

مقاله پژوهشی

تعیین شرایط عملکرد بهینه در فرایند خشک کردن گیاه رزماری با استفاده از یک سامانه خشک‌کن تسمه نقاله‌ای ترکیبی مجهز به لامپ‌های مادون قرمز با منبع فوتولتاییک

حماد ذرعی فروش^{۱*}، عادل بخشی‌پور^۲ و ایرج باقری^۳

چکیده

در پژوهش حاضر از یک سامانه خشک‌کن تسمه نقاله‌ای پیوسته ترکیبی شامل آب‌گرمکن خورشیدی و لامپ‌های مادون قرمز تأمین شونده با انرژی خورشیدی برای خشک کردن برگ‌های رزماری استفاده شد و مشخصات عملکرد آن از نظر زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل، نسبت انرژی خورشیدی و بازده انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر آزمایش مقادیر ۳۰۰ گرمی از برگ‌های تازه برداشت شده رزماری در دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس و مقادیر مختلف سرعت جریان هوای ورودی (۷، ۸ و ۹ متر بر ثانیه) و توان لامپ مادون قرمز (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ وات) تحت فرایند خشک شدن قرار گرفتند. نقطه بهینه برای شرایط کاری سامانه خشک‌کن با استفاده از روش سطح پاسخ با انتخاب مقادیر مناسب برای سرعت هوای ورودی و توان مادون قرمز بر اساس این معیارها تعیین شد: به حداقل رساندن زمان خشک‌شدن، به حداقل رساندن انرژی مصرفی کل، به حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداکثر رساندن نسبت انرژی خورشیدی. بر این اساس، نقطه بهینه انتخابی شامل توان مادون قرمز ۳۰۰ وات و سرعت هوای ۸/۸۵ متر بر ثانیه بود. تحت شرایط تعریف شده، مشخصات عملکردی سامانه خشک‌کن شامل زمان خشک کردن، انرژی مصرفی کل، بازده انرژی و نسبت خورشیدی به ترتیب برابر با ۱۴۹/۱۳ دقیقه، ۳۸۶۸/۹۱ kJ، ۵۲/۳۷ درصد و ۰/۵۷ به دست آمد. با توجه به یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری سامانه‌های خشک‌کن توسعه یافته می‌تواند تا حد قابل توجهی نیاز به منابع سوخت فسیلی را کاهش داده و منجر به عملکرد قابل قبول در فرایند خشک کردن گیاهان دارویی شود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ، خشک‌کن، انرژی خورشیدی، بازده انرژی.

ارجاع: ذرعی فروش ح. بخشی‌پور ع. و باقری ا. ۱۴۰۲. تعیین شرایط عملکرد بهینه در فرایند خشک کردن گیاه رزماری با استفاده از یک سامانه خشک‌کن تسمه نقاله‌ای ترکیبی مجهز به لامپ‌های مادون قرمز با منبع فوتولتاییک. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۷: ۶۳-۷۵.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14076.618>

۱- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۳- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

* نویسنده مسئول: hemad.zareiforush@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

مقدمه

گیاه رزماری با نام علمی (*Rosmarinus officinalis*) گیاهی دارویی و معطر از خانواده Labiatae است که به طور عمده در کشورهای مدیترانه‌ای مانند اسپانیا، مراکش، تونس، فرانسه و ایتالیا پرورش داده می‌شود (Flamini et al., 2002). برگ‌های آن حاوی اسانسی است که موجب بهبود عملکرد دستگاه گوارش می‌شود. گیاهان معطر و دارویی از جمله رزماری می‌توانند به شکل‌های مختلف تازه و خشک شده ارائه شوند. برگ‌های خشک شده باعث بهبود شرایط نگهداری و حمل و نقل در مقایسه با گیاهان تازه می‌شود. به همین دلیل، محبوب‌ترین روش برای حفظ این محصول به صورت برگ‌های خشک شده است (Haloui et al., 2000). خشک کردن زیر نور آفتاب و در هوای آزاد از رایج‌ترین روشها برای حفظ گیاهان دارویی است. با این حال، این نوع روش خشک کردن به شرایط آب و هوایی بستگی دارد. همچنین در چنین رویکردی ممکن است همگن بودن و کیفیت محصول نهایی تحت تأثیر قرار گیرد و محصول در معرض پندگان، جوندگان و حشرات آسیب ببیند. علاوه بر این، به دلیل آلودگی هوا محصولاتی که با استفاده از این روش خشک می‌شوند، مستعد آلودگی میکروبی و سایر آلودگی‌ها هستند (Yuan et al., 2015). با توجه به این موارد، استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی (خشک‌کن‌های کمک خورشیدی یا همرفت) از قابلیت‌های کاربردی بیشتری برخوردار خواهد بود.

خشک کردن میوه‌ها، سبزیجات و گیاهان دارویی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی اثرات محیطی مخرب به مراتب کمتری در مقایسه با به کارگیری منابع فسیلی دارد. پژوهش‌های گذشته نشان داده است که این روش خشک کردن مصرف انرژی فسیلی را به طرز قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد، فعالیت آبی و میکروبیولوژیکی مواد غذایی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و تغییرات فیزیکی و شیمیایی را در طول انبارداری به حداقل می‌رساند (Gulcimen et al., 2016; Nabnean et al., 2016). فرایند خشک کردن گیاهان دارویی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله دمای هوا و سرعت جریان هوای ورودی قرار دارد. همچنین، بسته به شرایط و نوع فرایند خشک کردن، عامل‌های مختلفی برای توصیف عملکرد سامانه‌های خشک‌کن قابل

