



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی و بهینه‌یابی پارامترهای انرژی در خشک‌کردن گیاه رزماری با پیش‌تیمار مایکروویو پالسی

ولی رسولی شریبانی^{۱*}، ابراهیم تقی نژاد^۲، رمضان هادی پور رکنی^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. دانشجوی دکتری، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۱، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۸/۳/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۶)

چکیده

امروزه استفاده از عملیات پیش‌تیمار برای کاهش زمان و انرژی با هدف کاهش هزینه‌های خشک‌کردن محصولات کشاورزی از جمله گیاهان دارویی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، مدل‌سازی و بهینه‌یابی پارامترهای انرژی در خشک‌کردن گیاه دارویی رزماری با استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو پالسی در سه تیمار ۹۰ W به مدت ۵ min، ۱۸۰ W به مدت ۲/۵ min و ۳۶۰ W به مدت ۱/۵ min و ۱/۵ min شاهد (بدون عملیات پیش‌تیمار) در یک خشک‌کن همرفتی با دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C و سرعت هوای ۰/۴ m/s به کمک روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش توان از ۹۰ به ۳۶۰ W و دما از ۴۰ به ۶۰ °C مقدار ضریب خشک‌شدن طی معادله درجه دوم افزایش یافت. میزان بازده انرژی، بازده خشک‌کردن، بازده حرارتی و بازده همرفتی با افزایش توان از ۹۰ به ۱۸۰ W و افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ °C روند کاهشی پیدا کرد ولی با افزایش توان از ۱۸۰ به ۳۶۰ W و افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ °C این میزان افزایش یافت. افزایش توان از ۹۰ تا ۳۶۰ W و دما از ۴۰ به ۵۰ °C میزان گرمای مخصوص، توان مخصوص و انرژی مخصوص را افزایش داد در حالی که با افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ °C این میزان طی معادله درجه دوم روند کاهشی پیدا کرد. بر اساس مدل‌سازی به روش سطح پاسخ، شرایط بهینه جهت حصول بهترین پارامتر انرژی، توان مایکروویو ۳۶۰ W و دمای خشک‌کردن ۶۰ °C با مطلوبیت ۹۹/۵٪ تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌یابی انرژی، خشک‌کردن، انرژی مخصوص، بازده حرارتی، رزماری.

۱. مقدمه

خشک‌شدن) افزایش یافت. همچنین با افزایش توان پیش‌تیمار مایکروویو زمان خشک‌شدن روند کاهشی داشت. در پژوهش دیگر اکبریان مایمند و همکاران [۱۰] با استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو به خشک‌کردن ریشه جوز هندی پرداختند و اثرات ضد میکروبی آن در مقابله با باکتری‌های بیماری‌زا و کپک‌های عامل فساد بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب افزایش خواص ضد میکروبی ریشه جوز هندی خشک‌شده می‌گردد.

روش سطح پاسخ ابزاری مهم برای بهبود فرایند و محصول به شمار می‌رود. روش سطح پاسخ در واقع مجموعه‌ای از طرح‌های آزمایشی و فن‌های بهینه‌یابی است که آزمایشگر را قادر می‌سازد تا رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل را تعیین کند. روش سطح پاسخ نوعاً برای ترسیم یک سطح پاسخ در محدوده مورد نظر و بهینه‌یابی پاسخ برای انتخاب شرایط فرایند به منظور دستیابی به مشخصات هدف یا نیازمندی‌های مصرف‌کننده به کار می‌رود [۱۱].

در تحقیقی شرایط مختلف خشک‌کردن افشانه‌ای بر خواص فیزیکی-شیمیایی و آنتی‌اکسیدانی گیاه رزماری به روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۲]. در دیگر گزارشات محققین، تاثیر سطوح مختلف خلایی و توان مایکروویو در خشک‌کن مایکروویو - خلاء را بر ترکیبات بویائی گیاه رزماری مورد ارزیابی قرار داده اند [۱۳، ۱۴]. در تحقیقی شرایط بهینه خشک‌شدن مغز فندق با تاثیر دما در سه سطح ۴۵، ۶۵ و ۸۵°C، سرعت هوا در سه سطح ۱/۳۰، ۳/۰۹ و ۴/۸۷ m/s و توان مادون قرمز در سه سطح ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ W بررسی شد نقطه بهینه مقادیر متغیرهای پاسخ ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی مصرفی به ترتیب $3/13 \times 10^{-10}$ m²/s و ۱۸/۷۶ kWh به دست آمد [۱۵]. نتایج بررسی تحقیقات قبلی نشان داد که استفاده از روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی رزماری خشک شده تحت خشک‌کن همرفتی با پیش‌تیمار مایکروویو پالسی تاکنون توسط هیچ محقق گزارش نشده است.

از آنجا که مبحث انرژی به چالش اساسی در دنیای امروز تبدیل شده و میزان بازده در سامانه‌های انرژی دارای اهمیت بالایی می‌باشد، لذا لازم است تا خصوصیات ترمودینامیکی سامانه‌های مورد استفاده به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. بررسی منابع

خشک‌کردن یکی از متداول‌ترین اشکال فرآوری محصولات کشاورزی بوده و هدف از آن افزایش ماندگاری فرآورده نهایی است. امروزه اکثر کشورهای پیشرفته دنیا مطالعات گسترده‌ای در زمینه شناخت گیاهان دارویی مورد استفاده در کشور خود انجام داده‌اند [۱]. در کشور ایران به دلیل تنوع شرایط آب و هوایی، گیاهان دارویی مختلف به صورت طبیعی و به صورت مکانیزه کشت می‌شود که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، گیاه دارویی رزماری (*Rosmarinus officinalis*) است. این گیاه دارای خواص درمانی زیادی از جمله رفع خستگی، ضد تشنج، از بین برنده کرم‌های معده و روده، تقویت عمومی بدن، درمان اختلالات عصبی، درمان سرگیجه، درمان آسم و سیاه سرفه می‌باشد [۲]. از آنجایی که گیاهان به علت تنفس بالا (بعد از عملیات برداشت) خاصیت فساد پذیری زیادی دارند، لذا با استفاده از فناوری‌ها در صنایع تبدیلی می‌توان محصول های فاسد شونده را به فرآورده هایی با پایداری بالا تبدیل کرد. یکی از فرایندهای مهم تبدیلی به کار رفته برای محصولات کشاورزی (مواد غذایی، گیاهان دارویی و غلات) خشک‌کردن است. که متداول‌ترین آن، استفاده از جریان هوای گرم است [۳، ۴]. یکی از معیارهای مهم در مرحله خشک‌کردن گیاهان دارویی، محصولات کشاورزی و مواد غذایی، میزان انرژی مصرفی و بازده خشک‌کن‌ها طی این فرایند است [۵، ۶]. لذا مطالعه و اقدام به کاهش زمان فرایند و انرژی مصرفی مورد استفاده در فرایند خشک‌کردن امری ضروری به نظر می‌رسد [۷].

یکی از پیش‌تیمارهایی که می‌توان برای خشک‌کردن گیاهان دارویی استفاده کرد، استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو است. نتایج پژوهش‌های محققین نشان می‌دهد که استفاده از مایکروویو در فرایند خشک‌کردن گیاهان دارویی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۹]. انتقال سریع حرارت، کاهش زمان فرایند، کمترین میزان تخریب در نمونه‌ها و کنترل شرایط محصول در حال خشک‌شدن از مزیت‌های برجسته استفاده از مایکروویو می‌باشد [۸].

