



آنالیز انرژی و اکسرژی خشک‌کن پیوسته مادون‌قرمز - هوای گرم جریان همسو با چرخه هوای بازگشتی

زانبار فرهودی^۱، حسین درویشی^{۲*}، ناصر بهروزی خزائی^۲

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

۲. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۱۹، تاریخ بازنگری: ۹۶/۵/۱، تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۵)

چکیده

آنالیز اکسرژی و انرژی خشک‌کن پیوسته ترکیبی مادون‌قرمز-هوای گرم با ساختار بستر همسو مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C، سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ m/s و توان مادون‌قرمز ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ W برای دو حالت فاقد چرخه و ۱۰۰٪ چرخه هوای بازگشتی برای گیاه مرزه انجام گرفت. به‌کارگیری ۱۰۰٪ چرخه هوای بازگشتی در مقایسه با حالت بدون هوای بازگشتی موجب صرفه‌جویی ۲۹/۱۰ الی ۵۰/۳۰٪ در انرژی مصرفی ویژه شد. استفاده از سطوح بالای توان مادون‌قرمز و دمای هوا و سطوح پایین سرعت هوا همراه با چرخه هوای بازگشتی سبب افزایش راندمان انرژی شده است ($p < 0/05$). حداکثر مقدار بازده انرژی برای حالت بدون چرخه و با ۱۰۰٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب ۲۰/۹۰ و ۳۰/۲۱٪ به‌دست آمد. انرژی اتلافی ویژه به‌شدت تحت تأثیر سرعت هوا و چرخه هوای بازگشتی می‌باشد ($p < 0/05$). انرژی اتلافی برای حالت فاقد چرخه و ۱۰۰٪ هوای بازگشتی به ترتیب از ۸/۵۴ الی ۳۷/۲۴ MJ/kg water و ۵/۲۱ الی ۲۰/۰۴ MJ/kg water متغیر بوده است. دما و سرعت هوا بیش‌ترین تأثیر را بر راندمان اکسرژی داشته، به‌طوری‌که حداکثر مقدار آن برابر با ۱۰/۲۱٪ برای شرایط ۶۰ °C، ۰/۵ m/s و ۷۰۰ W با ۱۰۰٪ چرخه هوای بازگشتی محاسبه شد. پتانسیل بهبود اکسرژی برای حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی و ۱۰۰٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب در محدوده ۲/۷۳ الی ۵/۱۲ MJ/kg water و ۲/۳۵ الی ۴/۰۲ MJ/kg water به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن مادون‌قرمز - هوای گرم، انرژی، اکسرژی اتلافی، پتانسیل بهبود، هوای بازگشتی، مرزه.

1- مقدمه

از خشک‌کن هوای گرم طی فرایند خشک‌کردن سبزیجات می‌توان 21 الی 38/5٪ در انرژی مصرفی صرفه‌جویی نموده و راندمان حرارتی خشک‌کن را 28 تا 63٪ افزایش داد [4]. همچنین با استفاده از 90٪ هوای خروجی می‌توان 70/7٪ در انرژی مصرفی فرایند خشک‌کردن پیاز صرفه‌جویی نمود [7]. انرژی مصرفی ویژه فرایند خشک‌کردن ذرت در خشک‌کن میکروویو-بستر سیال با 100٪ هوای بازگشتی در مقایسه با حالت فاقد حالت چرخه بیش‌تر از 60/32٪ کاهش یافته است [12]. بررسی شرایط عملیاتی خشک‌کردن، شامل سرعت و شدت جریان هوا، دمای هوای ورودی و خروجی، دمای محصول، میزان دبی جرمی محصول، رطوبت اولیه و نهایی محصول روی کیفیت انرژی مصرفی تأثیر بسزایی دارد. مدل‌های ریاضی ثابت شده‌ای برای تجزیه و تحلیل روند انتقال حرارت و جرم در طول خشک‌کردن ارائه شده است. در این میان، قوانین اول و دوم ترمودینامیک برای تحلیل انرژی و اکسرژی فرایندهای خشک‌کردن کاربرد زیادی داشته است. انرژی مورد نیاز برای خشک‌کردن بستگی به ماهیت محصول خشک شده و سرعت خشک‌کردن آن دارد از این‌رو آنالیز انرژی و اکسرژی برای محصول به‌منظور تعیین کمیت انرژی برای خشک‌کردن و محاسبه تلفات اکسرژی در مرحله فرایند مورد نیاز بوده و سودمند است [13]. اکسرژی حداکثر کار مفیدی است که توسط یک سیستم در تعامل با یک محیط با فشار و دمای ثابت انجام می‌گیرد [14]. روند کاهش تلفات اکسرژی و افزایش بازده اکسرژی از دیدگاه مهندسی خشک‌کردن یک روند ایده‌آل به‌شمار می‌آیند چرا که سرعت از دست دادن رطوبت با تلفات اکسرژی رابطه عکس و با بازدهی اکسرژی رابطه مستقیم دارد [15، 16]. آغباشلو [17] طی مطالعه‌ای به شبیه‌سازی اکسرژی خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون‌قرمز پرداخته و نشان داد که با افزایش دبی جرمی هوا و محصول ورودی به خشک‌کن راندمان اکسرژی کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است راندمان اکسرژی فرایند خشک شدن سیر برای حالت فاقد چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی به‌ترتیب از 5/01 الی 55/30٪ و 67/06 الی 88/24٪ متغیر است [18]. آنالیز ترمودینامیکی خشک‌کن غلات نشان دهنده آن است که راندمان انرژی و اکسرژی با افزایش چرخه هوای بازگشتی (75

فرایند خشک‌کردن یک فرایند با مصرف انرژی بالا به‌حساب می‌آید به‌گونه‌ای که حدود 20 الی 35٪ کل انرژی مصرفی در صنعت جهان، صرف فرایند خشک‌کردن مواد می‌گردد [1]. از این‌رو طراحی، ساخت و به‌کارگیری خشک‌کن‌های جدید که بتواند انرژی مصرفی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به محدودیت منابع انرژی در جهان، در چند سال اخیر روش‌های متعددی برای کاهش زمان و انرژی مصرفی مورد توجه محققان قرار گرفته است. در فرایند خشک‌کردن با هوای گرم به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی ماده، نرخ انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی آن کم بوده، لذا زمان و انرژی مورد نیاز برای انجام فرایند خشک‌کردن افزایش می‌یابد [2، 3]. از سوی دیگر به‌دلیل عدم تماس زمانی مناسب میان ماده و هوای گرم، هوا به‌طور کامل اشباع نشده و از محفظه خشک‌کن خارج می‌گردد. این عمل به معنای خارج شدن انرژی از خشک‌کن (اتلاف انرژی) و کاهش بیش‌تر راندمان خشک‌کن است [4، 5].

از جمله روش‌های ارائه شده توسط محققین، استفاده مجدد از هوای خروجی خشک‌کن به‌عنوان یک منبع انرژی می‌باشد. در این حالت قسمتی از هوای بازگشتی با هوای ورودی به دمنده ترکیب و دمای آن افزایش یافته، لذا انرژی کم‌تری جهت بالا بردن دمای هوا ورودی مورد نیاز است [6، 7]. اما به دلیل افزایش رطوبت هوای ورودی، گرادیان رطوبتی کاهش یافته که در نهایت منجر به افزایش زمان خشک شدن می‌گردد. برای رفع این مشکل می‌توان از روش‌های سریع حرارت دهی مانند مادون‌قرمز و میکروویو بهره گرفت [8، 9]. مطابق گزارش‌های صورت گرفته، راندمان حرارتی خشک‌کن هوای گرم (بستر ثابت) برای میوه لیچی (سرخالو) با 100٪ هوای بازگشتی برابر با 29٪ و در غیاب آن برابر با 19٪ بوده است. این در حالی است که حدود 35 تا 45٪ از انرژی توسط هوای خروجی در حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی وارد محیط اطراف خشک‌کن گردیده است [10]. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که به‌کارگیری 80٪ هوای بازگشتی سبب کاهش 67٪ انرژی مصرفی فرایند خشک‌کردن میگو در خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز-هوای گرم می‌گردد [11]. با استفاده مجدد از 80 الی 95٪ هوای خروجی

از حسگرهای دمایی نوع DS18B20 شرکت دالاس ساخت آمریکا، با قابلیت کاری 55- تا 125 °C با دقت اندازه‌گیری 0/5 ± °C استفاده شده است. مسیر هوای بازگشتی از لوله گالوانیزه انعطاف‌پذیر با قطر 20 cm (همراه با پوشش عایق حرارتی) ساخته شد. برای جلوگیری از پرتاب شدن احتمالی محصول در میسر بازگشت هوای خروجی، یک صفحه مشبک با قطر روزنه 5 mm در قسمت ابتدایی مسیر هوای بازگشتی قرار داده شده است. برای تولید امواج مادون قرمز از 4 عدد لامپ مادون قرمز سرامیکی تخت 450 W (در کل توان 1800 W) استفاده شد. به منظور جلوگیری از همپوشانی لامپ‌ها، لامپ‌ها به فاصله 10 cm از همدیگر بر روی یک صفحه فولادی با روکشی از آلومینیمی نازک و کاملاً براق به صورت موازی با همدیگر نصب و در فاصله 18 cm از سطح تسمه قرار داده شدند. از تسمه تفلونی با قابلیت تحمل دمایی 350 °C با مش 2 mm به عنوان بستر محرک استفاده شد. برای به حرکت در آوردن تسمه از ترکیب یک موتور الکتریکی 30 W، یک گیربکس فلزی و ماژول داریور موتور الکتریکی Dual Bridge; L298N استفاده شد.