تعریف هستند که از مهمترین این عامل‌ها می‌توان به زمان خشک شدن محصول، بازده خشک کردن، انرژی مصرفی فرایند خشک کردن و غیره اشاره نمود (Mghazli et al., 2017). سامانه‌های خشک‌کن کمک خورشیدی می‌توانند به تنهایی یا در ترکیب با سامانه‌های خشک‌کن مختلف برای رطوبت‌زدایی محصولات غذایی به کار گرفته شوند. کاهش زمان خشک کردن و افزایش بازده خشک کردن از مزایای اصلی استفاده از چنین سامانه‌های خشک‌کن ترکیبی است (Şevik et al., 2019). در سال‌های گذشته پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی انجام پذیرفته است. Qiu et al., (2016)، یک خشک‌کن کمک خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی را طراحی کردند که شامل واحد ذخیره حرارتی و واحد بازیابی حرارتی برای خشک کردن فلفل و قارچ بود. Şevik et al., (2019)، میوه سیب برش‌خورده را با استفاده از یک سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به پمپ حرارتی و منبع آب داغ خشک کردند. آنها اظهار داشتند که سامانه طراحی شده می‌تواند به طور مستقل و بدون نیاز به پمپ حرارتی در شرایط محیطی کار کند، اما سامانه در شرایط کاری سخت به پمپ حرارتی نیاز دارد. در تحقیقی (Aktaş et al., 2017)، مصرف انرژی ویژه را طی فرایند خشک کردن با استفاده از یک سامانه خشک کن ترکیبی متشکل از خشک‌کن مادون قرمز، جمع کننده هوای خورشیدی و یک سازوکار بازیافت حرارت ارزیابی کردند. آن‌ها گزارش دادند که سامانه بازیابی گرما ۲۳-۲۸ درصد از انرژی مصرفی را تأمین می‌کند و همچنین دریافتند که میانگین بازده جمع کننده خورشیدی در سامانه مورد استفاده ۵۱ درصد است. Atalay et al. (2017)، یک جمع کننده خورشیدی را طراحی کردند که شامل یک واحد ذخیره‌سازی انرژی برای تأمین مداوم انرژی حرارتی مورد نیاز بود. در نتیجه با استفاده از سازوکار بازیابی حرارت، ۶۰-۵۰ درصد از گرمای خروجی بازیابی شد و سامانه خشک‌کن ۸/۷۶ درصد انرژی کمتری مصرف کرد. در پژوهشی، Ullah & Kang (2017) یک جمع کننده سهمی‌وار را برای خشک کردن قطعات برش خورده میوه سیب طراحی کردند. جمع کننده در سرعت‌های مختلف هوا و قطرهای جاذب متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. درحالی‌که نرخ جریان

برای برش‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ و ۷ میلی‌متر در سامانه خشک‌کن ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. فاکتور مورد بررسی در سامانه خشک‌کن، دبی هوای ورودی به محفظه خشک کردن محصول بود. بررسی‌ها نشان داد که بهترین شرایط خشک کردن در دبی ۰/۰۰۴ کیلوگرم بر ثانیه همراه با منبع تابشی است. مزیت قابل توجه این سامانه در مقایسه با سامانه‌هایی که فقط از منبع تابشی یا فقط از هوای داغ استفاده می‌کنند و همچنین سامانه‌هایی که بخشی از انرژی الکتریکی یا کل انرژی الکتریکی سامانه توسط جریان برق شهر تأمین می‌شود، کاهش قابل توجه زمان فرآیند خشک شدن و انرژی مصرفی، و همچنین تأمین کل انرژی مصرفی آن توسط انرژی خورشیدی است. در تحقیقی از یک خشک‌کن خورشیدی با صفحه جذب پره‌ای سوراخ‌دار برای خشک کردن سبزی شوید استفاده شد (Razmipour et al., 2015). جمع‌کننده خشک‌کن دارای صفحه جذب پره‌ای سوراخ‌دار بود که عملکرد حرارتی آن در دبی‌های مختلف هوای عبوری با یک جمع‌کننده صفحه تخت مقایسه شد. تأثیر دمای هوای خشک‌کننده در سه سطح (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس)، اندازه محصول در سه سطح به طول‌های (۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر) و دو حالت مختلف خشک کردن (مختلط و غیر مستقیم) بر عملکرد خشک‌کن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از صفحه جذب پره‌ای سوراخ‌دار نسبت به صفحه تخت ۱۱ درصد افزایش بازده حرارتی را در برداشت داشته و بیشترین بازده حرارتی در بالاترین دبی هوای عبوری به دست آمد. با افزایش دما و کاهش اندازه قطعات محصول کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی ایجاد شد. با افزایش دما سهم انرژی خورشیدی نیز کاهش یافت. در نهایت بیشترین بازده خشک‌کن در حالت مختلط و با اندازه قطعات ۳ سانتی‌متر در دمای ۶۵ درجه سلسیوس برابر با ۷۰ درصد مشاهده گردید.

با توجه به امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن نامناسب، کنترل فرآیند خشک کردن از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین، برای حفظ ایمنی محصولات، رطوبت آنها باید به مقدار مشخصی کاهش یابد. به منظور دستیابی به این هدف، ضروری است که روند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی مدل‌سازی شود. به این صورت، مدل خشک کردن

جرمی هوا از ۱/۵ تا ۳/۵ کیلوگرم در دقیقه متفاوت بود، در بازده انرژی در محدوده ۲۰/۸ تا ۲۳/۳۳ درصد به دست آمد. مقادیر بازده بالاتر نیز در سرعت‌های جریان بالاتر به دست آمد. همچنین، قطر کوچک‌تر جاذب مقادیر بازده بالاتری را نتیجه داد. در پژوهشی دیگر، Assoa et al. (2017) به طور تجربی یک سامانه خشک‌کن ترکیبی حرارتی فتوولتائیک را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های تجربی آنها نشان داد که سرعت باد تأثیر معنی‌داری بر زمان خشک شدن دارد. بازده حرارتی سامانه در مطالعه آنها ۲۷/۷ درصد و بازده الکتریکی سامانه ۱۳ درصد بود. همچنین، Agh-Khani et al. (2013) عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی با جریان هوای اجباری، مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت، که مناسب خشک کردن محصولات با ارزش در حجم کم از قبیل گیاهان دارویی و زعفران است را بررسی کردند. خشک‌کن مورد ارزیابی شامل جمع‌کننده خورشیدی، محفظه محصول، محفظه مواد جاذب رطوبت سیلیکاژل، دمنده، کانال‌های عبور هوا و سامانه اندازه‌گیری و کنترل بود. به منظور بررسی عملکرد دستگاه از گیاه نعنای استفاده شد و نرخ خشک شدن و میزان انرژی مصرفی در سه سطح فاکتور دما (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و در دو حالت سامانه گردش هوای باز و بسته اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه گردش هوای بسته تأثیر بسیار معنی‌داری بر انرژی مصرفی و بازده خشک‌کن دارد. افزایش دمای هوای خشک‌کننده در سامانه هوای باز، باعث کاهش زمان و بازده خشک شدن و افزایش انرژی مصرفی شد. درحالی‌که در سامانه گردش هوای بسته، با افزایش دما انرژی مصرفی کاهش و بازده خشک‌کن و سرعت خشک شدن افزایش یافت. بیشترین بازده خشک‌کن مربوط به تیمار دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سامانه گردش هوای بسته بود. در نهایت میانگین بازده جمع‌کننده خورشیدی و بیشترین بازده خشک‌کن به ترتیب ۳۴ درصد و ۴۱ درصد به دست آمدند.

Mirzaee et al. (2020) یک خشک‌کن فرسوخ-خورشیدی را که انرژی آن به وسیله یک سامانه فتوولتائیک-حرارتی تأمین می‌شد، مورد آزمایش قرار دادند. در تحقیق آنها زمان و دمای خشک شدن و مقدار انرژی الکتریکی مصرفی در حین فرآیند خشک شدن

انرژی خورشیدی و بازده انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نقطه بهینه برای شرایط کاری خشک‌کن نیز با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) با انتخاب مقادیر مناسب برای دمای هوای خشک‌کن، سرعت هوا و توان مادون قرمز تعیین شد.