در تحقیقی بررسی اثرات پیش‌تیمار مایکروویو بر ضرایب مدل شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت [۹]. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش پارامترهای دما، سرعت جریان هوا و توان مایکروویو، مقادیر ضرایب مدل‌های شبیه‌سازی (آهنگ ثابت

کره، استفاده شد. باید توجه داشت که شرایط اعمال پیش‌تیما بر اساس میزان انرژی یکسان برای اعمال پیش‌تیما می‌باشد. با اعمال این سطوح توانی و با این مدت زمان، میزان انرژی مصرفی توسط میکروویو برای اعمال پیش‌تیما برای تمامی نمونه‌ها یکسان بود. ۱۰۰ g نمونه با محتوای رطوبت اولیه ۷۵٪ (بر پایه تر) برای خشک‌کردن در هر مرحله استفاده شد و فرایند خشک‌کردن تا رسیدن محتوای رطوبت نمونه به ۲۰٪ (بر پایه تر) ادامه یافت. کاهش وزن نمونه‌ها طی خشک‌کردن، توسط ترازو مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در طول آزمایش‌های خشک‌کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط 25 ± 2 °C و رطوبت نسبی هوا 35 ± 5 ٪ بود.

۳.۲. محاسبه مقدار انرژی مصرفی در خشک‌کن جریان

هوای گرم

انرژی حرارتی مصرفی توسط خشک‌کن جریان هوای گرم برای خشک‌کردن گیاه دارویی رزماری در دماهای مختلف و سرعت جریان هوای ثابت با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۵، ۱۶]. انرژی مکانیکی مصرفی توسط دمنده در خشک‌کن در طول فرایند خشک‌کردن از رابطه (۲) و انرژی مخصوص مورد نیاز به ازای خروج یک کیلوگرم رطوبت از محصول در حال خشک‌شدن با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد.

(۱) انرژی مصرفی در خشک‌کن جریان هوای گرم

$$E_{ter} = A \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T \cdot t$$

(۲) انرژی مکانیکی مصرفی توسط دمنده در خشک‌کن

$$E_{mec} = \Delta P \cdot W_{air} \cdot t$$

(۳) انرژی مصرفی ویژه

$$S.E.C = \frac{E \cdot U_{(total)}}{M_w} = \frac{E \cdot U_{(mic+mec+ter)}}{M_w}$$

۳.۲. محاسبه مقدار انرژی مصرفی در میکروویو

انرژی مصرفی در خشک‌کن میکروویو در طول عملیات پیش‌تیما با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد [۱۷].

(۴) انرژی مصرفی در میکروویو

$$E_{mic} = P \times t$$

نشان داد که خشک‌کن‌های جریان هوای گرم دارای بازده پایینی هستند، بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از روش‌هایی که بتواند بازده انرژی و ترمودینامیکی را بهبود بخشد، ضروری است. یکی از این روش‌ها استفاده از پیش‌تیما میکروویو است. بررسی پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با به‌کارگیری پیش‌تیما میکروویو در خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی و محصولات غذایی نشان داد که در هیچ یک از این پژوهش‌ها اثرات این پیش‌تیما بر خصوصیات ترمودینامیکی بررسی نشده است. لذا در این تحقیق، تاثیر دمای هوای گرم و پیش‌تیما میکروویو بر مقدار بازده انرژی و خواص ترمودینامیکی گیاه رزماری طی خشک‌کردن، به روش سطح پاسخ مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد

در این پژوهش از گیاه دارویی رزماری پرورش یافته در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استفاده گردید.

۲.۲. خشک‌کردن

نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت تازه تهیه گردید و پس از آماده شدن خشک‌کن‌ها و تنظیم آن‌ها در سطوح مختلف آزمایشی یک لایه از آن روی بستر خشک‌کن قرار داده شد. برای تعیین رطوبت گیاه دارویی رزماری طبق استاندارد (AOAC, 1980) ذکر شده، به‌طور تصادفی، ۵ نمونه ۵ گرمی از توده محصول به مدت ۲۴ h در آون با دمای ۷۰ °C قرار داده شد. رطوبت اولیه گیاه دارویی رزماری ۰/۷۵ بر پایه تر به دست آمد. به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت گیاه دارویی رزماری از استاندارد استفاده شد. آزمایش خشک‌کردن در این تحقیق با استفاده از یک خشک‌کن آزمایشگاهی هوای گرم، در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C، سرعت جریان هوای ثابت ۰/۴ و ۴ حالت پیش‌تیما (بدون پیش‌تیما، پیش‌تیما میکروویو با توان ۹۰ W به مدت ۵ min، با توان ۱۸۰ W به مدت ۲/۵ min و با توان ۳۶۰ W به مدت ۱/۵ min) در سه تکرار اقدام به خشک‌کردن گیاه دارویی رزماری به صورت لایه نازک انجام شد. برای انجام پیش‌تیما میکروویو از دستگاه سولاردام مدل MS93WCR، شرکت LG، ساخت کشور

۴.۲. بازده خشک کردن

بازده خشک شدن عبارت است از تقسیم مجموع انرژی لازم برای گرم کردن محصول در حال خشک شدن و انرژی لازم برای تبخیر رطوبت به کل انرژی مصرفی در طول فرایند خشک شدن که از رابطه (۵) به دست آمد [۱۸].

(۵) بازده خشک شدن

$$\text{Drying efficiency} = \frac{E_{\text{Heating+Evaporation}}}{E_{\text{total}}}$$

۵.۲. بازده انرژی

بازده انرژی از تقسیم انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول در حال خشک کردن به کل انرژی مصرفی در طول فرایند خشک شدن از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۸].

(۶) بازده انرژی

$$\text{Energy efficiency} = \frac{E_{\text{evaporation}}}{E_{\text{total}}}$$

۶.۲. بازده حرارتی

بازده حرارتی عبارت است از تقسیم میزان رطوبت تبخیر شده از محصول به میزان گرمای مصرفی که از رابطه (۷) محاسبه شد [۱۸].

(۷) بازده حرارتی

$$\text{Thermal efficiency} = \frac{M_{\text{evaporation}}}{H_{\text{total}}}$$

۷.۲. گرما (حرارت) مصرفی مخصوص

گرمای مصرفی مخصوص حاصل تقسیم کل گرمای مصرفی در طول فرایند خشک کردن به وزن کل رطوبت خارج شده از محصول است که رابطه (۸) محاسبه شده و عکس بازده حرارتی است [۱۸].

(۸) گرما (حرارت) مصرفی مخصوص

$$\text{Specific heat consumption} = \frac{H_{\text{total}}}{M_{\text{evaporation}}}$$

۸.۲. بازده همرفتی سامانه (ضریب خشک کردن)

بازده همرفتی سامانه (ضریب خشک کردن) برای خشک کردن رزماری با استفاده از رابطه (۹) به دست آمد [۱۸].

(۹) بازده همرفتی سامانه

$$\text{Convective efficiency} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{\text{amb}}}$$

۹.۲. انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول

انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول حین فرایند خشک کردن رزماری را می‌توان از رابطه (۱۰) محاسبه کرد [۱۸].