تا 100٪) به طور معنی‌دار افزایش یافته است [19]. بنابراین اهداف این پژوهش را می‌توان اولاً بررسی تأثیر پارامترهای دما، سرعت هوای ورودی و توان مادون قرمز و چرخه هوای بازگشتی بر جنبه‌های مختلف انرژی خشک کن پیوسته ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم با جریان همسو، دوماً به کارگیری قانون دوم ترمودینامیک برای آنالیز اکسرژی خشک کن دانست.

2- مواد و روش‌ها

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

گیاه مرزه از یک سبزی فروشی محلی در شهر سنندج، کردستان خریداری شد. بعد از جداسازی برگ‌های له شده و پژمرده، برگ‌های سالم و تازه جهت انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند. پس از شستشوی کامل و پاک کردن گل و خاک، در داخل توری‌ها به مدت 2 ساعت در هوای آزاد در دمای 10 °C نگهداری شدند تا آب سطحی آن‌ها از بین رود. رطوبت اولیه نمونه‌ها، با استفاده از استاندارد آن به مدت 24 ساعت در دمای 103 °C، برابر با 1/5 ± 90٪ بر پایه تر به دست آمد [20].

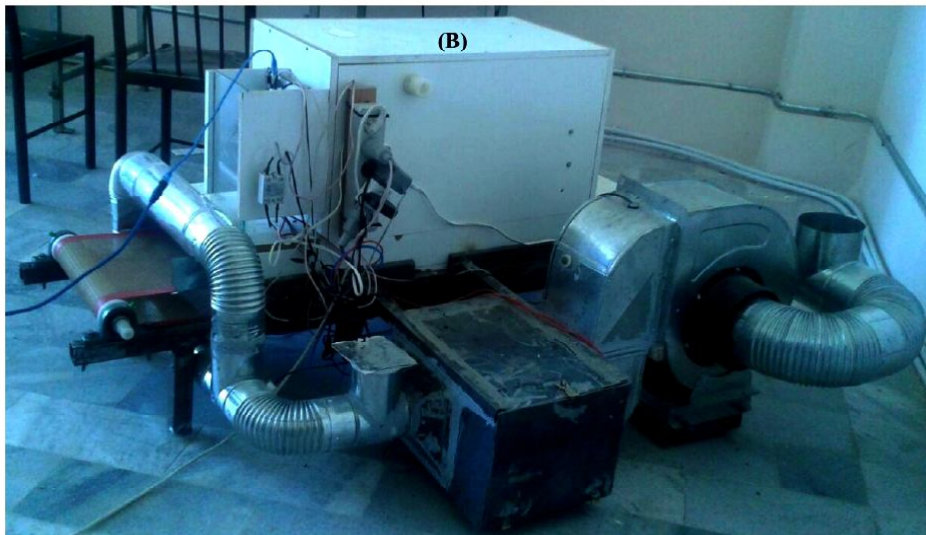
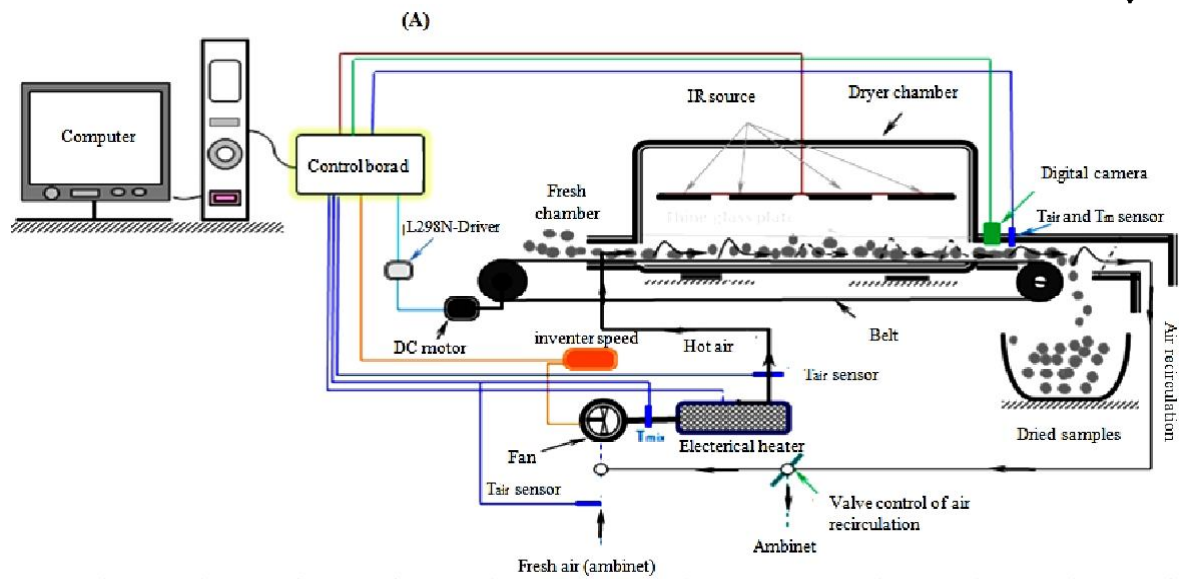
2-2- خشک کن مادون هوای گرم-قرمز تسمه‌ای

(جریان همسو)

تصویر خشک کن ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها در شکل (1) نشان داده شده است. محفظه خشک کن از سه لایه، چوب با ضخامت 2 cm، ورق فولادی 0/5 mm و لایه نازک آلومینیمی ساخته شده است (برای جلوگیری از نشست امواج). برای جلوگیری از برخورد هوای گرم و مرطوب با لامپ‌های مادون قرمز و همچنین جریان یکنواخت هوا بر روی محصول، محفظه مادون قرمز و هوای گرم توسط یک شیشه نازک از همدیگر جدا شدند. از یک دمنده گریز از مرکز با موتور محرک 0/37 kW متصل به اینوتور برای تأمین جریان هوا استفاده شد. برای کنترل دمای هوای ورودی به خشک کن از یک مجموعه 4 kW از المان‌های الکتریکی با سامانه کنترل PID با دقت 1 °C ± استفاده شده است. دمای هوا در نقاط مختلف خشک کن (هوای ورودی به المان‌های الکتریکی، هوای ورودی به محفظه خشک کن، هوای خروجی از محفظه خشک کن و هوای محیط)

2-3- شرایط خشک کردن

آزمایش‌ها در سه سطح دمایی 40، 50 و 60 °C، سه سطح سرعت هوای 0/5، 1 و 1/5 m/s و سه سطح توان تابشی 2000، 2400 و 2800 W/m² که به ترتیب معادل توان 500، 600 و 700 W می‌باشد، برای حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی و 100٪ هوای بازگشتی انجام گرفت. قابل ذکر است که سطوح سرعتی به گونه‌ای انتخاب شد که سبب بیرون افتادن محصول خشک شدن و یا برهم زدن چیدمان محصول بر روی بستر متحرک نگردد. ضخامت بستر ماده بر روی تسمه به طور تقریبی 2 cm² (مقدار 200 g در طول تسمه) در نظر گرفته شد. از آنجایی که خشک کن مورد استفاده فاقد سامانه اندازه‌گیری رطوبت به صورت لحظه‌ای بود، برای هر یک از شرایط ذکر شده، آزمایش اول به صورت بستر ثابت (موتور محرک تسمه از طریق مدار کنترل آن متوقف شد) برای اندازه‌گیری زمان تقریبی لازم جهت خشک شدن نمونه‌ها انجام گرفت. از تقسیم طول محفظه خشک کن بر زمان خشک شدن، سرعت تقریبی پیشروی تسمه