مواد و روش‌ها

به منظور خشک کردن محصول رزماری، از یک خشک‌کن تسمه نقاله‌ای پیوسته چهار طبقه مجهز به ترکیبی از آب‌گرمکن‌های خورشیدی و گازی به عنوان منبع اصلی گرمایش سامانه استفاده شد. یک پمپ آب برای رساندن آب از مخزن آب‌گرمکن به مبدل حرارتی مایع - گاز استفاده شد. هوای محیط از یک دمنده گریز از مرکز از مبدل حرارتی عبور می‌کرد و گرما را از جریان آب گرم داخل لوله‌های مبدل حرارتی دریافت می‌کرد و به داخل محفظه خشک‌کن انتقال می‌داد (شکل ۱-الف). سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن با استفاده از بادسنج دیجیتال (Lutron Model YK, 80 Am, Taiwan) اندازه‌گیری شد و با استفاده از یک اینورتر (LS, SV040iG5-4, Korea) که کنترل دوران دمنده گریز از مرکز را انجام می‌داد، تنظیم شد. دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و هوای بالای نمونه‌ها، در طول آزمایش‌های خشک‌کردن با استفاده از حسگرهای دما/رطوبت نسبی (AM2301/DHT21, Model China) پایش شدند. در این تحقیق چهار لامپ IR خورشیدی با توان اسمی ۲۵۰ وات (شرکت لامپ نور ایران) در کناره‌های تسمه نقاله در محفظه خشک‌کن (یک لامپ بالای هر تسمه نقاله) جهت کمک گرمایش قرار داده شد. توان ورودی لامپ‌های IR با استفاده از یک پتانسیومتر چرخشی و یک مولتی‌متر دیجیتال (TES Model 232, Taiwan) تنظیم شد. تصویر واقعی سامانه خشک‌کن توسعه یافته در شکل ۱-ب ارائه شده است.

برگ‌های رزماری جهت خشک کردن به طور روزانه از مؤسسه تحقیقات زیست فناوری کشاورزی واقع در شهر رشت تهیه شد و بلافاصله به محل اجرای آزمایش انتقال یافت. به منظور جلوگیری از پژمردگی، تا شروع آزمایش‌ها، برگ‌های محصول در کیسه‌های پلاستیکی در بسته از جنس پلی اتیلن نگهداری شد. مقادیر ۳۰۰ گرمی از برگ‌های تازه برداشت شده، تحت تأثیر درجه حرارت

محصول در فرایندهای بعدی را می‌توان بر اساس الگوی به دست آمده، پیش‌بینی کرد. از سوی دیگر، طراحی بهینه و مناسب خشک‌کن‌های خورشیدی نه تنها نیازهای خشک کردن محصولات را برآورده می‌کند، بلکه بهره‌وری انرژی در عملیات فرآوری مواد غذایی را نیز ارتقا می‌دهد. علاوه بر توسعه مناسب سامانه‌های خشک کردن محصولات کشاورزی، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد چنین سامانه‌هایی نیز برای یافتن بهترین شرایط کاری برای فرآیند خشک کردن، دارای اهمیت بسیار است. در این راستا مدل‌های بهینه‌سازی نقش مهمی در توسعه و بهره‌برداری از سامانه‌های خشک‌کن و گرمایشی دارند.

روش منحنی سطح پاسخ یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای ترسیم سطح پاسخ در دامنه مورد نظر، بهینه‌سازی پاسخ یا انتخاب مناسب‌ترین شرایط فرآیند برای دستیابی به مشخصات هدف است (Myers *et al.*, 2016). روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از فنون ریاضی و آماری است که برای توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف، بهینه کردن پاسخ مزبور است. به کارگیری روش سطح پاسخ برای مشخص کردن روابط بین پاسخ و متغیرهای مستقل در یک پروژه، شامل سه مرحله است (Myers *et al.*, 2016):

مرحله‌ی یک: تعیین متغیرهای مستقل، سطوح مورد آزمایش و نوع طرح آزمایش.

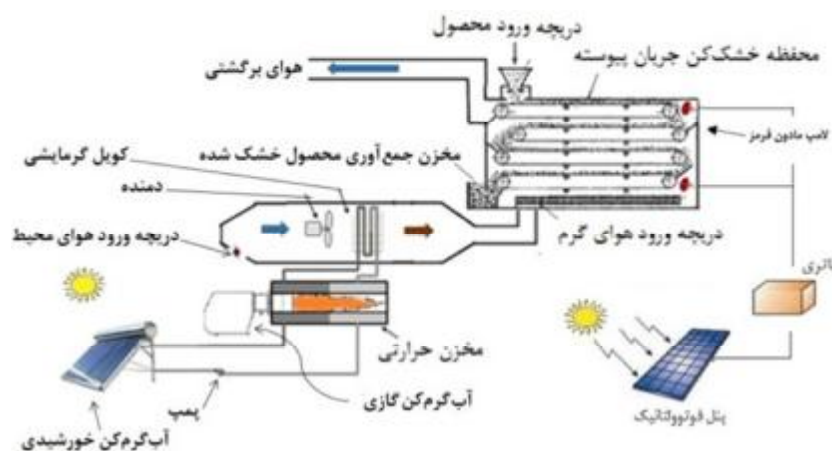
مرحله‌ی دوم: پیش‌بینی و تعیین صحت معادله‌ی مدل.

مرحله‌ی سوم: به دست آوردن نمودار منحنی‌های پاسخ و نقشه خطی پاسخ به عنوان تابعی از متغیرهای مستقل و نیز تعیین نقاط بهینه.

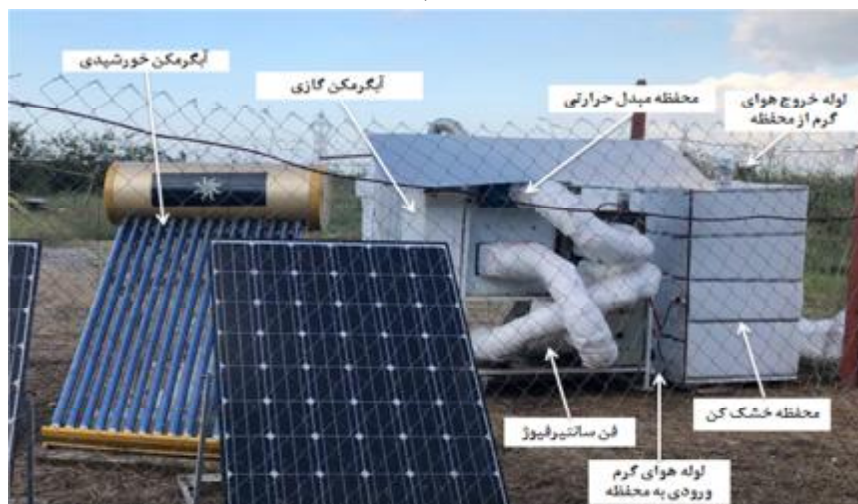
در بررسی منابع تحقیقی در مورد ارزیابی عملکرد و بهینه‌سازی یک خشک‌کن پیوسته تسمه نقاله‌ای ترکیبی با قابلیت بهره‌گیری از توان مادون قرمز و آب‌گرمکن خورشیدی در طول فرآیند خشک کردن برگ‌های رزماری یافت نشد. بنابراین، در این تحقیق از خشک‌کن نقاله‌ای پیوسته ترکیبی شامل آب‌گرمکن خورشیدی و لامپ‌های مادون قرمز تأمین شونده با انرژی خورشیدی برای خشک کردن برگ‌های رزماری استفاده شد و ویژگی‌های عملکرد آن از نظر زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل، نسبت

