون دوم ترمودینامیک اساس تحلیل اگزرژی فرآیندها است. بر خلاف قانون اول ترمودینامیک که تنها بر کمیت انرژی و بقای آن متمرکز است، در قانون دوم بیان می‌شود که انرژی علاوه بر کمیت، دارای کیفیت نیز است. طبق قانون دوم، کیفیت انرژی در یک فرآیند واقعی ترمودینامیکی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، هرچند کمیت انرژی (طبق قانون بقای انرژی) ثابت است اما کیفیت آن افت می‌کند [۲۳].

به طور کلی، تعادل اگزرژی برای یک فرآیند به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Ex_{in} = Ex_{abs} + Ex_{loss} \quad (۱۰)$$

که، Ex_{in}، Ex_{abs} و Ex_{loss} به ترتیب اگزرژی ورودی (ژول)، اگزرژی جذب یا مصرف شده (ژول) و اگزرژی تلف شده (ژول) هستند.

برای حجم کنترل در نظر گرفته شده برای خشک‌کن مایکروویو، معادله (۱۰) به صورت زیر خواهد بود [۱۷]:

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

(۱۱)

$$P \times t = \left[(m \times ex)_{dp} - (m \times ex)_{wp} + (\acute{e}x_{evap} \times t)\right] + \left[Ex_{ref} + Ex_{tra}\right]$$

نرخ اگزرژی (ژول بر ثانیه) مربوط به تبخیر در محفظه خشک‌کن ($\acute{e}x_{evap}$) به صورت زیر است:

$$\acute{e}x_{evap} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times \dot{m}_w \lambda \quad (۱۲)$$

که، T_0 دمای محیط (درجه سلسیوس) است. همچنین، $\dot{m}_w$ نرخ تبخیر رطوبت (کیلوگرم بر ثانیه) بوده که به صورت به دست می‌آید:

$$\dot{m}_w = \frac{m_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (۱۳)$$

اگزرژی ویژه (ex، ژول بر ثانیه) با استفاده از رابطه (۱٤) محاسبه می‌شود [۵]:

$$ex = C_p\left[(T - T_0) - T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)\right] \quad (۱٤)$$

راندمان اگزرژی (η_{ex}) به صورت نسبت اگزرژی جذب (مصرف) شده به اگزرژی ورودی تعریف و محاسبه شد:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{abs}}{Ex_{in}} \quad (۱۵)$$

شاخص پایداری (SI) نیز با استفاده از رابطه (۱٦) به دست آمد [۲۳]:

$$SI = \frac{1}{1 - \eta_{ex}} \quad (۱٦)$$

۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی تأثیر توان مایکروویو و ضخامت ورقه‌های سیب‌زمینی بر شاخص‌های مورد مطالعه از نرم‌افزار SPSS (V.19) و آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انرژی مصرفی ویژه

میانگین مدت انرژی مصرفی ویژه در طی فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی تازه از رطوبت اولیه ۵/٦۷ (بر پایه خشک) به رطوبت نهایی حدود ۰/۲۰ (بر پایه خشک) در شرایط مختلف آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. بیشترین انرژی مصرفی ویژه (۳/۲۹ مگاژول بر کیلوگرم) مربوط به شرایط آزمایشی با توان مایکروویو ۸۰۰ وات و ضخامت نمونه‌های ۹ میلی‌متر بود در حالی که کمترین مقدار آن (۰/۸۳ مگاژول بر کیلوگرم) در توان ۲۰۰ وات و ضخامت ۳/۵ میلی‌متر به دست آمد.