شکل (1) شماتیک (a) خشک‌کن پیوسته مادون‌هوای گرم - قرمز و (b) تصویر خشک‌کن ساخته شده

Fig. 1 schematic diagram of (a) continues hot air - infrared dryer, (b) picture of dryer

برای هر کدام از شرایط مدنظر مشخص شد. کلیه آزمایش‌ها در دمای محیط $20 \pm 1/5$ °C با رطوبتی نسبی $43/5 \pm 2/1$ % توسط موتور محرک بستر در مقابل دیگر منابع مصرف‌کننده انرژی، از توان مصرفی برای به حرکت درآوردن بستر صرف‌نظر شد. کل انرژی از رابطه (1) محاسبه شد [21-22].

$$E_t = (P_{IF} + \rho_a A_c u_a C_{pa} (T_{in} - T_0)) \times t \quad (1)$$

در رابطه فوق E_t انرژی مصرفی کل (J)، P_{IF} توان مادون قرمز (W)، A_c سطح مقطع محفظه هوای گرم خشک‌کن (m^2)، u_a سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن (m/s)، t زمان

4-2- آنالیز انرژی

کل انرژی مصرفی خشک‌کن عبارت است از مجموع انرژی‌های مصرفی توسط مادون قرمز و انرژی لازم جهت افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و سیستم بستر متحرک می‌باشد. به‌علت پایین بودن انرژی مصرفی

خشک شدن (s)، ρ_a چگالی هوای ورودی (kg/m^3)، C_{pa} چگالی هوا (J/kg.K)، T_{in} دمای هوای گرم ورودی به محفظه خشک کن ($^\circ\text{C}$) و T_0 دمای هوای ورودی به بخش المان‌های حرارتی ($^\circ\text{C}$) (دمای محیط) می‌باشد.

انرژی مصرفی ویژه عبارت است از انرژی لازم برای تبخیر نمودن یک کیلوگرم آب از محصول و به صورت رابطه (2) محاسبه می‌شود [23].

$$EX_{abs} = EX_{evp} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}}\right) \times m_w \lambda_w \quad (7)$$

که در آن، EX_{abs} اکسرژی جذب شده توسط ماده (J)، EX_{evp} اکسرژی صرف شده برای تبخیر آب از ماده (J)، T_0 دمای اولیه ماده (K) و T_{in} متوسط دمای محصول طی فرایند خشک کردن (K) است. متوسط دمای محصول برابر با دمای اندازه‌گیری شده توسط سنسور دمای هوای خروجی که در نزدیکی سطح محصول نصب شده بود، در نظر گرفته شد. اکسرژی منبع مادون قرمز برابر است با [17]:

$$EX_{IR} = \left(\varepsilon_{IR} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right)^4 - \frac{4}{3} \varepsilon_{IR} \left(\frac{T_0}{T_{IR}}\right)^4 \right) \times \sigma T_{IR}^4 A_{IR} \times t \quad (8)$$

که در آن، EX_{IR} اکسرژی مصرفی منبع مادون قرمز (J)، ε_{IR} ضریب نشر (بدون بعد)، T_{IR} دمای سطح منبع مادون قرمز (K)، T_0 دمای اولیه محفظه مادون قرمز (K)، σ ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)، A_{IR} سطح منبع مادون قرمز (m^2) و t زمان حرارت‌دهی (s) می‌باشد. ضریب نشر برای منبع مادون قرمز بکار گرفته شده برابر با 0/72، مساحت رویه تابش کننده منبع مادون قرمز برابر با $24 \times 24 \text{ mm}^2$ و دمای سطح منبع با توجه به رابطه (9) برای سطوح توانی 600، 500 و 700 W به ترتیب برابر با 715/8، 683/9 و 738/6 K به دست آمد [17].

$$E_{IR} = \varepsilon_{IR} \sigma T_{IR}^4 \quad (9)$$

که در آن، E_{IR} شار منبع مادون قرمز (W/m^2) می‌باشد. اکسرژی جریان هوای ورودی به محفظه خشک کن مطابق رابطه (10) عبارت است از [24]:

$$EX_{air} = \rho_{air} u_a A_c \left(T - T_\infty - T_\infty \ln \left(\frac{T}{T_\infty} \right) \right) \times t \quad (10)$$

انرژی مصرفی ویژه عبارت است از انرژی لازم برای تبخیر نمودن یک کیلوگرم آب از محصول و به صورت رابطه (2) محاسبه می‌شود [23].

$$E_{sc} = \frac{E_t}{m_w} \quad (2)$$

که در آن، m_w جرم آب بخار شده از محصول (kg) و E_{sc} انرژی مصرفی ویژه (MJ/kg water) می‌باشد. راندمان انرژی مصرفی خشک کن را می‌توان از رابطه (3) محاسبه نمود [24].

$$\eta_{en} = 100 \times \left(\frac{m_w \lambda_w}{E_t} \right) \quad (3)$$

که در آن، λ_w گرمای نهان آب (2257 kJ/kg) و η_{en} راندمان انرژی خشک کردن (/) است. انرژی اتلافی ویژه از رابطه (4) محاسبه شد:

$$E_{loss} = (1 - \eta_{en}) \times E_{sc} \quad (4)$$

که در آن، E_{loss} انرژی اتلافی ویژه (MJ/kg water) است.

5-2- آنالیز اکسرژی

تعادل اکسرژی را بر اساس قانون دوم ترمودینامیک می‌توان این گونه بیان نمود:

$$\sum EX_{in} = \sum EX_{out} \quad (5)$$

$$EX_{air,in} + EX_{IR} = EX_{abs} + EX_{loss} \quad (6)$$

که در آن، EX_{in} اکسرژی ورودی به خشک کن (J)، EX_{out} اکسرژی خروجی (J)، $EX_{air,in}$ اکسرژی هوای ورودی به محفظه خشک کن (J)، EX_{IR} اکسرژی مصرفی منبع مادون قرمز (J)،

داشته است. علت این فرایند آن است که افزایش سرعت هوای ورودی سبب خنک کردن سطح روی بستر محصول می‌گردد. در نتیجه این گرادیان دمایی کاهش، زمان خشک شدن افزایش و انرژی مصرفی خشک‌کن افزایش می‌یابد. برای مثال در دمای 40°C و توان 500 W با کاهش سرعت هوا از $1/5$ به $0/5\text{ m/s}$ ، انرژی مصرفی ویژه به ترتیب 50 و 44% برای حالت بدون چرخه و با 100% چرخه هوای بازگشتی کاهش یافته است. نتایج به دست آمده با گزارش‌های صورت گرفته توسط محققان از هم‌خوانی بالایی برخوردار می‌باشد [19، 27].

در هر یک از سطوح توان مادون قرمز و سرعت هوا، برای حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی، با افزایش دمای هوای ورودی انرژی مصرفی ویژه به طور چشم‌گیری افزایش یافته است [28]. در حالی که برای 100% چرخه هوای بازگشتی، نرخ افزایش انرژی مصرفی ویژه کم‌تر می‌باشد. با این وجود برای حالت فاقد چرخه، بیش‌ترین مقدار انرژی مصرفی (MJ/kg) $39/49\text{ water}$ تحت شرایط کاری 60°C ، $1/5\text{ m/s}$ و 500 W و کم‌ترین مقدار آن، $10/80\text{ MJ/kg water}$ ، برای شرایط کاری 40°C ، $0/5\text{ m/s}$ و 700 W به دست آمده است. به طور کلی می‌توان بیان داشت با افزایش توان مادون قرمز برای هر یک از شرایط مورد بررسی، میزان انرژی مصرفی کاهش یافته است ($p > 0/05$). علت این فرایند کاهش زمان خشک شدن با افزایش توان منبع مادون قرمز می‌باشد [29]. با افزایش توان از 500 به 700 W ، انرژی مصرفی برای حالت فاقد چرخه و 100% هوای بازگشتی به ترتیب $14/33$ الی $31/03\%$ و $18/17$ الی $36/94\%$ افزایش یافته است. مقایسه میان حالت فاقد چرخه با 100% چرخه هوای بازگشتی نشان‌دهنده آن است که میزان انرژی مصرفی ویژه برای حالت بدون هوای بازگشتی در تمام سطوح توانی و دمایی نسبت به حالت 100% هوای بازگشتی بیش‌تر می‌باشد ($p < 0/05$). علت این امر آن است که در حالت بدون هوای بازگشتی بخش بزرگی از انرژی ورودی به خشک‌کن، از طریق هوای خروجی از محفظه خشک‌کن به محیط اطراف منتقل می‌گردد. در صورتی که در 100% هوای بازگشتی، انرژی بالای هوای خروجی سبب افزایش دمای هوای قسمت گرم‌کن و در نتیجه مصرف کم‌تر انرژی الکتریکی جهت افزایش دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن می‌باشد [30].