دوباره از مخزن ورودی محصول در بالای محفظه به درون خشک‌کن برگردانده شدند. سرعت تسمه نقاله توسط مبدل (اینورتر) فرکانسی به گونه‌ای تنظیم شد که پس از گذشت هر ۱۵ دقیقه، محصول به مخزن خروجی جمع‌آوری خشک‌کن وارد می‌شد که از این قسمت، محصول قابل برداشت و وزن کردن بود. عملیات توزین تا زمانی که رطوبت نمونه به حدود ۱۳ درصد (بر پایه وزن تر) برسد، ادامه یافت (Poós & Varju, 2017).

هوای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس و مقادیر مختلف سرعت جریان هوای ورودی (۷، ۸ و ۹ متر بر ثانیه) و توان لامپ IR (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ وات) تحت فرایند خشک شدن قرار گرفتند. برای هر حالت از شرایط خشک کردن، آزمایش در سه تکرار انجام شد. نمونه‌های برگ‌های رزماری از دریچه بالایی وارد محفظه خشک‌کن شدند و هر ۱۵ دقیقه از قسمت پایینی محفظه خشک‌کن خارج شده و توسط ترازوی دیجیتال (AND Model GF6000, Japan) با دقت ± 0.01 گرم وزن و پس از وزن شدن بلافاصله



(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) طرحواره کلی سامانه خشک‌کن مورد استفاده، ب) تصویر واقعی سامانه خشک‌کن توسعه یافته

کشور ایران برابر با ۸۶۰۰ کیلوکالری و معادل با ۹/۹۹ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب (Sharifi, 2004) است.

انرژی حرارتی آب گرم‌کن خورشیدی با معادله زیر محاسبه شد (Ceylan & Gürel, 2016):

انرژی مصرفی آب گرم‌کن گازی با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Firouzi et al., 2017):

$$E_{gwh} = V_g \times E_{eq} \quad (1)$$

در معادله فوق، V_g حجم گاز مصرف شده در هر آزمایش (m^3) و E_{eq} انرژی معادل گاز شهری (kWh/m^3) که در

با در نظر گرفتن مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی سامانه خشک‌کن شامل انرژی مصرفی کل، زمان خشک کردن، نسبت انرژی خورشیدی و بازده انرژی، شرایط بهینه برای فرایند خشک کردن گیاه رزماری با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) تعیین شد.

فرایند بهینه‌سازی در حالت به کارگیری همزمان آب‌گرمکن خورشیدی و آب‌گرمکن گازی به عنوان منابع تأمین گرمایش سامانه خشک‌کن انجام شد. به منظور پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی و به دست آوردن نمودارهای مربوط از نرم‌افزار Design Expert 10.0.3 استفاده شد و داده‌ها با استفاده از روش مرکب مرکزی تجزیه و تحلیل شدند.

به منظور به دست آوردن مقدار بهینه، از معادله زیر استفاده شد:

$$Y_i = b_0 + \sum b_j X_j + \sum b_{ij} X_i X_j + \sum b_{jj} X_i^2 + e \quad (11)$$

در این آزمایش از طرح مرکب مرکزی با پنج نقطه مرکزی استفاده شد (Hosseinzadeh Samani *et al.*, 2015). جدول ۱ سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش سطح پاسخ را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این که متغیرهای وابسته در این پژوهش شامل انرژی مصرفی کل، زمان خشک‌شدن محصول، نسبت انرژی خورشیدی و بازده انرژی بودند، سطوح متغیرهای مستقل انتخابی برای پیاده‌سازی روش سطح پاسخ به صورت زیر تعریف شد:

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش

سطح پاسخ			
متغیرهای مستقل			
سطوح کد بندی			
۱	۰	-۱	
۹	۸	۷	سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)
۳۰۰	۱۵۰	۰	توان الکتریکی مدار مادون قرمز (وات)

در حالت بهینه‌سازی سامانه خشک‌کن ترکیبی مورد بررسی، متغیرهای مستقل ورودی برای سامانه خشک‌کن شامل توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی بود. در این حالت تنها مصرف انرژی منابع انرژی غیرخورشیدی سامانه خشک‌کن (یعنی آب‌گرمکن گازی و دمنده گریز از مرکز) در بهینه‌سازی سامانه در نظر گرفته شد. شاخص‌های عملکرد سامانه خشک‌کن (پاسخ‌های مدل RSM) شامل زمان خشک‌کردن، انرژی مصرفی کل، نسبت خورشیدی و بازده انرژی بود. برای انجام آزمایش‌ها

$$E_{swh} = m_w \times c_p \times (T_{fw} - T_{iw}) \quad (2)$$

که در آن m_w جرم آب در مخزن (kg)، C_p گرمای ویژه آب (J/kg °C)، T_{fw} و T_{iw} به ترتیب دمای نهایی و اولیه آب (°C) هستند.

انرژی مصرف شده توسط فن سانتریفیوژ سامانه خشک‌کن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Tohidi *et al.*, 2017):

$$E_{cb} = \Delta P_t \times Q_a \times t \quad (3)$$

در معادله بالا، Q_a دبی هوای فن (m³/s)، t زمان خشک کردن محصول (s) و ΔP افت فشار کل در بخش‌های مختلف سامانه خشک‌کن (kPa) هستند.

انرژی مصرف شده توسط لامپ‌های مادون قرمز به صورت زیر تعیین شد:

$$E_{irc} = P_{ir} \times t \quad (4)$$

که در آن P_{ir} توان مصرفی مدار مادون قرمز شامل چهار لامپ مادون قرمز (W) و t زمان خشک شدن (s) است.