گرمای نهان تبخیر رزماری را می‌توان از رابطه (۱۱) به دست آورد [۱۶]. رابطه (۱۱) با شرط $273.16 \leq T(K) \leq 338.72$ و $338.72 \leq T(K) \leq 533.16$ برقرار است.

(۱۰) انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول

$$Q_w = h_{fg} \cdot M_{w, ev}$$

(۱۱) گرمای نهان تبخیر

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2386 \times 10^3 (T - 273.16)$$

۱۰.۲. انرژی لازم برای بالا بردن دمای محصول

انرژی لازم برای افزایش دمای محصول از دمای اولیه (دمای قبل از ورود محصول به داخل محفظه خشک کن) به دمای نهایی (بالاترین دمای محصول) و ضریب خشک کردن را می‌توان به ترتیب از روابط (۱۲) [۱۹] و (۱۳) [۲۰] محاسبه کرد.

(۱۲) انرژی لازم برای بالا بردن دمای محصول

$$Q_m = W_d C_m (T_{m2} - T_{m1})$$

$$C_m = 1465 + 3560 \left(\frac{M_p}{1 + M_p} \right)$$

$$M_p = \left(\frac{W_w - W_d}{W_d} \right)$$

(۱۳) ضریب خشک شدن

$$LM = \left(\frac{Q_w}{E_{\text{airPumping}}} \right)$$

۱۱.۲. تجزیه و تحلیل آماری و بهینه‌یابی فرایند

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از فن‌های آماری است که در بهینه‌یابی فرایندهایی به کار می‌رود که پاسخ مورد نظر به واسطه تعدادی از متغیرها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه روش سطح پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل متغیرها، قابل برآورد هستند. مهم‌ترین مسئله‌ی این تحقیق بررسی آثار اصلی و متقابل متغیرها است، از این رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد [۱۸]. در بررسی پارامترهای انرژی،

اثر متغیرهای مستقل شامل دمای خشک کردن و توان مایکروویو هریک در ۳ سطح ارزیابی شد. در ضمن، کلیه‌ی متغیرها به روش سطح پاسخ از طریق طرح داده‌های واقعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در روش سطح پاسخ، سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار دارد و هدف عبارت از بهینه کردن پاسخ مزبور است. برای به دست آوردن مقدار بهینه (Y_i) ، از حل رابطه رگرسیون (۱۳) استفاده شد [۲۱].

اثر متغیرهای مستقل شامل دمای خشک کردن و توان مایکروویو هریک در ۳ سطح ارزیابی شد. در ضمن، کلیه‌ی متغیرها به روش سطح پاسخ از طریق طرح داده‌های واقعی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در روش سطح پاسخ، سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار دارد و هدف عبارت از بهینه کردن پاسخ مزبور است. برای به دست آوردن مقدار بهینه (Y_i) ، از حل رابطه رگرسیون (۱۳) استفاده شد [۲۱].

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \varepsilon \quad (14)$$

که در آن، β_0 ، β_{ij} و β_{ii} ضرایب ثابت رگرسیون، x_j و x_i متغیرهای مستقل در فرایند و ε خطای تصادفی است. مدل‌های ریاضی برای هر پاسخ با تجزیه رگرسیون خطی چندگانه، ارزیابی شدند. معنادار بودن آماری عبارت‌ها در معادله رگرسیونی در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) بررسی گردید. جهت برازش داده‌ها و رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۷ استفاده شد [۲۲]. در انتها، نقطه بهینه فرایند با توجه به شرایط مرزی، توابع هدف (بالاترین راندمان انرژی) به دست آمد.

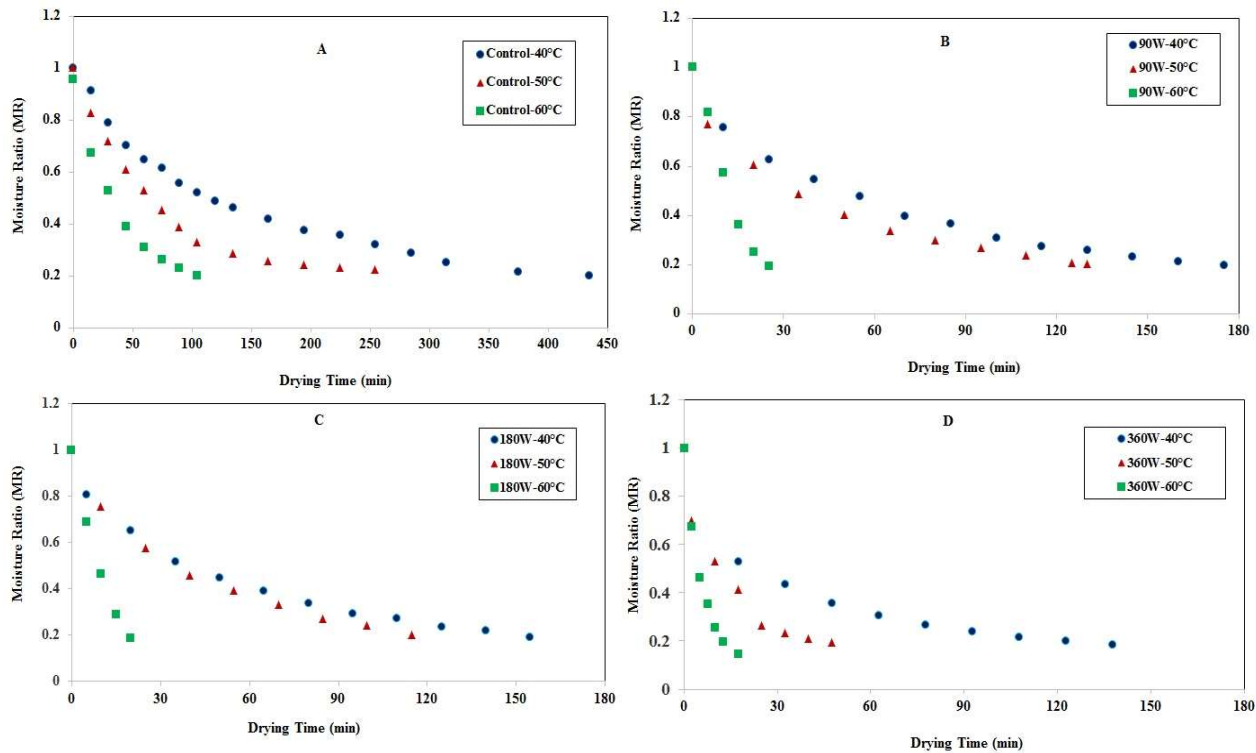
۲. نتایج و بحث

برای این که مدل توانایی خوبی برای برازش اطلاعات داشته باشد لازم است که ضریب تبیین پیش‌بینی شده و ضریب تبیین اصلاح‌شده دارای بالاترین مقدار باشد. ضریب تبیین (R^2) به عنوان نسبت تغییرات توصیف شده توسط مدل به تغییرات کل بیان می‌شود که معیاری از درجه تناسب برازش است. بنابراین، هرچه مقدار R^2 به یک نزدیک‌تر شود (حداقل ۰/۸ باشد)، قدرت مدل برازش یافته در توصیف تغییرات پاسخ به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل بیشتر خواهد بود [۲۳]. با توجه معنی‌دار نشدن شاخص عدم برازش در آنالیز واریانس و مقدار ضریب تغییرات برای مدل درجه دوم، می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به رابطه و ضرایب خطا در جدول (۱)، این مدل‌ها بهترین مدل برای تخمین پارامترهای انرژی می‌باشد. همان‌طور که در مدل‌های ارائه شده در جدول مشاهده می‌شود، علامت مثبت و منفی ضرایب متغیرهای مستقل، به ترتیب بیانگر اثر فزاینده و کاهنده متغیر نام برده بر مقدار پارامترهای انرژی است [۲۴]. مطابق جدول (۱)، تأثیر متغیرهای مستقل A (دمای خشک کردن)، B