راندمان اکسرژی از رابطه (11) محاسبه می‌شود [25].

$$\eta_{\text{ex}} = 100 \times \left(\frac{\text{EX}_{\text{abs}}}{\text{EX}_{\text{in}}} \right) \quad (11)$$

اکسرژی اتلافی به فرم رابطه (12) محاسبه شد:

$$\text{EX}_{\text{loss}} = \text{EX}_{\text{in}} - \text{EX}_{\text{abs}} \quad (12)$$

پتانسیل بهبود اکسرژی مقداری از اکسرژی است که با حداقل نمودن اکسرژی اتلافی می‌توان از آن استفاده مجدد نمود. پتانسیل بهبود اکسرژی از رابطه (13) تعیین می‌شود [26].

$$\text{IP} = (1 - \eta_{\text{ex}}) \times \text{EX}_{\text{loss}} \quad (13)$$

که در آن، IP پتانسیل بهبود اکسرژی (J) می‌باشد.

2-6- آنالیز آماری

پژوهش بر اساس آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS16 انجام و کلیه میانگین‌ها همراه با مقادیر انحراف استاندارد گزارش شدند. از آنجایی که در گزارش‌های علمی تمامی مقادیر به فرم مقادیر ویژه بیان می‌شوند، لذا مقادیر انرژی و اکسرژی برحسب انرژی یا اکسرژی لازم برای تبخیر یک کیلوگرم آب از ماده بیان شده‌اند.

3- نتایج و بحث

3-1- انرژی مصرفی ویژه

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس برای انرژی مصرفی ویژه در جدول (1) نشان داده شده است. مطابق این نتایج، چرخه هوای بازگشتی و سرعت هوا نسبت به دیگر پارامترهای مورد بررسی (دما و توان مادون قرمز) از تأثیر بیش‌تری بر تغییرات انرژی مصرفی ویژه برخوردار می‌باشند. تغییرات انرژی مصرفی ویژه برای شرایط مختلف خشک کردن در شکل (2) نشان داده شده است. با افزایش سرعت هوای ورودی میزان انرژی مصرفی ویژه برای تمامی شرایط خشک کردن کاهش

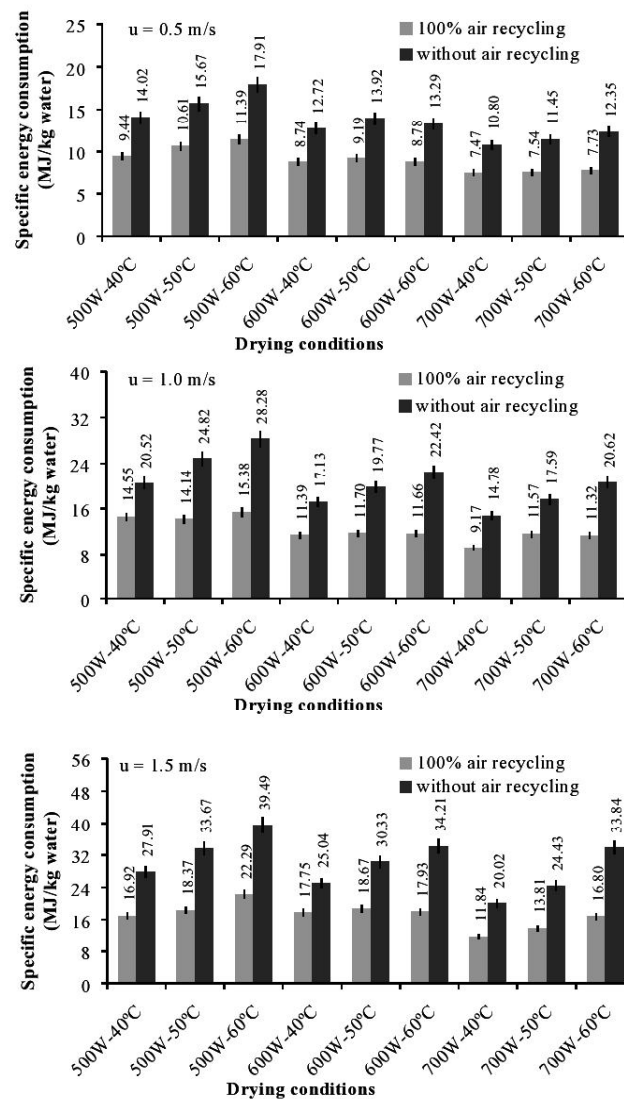
جدول (1) تجزیه واریانس پارامترهای مورد ارزیابی در خشک کن ترکیبی هوای گرم - مادون قرمز
 Table 1 Analysis of the variance of the studied parameters in combined hot air-infrared dryer

منبع source	درجات آزادی Degrees of freedom	انرژی مصرفی Energy consumption	راندمان انرژی Energy efficiency	انرژی اتلافی Energy loss	راندمان اکسرژی Exergy efficiency	اکسرژی اتلافی Exergy loss	پتانسیل بهبود Improvement potential
میانگین مربعات Means of squares							
تیمار	53	47343.17*	39814.72*	35667.27*	6487.48*	2163.35*	1906.17*
سرعت Air velocity	2	2037.51*	1531.70*	4075.21*	68.13*	13.45**	14.23*
دما Temperature	2	237.47*	93.49*	474.84*	61.05*	0.198*	0.35*
توان مادون قرمز Infrared power	2	355.70*	328.44*	711.37*	9.98*	0.599*	0.74*
چرخه بازگشتی Air recirculation	1	2960.88*	2126.38*	2960.86*	34.69*	14.03*	13.93*
دما × سرعت هوا Air velocity×temperature	4	44.01*	1.66ms	44.01*	1.55*	0.597*	0.55*
توان مادون قرمز × سرعت هوا Air velocity×infrared power	4	14.09**	17.31*	14.11*	2.52*	0.292*	0.280*
چرخه بازگشتی × سرعت هوا Air velocity×air recirculation	2	224.54*	29.04*	224.57*	0.77*	1.301*	1.30*
توان مادون قرمز × دما Temperature×infrared power	4	10.31*	8.77*	10.31*	1.50*	0.432*	0.40*
چرخه بازگشتی × دما Air velocity× air recirculation	2	78.78*	1.92ms	78.75*	5.41*	1.527*	1.51*
توان مادون قرمز × چرخه بازگشتی Infrared power×air recirculation	2	19.60*	20.42*	19.60*	0.11ms	0.128	0.13*
توان مادون قرمز × سرعت هوا × دما Air velocity×temperature×infrared power	8	3.08*	3.74*	3.08*	0.67**	0.128*	0.13*
دما × سرعت هوا × چرخه بازگشتی Air velocity×temperature×air recirculation	4	12.99*	0.66 ns	12.99*	0.12 ns	0.169 *	0.16*

ادامه جدول (۱) تجزیه واریانس پارامترهای مورد ارزیابی در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مادون‌فرمز
Table 1 Analysis of the variance of the studied parameters in combined hot air-infrared dryer

منبع source	میانگین مربعات Means of squares							
	درجات آزادی Degrees of freedom	انرژی مصرفی Energy consumption	راندمان انرژی Energy efficiency	انرژی اتلافی Energy loss	راندمان اکسرژی Exergy efficiency	انرژی اتلافی Exergy loss	اکسرژی بهبود Improvement potential	
توان مادون فرمز×سرعت هوا×چرخه بازگشتی Air velocity×infrared power×air recirculation	4	1.40 ns	1.85*	1.40 ns	0.02ns	0.004ns	0.004ns	
توان مادون فرمز×دما×چرخه بازگشتی Temperature×infrared power×air recirculation	4	1.34ns	1.75*	1.35ns	0.03ns	0.009ns	0.009ns	
توان مادون فرمز×سرعت هوا×دما×چرخه بازگشتی Air velocity×temperature×infrared power×air recirculation	8	1.53ns	1.50*	1.53*	0.01ns	0.003ns	0.003ns	
خطا	108	0.873	0.712	0.69	0.10	0.030	0.030	

ns as not significant effect (p>0.05) ** significant effect (p<0.05)



شکل (2) تغییرات انرژی مصرفی ویژه برای شرایط مختلف خشک کردن مرزه

Fig.2 Variations of specific energy consumption for different drying conditions of savory leaves

متوسط تغییرات دمای هوای ورودی به خشک کن طی فرایند حرارت دهی با 100٪ چرخه هوای بازگشتی در جدول (2) نشان داده شده است. مطابق این جدول، با افزایش دمای هوای ورودی به خشک کن از 20 °C (دمای محیط) به 28/89 الی 55/09 °C (با توجه به شرایط آزمایش)، انرژی مصرفی ویژه از 29/10 تا 50/30٪ کاهش یافته است. کمترین و بیشترین انرژی مصرفی ویژه برای 100٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب برابر با 7/48 و 22/30 MJ/kg water به دست آمده است. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین همخوانی دارد [10، 31-33].