انرژی مصرفی کل سامانه خشک‌کن

انرژی مصرفی کل سامانه خشک‌کن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$E_t = E_{gwh} + E_{swh} + E_{irc} + E_{cb} \quad (5)$$

بازده انرژی خشک‌کن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (Tohidi *et al.*, 2017):

$$\eta_t = \frac{E_e}{E_t} \quad (6)$$

در معادله فوق در E_e انرژی تبخیر رطوبت از محصول (MJ) است و می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$E_e = h_{fg} \cdot m_{ew} \quad (7)$$

که در آن m_{ew} جرم آب تبخیر شده (kg) است. برای محاسبه گرمای نهان تبخیر (h_{fg}) با توجه به دمای مطلق (T_{abs})، از معادلات زیر استفاده شد:

$$h_{fg} = 2.503 \times 10^6 - 2.386 \times 10^3 (T_{abs} - 273.16) \quad (8)$$

$$h_{fg} = (7.33 \times 10^{12} - 1.60 \times 10^7 T_{abs}^2)^{0.5} \quad (9)$$

نسبت انرژی خورشیدی بیانگر آن میزان از انرژی مصرفی سامانه خشک‌کن است که توسط انرژی خورشیدی تأمین شده است. این شاخص نشان دهنده میزان کاهش منابع تجدیدناپذیر بوده و به کمک معادله زیر محاسبه می‌شود (Duffie & Beckman, 2013):

$$SF = \frac{E_s}{E_t} = \frac{E_{swh} + E_{irc}}{E_t} \quad (10)$$

و یافتن شاخص‌های عملکرد سامانه خشک‌کن، ۱۳ آزمون کاری تعیین شد که در ادامه به نتایج به‌دست آمده پرداخته می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده برای شاخص‌های مورد ارزیابی در این تحقیق با استفاده از روش سطح پاسخ در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل درجه دوم مبتنی بر روش مرکب مرکزی، مدل برتر برای توصیف مقادیر پاسخ بر اساس عامل‌های عملکردی سامانه خشک‌کن است.

جدول ۳ تجزیه و تحلیل واریانس مقادیر پاسخ یعنی زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل، نسبت خورشیدی و بازده انرژی را با توجه به دو متغیر مستقل مورد بررسی شامل توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل آماری، هر چهار شاخص عملکردی مورد بررسی سامانه خشک کردن شامل زمان خشک کردن، انرژی مصرفی کل، بازده انرژی و نسبت انرژی خورشیدی به طور معنی‌داری تحت تأثیر توان‌های مادون قرمز و سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن قرار گرفتند.

جدول ۲- ترکیب‌های کاری در نظر گرفته شده برای سامانه خشک‌کن توسط روش سطح پاسخ به همراه مقادیر به دست آمده از انجام آزمون‌های عملکردی بر روی خشک‌کن

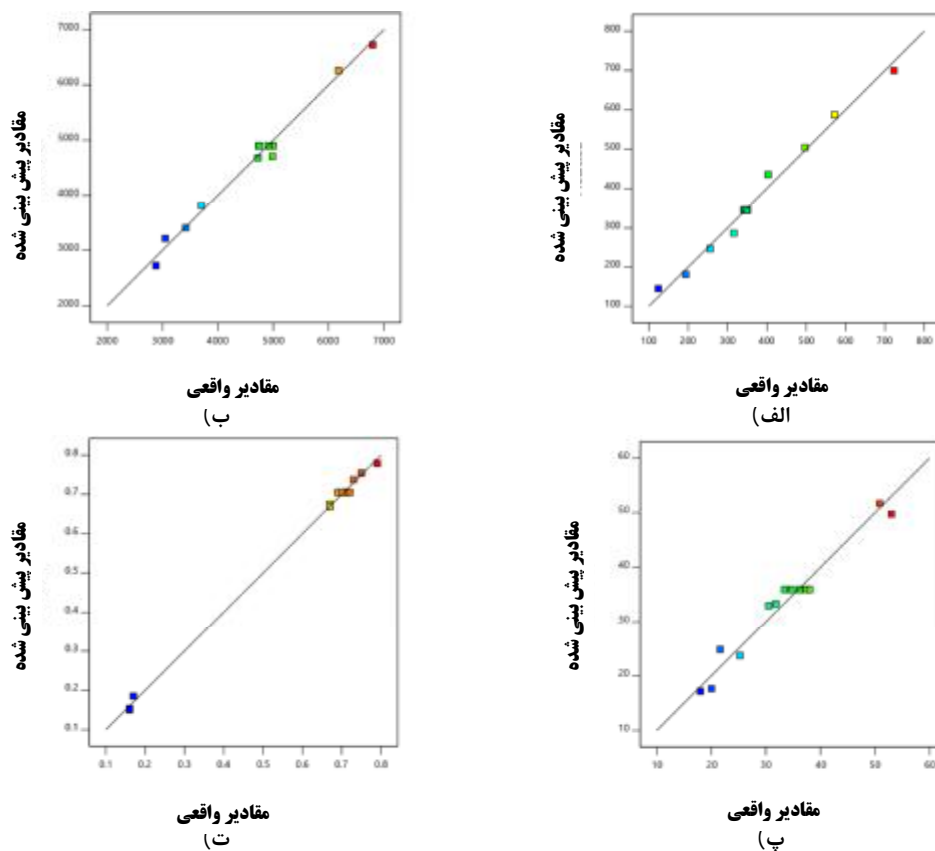
آزمون	سرعت هوای ورودی (m/s)	توان مادون قرمز (W)	زمان خشک شدن (min)	انرژی مصرفی کل (kJ)	بازده خشک‌کن (درصد)	نسبت خورشیدی
۱	۸	۰	۵۷۲	۲۸۷۹/۶۶	۲۱/۶۱	۰/۱۷
۲	۷	۱۵۰	۴۰۳	۶۱۷۷/۴۲	۲۵/۲۷	۰/۶۷
۳	۷	۳۰۰	۲۵۶	۶۷۹۵/۹۵	۳۰/۵۳	۰/۷۵
۴	۸	۱۵۰	۳۴۷	۴۹۰۷/۲۵	۳۴/۶۸	۰/۷۰
۵	۹	۳۰۰	۱۲۴	۳۷۰۲/۵۵	۵۰/۸۵	۰/۷۳
۶	۹	۱۵۰	۳۱۶	۴۹۸۶/۴۴	۳۱/۸۲	۰/۶۷
۷	۷	۰	۷۲۳	۳۴۱۹/۹۱	۱۸/۰۱	۰/۱۶
۸	۸	۱۵۰	۳۵۰	۴۹۹۷/۲۵	۳۳/۴۶	۰/۶۹
۹	۸	۳۰۰	۱۹۴	۴۷۲۱/۴۱	۵۳/۰۳	۰/۷۹
۱۰	۹	۰	۴۹۷	۳۰۴۶/۷۴	۲۰/۰۵	۰/۱۷
۱۱	۸	۱۵۰	۳۴۱	۴۷۳۹/۱۳	۳۷/۴۱	۰/۷۱
۱۲	۸	۱۵۰	۳۴۵	۴۷۴۶/۳۳	۳۸/۰۲	۰/۷۱
۱۳	۸	۱۵۰	۳۵۱	۴۹۱۶/۶۱	۳۶/۱۴	۰/۷۲