۱.۳. بازده انرژی و خشک کردن

در شکل (۲) اثر همزمان توان مایکروویو و دمای هوا بر مقدار بازده انرژی و خشک کردن نشان داده شده است. مطابق این اشکال، با افزایش توان مایکروویو از ۹۰ تا ۳۶۰ W، مقدار بازده انرژی و خشک کردن به ترتیب از ۵/۹ تا ۱۵/۱۸٪ و ۶/۲ تا ۱۶/۸٪ افزایش یافت. بازده انرژی و خشک شدن ابتدا روند نزولی داشته (از دمای ۴۰ به ۵۰°C) و سپس روند صعودی (از دمای ۵۰ به ۶۰°C) داشته است. دلیل این امر آن است که دمای خشک کردن ۴۰°C نسبت به دو دمای دیگر به دمای محیط نزدیک بوده و میزان انرژی کمی صرف فرایند خشک کردن می‌گردد. از طرف دیگر در دمای ۶۰°C نیز میزان دو پارامتر بازده انرژی و خشک کردن بالا است که دلیل این امر می‌تواند سرعت بالای خشک شدن نمونه‌ها باشد. سرعت بالای خشک شدن نمونه‌ها به دلیل اختلاف گرادیان حرارتی بین محصول و دمای خشک کردن اتفاق می‌افتد و به دنبال آن زمان خشک شدن و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. بیشترین و کمترین مقدار بازده انرژی (به ترتیب ۱۵/۱۸ و ۵/۹٪) و بازده خشک کردن (به ترتیب ۱۶/۷۷ و ۶/۱۷٪) به ترتیب در تیمار ۳۶۰ W - ۶۰°C و ۹۰ W - ۵۰°C مشاهده شد. این نتایج با گزارش‌های منتشر شده توسط دیگر محققان سازگار است [۱۹]. آن‌ها روش‌های مختلف خشک کردن را بر بازده انرژی و خشک کردن گیاه بابونه را مورد بررسی

قرار داده‌اند. آن‌ها بیان کرده‌اند با افزایش دما، بازده انرژی روند افزایشی دارد. همچنین در خشک کردن به روش مایکروویو، بازده انرژی با افزایش توان، در ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی از خود نشان داد.



شکل (۱) روند تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان خشک شدن تحت تیمارهای مختلف آزمایشی

Fig. 1. The trend of changes in moisture ratio versus drying time under different experimental pretreatments

جدول (۱) معادله رگرسیونی متغیرهای پاسخ برای تاثیر دمای خشک کردن و توان مایکروویو بر پارامترهای انرژی

Table 1 Regression equation of response variable for drying temperature and microwave power effect on energy parameters

Response variable متغیرهای پاسخ	Equation معادله	R ² value	Adj R ²	Pred R ²	C.V. (%)
Energy efficiency (%) بازده انرژی	$110.91281 - 4.38013 \times A + 0.017063 \times B + 0.044928 \times A^2$	0.95	0.92	0.83	8.58
Drying efficiency (%) بازده خشک کردن	$119.03061 - 4.71773 \times A + 0.020729 \times B + 0.048374 \times A^2$	0.95	0.93	0.84	8.66
Thermal efficiency (%) بازده حرارتی	$465.15529 - 18.39328 \times A + 0.0749 \times B + 0.188640 \times A^2$	0.95	0.92	0.83	8.60
Drying coefficient ضریب خشک کردن	$1.626 - 0.074457 \times A - 7.12 \times 10^{-4} \times B + 2.45 \times A \times B + 9.73 \times 10^{-4} \times A^2$	0.99	0.98	0.93	11.97
Convective efficiency (%) بازده همرفتی	$221.09197 - 9.05103 \times A + 0.032896 \times B + 0.095154 \times A^2$	0.99	0.98	0.95	5.84
Specific heat consumption (MJ/kg) گرمای مصرفی ویژه	$-237.68247 + 11.38907 \times A - 0.043222 \times B - 0.116269 \times A^2$	0.92	0.89	0.85	14.66
Specific power consumption (MJ/kg) توان مصرفی ویژه	$-178.26185 + 8.54180 \times A - 0.032417 \times B - 0.087202 \times A^2$	0.92	0.89	0.85	14.66
Specific energy consumption (MJ/kg) انرژی مصرفی ویژه	$-233.53224 + 11.43103 \times A - 0.045967 \times B - 0.117860 \times A^2$	0.93	0.88	0.83	14.63

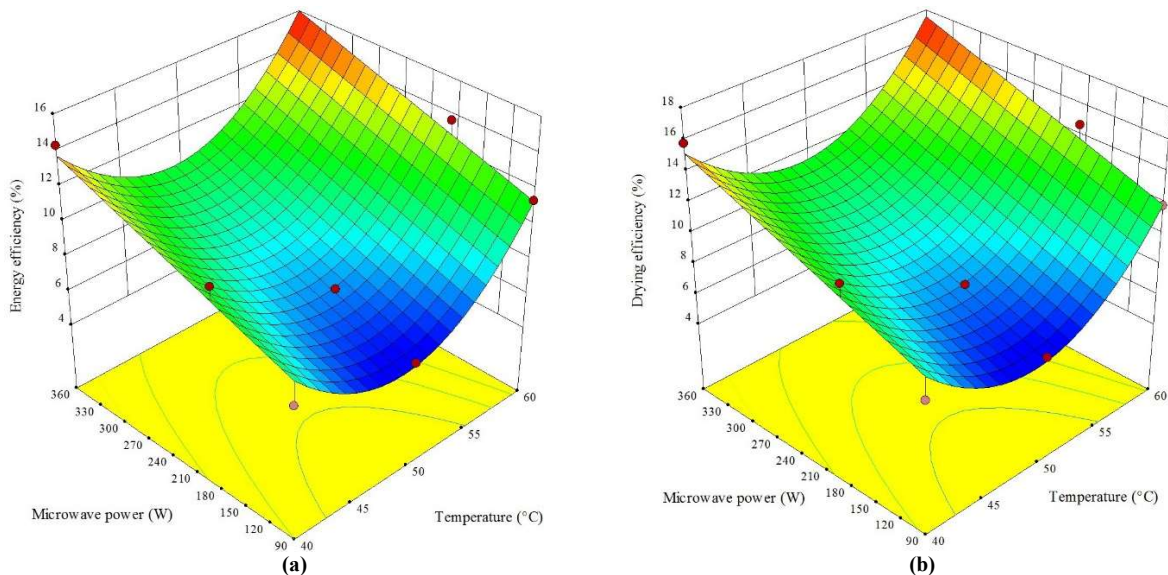
خواهد داشت. در حالی که با افزایش دمای خشک‌کردن از ۵۰ به ۶۰ °C، اختلاف دمای خشک‌کردن با دمای محیط افزایش یافته و به نوبه‌ی آن، زمان خشک‌شدن محصول نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه شاهد کاهش میزان گرما، توان و انرژی مصرفی بوده‌ایم. محققان دیگر هم نتایج مشابهی را گزارش داده‌اند [۵، ۶، ۲۶-۲۸]. آن‌ها ارزیابی روش‌های مختلف خشک‌کردن در مقدار انرژی مصرفی مورد بررسی قرار داده‌اند و بیان کرده‌اند که با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو و افزایش توان آن، زمان خشک‌کردن و به نوبه آن انرژی مصرفی کاهش خواهد یافت.