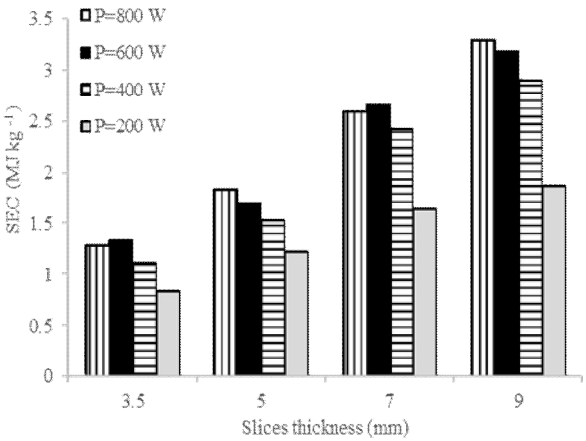

Fig 1 Average specific energy consumption (SEC) of microwave drying process of potato slices

انرژی مصرفی ویژه به دست آمده در این تحقیق را می‌توان با نتایج گزارش شده توسط دیگر محققان برای خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی مقایسه کرد (جدول ۱). به طور کلی، انرژی مورد نیاز برای خشک کردن محصولات تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های ذاتی محصول، رطوبت اولیه و نهایی محصول، نوع سیستم و شرایط خشک کردن قرار دارد. به عنوان مثال، در ارتباط با نوع سیستم مورد استفاده برای خشک کردن می‌توان بیان داشت که به طور کلی در خشک‌کن‌های هوای گرم، به دلیل مکانیسم انتقال حرارت از سیال عامل به محصول، زمان فرآیند طولانی بوده و انرژی مصرفی بسیار زیاد است [۳]. این در حالی است که استفاده از توان مایکروویو برای خشک کردن، به دلیل انتقال حرارت به صورت الکترومغناطیسی و تولید گرما درون محصول، منجر به گرمایش حجمی و یکنواخت ماده و در نهایت کاهش زمان و انرژی مصرفی می‌شود [۲۷].

بر اساس نتایج به دست آمده، به طور کلی، افزایش توان مایکروویو در محدوده ۲۰۰ تا ۸۰۰ وات منجر به افزایش انرژی مصرفی شد. افزایش انرژی مصرفی با تغییر توان از ۲۰۰ به ٤۰۰ وات برای تمامی ضخامت‌های مورد مطالعه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌داری بود به طوی که برای ضخامت‌های ۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر، انرژی مصرفی ویژه، در توان ٤۰۰ وات به ترتیب حدود ۳٤/۹٤، ۲۵/٤۱، ٤۷/۵٦ و ۵۵/۹۱ درصد بیشتر از توان ۲۰۰ وات بود. برای دیگر سطوح، افزایش انرژی مصرفی با تغییرات توان معنی‌دار نبود. نیاز به صرف انرژی بیشتر برای خشکاندن

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]
[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

محصولات زیستی در توان‌های بالاتر مایکروویو توسط برخی از محققین مانند ترکی هرچگانی و همکاران (۲۰۱٦) برای برگ‌های نعناع فلفلی [۲۵] و درویشی و همکاران (۲۰۱٤) برای توت سفید [۱٦] گزارش شده است. با این حال، نتایج متفاوتی با این یافته در بعضی از مطالعات گزارش شده است. به طور مثال، درویشی و همکاران (۲۰۱٦) گزارش کردند که، در مجموع، افزایش توان مایکروویو باعث کاهش مصرف انرژی شد. ایشان اعلام داشتند که افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ وات، انرژی مصرفی ویژه برای خشکاندن نمونه‌های کیوی با ضخامت ۳، ٦ و ۹ میلی‌متر به ترتیب منجر به کاهش ۲۸/٦۳، ۲۵/۳۸ و ٦۹/۲۸ درصدی مصرف انرژی شد [۱۷]. در پژوهشی دیگر، سورندار و همکاران (۲۰۱۹) مصرف انرژی ویژه برای خشک کردن زردچوبه در توان‌های ۲۷۰، ٤۵۰، ۷۲۰ و ۹۰۰ وات را به ترتیب ۲۲/٤۹، ۱۱/۸۷، ۱۰/۰۰ و ۹/۱۱ گزارش کردند [۱۹].

Table 1 Specific energy consumption (SEC) reported by some researchers for drying of different products.