جدول ۳- شرایط کاری بهینه برای عامل‌های عملکردی سامانه خشک‌کن مورد مطالعه

ردیف	سرعت هوا	توان مادون قرمز	زمان خشک شدن	انرژی مصرفی کل	بازده انرژی	نسبت خورشیدی	مطلوبیت	نقطه انتخابی
۱	۸/۸۵	۳۰۰	۱۴۹/۱۳	۳۸۶۸/۹۱	۵۲/۳۷	۰/۷۴۸	۰/۹۰۰	**
۲	۸/۸۴	۳۰۰	۱۴۹/۳۳	۳۸۷۲/۵۵	۵۲/۴۰	۰/۷۴۸	۰/۹۰۰	
۳	۸/۸۶	۳۰۰	۱۴۸/۸۷	۳۸۶۴/۲۴	۵۲/۳۴	۰/۷۴۷	۰/۹۰۰	
۴	۸/۸۷	۳۰۰	۱۴۸/۶۵	۳۸۶۰/۲۹	۵۲/۳۱	۰/۷۴۷	۰/۹۰۰	
۵	۸/۸۲	۳۰۰	۱۴۹/۷۸	۳۸۸۰/۷۹	۵۲/۴۵	۰/۷۴۹	۰/۹۰۰	
۶	۸/۷۵	۳۰۰	۱۵۱/۸۵	۳۹۲۱/۲۷	۵۲/۶۲	۰/۷۵۴	۰/۸۹۹	
۷	۸/۶۹	۳۰۰	۱۵۳/۴۷	۳۹۵۴/۹۲	۵۲/۶۹	۰/۷۵۷	۰/۸۹۷	

داده شده است. می‌توان مشاهده نمود که مقادیر به طرز مناسبی با داده‌های تجربی در مورد هر چهار شاخص مورد ارزیابی برازش داده شده است.

مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده با توجه به داده‌های واقعی در مورد زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل، بازده انرژی و نسبت انرژی خورشیدی در شکل ۲ نشان



شکل ۲- مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی برای شاخص‌های عملکردی مورد بررسی (شامل الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی کل، پ) بازده انرژی؛ ت) نسبت انرژی خورشیدی

استفاده از سرعت هوای ۷ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز صفر به دست آمد. تحقیقات مشابهی تأثیر استفاده از لامپ‌های مادون قرمز تشعشعی را بر کاهش زمان فرآیند خشک کردن ثابت می‌کند (Ziaforoughi & Esfahani, 2016 & Abbaspour-Fard, 2018).

اثرات مستقل و متقابل توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی بر انرژی مصرفی کل سامانه خشک‌کن از لحاظ آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($P < 0.01$). روند تغییرات انرژی مصرفی کل سامانه خشک‌کن نسبت به عوامل مورد بررسی در شکل ۳-ب نشان داده شده است. انرژی مصرفی کل با افزایش سرعت هوای ورودی در قالب یک روند خطی افزایش یافت. با افزایش توان مادون قرمز از صفر به ۳۰۰ وات، نوعی تغییر سهمی با روند کلی افزایشی در مقدار انرژی مصرفی کل

اثر متقابل «توان مادون قرمز×سرعت هوا» در شکل ۳-الف نشان داده شده است. براساس تجزیه آماری، تغییرات اثر متقابل عوامل مورد بررسی بر زمان خشک شدن از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.05$). همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت هوای ورودی زمان خشک شدن کاهش یافته است. سایر محققان نیز نتایج مشابهی را در مورد تأثیر دمای هوای ورودی بر زمان خشک شدن محصولات غذایی گزارش کردند (Singh *et al.*, 2008). همچنین افزایش توان مادون قرمز از صفر به ۳۰۰ وات باعث کاهش زمان خشک شدن شد. طبق جدول ۲، کمترین مقدار زمان خشک شدن ۱۲۴ دقیقه بود که در سرعت هوای ۹ متر بر ثانیه، دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس و توان مادون قرمز ۳۰۰ وات به دست آمد. بیشترین زمان خشک شدن ۷۲۳ دقیقه بود که در حالت

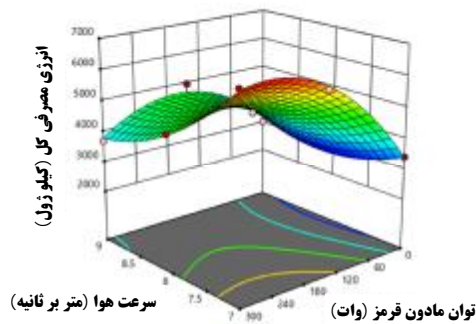
نشان می‌دهد. تجزیه آماری مدل نشان داد که اثرات مستقل و اثر متقابل عوامل مورد بررسی بر روی شاخص‌های عملکردی سامانه خشک‌کن به ترتیب در سطوح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت هوای ورودی و توان مادون قرمز یک روند افزایشی در مقدار بازده انرژی سامانه خشک‌کن به وجود آمده است. نتایج مشابهی توسط محققین دیگر گزارش شده است (Nazghelichi *et al.*, 2010. Nassiri & Etesami, 2015). همچنین جعفری و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه‌های شلتوک در خشک‌کن میکروویو بستر پیوسته، بازده انرژی و بازده انرژی افزایش یافته است. هنگامی که ضخامت لایه‌ها یکسان بود، با افزایش توان میکروویو، بازده انرژی و بازده انرژی کاهش یافت.

رخ داد.

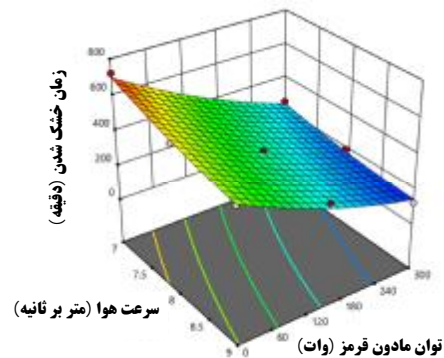
کمترین مقدار انرژی مصرفی کل برابر با ۲۸۷۹/۶۶ کیلوژول بود که در سرعت هوای ورودی ۸ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز صفر به دست آمد، در حالی که بیشترین مقدار انرژی مصرفی کل برابر با ۶۷۹۵/۹۵ کیلوژول با به کارگیری سرعت هوای ورودی ۷ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۳۰۰ وات به دست آمد. در پژوهش خود، (Soodmand-Moghaddam *et al.*, 2019) نشان دادند که انرژی مصرفی یک خشک‌کن تسمه نقاله‌ای چندگانه در فرآیند خشک کردن برگ‌های به‌لیمو از ۴۶۷/۹۹ تا ۴۶۰۷/۹۴ کیلوژول متغیر است.

بیشترین مصرف انرژی در بالاترین سطوح سرعت هوا و دمای هوا به ترتیب ۲ متر بر ثانیه و ۵۰ درجه سلسیوس مشاهده شد.