2-3- راندمان انرژی

تغییرات راندمان انرژی برای شرایط مختلف خشک کردن مرزه در شکل (3) نشان داده شده است. راندمان حرارتی برای حالت فاقد چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب در محدوده 5/71 الی 20/9٪ و 10/2 الی 30/21٪ متغیر می باشد. همان گونه که مشاهده می گردد، به کارگیری چرخه هوای بازگشتی سبب افزایش راندمان حرارتی خشک کن در مقایسه با حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی شده است ($p < 0/05$). فرایند خشک کردن در سرعت پایین هوا سبب کاهش انرژی مصرفی و به عبارت دیگر افزایش راندمان انرژی می شود. با

جدول (2) متوسط تغییرات دمای هوای ورودی به المان‌های الکتریکی با 100٪ چرخه هوای بازگشتی

Table 2 Average of air temperature entering to electrical elements with 100% air recycling

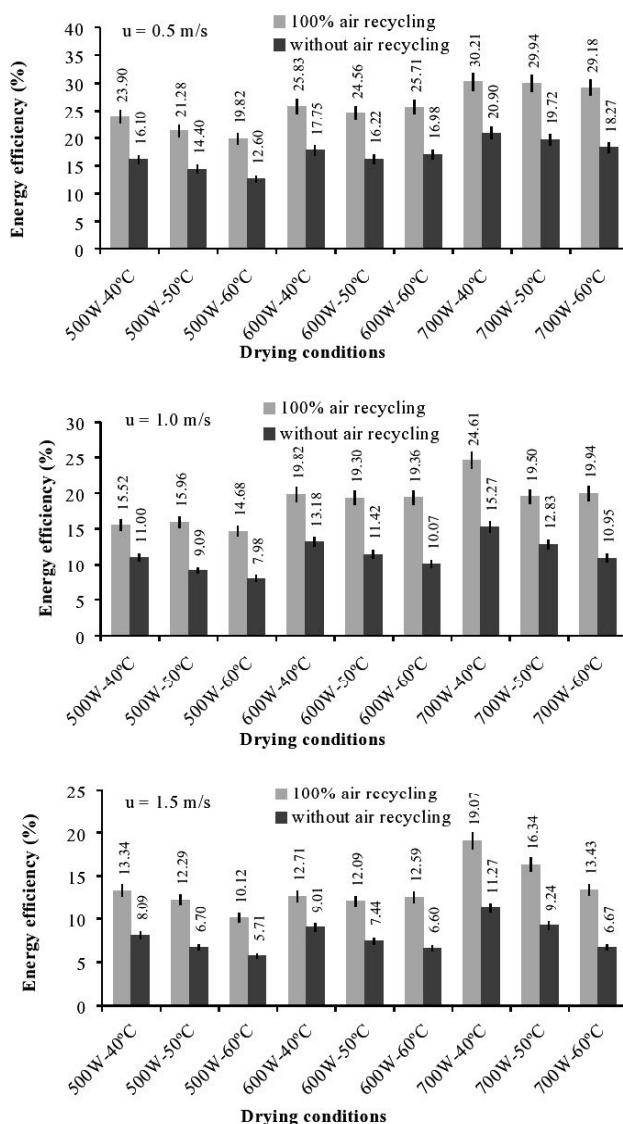
دما T (°C)	توان مادون قرمز P (W)	سرعت هوا u (m/s)		
40	500	36.32 (±1.34)	30.19 (±3.57)	31.82 (±1.11)
	600	37.53 (±1.56)	32.74 (±2.71)	29.32 (±0.61)
	700	38.50 (±1.43)	35.57 (±1.55)	33.91 (±1.00)
50	500	39.40 (±1.82)	39.37 (±5.36)	38.19 (±1.46)
	600	42.44 (±1.57)	39.61 (±2.80)	36.16 (±1.98)
	700	44.59 (±2.00)	37.45 (±2.68)	39.13 (±1.16)
60	500	45.50 (±0.66)	45.10 (±1.34)	41.78 (±1.63)
	600	45.81 (±0.24)	47.85 (±1.78)	44.75 (±2.14)
	700	50.68 (±1.14)	47.52 (±3.35)	47.19 (±1.24)

ذکر شده، به کارگیری سرعت هوای 0/5 m/s، انرژی اتلافی ویژه حدود 23/83 MJ/kg water کاهش یافته است. این بدان معناست که با افزایش سرعت هوای ورودی، انرژی ورودی به محفظه سریع‌تر خارج شده و هم‌چنین با خنک شدن سطح محصول و کاهش گرادیان حرارتی، مدت زمان خشک‌کردن افزایش یافته و انرژی مصرفی افزایش و در نتیجه میزان اتلاف انرژی نیز افزایش خواهد یافت [22، 36]. انرژی اتلافی ویژه با توجه به شرایط مختلف خشک‌کردن برای حالت فاقد چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب از 8/54 الی 37/24 MJ/kg water و 5/21 الی 20/04 MJ/kg water متغیر است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به کارگیری چرخه هوای بازگشتی سبب کاهش 32 الی 54٪ انرژی اتلافی ویژه است. این نتایج با گزارش‌های صورت گرفته توسط محققین برای محصولات کشاورزی همخوانی دارد [37-38]. انرژی اتلافی ویژه با افزایش توان از 500 به 700 W در تمام شرایط خشک‌کردن کاهش یافته است. دلیل کاهش انرژی اتلافی با افزایش دما آن است که با افزایش توان مادون قرمز، زمان خشک شدن به دلیل افزایش نرخ انتقال جرم از محصول کاهش می‌یابد. این کاهش زمان فرایند، در نهایت منجر به کاهش انرژی اتلافی در طی فرایند خشک‌شدن خواهد شد [22 و 39]. از سوی دیگر، افزایش دمای هوای ورودی موجب افزایش انرژی اتلافی ویژه شده است. علت این امر آن است که تاثیر آنتالپی هوا بر اثر افزایش دما بیش‌تر از تاثیر افزایش دما بر کاهش زمان فرایند می‌باشد [40]. با این حال تاثیر دما

این حال حداکثر راندمان حرارتی در تمامی سطوح سرعتی هوا، تحت شرایط خشک کردن 40 °C و 700 W محاسبه شده است. مطابق نتایج آنالیز واریانس، تاثیر چرخه هوا بر راندمان حرارتی خشک‌کن به مراتب بیش‌تر از سرعت هوای ورودی می‌باشد (جدول 1). به‌طور کلی با افزایش دما راندمان حرارتی خشک‌کن کاهش یافته است. هرچند این تغییرات برای حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی و سطوح سرعتی (هوا) بالا از نرخ بیش‌تر برخوردار می‌باشد. علت این امر را می‌توان به علت خروج بیش‌تر انرژی به محیط اطراف خشک‌کن از طریق هوای خروجی و و نیز خروج سریع‌تر آن به علت سرعت بالای هوا دانست [34، 35]. تاثیر توان مادون قرمز بر راندمان انرژی بیش‌تر از تغییرات دمای هوای ورودی می‌باشد (جدول 1). با این حال با افزایش توان مادون قرمز راندمان انرژی خشک‌کن دچار افزایش شده است.