Product	Drying system and conditions	SEC (MJ kg^{-1})	Reference
White mulberry	Microwave power Power levels: 100–500 W	3.97–6.73	[16]
Kiwi	Microwave power Sample thicknesses: 3–9 mm Power levels: 200–500 W	7.79–16.20	[17]
Green pepper	Combined hot air/microwave power Air flow rate: 1 m s^{-1} Power levels: 180–720 W	7.20–9.26	[24]
Peppermint leaves	Microwave power Power levels: 200–800 W Samples bed thickness: 10 mm	4.58–5.89	[25]
	Hot air Air temperatures: 50–70 °C Air flow rate: 0.4 m s^{-1} Samples bed thickness: 10 mm	42.72–64.71	
Wormwood leaves	Hot air Air temperatures: 50–70 °C Air flow rate: 0.7 m s^{-1} Samples bed thickness: 50 mm	17.64–32.09	[26]
	Infrared power Power levels: 200–500 W Samples bed thickness: 30 mm	4.22–10.56	[1]

برخی از پژوهش‌گران نیز عدم رابطه‌ای مشخص بین توان مایکروویو و مصرف انرژی را گزارش نموده‌اند [۲٤]. به طور کلی، ویژگی‌های ذاتی متفاوت محصولات مورد مطالعه، شرایط آزمایشی و سیستم مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها را می‌توان از جمله دلایل این نتایج متناقض دانست.

همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، انرژی مورد نیاز برای حذف یک کیلوگرم آب از ورقه‌های سیب‌زمینی در طی فرآیند خشکاندن به روش مایکروویو با افزایش ضخامت نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) افزایش یافت. مقدار افزایش مصرف انرژی ویژه با افزایش ضخامت نمونه‌ها در توان‌های مختلف مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است. افزایش انرژی مصرفی با افزایش ضخامت نمونه‌ها را می‌توان مرتبط با زمان فرآیند دانست. به طور کلی، نمونه‌های ضخیم‌تر، به دلیل مسافت بیشتری که آب درون محصول باید طی کند تا به سطح آن برسد نیاز به زمان بیشتری برای دفع رطوبت دارند که این امر باعث مصرف بیشتر انرژی می‌شود. این یافته با مشاهدات گزارش شده توسط پژوهشگران مانند درویشی و همکاران (۲۰۱٦) برای خشک کردن ورقه‌های کیوی در خشک‌کن مایکروویو [۱۷] و قنبریان و همکاران (۲۰۱٦) برای خشک کردن ورقه‌های قارچ در یک خشک‌کن هوای گرم [۲۸] مطابقت کامل دارد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

Table 2 Increment in specific energy consumption by increasing samples thickness at the studied microwave powers.

Microwave power (W)	Variation in samples thickness	Increment in SEC (%)
800	3.5→5 mm	42.19
	5→7 mm	42.31
	7→9 mm	27.02
600	3.5→5 mm	27.07
	5→7 mm	57.39
	7→9 mm	19.55
400	3.5→5 mm	36.61
	5→7 mm	58.17
	7→9 mm	19.83
200	3.5→5 mm	46.99
	5→7 mm	34.43
	7→9 mm	13.41

۳-۲- راندمان انرژی

راندمان انرژی فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی در خشک‌کن مایکروویو با استفاده از داده‌های آزمایشی و رابطه (۸) محاسبه شد. میانگین راندمان انرژی به دست آمده در در این پژوهش (شکل ۲) از ۱۳/۲۳ تا ۳۵/۵۹ درصد متغیر بود که با نتایج گزارش شده برای راندمان انرژی خشک کردن محصولات مختلف توسط مایکروویو مانند توت سفید (۳۱/۸۵–۵۵/۵٦ درصد) [۱٦]، شلتوک (۱۰/٦۵–۳٦/۲۹ درصد) [۱۸] و زردچوبه (۱۰/۱۲–۲٤/۷۸ درصد) [۱۹] قابل مقایسه است.