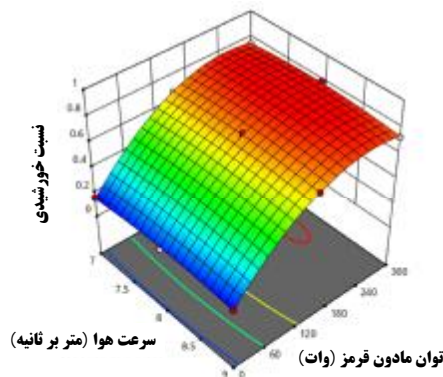
شکل ۳-پ تغییرات بازده انرژی خورشیدی را با در نظر گرفتن اثرات متقابل «توان مادون قرمز» «سرعت هوا»



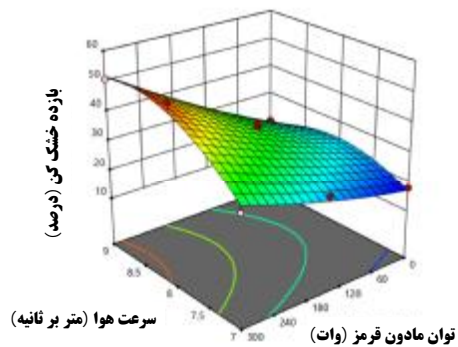
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۳- مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی برای شاخص‌های عملکردی مورد بررسی شامل الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی کل، پ) بازده انرژی؛ ت) نسبت انرژی خورشیدی

حداکثر رساندن بازده انرژی و به حداکثر رساندن نسبت انرژی خورشیدی. با توجه به معیارهای تعریف شده، ۸ نقطه با مقادیر مطلوبیت ۹۰ درصد توسط نرم افزار Design Expert مشخص شد (جدول ۳). نقطه بهینه برگزیده شامل توان مادون قرمز ۳۰۰ وات و سرعت هوای ۸/۸۵ متر بر ثانیه به دست آمد. در شرایط بهینه انتخابی، مشخصات عملکردی سامانه خشک کن شامل زمان خشک کردن، انرژی مصرفی کل، بازده انرژی و نسبت خورشیدی به ترتیب ۱۴۹/۱۳ دقیقه، ۳۸۶۸/۹۱ kJ، ۵۲/۳۷ درصد و ۰/۷۵ به دست آمد. با در نظر گرفتن جدول ۳ می توان دریافت که همه شرایط کاری بهینه پیشنهادی در شرایط استفاده از توان مادون قرمز ۳۰۰ وات و نزدیک به سرعت هوای ورودی ۸ متر بر ثانیه به دست آمده است.

وضعیت نقطه بهینه پیشنهادی با توجه به اثر متقابل توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که روش بهینه سازی اعمال شده به طور مناسب قادر است چهار شاخص عملکردی مورد مطالعه را در سطوح مطلوب قرار دهد. در مورد زمان خشک شدن و انرژی مصرفی کل، نمودارهای مربوطه بیشتر به رنگ آبی (مقادیر حداقل نرمال شده) تمایل دارند، در حالی که برای شاخص های بازده انرژی و نسبت خورشیدی، نمودارهای بهینه سازی به رنگ های قرمز (مقادیر بیشینه نرمال شده) متمایل بود. با به کارگیری نقطه پیشنهادی، سهم قابل توجهی از انرژی خورشیدی به همراه مقادیر کمتری از انرژی مصرفی کل و زمان خشک شدن قابل دستیابی است. با توجه به یافته های این تحقیق می توان نتیجه گرفت که با به کارگیری سامانه خشک کن توسعه یافته می توان نیاز به منابع سوخت فسیلی را کاهش داد و در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه ای به جو را به میزان قابل توجهی کم کرد. Gharnasi Gharavi (2017)، گزارش دادند که روش سطح پاسخ می تواند به طور موفقیت آمیز برای توسعه مدل های پیش بینی مناسب برای توصیف روند خشک کردن شلتوک مورد استفاده قرار گیرد. آنها نشان دادند که تغییرات در عامل های کیفی می تواند به وسیله مدل درجه دوم توصیف شود. طبق فرآیند بهینه سازی، حداقل تلفات (درصد شکستگی و درصد ترک) و زمان خشک شدن با دمای هوای ورودی ۵۶/۵۳ درجه سلسیوس، سرعت چرخش سیلندر ۱۰ دور بر دقیقه مشاهده شد. Pourbagher et

بیشترین مقدار بازده سامانه خشک کن برابر با ۵۳/۰۳ درصد بود که در سرعت هوای ورودی ۸ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۳۰۰ وات به دست آمد، در حالی که کمترین مقدار بازده انرژی ۱۸/۰۱ درصد بود که در سرعت هوای ورودی ۷ m/s و توان مادون قرمز صفر به دست آمد.

نسبت انرژی خورشیدی بخشی از مصرف انرژی مورد استفاده سامانه خشک کن را نشان می دهد که توسط انرژی خورشیدی تأمین شده است.

انرژی خورشیدی به دو شکل در سامانه خشک کن مورد استفاده قرار گرفت: الف) انرژی گرمایی توسط آب گرمکن خورشیدی برای تأمین هوای خشک کن؛ ب) انرژی الکتریکی توسط پنل های خورشیدی برای تأمین روشنایی لامپ مادون قرمز. همان طور که در شکل ۳-ت نشان داده شده است، با افزایش توان مادون قرمز شاخص نسبت انرژی خورشیدی به طرز قابل توجهی افزایش یافته است و در واقع بیشترین شیب افزایشی در بین شاخص های عملکردی مورد مطالعه تحت تأثیر توان مادون قرمز مربوط به همین شاخص است.