3-3- انرژی اتلافی

از میان متغیرهای ورودی، چرخه هوای بازگشتی، دارای بیش‌ترین تاثیر بر تغییرات انرژی اتلافی بوده است (جدول 1). تاثیر شرایط مختلف خشک‌کردن بر انرژی اتلافی ویژه در فرایند خشک‌کردن مرزه در شکل (4) نشان داده شده است. با افزایش سرعت هوا از 0/5 به 1/5 m/s، انرژی اتلافی به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. انرژی ویژه در سرعت 1/5 m/s، 60 °C و 500 W در حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی در حدود 37/24 MJ/kg water می‌باشد، که در مقایسه با شرایط



شکل (3) تغییرات راندمان انرژی در شرایط مختلف خشک شدن

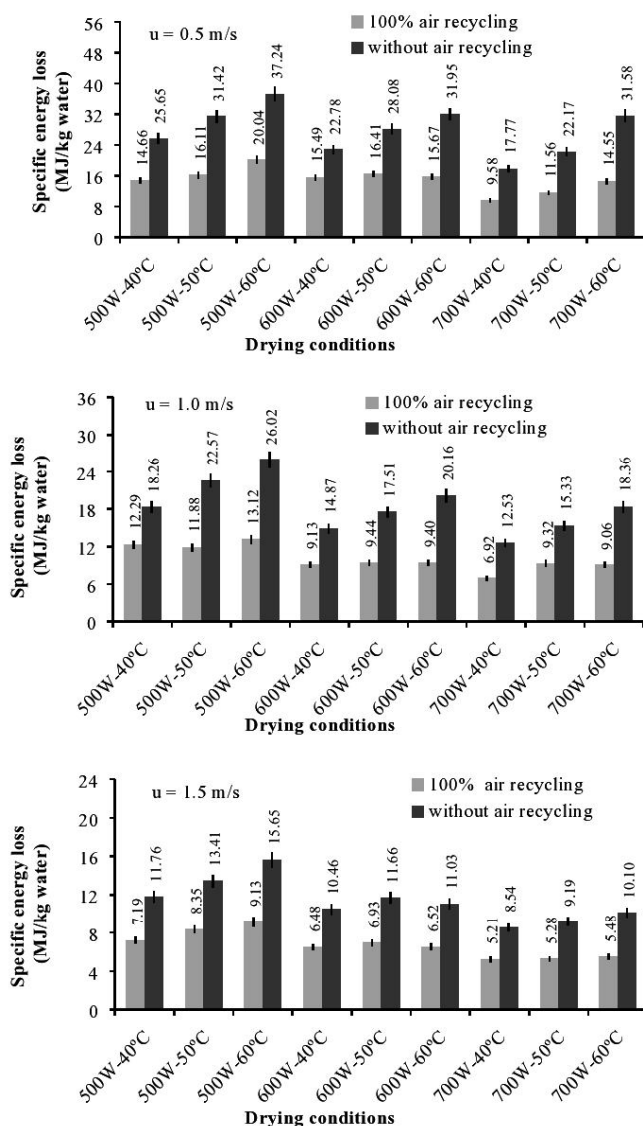
Fig.3 Variations of energy efficiency at different drying conditions

کمتر می‌باشد. از سوی دیگر، راندمان اکسرژی با 100٪ چرخه هوای بازگشتی بیش‌تر از حالت فاقد چرخه می‌باشد. علت این فرایند، کاهش اکسرژی هوای ورودی به محفظه خشک‌کن به دلیل افزایش دمای هوای به ورودی محفظه‌المان‌های الکتریکی می‌باشد. این نتایج با گزارش‌های صورت گرفته توسط دیگر محققین از همخوانی بالایی برخوردار می‌باشد [19، 41]. هم‌چنین با افزایش توان مادون قرمز و دمای هوا و کاهش سرعت هوا، راندمان اکسرژی افزایش یافته است. این افزایش راندمان اکسرژی را می‌توان در نتیجه بالا بودن نرخ

بر انرژی اتلافی در حالت فاقد چرخه نسبت به 100٪ چرخه هوای بازگشتی مشهودتر می‌باشد [32، 34].

4-3- راندمان اکسرژی

تغییرات راندمان اکسرژی برای فرایند خشک کردن مرزه در خشک‌کن جریان پیوسته مادون قرمز- هوای گرم در شکل (5) نشان داده شده است. مقایسه میان مقادیر راندمان انرژی و اکسرژی نشان دهنده آن است که تحت شرایط یکسان از هرکدام از متغیرهای ورودی، راندمان اکسرژی از راندمان انرژی



شکل (4) انرژی اتلافی ویژه در شرایط مختلف خشک کردن

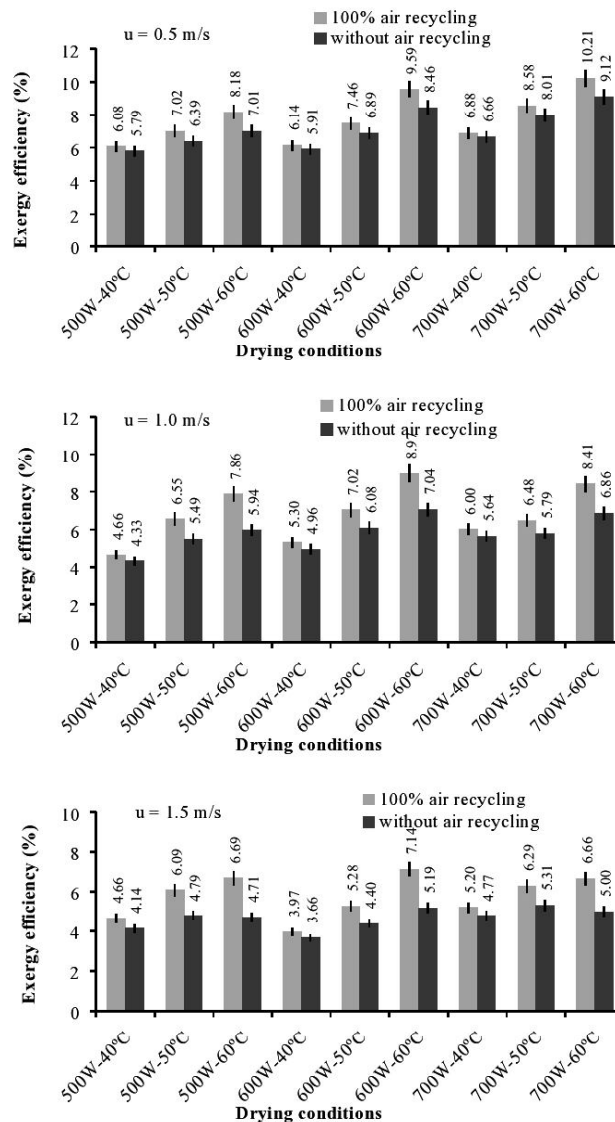
Fig.4 Specific energy loss at different drying conditions

هوای بازگشتی به دست آمده است.

3-5- اکسرژی اتلافی

تاثیر شرایط مختلف خشک کردن بر روی اکسرژی اتلافی ویژه در شکل (6) نشان داده شده است. همان گونه از تغییرات اکسرژی اتلافی ویژه پیداست به کارگیری چرخه هوای بازگشتی سبب کاهش 3/42 الی 30/98٪ اکسرژی اتلافی نسبت به حالت فاقد چرخه می گردد. هم چنین استفاده از سطوح سرعتی پایین هوا سبب می گردد تا زمان تماس محصول با هوای داغ

حرارت دهی و تبخیر رطوبت از ماده در توان مادون قرمز و دمای بالا و سرعت پایین دانست [42]. با این وجود مطابق آنالیز واریانس، تاثیر دما و سرعت هوا بر تغییرات راندمان اکسرژی بیش تر از دیگر متغیرهای مورد بررسی یعنی توان مادون قرمز و چرخه هوای بازگشتی می باشد. بیش ترین راندمان اکسرژی برای شرایط حرارت دهی 700 W و 0/5 m/s، 60 °C تحت 100٪ چرخه هوای بازگشتی برابر با 10/21٪ به دست آمده است. درحالی که کم ترین مقدار آن، 3/66٪، برای شرایط حرارت دهی 40 °C و 1/5 m/s و 600 W با حالت فاقد چرخه