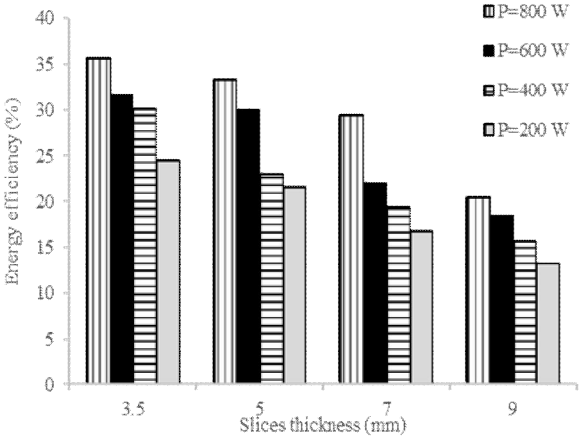

Fig 2 Average energy efficiency of microwave drying process of potato slices

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل آماری نشان داد که راندمان انرژی فرآیند با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵) بهبود یافت. در واقع، کاهش زمان فرآیند خشک شدن در توان‌های بالاتر و برای نمونه‌ها نازک‌تر منجر به افزایش راندمان انرژی شده است. درویشی و همکاران (۲۰۱٦) راندمان انرژی فرآیند خشک کردن ورقه‌های کیوی با ضخامت‌های مختلف (۳، ٦ و ۹ میلی‌متر) توسط مایکروویو را برای توان‌های ۲۰۰، ۳۰۰، ٤۰۰ و ۵۰۰ وات به ترتیب در محدوده‌های ۱۵/۱۵–۲٤/۳۹ درصد، ۲۱/۸٤–۲۸/۲۱ درصد، ۲۵/۷۳–۲۷/۵۷ درصد و ۲٦/۱٦–۳۲/۲۷ درصد محاسبه کردند. ایشان همچنین گزارش کردند که افزایش ضخامت نمونه‌ها منجر به کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) راندمان انرژی شد [۱۷]. با این حال، در پژوهشی، جعفری و همکاران (۲۰۱۷) از یک دستگاه خشک‌کن پیوسته مایکروویو برای خشک کردن دانه‌های شلتوک استفاده و فرآیند خشک شدن نمونه‌ها را از نظر ترمودینامیک تحلیل کردند. ایشان در آزمایش‌های خود از سه توان مایکروویو ۹۰، ۲۷۰ و ٤۵۰ وات برای خشک کردن بستر شلتوک با ضخامت‌های ٦، ۱۲ و ۱۸ استفاده نموده و اعلام کردند که راندمان انرژی فرآیند با افزایش توان کاهش و با افزایش ضخامت بستر محصول افزایش یافت. ایشان میانگین راندمان انرژی برای توان‌های ۹۰، ۲۷۰ و ٤۵۰ وات را به ترتیب در محدوده‌های ۲۷/۵۰–۳٦/۲۹ درصد، ۱۳/۰۸–۱۹/۳۰ درصد و ۱۰/٦۵–۱۵/٦۰ درصد گزارش کردند [۱۸].

۳-۳- انرژی تلف شده ویژه

در این پژوهش، اختلاف انرژی ورودی به حجم کنترل (محفظه خشک‌کن) و انرژی جذب شده توسط محصول به عنوان انرژی تلف شده تعریف شد. انرژی تلف شده به ازای واحد (کیلوگرم)

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

آب دفع شده از محصول نیز به عنوان انرژی تلف شده ویژه (مگاژول بر کیلوگرم) نامیده شد. میانگین انرژی تلف شده ویژه در طی فرآیند خشک کردن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با توان مایکروویو با استفاده داده‌های تجربی و رابطه (۹) محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. انرژی تلف شده ویژه به دست آمده در این پژوهش (۰/۶۹-۲/۷۱ مگاژول بر کیلوگرم) را می‌توان با مقادیر گزارش شده برای ورقه‌های کیوی (۵/۳۲-۱۳/۷۷ مگاژول بر کیلوگرم) [۱۷] و توت سفید (۱/۷۶-۴/۵۹ مگاژول بر کیلوگرم) [۱۶] در طی خشک کردن با استفاده از توان مایکروویو مقایسه کرد.

Table 3 Average specific energy loss of microwave drying process of potato slices.