۳.۳. ضریب خشک‌کردن

اثر متقابل توان مایکروویو و دمای هوای گرم بر مقدار ضریب خشک‌کردن در شکل (۴) نشان داده شده است. با افزایش توان (از ۹۰ تا ۳۶۰ W) و دمای هوای گرم (از ۴۰ تا ۶۰ °C) مقدار ضریب خشک‌کردن (از ۰/۷۹ تا ۷/۷۷) طی معادله درجه دوم افزایش یافت. متغیرهای مستقل دمای هوای گرم (A)، توان مایکروویو (B)، و اثرات متقابل آن‌ها (A^2 ، $A \times B$) بر مقادیر پاسخ (ضریب خشک‌کردن) اثر معنی‌داری ($p < 0.05$) داشت (جدول (۱)). مطابق شکل (۴)، با ثابت نگه داشتن توان مایکروویو و افزایش دمای هوا، مقدار ضریب خشک‌کردن افزایش یافت. به‌علاوه، با ثابت نگه داشتن دمای هوای گرم و افزایش توان مایکروویو، نیز مقدار ضریب خشک‌کردن روند افزایشی داشت.

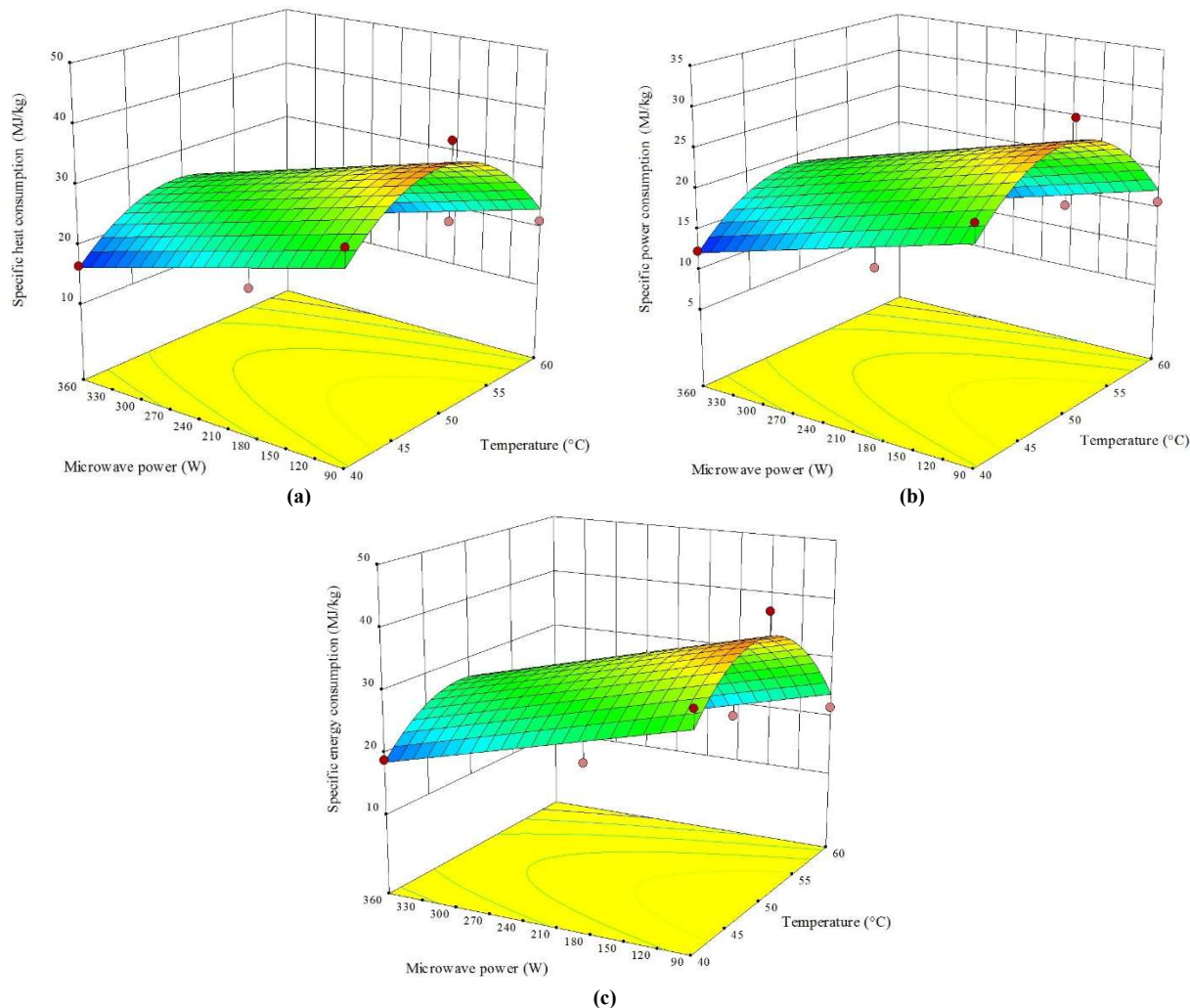
۲.۳. گرمای مخصوص، توان مخصوص و انرژی مصرفی

مطابق شکل (۳) مقادیر گرمای مخصوص، توان مخصوص و انرژی مخصوص مصرفی به‌ترتیب بین ۱۵/۵ تا ۴۰/۸ MJ/kg، ۱۱/۷ تا ۳۰/۶ MJ/kg و ۱۵/۹ تا ۴۳/۰۲ MJ/kg تغییر کرد. جدول (۱) معادلات به دست آمده توسط مدل برازش شده با داده‌های آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثرات دمای هوای (A) توان مایکروویو (B) و متغیر A^2 بر مقادیر گرمای مخصوص، توان مخصوص و انرژی مخصوص مصرفی از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.01$). همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده، روند تغییرات میزان گرما، توان و انرژی مخصوص مصرفی ابتدا صعودی (از ۴۰ به ۵۰ °C) و سپس روند آن به صورت نزولی (از ۵۰ به ۶۰ °C) بود. کمترین و بیشترین میزان توان مخصوص، انرژی مخصوص مصرفی و گرمای مخصوص به‌ترتیب مربوط به شرایط ۶۰ °C - ۳۶۰ W - ۵۰ °C و ۹۰ W - ۵۰ °C بود. با توجه به آزمایش‌ها، بالاترین میزان این سه پارامتر انتظار می‌رفت که در دمای ۴۰ °C باشد در صورتی که کمترین مقدار آن در این دما اتفاق افتاد. زیرا با نزدیک بودن دمای خشک‌کردن به دمای محیط، میزان گرما، توان و انرژی مصرفی در سطح پایین‌تری قرار خواهد گرفت. اما با افزایش دمای خشک‌کردن از ۴۰ به ۵۰ °C در نتیجه با ایجاد اختلاف دمای خشک‌کردن و دمای محیط، زمان خشک‌کردن افزایش یافته و بنابراین میزان این سه پارامتر روند صعودی