شکل (5) تغییرات راندمان اکسرژی در شرایط مختلف خشک کردن

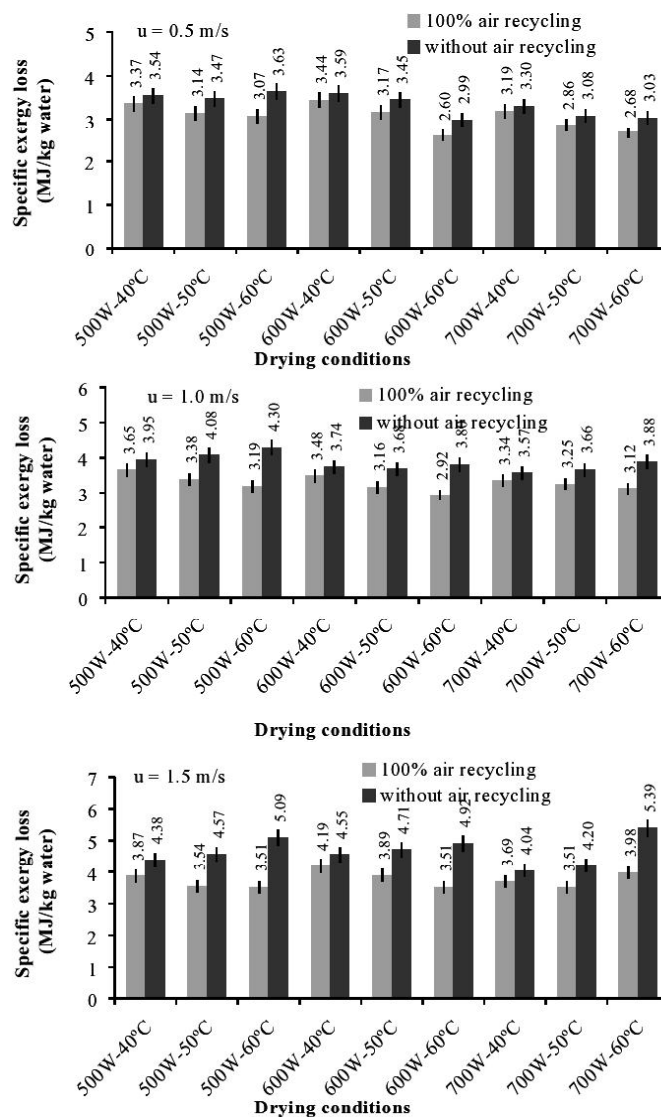
Fig.5 Variations of exergy efficiency at different drying conditions

کاهش یافته است. کمترین اکسرژی اتلافی برابر با 600 W و 60°C، 0.5 m/s تحت شرایط 2/60 MJ/kg water با 100٪ چرخه هوای بازگشتی بوده است.

3-6- پتانسیل بهبود اکسرژی

مطابق نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس برای پتانسیل بهبود اکسرژی (جدول 1)، چرخه هوای بازگشتی و سرعت هوا نسبت به دما و توان مادون قرمز از تأثیر بیشتری بر تغییرات پتانسیل بهبود اکسرژی برخوردار می باشند. تغییرات پتانسیل

بیشتر از سطوح سرعتی بالاتر باشد. در نتیجه این فرایند، نرخ انتقال جرم و حرارت افزایش و زمان فرایند خشک کردن کاهش و انرژی کمتری به خارج محفظه خشک کن منتقل می گردد [22]. تغییرات اکسرژی اتلافی ویژه با افزایش دما در دو حالت بدون چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی از روند مخالف همدیگر تبعیت می کنند. به این معنا که با افزایش دما، اکسرژی اتلافی برای حالت فاقد چرخه افزایش و برای 100٪ هوای بازگشتی روند کاهشی داشته است. همچنین با افزایش توان مادون قرمز اکسرژی اتلافی به دلیل کاهش زمان فرایند

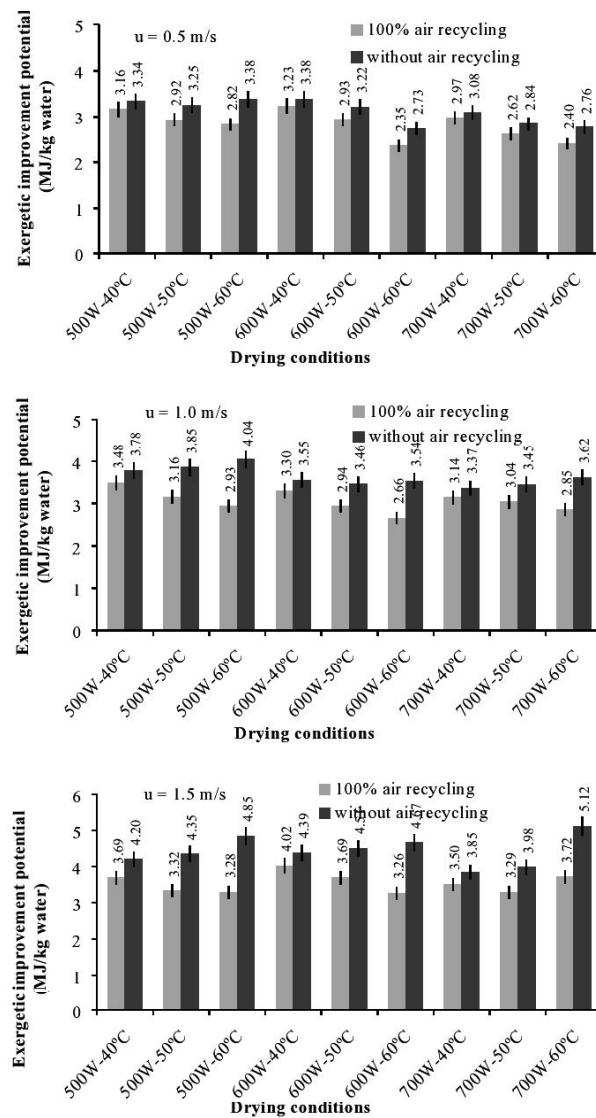


شکل (6) تغییرات اکسرژی اتلافی ویژه در شرایط مختلف خشک کردن

Fig.6 Variations of specific exergy loss at different drying conditions

بدون چرخه و با 100٪ چرخه هوای بازگشتی افزایش یافته است. پتانسیل بهبود اکسرژی برای فرایند خشک کردن بدون استفاده از چرخه هوای بازگشتی در محدوده 2/73 الی 5/12 MJ/kg water متغیر می‌باشد. درحالی‌که این مقادیر برای 100٪ چرخه هوای بازگشتی از 2/35 الی 4/02 MJ/kg water تغییر می‌نماید. به علت آن که در 100٪ چرخه هوای بازگشتی با بازخور کردن هوای خروجی و استفاده مجدد از اکسرژی هوای خروجی از خشک‌کن، مقادیر کم‌تری از اکسرژی خروجی به هدر می‌رود، لذا مقادیر پتانسیل بهبود برای 100٪ چرخه

بهبود اکسرژی برای شرایط مختلف خشک کردن در شکل (7) نشان داده شده است. با افزایش سرعت هوای ورودی پتانسیل بهبود اکسرژی برای تمامی شرایط خشک کردن افزایش داشته است. این افزایش پتانسیل به دلیل آن است که در سرعت بالای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن مقدار اتلاف اکسرژی بیشتر، در نتیجه سطح بیش‌تری از اکسرژی مفید قابلیت برگشت به چرخه فرایند را دارا است. در دمای 40°C و توان 500 W با افزایش سرعت هوا از 0/5 به 1/5 m/s، پتانسیل بهبود اکسرژی به ترتیب 25 و 16/72٪ برای حالت



شکل (7) تاثیر شرایط مختلف خشک کردن بر پتانسیل بهبود اکسرژی

Fig.7 Effect of different drying conditions on exergetic improvement potential

هوای بازگشتی نسبت به حالت بدون چرخه بازگشتی کم تر یا افزایش پتانسیل بهبود اکسرژی می باشد [44].

می باشد [43]. برای فرایند خشک کردن فاقد چرخه هوای

بازگشتی، مقدار پتانسیل بهبود اکسرژی در توان بالا- دمای

بالا- سرعت بالا بیش تر از توان بالا- دمای بالا و سرعت پایین

می باشد. در واقع افزایش دما و توان سبب افزایش آنتالپی محیط

محفظه خشک-کن می گردد. در سرعت های بالا به علت کاهش

زمان تماس میان ماده و جریان هوا و همچنین جذب انرژی از

ماده توسط هوا، مقدار اکسرژی خروجی از محفظه خشک کن

افزایش می یابد. در واقع این به معنای افزایش اکسرژی اتلافی

4- نتیجه گیری

با به کارگیری 100٪ چرخه هوای بازگشتی می توان 41

الی 100٪ در انرژی مصرفی ویژه صرفه جویی نمود. حداقل

انرژی مصرفی ویژه برابر با 7/47 MJ/kg water تحت شرایط

سرعت 0/5 m/s، توان 700 W و دمای 40 °C و حداکثر

مقدار آن برابر با 22/29 MJ/kg water برای شرایط سرعت

1/5 m/s، توان 500 W و دمای 60 °C به دست آمد. راندمان

فاقد چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی به ترتیب از 8/54 الی 37/24 MJ/kg water و 5/21 الی 20/04 متغیر است. با افزایش دما در حالت فاقد چرخه هوای بازگشتی، اکسرژی اتلافی افزایش یافته و با به کارگیری چرخه هوای بازگشتی اکسرژی اتلافی دچار کاهش شده است. به علت استفاده مجدد از اکسرژی هوای خروجی، پتانسیل بهبود اکسرژی در 100٪ هوای بازگشتی نسبت به فاقد چرخه به میزان 0/38 الی 1/01 کاهش یافته است.