Microwave power (W)	Specific energy loss (MJ kg^{-1}) Samples Thickness (mm)			
	3.5	5	7	9
800	0.69	0.94	1.31	1.72
600	0.85	1.16	1.73	2.09
400	1.07	1.41	1.91	2.45
200	1.33	1.71	2.30	2.71

بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش توان مایکروویو در محدوده مورد مطالعه منجر به کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) انرژی تلف شده ویژه شد به طوری که برای نمونه‌های با ضخامت ۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر، افزایش توان مایکروویو از ۲۰۰ به ۸۰۰ وات به ترتیب باعث کاهش ۴۸/۱۲، ۴۵/۰۳، ۴۳/۰۴ و ۳۶/۵۳ درصدی انرژی اتلافی شد. همچنین، نتایج نشان دادند که انرژی تلف شده در حین فرآیند خشک کردن برای نمونه‌های ضخیم‌تر به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) از نمونه‌های نازک‌تر بیشتر بود. به عنوان مثال، در توان ۴۰۰ وات، افزایش ضخامت ورقه‌های سیب‌زمینی از ۳/۵ به ۵، از ۵ به ۷ و از ۷ به ۹ میلی‌متر به ترتیب باعث شد انرژی تلف شده حدود ۳۱/۷۸، ۳۵/۴۶ و ۲۸/۲۷ درصد افزایش یابد. با توجه به یافته‌های این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که، به دلیل مکانیسم حاکم بر گرمایش محصول در طی فرآیند خشک کردن به کمک توان مایکروویو، استفاده از توان‌های بالاتر و نمونه‌های نازک‌تر و همچنین افزایش مقدار محصول بارگیری شده در محفظه خشک‌کن (تا حد امکان) منجر به کاهش انرژی تلف شده ویژه و افزایش راندمان انرژی شد.

۳-۴- راندمان اگزرژی

شکل (۳) میانگین به دست آمده برای راندمان اگزرژی در این پژوهش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، راندمان اگزرژی فرآیند خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی از ۱۰/۰۳ تا ۲۸/۱۷ درصد متغیر بود که با نتایج گزارش شده برای فرآیند خشک کردن محصولات غذایی و کشاورزی مختلف توسط توان مایکروویو آورده شده‌اند (جدول ۴) قابل مقایسه است. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل آماری، استفاده از توان‌های بالاتر و نمونه‌های نازک‌تر باعث بهبود معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) عملکرد سیستم از نظر راندمان اگزرژی شد به طوری کمترین راندمان اگزرژی (۱۰/۰۳ درصد) در شرایط خشک کردن با توان ۲۰۰ وات و ضخامت ۹ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن (۲۸/۱۷ درصد) در توان ۸۰۰ وات و ضخامت ۳/۵ میلی‌متر نمونه‌ها حاصل شد. کاهش زمان فرآیند خشک شدن و گرمایش یکنواخت‌تر نمونه‌های نازک‌تر و در توان‌های بالاتر مایکروویو منجر به کاهش اتلاف انرژی و در نهایت باعث افزایش راندمان اگزرژی سیستم می‌شود. راندمان بیشتر اگزرژی در توان‌های بالاتر و برای نمونه‌های نازک‌تر در طی فرآیند خشک کردن ورقه‌های کیوی توسط درویشی و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شده است [۱۷]. همچنین، سورندار و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو در بازه ۲۷۰ تا ۹۰۰ وات باعث افزایش راندمان خشک کردن ورقه‌های زردچوبه شد [۱۹]. با این حال، جعفری و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو باعث کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) راندمان اگزرژی فرآیند خشک کردن دانه‌های شلتوک در یک

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

خشک‌کن پیوسته شد. ایشان اعلام کردند دلیل این مشاهده اعمال پله‌ای توان مایکروویو بوده است [۱۸].

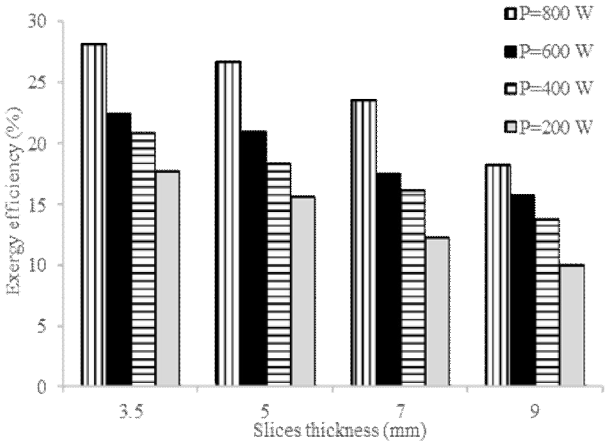

Fig 3 Average exergy efficiency of microwave drying process of potato slices.