شکل (۲) سطوح پاسخ و منحنی تراز برای (a) بازده انرژی و (b) بازده خشک‌کردن: اثر متقابل بین توان مایکروویو و درجه حرارت

Fig. 2. Response surface and contour plots for a) energy efficiency and b) drying efficiency: interaction effect between microwave power (W) and air temperature (°C)



شکل (۳) سطوح پاسخ و منحنی تراز برای (a) گرمای مخصوص، (b) توان مخصوص و (c) انرژی مخصوص مصرفی: اثر متقابل بین توان میکروویو و درجه حرارت

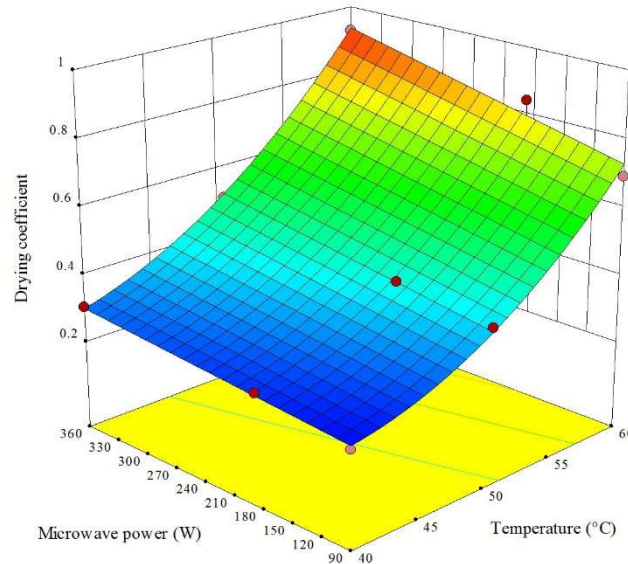
Fig. 3. Response surface and contour plots for a) specific heat consumption, b) specific power consumption and c) specific energy consumption: interaction effect between microwave power (W) and air temperature (°C)

شکل (۵) نشان داده شده است. پایین‌ترین مقدار بازده حرارتی و بازده همرفتی به ترتیب به میزان $۲۴/۵۳$ ، $۹/۵۷$ ٪ در دمای ۵۰°C و توان میکروویو ۹۰W و بالاترین مقدار بازده حرارتی و بازده همرفتی به ترتیب به میزان $۶۴/۳۲$ ، $۳۳/۳۳$ ٪ در دمای ۶۰°C و توان میکروویو ۳۶۰W اتفاق افتاد. این دو پارامتر از دمای ۵۰°C به ۶۰°C و از دمای ۴۰°C به ۵۰°C به ترتیب روند صعودی و نزولی داشت. زیرا در دمای ۴۰°C ، اختلاف کمی بین دمای محیط و دمای خشک کردن وجود دارد و در نتیجه تلفات حرارتی به محیط، کمتر خواهد شد و انرژی مصرفی توسط گرمکن‌ها طی خشک کردن در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد. بنابراین میزان

در این خشک کن، دمای هوای گرم به عنوان موثرترین عامل بر مقدار ضریب خشک کردن رزماری بود. این نتایج با گزارش‌های منتشر شده توسط دیگر محققان سازگار است [۲۹-۳۳]. آن‌ها با بررسی خشک‌کن‌های مختلف بر محصول‌های کشاورزی بیان کرده‌اند که با افزایش دمای هوای ورودی، مقدار ضریب خشک کردن روند افزایشی داشت.

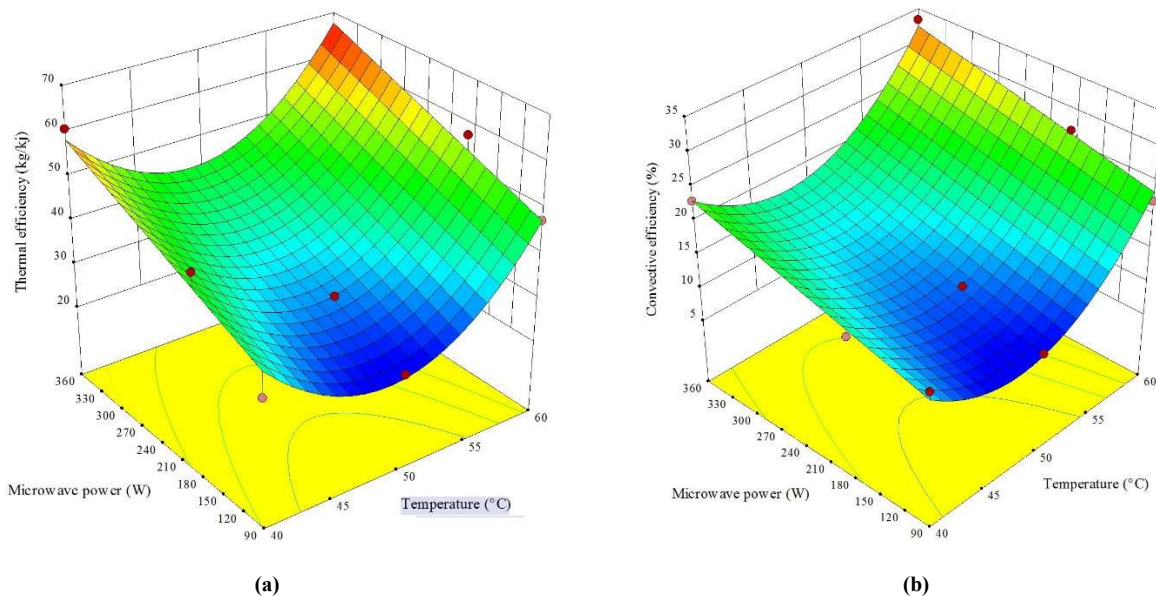
۴.۳. بازده حرارتی و بازده همرفتی سامانه

تغییرات بازده حرارتی و بازده همرفتی سامانه تحت دما و توان - های مختلف میکروویو برای خشک شدن گیاه دارویی رزماری در



شکل (۴) سطوح پاسخ و منحنی تراز برای ضریب خشک‌کردن: اثر متقابل بین توان مایکروویو و درجه حرارت

Fig. 4. Response surface and contour plots for drying coefficient: interaction effect between microwave power (W) and air temperature (°C)



شکل (۵) سطوح پاسخ و منحنی تراز برای بازده حرارتی و همرفتی: اثر متقابل بین توان مایکروویو و درجه حرارت

Fig. 5. Response surface and contour plots for thermal and coefficient efficiency: interaction effect between microwave power (W) and air temperature (°C)

کاهش زمان خشک‌شدن گیاه رزماری در این دما، میزان بازده همرفتی روند افزایشی داشت. همچنین نتایج مشابهی را نیز با اعمال پیش‌ تیمار نیز می‌توان مشاهده کرد. بالا بودن میزان این دو پارامتر نشان از کارایی سامانه خشک‌کن می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که اعمال پیش تیمار مایکروویو با توان 360 W سبب افزایش