انرژی برای حالت فاقد چرخه و 100٪ چرخه هوای بازگشتی با توجه به شرایط مختلف خشک کردن به ترتیب از 7/44 الی 20/90٪ و 10/12 الی 30/21٪ متغیر است. تأثیر دما بر افزایش اتلاف انرژی در حالت فاقد چرخه بیش تر از حالت به کارگیری 100٪ چرخه هوا بازگشتی می باشد. حداکثر مقدار راندمان اکسرژی برابر با 10/21٪ برای شرایط 0/5 m/s، 60 °C و 700 W با 100٪ چرخه هوای بازگشتی محاسبه شد. انرژی اتلافی ویژه با توجه به شرایط مختلف خشک کردن برای حالت

منابع

- convective drying and under open sun. *J. Food Eng.*, 75, 308-315.
- [9] Li, Y., Xu, S., Dawen, S. (2007). Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum drying as well as microencapsulation. *J. Food Eng.*, 83, 76-83.
- [10] Tippayawong, N., Tantakitti, C., Thavornun, S., Peerawanitkul, V. (2009). Energy conservation in drying of peeled longan by forced convection and hot air recirculation. *Biosys Eng.*, 104, 199-204.
- [11] Tirawanichakul, S., Prachayawarakorn, S., Varanyanon, W., Soponronnarit, S. (2009). Drying strategies for fluidized-bed drying of paddy. *Int. J. Food Eng.*, 23, 126-135.
- [12] Zare, D., Tavakoli, S. (2014). Optimization and evaluation of a microwave-assisted fluidized bed dryer with exhaust air recirculating system: case study, corn drying. 18th World Congress of CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering), 15-21.
- [13] Boulemtafes, B.A., Benzaoui, A. (2011). Energy and exergy analyses of solar drying process of mint. *Energy Procedia.*, 6, 583- 591.
- [14] Prommas, R., Rattanadecho, P.H., Cholaseuk, D. (2010). Energy and exergy analyses in drying proc-
- [1] Sivakumar, R., Saravanan, R., Elaya, A.P., Iniyar, S. (2016). Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renew Sust Energ Rev.*, 61, 280–301.
- [2] Togrul, H. (2006). Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J. Food Eng.*, 77, 610–619.
- [3] Soysal, A., Oztekin, S., Eren, O. (2006). Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosys Eng.*, 93 (4), 403–413.
- [4] Iguaz, A., Lopez, A., Virseda, P. (2002). Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for wholesale by-products. *J. Food Eng.*, 54, 289–297.
- [5] Abasi, S., Minaei, S., Khostaghaza, M.H. (2016). Performance of a recirculating dryer equipped with a desiccant wheel. *Drying Technol.*, 34 (8), 863-870.
- [6] Shawik, D., Tapash, D., Srinivasa, R., Jain, R.K. (2001). Development of an air recirculating tray dryer for high moisture biological materials. *J. Food Eng.*, 50 (4), 223–227.
- [7] Velmurugan, C., Sivakumar, S., Bala, A., Kumar, N.H., Prithviraj, S. (2013). Experimental and analytical investigation on modified solar dryer with recirculation of air. *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 6(4), 441-448.
- [8] Akpınar, E.K., Berceer, Y., Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a

- [25] Aviara, N., 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.
- [26] Hammond, G., Stapleton, A. (2001). Exergy analysis of the United Kingdom Energy System. *J. Power Energy*, 215(2), 141-162.
- [27] Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *J. Food Eng.*, 100, 662-668.
- [28] Savoie, P., Joannis, H. (2006). Bidirectional drying of baled hay with air recirculation and cooling. *Can Biosys Eng.*, 48, 353-359.
- [29] Bowser, T., Frazier, R.S. (2016). Dehydrator exhaust recirculation for energy savings. *FAPC.*, 181, 1-4.
- [30] Jokiniemi, T., Ahokas, J. (2014). Effect of heat insulation on the energy consumption of recirculating mixed-flow batch grain dryer. *Agricultural Engineering International, CIGR Journal.*, 16(3), 205-213.
- [31] Sarsavadia, P.N. (2007). Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. *Renewable Energy*, 11, 2529-2547.
- [32] Washington, N. J. (2010). Energy-efficient fluid bed drying system recycles exhaust air to cut heating costs and improve process efficiency. *Witte CoInc.*
- [33] Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., Wutiwivatchai, W. (2001). Fluidised bed drying of soybeans. *J. Stored Prod. Res.*, 37, 133-151.
- [34] Kassam, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy, A.R., Aboukarima, A.M., Hamed, E.Y. (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *J. Saudi Society Agri. Sci.*, 10, 33-40.
- [35] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., ess of porous media - using hot air. *Heat Mass Trans.*, 37,372-378.
- [15] Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., Aghbashlo, M. (2010). Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy*, 35, 4679-4684.
- [16] Azadbakhat, M., Aghili, H., Ziaratban, A., Vahedi Torshizi, M. (2017). Application of artificial neural network method to exergy and energy analyses of fluidized bed dryer for potato cubes. *Energy*, 120, 947-958
- [17] Agbashlo, M. (2015). Exergetic simulation of a combined infrared-convective drying process. *Heat Mass Trans.*, 52, 829-844.
- [18] Shringi, V., Kothari, S., Panwar, N.L. (2014). Experimental investigation of drying of garlic clove in solar dryer using phase change material as energy storage. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 118, 533-539.
- [19] Amantea, R.P., Fortes, M., Santos, T.G. (2010). Exergy Analysis applied to the design of grain dryers with air flow recirculation. *ASABE.*, 33,12-22.
- [20] AOAC. (2000). Official Methods of Analysis of the AOAC. Association of Official Analytical Chemists, Washington.
- [21] Koyuncu, T., Tosun, I., Pinar, Y. (2007). Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits. *J. Food Eng.*, 78, 735-739.
- [22] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Convers Manag.*, 52, 1192-1199.
- [23] Sharma, G.P., Prasad, S. (2006). Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy*, 31,1921-1926.
- [24] Darvishi, H., Zarein, M., Farhudi, Z. (2016). Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *J. Food Sci. Technol.*, 5(2), 1-17.

Acharyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *J. Food Eng.*, 81(2), 459–68.

[36] Khoshtaghaza, M.H., Darvishi, H., Minaei, S. (2014). Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. *J. Agri. Sci. Technol.*, 16, 1017-1031.

[37] Ceylan, I., Aktas, M., Dogan, H. (2007). Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Appl Therm Eng.*, 27, 216–222.

[38] Adapa, P.K., Schoenau, G.J. (2005). Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis. *Int. J. Energy Res.*, 29, 961-972.

[39] Cheng, W.N., Raghavan, G.S.V., Ngadi, M., Wang, N. (2006). Microwave power control strategies on the drying process II. Phase-controlled and cycle-controlled microwave/airdrying. *J. Food Eng.*, 76, 195–201.

[40] Mellmann, J. and Fürll, C. 2008. Drying facilities for medicinal and aromatic plants - specific energy consumption and potential for optimization. *J. Medicinal Spice Plants.*, 13(3), 127-133.

[41] Syahrul, S., Dincer, I., Hamdullahpur, F. (2002). Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Appl Therm Eng.*, 22, 1763-1775.

[42] Jaturonglumlert, S., Kiatsiriroat, T. (2010). Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *J. Food Eng.*, 100 (2), 254-260.

[43] Colpan, C.O. (2005). Exergy Analysis of Combined Cycle Congeneration Systems. MS.c Theses, METU - Middle East Technical University, Turkey.

[44] Khanali, M., Aghbashlo, M., Jafari, A. (2013). Exergetic performance assessment of plug flow fluidized bed drying process of rough rice. *Int. J. Energy.*, 13, 387-408.