به علاوه، با مقایسه راندمان انرژی و اگزرژی، مشاهده شد که میانگین راندمان انرژی در تمامی شرایط آزمایشی به طور معنی‌داری از میانگین راندمان اگزرژی بیشتر بود. این یافته با نتایج گزارش شده توسط آکپینار و همکاران (۲۰۰۶) [۳۰]، سورندار و همکاران (۲۰۱۹) [۱۹] و جعفری و همکاران (۲۰۱۷) [۱۸] گزارشش شده است. راندمان انرژی به طور عمده تلفات گرما از سیستم به محیط و تلفات انرژی ناشی از برگشت‌ناپذیری فرآیند را نشان می‌دهد. از آنجا که راندمان اگزرژی به شدت به فرضیات حالت مرده در نظر گرفته شده در تحلیل بستگی دارد. برای دستیابی به نتایج مناسب، شرایط حالت مرده باید به محیط مرجع تنظیم شود. راندمان اگزرژی تنها با در نظر گرفتن انرژی قابل استفاده خروجی برای فرآیند محاسبه شد در حالی که برای محاسبه راندمان انرژی از کل انرژی استفاده شد.

Table 4 Exergy efficiency reported by some researchers for drying of different products.

Product	Drying system and conditions	Exergy efficiency (%)	Reference
Turmeric slices	Microwave oven Power levels: 270–900 W	2.18–12.77	[19]
White mulberry	Microwave oven Power levels: 100–500 W	33.63–57.08	[16]
Kiwi slices	Microwave oven Power levels: 200–500 W Samples thicknesses: 3, 6 and 9 mm	11.35–2468	[17]
Paddy	Semi-industrial continuous band microwave dryer Power levels: 90, 270 and 450 W Thickness of paddy bed: 6, 12 and 18 mm Conveyor belt speed: 0.24–1.2 m min^{-1}	4.13–13.88	[18]
Soybeans	Microwave-assisted fluidized bed dryer Microwave power densities:0.0–5.3 W g^{-1} Air temperatures: 30–60 °C Air velocities: 1.2, 1.85 and 2.2 m s^{-1} Bed heights: 3, 4.5 and 6 cm	9.21–13.81	[29]

۳-۵- شاخص پایداری

استفاده از منابع انرژی پایدار به تنهایی ضامن توسعه پایدار نیست، بلکه لازم است تا از این منابع به طور مؤثر استفاده شود. تحلیل‌های اگزرژی برای بهبود کارآیی ضروری هستند. تحلیل اگزرژی امکان دستیابی به بیشترین منافع و به حداقل رساندن تأثیرات منفی (مانند آسیب‌های زیست محیطی) استفاده از این منابع انرژی را فراهم می‌کند. استفاده کارآمدتر باعث می‌شود این منابع در یک بازه زمانی طولانی‌تر به توسعه کمک کنند. نقش اگزرژی در توسعه پایدار با شاخصی به نام شاخص پایداری توصیف می‌شود. متوسط شاخص پایداری به دست آمده در این پژوهش تحت شرایط آزمایشی مورد بررسی در جدول (۵) آورده شده‌اند. شاخص پایداری از ۱/۱۱ تا ۱/۳۹ متغیر بود و با افزایش توان مایکروویو و کاهش ضخامت نمونه‌ها بهبود یافت. لازم به ذکر است، بر اساس تحلیل‌های آماری، تأثیر توان مایکروویو و

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

ضخامت نمونه‌ها بر شاخص پایداری معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) نبود. بیگی و همکاران (۲۰۱۷) بستر عمیق دانه‌های شلتوک را با استفاده از جریان هوای گرم با دمای ٤٠ تا ٦٠ درجه سلسیوس و سرعت ۰/۵ تا ۱/۱ متر بر ثانیه خشک شاخص پایداری فرآیند را در محدوده ۱/۰۵ تا ۱/٤۲ گزارش کردند. همچنین، ایشان اعلام داشتند که این شاخص هم با افزایش دما و هم با افزایش سرعت جریان هوای ورودی به محفظه خشک‌کن افزایش یافت [۲۳].