بازده همرفتی، افزایش خواهد یافت. اما افزایش دما به 50°C ، موجب افزایش اختلاف دمایی سامانه با محیط شده، و زمان خشک‌کردن (شکل ۱) زیاد می‌گردد که این امر موجب اتلاف حرارتی زیاد می‌گردد و بازده همرفتی کاهش خواهد یافت. در حالی که در دمای 60°C ، افزایش اختلاف دمایی ایجاد شده بین محیط و دمای خشک‌کردن موجب اتلاف بالا می‌گردد اما به علت

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با ارزیابی خشک‌کردن گیاه دارویی رزماری تحت پیش‌تیمارهای مایکروویو با کمک روش سطح پاسخ، بیشترین و کمترین مقدار بازده انرژی (به ترتیب ۱۵/۱۸ و ۰/۵۱) و خشک‌کردن (به ترتیب ۱۶/۷۷ و ۰/۶۱۷) به ترتیب در تیمار $W - 360^{\circ}C$ و $W - 90^{\circ}C$ به دست آمد. کمترین و بیشترین میزان گرمای مخصوص (به ترتیب ۱۵/۵ و ۴۰/۸ MJ/kg)، توان مخصوص (۱۵/۹ و ۳۰/۶ MJ/kg) و انرژی مخصوص مصرفی (۱۵/۹ و ۴۳/۰۲ MJ/kg) به ترتیب در تیمار $W - 360^{\circ}C$ تا $W - 90^{\circ}C$ بوده است. با افزایش توان (از ۹۰ تا $W - 360$) و دمای هوای گرم (از ۴۰ تا $60^{\circ}C$) مقدار ضریب خشک‌کردن (از ۰/۷۹ تا ۷/۷۷) طی معادله درجه دوم افزایش یافت. پایین‌ترین مقدار بازده حرارتی (۲۴/۵۳ KJ/Kg) و بازده همرفتی (۰/۹۱۵۷) در تیمار $W - 90^{\circ}C$ و بالاترین مقدار بازده حرارتی (۶۴/۳۲ KJ/Kg) و بازده همرفتی (۰/۳۳۳۳) در تیمار $W - 360^{\circ}C$ به دست آمد. تاثیر دمای هوای گرم و توان مایکروویو بر مقدار بازده انرژی و خواص ترمودینامیکی در خشک‌شدن گیاه رزماری، به کمک روش سطح پاسخ طی معادله درجه دوم مدل‌سازی شد. شرایط بهینه برای بازده انرژی (۰/۱۵/۹۹)، بازده خشک‌کردن (۰/۱۷/۵۷)، بازده حرارتی (۶۷/۶۳ KJ/Kg)، ضریب خشک‌کردن (۸/۰۳)، بازده همرفتی (۳۲/۴۳)، گرمای مخصوص مصرفی (۱۱/۵۳ MJ/Kg)، توان مخصوص مصرفی (۸/۶۵ MJ/Kg) و انرژی مخصوص مصرفی (۱۱/۴۸ MJ/kg) طی دمای هوای گرم $60^{\circ}C$ و توان مایکروویو $W - 360$ با مطلوبیت ۹۹/۵٪ گزارش شد.

کارایی سامانه می‌گردد. نتایج مشابه توسط دیگر محققان گزارش شد [۱۹، ۲۹، ۳۴]. این محققان روش‌های مختلف خشک‌کردن را بر خواص خشک‌کردن محصول‌های کشاورزی مورد بررسی قرار داده‌اند و گزارش داده‌اند که با افزایش زمان خشک‌کردن، مقدار بازده همرفتی، کاهش یافت.

۵.۳. بهینه‌سازی

شرایط بهینه فرایند خشک‌کردن به روش همرفتی با پیش‌تیمار مایکروویو برای دستیابی به بیشینه بازده انرژی، خشک‌کردن، حرارتی، همرفتی و ضریب خشک‌کردن و کمترین گرمای مخصوص، توان مخصوص و انرژی مخصوص مصرفی تعیین شد. در این مطالعه مدل‌های چندجمله‌ای درجه دوم به دست آمده برای هر پاسخ مورد استفاده قرار گرفتند تا شرایط بهینه خاص تعیین شود. این مدل‌های رگرسیونی تنها در حوزه انتخاب شده اعتبار دارند. بنابراین، ناحیه عملیاتی با در نظر گرفتن تعدادی از محدودیت‌های اقتصادی، صنعتی و کیفیتی محصول تعیین شد [۲۱]. در این تحقیق، دمای هوای گرم و توان مایکروویو به ترتیب در محدوده $40^{\circ}C$ تا $60^{\circ}C$ و ۹۰ تا $W - 360$ انتخاب شدند. با به کارگیری تابع مطلوبیت، دمای هوای گرم $60^{\circ}C$ و توان مایکروویو $W - 360$ به عنوان شرایط بهینه برای بازده انرژی (۰/۱۵/۹۹)، بازده خشک‌کردن (۰/۱۷/۵۷)، بازده حرارتی (۶۷/۶۳ KJ/Kg)، ضریب خشک‌کردن (۸/۰۳)، بازده همرفتی (۳۲/۴۳)، گرمای مخصوص مصرفی (۱۱/۵۳ MJ/Kg)، توان مخصوص مصرفی (۸/۶۵ MJ/Kg) و انرژی مخصوص مصرفی (۱۱/۴۸ MJ/kg) با مطلوبیت ۹۹/۵٪ به دست آمد.

منابع

analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Res. Int.*, 48, 410-427.

[4] Rawson, A., Tiwari, B., Tuohy, M., O'Donnell, C., and Brunton, N. (2011). Effect of ultrasound and blanching pretreatments on polyacetylene and carotenoid content of hot air and freeze dried carrot discs. *Ultrasonics Sonochemistry.*, 18, 1172-1179.

[5] Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., and Amirnejat, H. (2011a). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of

[1] AhmadiChenarbon, H., Minaei, S., Bassiri, A., Almassi, M., and Arabhosseini, A. (2011). Effective parameters on drying of *Hypericum perforatum* L. leaves. *J. Med. Plan. Res.*, 5, 4530-4536.

[2] Omidbeige, R. (2005). *Production and processing of medicinal plants*. Astan Goods razavi., mashhad., iran.