Table 5 Average specific exergy loss of microwave drying process of potato slices.

Microwave power (W)	Specific exergy loss (MJ kg^{-1}) Samples Thickness (mm)			
	3.5	5	7	9
800	1.39	1.36	1.30	1.22
600	1.29	1.27	1.21	1.19
400	1.26	1.22	1.19	1.16
200	1.21	1.19	1.14	1.11

٤- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با استفاده از توان مایکروویو خشکانده و شاخص‌های ترمودینامیکی فرآیند ارزیابی و مورد تحلیل قرار گرفتند. بر اساس یافته‌های به دست آمده، به طور خلاصه، می‌توان نتایج زیر را استنتاج کرد:

- عواملی مانند ویژگی‌های ذاتی محصول، سیستم خشک‌کن و شرایط انجام آزمایش‌ها بر نحوه تأثیر توان مایکروویو بر مقدار انرژی مصرفی فرآیند اثرگذار هستند.
- انرژی مصرفی در طی فرآیند خشک کردن با کاهش نمونه‌ها به طور معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) کاهش یافت.
- انرژی تلف شده ویژه، راندمان انرژی، راندمان اگزرژی و شاخص پایداری فرآیند به ترتیب از۰/٦۹ تا ۲/۷۱ مگاژول بر کیلوگرم، از ۱۳/۲۳ تا ۳۵/۵۹ درصد، از ۱۰/۰۳ تا ۲۸/۱۷ درصد و از ۱/۱۱ تا ۱/۳۹ متغیر بودند.
- در نهایت، برای بهبود عملکرد ترمودینامیکی و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی فرآیند باید از توان‌های بالاتر مایکروویو و نمونه‌های نازک‌تر استفاده کرد.

۵- منابع

[1] Beigi, M. 2018. Effect of infrared drying power on dehydration characteristics, energy consumption, and quality attributes of common wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves, Journal of Agricultural Science and Technology. 20(4), 709–718.

[2] Ghanbarian, D., Torki-Harchegani, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Sadeghi, M. 2018. Drying of peppermint leaves (*Mentha piperita* L.) in a combined hot air-ultrasonic dryer: Influences of temperature and ultrasound power on duration, energy consumption, and essential oil yield, Journal of Food Science and Technology. 15(81), 345–357.

[3] Tohidi, M., Sadeghi, M., Torki-harchegani, M. 2017. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 70, 519–528.

[4] Beigi, M. 2018. Energy and exergy analyses for drying process of apple cubes in a hot air dryer, Journal of Food Science and Technology. 15(76), 1–11.

[5] 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.

[6] Dincer, I. 2002. On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems, International Journal of Energy Research. 26(8), 717–727.

[7] Bagheri, H., Arabhoseini, A., Kianmehr, M. 2015. Energy and exergy analyses of thin layer drying of tomato in a forced solar dryer, Iranian Journal of Biosystem Engineering. 46(1), 39–45.

[8] Saidur, R., Boroumandjaz, G., Mekhlif, S., Jameel, M. 2012. Exergy analysis of solar energy applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16(1), 350–356.

[9] Mokhtarian, M., Kalbasi-Ashtari, A. 2018. Exergy and energy analyses for solar drying of peppermint (Mentha piperita) with a double-pass collector, Innovative Food Technologies. DOI: 10.22104/JIFT.2018.2978.1724

[10] Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., Aghbashlo, M. 2010. Thermodynamic analysis

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

of fluidized bed drying of carrot cubes, Energy. 35(12), 4679–4684.

[11] Erbay, Z., Icier, F. 2011. Energy and exergy analysis on drying of olive leaves (*Olea europaea* L.) in tray drier, Journal of Food Process Engineering. 34(6), 2105–2123.

[12] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., Madalou, A. 2012. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil encapsulation, Biosystems Engineering. 111(2), 229–241.

[13] Saygi, G., Erbay, Z., Koca, N., Pazir, F. 2015. Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree), International Journal of Exergy. 16(3), 315–336.