[In Persian]

[3] Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D., and Youssef, M. (2012). Applications of ultrasound in

- 111, 229-241.
- [17] Ozkan, I.A., Akbudak, B., and Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *J. Food Eng.*, 78, 577-583.
- [18] Vieira, M., Estrella, L., and Rocha, S. (2005). *Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper in convective drying*. In: Proceedings of the 3rd Inter-American Drying Conference, Montreal, Canada.
- [19] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., and Khoshtaghaza, M.H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Eng. Con. & Man.*, 87, 711-725.
- [20] Vieira, M., Estrella, L., and Rocha, S. (2007). Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp. *Dry. Tech.*, 25, 1639-1648.
- [21] Mansourpoor, M. and Shariati, A. (2012). Optimization of biodiesel production from sunflower oil using response surface methodology. *J. Chem. Eng. Pro. Tech.*, 3, 151-163.
- [22] Kargozari, M., Moini, S., and EmamJomeh, Z. (2010). Prediction of some physical properties of osmodehydrated carrot cubes using response surface methodology. *J. Food Pro. & Preservation.*, 34, 1041-1063.
- [23] Bekers, M., Grube, M., Upite, D., Kaminska, E., Linde, R., Scherbaka, R., and Danilevich, A. (2007). Carbohydrates in Jerusalem artichoke powder suspension. *Nut. & Food Sci.*, 37, 42-49.
- [24] Krishna, D., Krishna, K.S., and Sree, R.P. (2013). Response surface modeling and optimization of chromium (vi) removal from aqueous solution using borasus flabellifer coir powder. *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, 11, 213-226.
- [25] Motevali, A., S. Minaei., M. H, Khoshtaghaza., M. H. Azizi. (2013). Effect of microwave pretreatment on drying time of pomegranate arils and Simulation model coefficients. *Quar. J. Sci. & Food Ind.*, 38, 113-126.
- [26] Motevali, A., Abbaszadeh, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., and Ghobadian, B. (2012). Effective Moisture Diffusivity, Activation Energy and Energy Consumption in Thin-layer Drying of Jujube (*Zizyphus jujube* Mill). *J. Agr. Sci. & Tech.*, 14, 523-532.
- [27] Sami, S., Etesami, N., and Rahimi, A. (2011). Energy and exergy analysis of an indirect solar cabinet dryer based on mathematical modeling results. *Energy.*, 36, 2847-2855.
- [28] Catton, W., Carrington, G., and Sun, Z. (2011). Exergy analysis of an isothermal heat pump dryer. *Energy.*, 36, 4616-4624.
- [29] Feng, H., Tang, J., Cavalieri, R., and Plumb, O. (2001). Heat and mass transport in microwave drying of different methods for drying mushroom slices. *Energy.*, 36, 6433-6441.
- [6] Motevali, A., Minaei, S., and Khoshtaghaza, M.H. (2011b). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Con. & Man.*, 52, 1192-1199.
- [7] Chua, K., Mujumdar, A., A Hawlader, M., Chou, S., and Ho, J.(2000). Effect of continuous and stepwise change in drying temperature on drying characteristics and product quality. In: Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference. *Korean Society for Agricultural Machinery*.
- [8] Wang, J., Xiong, Y.-S., and Yu, Y. (2004). Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *Euro. Food Res. & Tech.*, 219, 500-506.
- [9] Motevali, A., S. Minaei., M. H, Khoshtaghaza., M. H. Azizi. (2013). Effect of microwave pretreatment on drying time of pomegranate arils and Simulation model coefficients. *Quar. J. Sci. & Food Ind.*, 38, 113-126.
- [10] Akbarian Mymand, M.J., Faraji Kafshgari, S., Mahmodi, E., Vatankhah, M. (2014). The Effect of using microwave pretreatment in drying roots nutmeg on antimicrobial properties against pathogenic bacteria and spoilage molds. *Iran. J. Med. Micro.*, 9, 47-55. [In Persian]
- [11] Chemat, S., Ait-Amar, H., Lagha, A., and Esveld, D. (2005). Microwave-assisted extraction kinetics of terpenes from caraway seeds. *Chem. Eng. & Pro: Pro. Intensification.*, 44, 1320-1326.
- [12] Couto, R.O., Conceição, E.C., Chaul, L.T., Oliveira, E.M.S., Martins, F.S., Bara, M.T.F., Rezende, K.R., Alves, S.F., and Paula, J.R. (2012). Spray-dried rosemary extracts: Physicochemical and antioxidant properties. *Food Chem.*, 131, 99-105.
- [13] Calín-Sánchez, Á., Szumny, A., Figiel, A., Jałoszyński, K., Adamski, M., and Carbonell-Barrachina, Á.A. (2011). Effects of vacuum level and microwave power on rosemary volatile composition during vacuum-microwave drying. *J. Food Eng.*, 103, 219-227.
- [14] Szumny, A., Figiel, A., Gutiérrez-Ortiz, A., and Carbonell-Barrachina, Á.A. (2010). Composition of rosemary essential oil (*Rosmarinus officinalis*) as affected by drying method. *J. Food Eng.*, 97, 253-260.
- [15] Ahmadi Ghavidelan, M., Amiri Chayjan, R. (2017). Optimization of hazelnut kernel drying in an infrared dryer with microwave pretreatment using response surface methodology. *J. Food Sci. & Tech.*, 64, 102-111.
- [16] Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., and Madadlou, A. (2012). Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. *Bio. Eng.*,

porous materials in a spouted bed. *AIChE J.*, 47, 1499-1512.

[30] Mousa, N., and Farid, M. (2002). Microwave vacuum drying of banana slices. *Dry. Tech.*, 20, 2055-2066.

[31] McMinn, W. (2006). Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *J. Food Eng.*, 72, 113-123.

[32] Soysal, Y., Öztekin, S., and Eren, Ö. (2006). Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Bio. Eng.*, 93, 403-413.

[33] Vongpradubchai, S., and Rattanadecho, P. (2009). The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. *Chem. Eng. & Pro: Pro. Intensification.*, 48, 997-1003.

[34] Motevali, A., Hashemi, S.J., and Kiani, R. (2017). Investigation of Thermodynamic Parameters and Essential Oil Content in Drying of Rosemary by Applying a Microwave Pulsed Pretreatment. *ku-energy.*, 7, 42-51.

*Research Article***Modeling and Optimization of Energy Parameters in *Rosmarinus officinalis* Drying with Microwave Pretreatment Using Response Surface Methodology**

Vali Rasooli Sharabiani^{1*}, Ebrahim Taghi nejad², Ramzan Hadipour Rokni³

- 1. Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.**
- 2. Associate Professor, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.**
- 3. Ph.D Student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resource University, sari, Iran.**

Abstract

Today, the use of pretreatment operations has been considered to reduce the time and energy with the aim of reducing the cost of agricultural products drying, such as medicinal plants. In this research, the modeling and optimization of energy parameters in the *Rosmarinus officinalis* drying with microwave pretreatment was evaluated using response surface methodology in three treatments (90 W for 5 min, 180 W for 2.5 min and 360 W for 1.5 min) and control (without pretreatment) in a convection dryer at temperatures of 40, 50 and 60 °C and the constant air flow velocity of 0.4 m/s. The results showed that with increasing power (from 90 to 360 W) and temperature (from 40 to 60 °C), the amount of drying coefficient increased quadratically. The value of energy efficiency, drying efficiency, thermal efficiency and convective efficiency increased by increasing of power and temperature from 90 to 180 W and 40 to 50 °C, respectively, but these amounts decreased by increasing of power and temperature from 180 to 360 W and 50 to 60 °C, respectively. The increasing of the power (from 90 to 360 W) and temperature (from 40 to 50 °C) increased the amount of specific heat, specific power and specific energy consumption, while with increasing of temperatures from 50 to 60 °C, these values were reduced during quadratic equation. Based on modeling using RSM, optimum conditions for obtaining of the best energy parameters were determined to be microwave power of 360 W and drying temperature of 60 °C with desirability 99.5%.

Keywords: Energy optimization, Drying, Specific energy consumption, Thermal efficiency, *Rosmarinus officinalis*.

* Corresponding author: vrasooli@uma.ac.ir