[14] 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(2), 193–204.

[15] Farhudi, Z., Darvishi, H., Behroozi, N. 2018. Energy and exergy analyses of continues infrared-hot air current dryer with air recycling, Innovative Food Technologies. 5(2), 253–271.

[16] Darvishi, H., Zarein, M., Minaei, S., Khafajeh, H. (2014). Exergy and energy analysis, drying kinetics and mathematical modeling of white mulberry drying process, International Journal of Food Engineering. 10(2), 269–280.

[17] Darvishi, H., Zarein, M., Farhudi, Z. (2016). Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices, Journal of Food Science and Technology. 53(5), 2317–2333.

[18] Jafari, H., Kalantari, D., Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and it's qualitative, Energy. 138, 1016–1029.

[19] Surendhar, A., Sivasubramanian, V., Vidhyeswari, D., Deepanraj, B. (2019). Energy and exergy analysis, drying kinetics, modeling and quality parameters of microwave-dried turmeric slices, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 136(1), 185–197.

[20] Beigi, M. 2016. Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying, Food Science and Technology. 36(1), 145–150.

[21] Jindarat, W., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S. 2011. Analysis of energy consumption in microwave and convective drying process of multilayered porous material inside a rectangular wave guide, Experimental Thermal and Fluid Science. 35(4) 728–737.

[22] Wang, N., Brennan, J.G. 1993. The influence of moisture content and temperature on the specific heat of potato measured by differential scanning calorimetry, Journal of Food Engineering. 19(3), 303–310.

[23] Beigi, M., Tohidi, M., Torki-Harchegani, M. 2017. Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer, Energy. 140, 374–382.

[24] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H., Najafi, G., Nargesi, F. 2013. Mathematical modeling of green pepper drying in microwave-convective dryer, Journal of Agricultural Science and Technology. 15, 457–465.

[25] Torki-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.

[26] Beigi, M. 2017. Thin layer drying of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves: dehydration characteristics, rehydration capacity and energy consumption, Heat and Mass Transfer. 53(8), 2711–2718.

[27] Azimi-Nejadian, H., Hoseini, S.S. 2019. Study the effect of microwave power and slices thickness on drying characteristics of potato, Heat and Mass Transfer. 55(10), 2921–2930.

[28] Ghanbarian, D., Baraani Dastjerdi, M., Torki-Harchegani, M. 2016. Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying. Heat and Mass Transfer. 52(5), 1081–1088.

[29] Ranjbaran, M., Zare, D. 2013. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans, Energy. 59, 484–493.

[30] Akpinar, E.K., Midilli, A., Bicer, Y. 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process, Journal of Food Engineering. 72(4), 320–331.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

Thermodynamic analysis of potato drying process in a microwave dryer

Azimi-Nejadian, H. [1*], Houshyar. E. [2]

1. Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, PO BOX 74135–111, Jahrom, Iran

(Received: 2020/04/29 Accepted: 2020/06/27)

In the present research, microwave drying process of potato slices were thermodynamically analyzed and evaluated. During the experiments, potato slices with thicknesses of 3.5, 5, 7 and 9 mm were dried using powers of 200, 400, 600 and 800 W. Specific energy consumption was obtained to be the range of 0.83–3.29 MJ kg^{-1}, and significantly increased ($p < 0.05$) with increasing samples thickness. Energy efficiency of the process (13.23–35.59) was significantly ($p < 0.05$) improved with increasing microwave power and decreasing samples thickness. Average specific energy loss of the process varied from 0.69 to 2.71 MJ kg^{-1}. Exergy efficiency and sustainability index of the process changed from 10.03 to 28.17 % and from 1.11 to 1.39, respectively. In General, according to the results obtained in this research, practicing higher microwave powers to dry thinner samples improved the thermodynamical performance and reduced the environmental footprints of the process.

Keywords: Microwave power, Thin-layer drying, Energy efficiency, Exergy efficiency, Sustainability index

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-02]

[DOI: 10.52547/fsct.17.106.1]

* Corresponding Author E-Mail Address: h.aziminejadian@shirazu.ac.ir