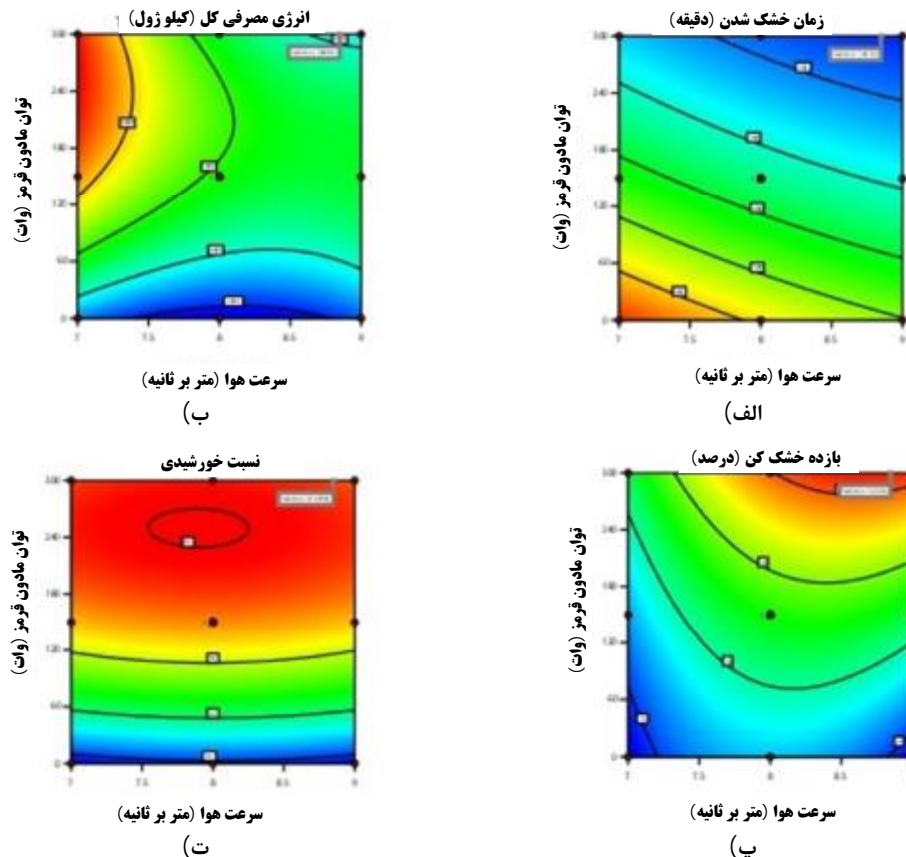
افزایش سرعت هوای ورودی منجر به تغییر قابل توجهی در مقدار نسبت انرژی خورشیدی نشد. بالاترین مقدار نسبت انرژی خورشیدی در طول فرآیند خشک کردن برابر با ۰/۷۹ بود که در سرعت هوای خشک کردن ۸ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۳۰۰ وات به دست آمد. کمترین مقدار نسبت انرژی خورشیدی (۰/۱۶) مربوط به سرعت هوای ۷ m/s و توان مادون قرمز صفر بود.

Ziaforoughi & Esfahani (2016) میزان مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن سیب زمینی را با استفاده از خشک کن مادون قرمز متناوب خورشیدی بررسی کردند. Zoukit et al., (2019) گزارش دادند که حداکثر مقادیر بازده خشک کن برای حالت های خورشیدی، گازی و هیبریدی به ترتیب برابر با ۴۲ درصد، ۳۷ درصد و ۴۰ درصد بود. نتایج شبیه سازی و تجربی در مطالعه آنها بسیار نزدیک به هم و مقادیر RMSE برای دما و رطوبت نسبی به ترتیب برابر با ۲/۷ درصد و ۲/۴ درصد بود.

نقاط بهینه پیشنهادی برای شرایط کاری سامانه خشک کن توسعه یافته توسط نرم افزار Design Expert بر اساس این معیارها تعیین شد: به حداقل رساندن زمان خشک کردن، به حداقل رساندن انرژی مصرفی کل، به

شرایط بهینه شده به ترتیب شامل دمای هوا ۵۵/۲۵ درجه سلسیوس و ۵۸ درجه سلسیوس برای ارقام شلتوک طارم و شیرودی بود.

al. (2018). نشان دادند که مدل درجه دوم با موفقیت قادر به برازش داده‌های تجربی در یک خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز است. بر اساس روش الگوریتم ژنتیک،



شکل ۴- نقطه بهینه با در نظر گرفتن الف) زمان خشک شدن، ب) انرژی مصرفی کل، پ) بازده انرژی، ت) نسبت انرژی خورشیدی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از خشک‌کن نواری پیوسته ترکیبی شامل آب‌گرمکن خورشیدی و لامپ‌های مادون قرمز تأمین شونده با انرژی خورشیدی برای خشک کردن برگ‌های رزماری استفاده شد و ویژگی‌های عملکرد آن از نظر زمان خشک شدن، انرژی مصرفی کل، نسبت انرژی خورشیدی و بازده انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. نقطه بهینه برای شرایط کاری خشک‌کن با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) با انتخاب مقادیر مناسب برای دمای هوای خشک کردن، سرعت هوا و توان مادون قرمز تعیین شد. نتایج تحقیق نشان داد که:

است. بالاترین نسبت انرژی خورشیدی در فرآیند خشک کردن گیاه رزماری برابر با ۰/۷۹ بود که در سرعت هوای ورودی ۸ متر بر ثانیه و توان مادون قرمز ۳۰۰ وات به دست آمد.

۲- بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در روش سطح پاسخ، مدل درجه دوم مبتنی بر روش مرکب مرکزی، مدل برتر برای توصیف مشخصات عملکردی سامانه خشک‌کن بود.

۳- نقطه بهینه برگزیده برای عملکرد سامانه خشک‌کن شامل توان مادون قرمز ۳۰۰ وات و سرعت هوای ۸/۸۵ متر بر ثانیه بود.

۴- در شرایط بهینه برگزیده، مشخصات عملکردی سامانه خشک‌کن شامل زمان خشک کردن، انرژی مصرفی کل،

۱- افزایش سرعت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن موجب تغییر معنی‌داری در نسبت انرژی خورشیدی نشده

- Firouzi, S., Alizadeh, M.R. & Haghtalab, D. (2017). Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer. *Energy*, 119: 629-636.
- Flamini, G., Cioni, P.L., Morelli, I., Macchia, M., & Ceccarini, L. (2002). Main agronomic- productive characteristics of two ecotypes of *Rosmarinus officinalis* L. and chemical composition of their essential oils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(12): 3512-3517.
- Gharnasi Gharavi, O., Shamsabadi, H., Afkarisayyah, A., Askari, A., & Rasekh, M. (2017). Optimization of paddy rice drying using response surface methodology. *Electronic Journal of Food Processing and Preservation*, 10(1): 99-116.
- Gulcimen, F., Karakaya, H., & Durmus, A. (2016). Drying of sweet basil with solar air collectors. *Renewable energy*, 93: 77-86.
- Haloui, M., Louedec, L., Michel, J.-B., & Lyoussi, B. (2000). Experimental diuretic effects of *Rosmarinus officinalis* and *Centaurium erythraea*. *Journal of ethnopharmacology*, 71(3): 465-472.
- Hosseinzadeh Samani, B., Khoshtaghaza, M., Minaee, S., & Abbasi, S. (2015). Modeling the simultaneous effects of microwave and ultrasound treatments on sour cherry juice using response surface methodology. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4): 837-846.
- Jafari, H., Kalantari, D., & Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study. *Energy*, 138: 1016-1029.
- Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., & Mahrouz, M. (2017). Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable energy*, 108: 303-310.
- Mirzaee, S., Ameri, M., & Ziaforoughi, A. (2020). Experimental Study of an Infrared-Solar Dryer Powered by a Photovoltaic-Thermal System. *Modares Mechanical Engineering*. 20 (6): 1677-1689. (In Persian).
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments: John Wiley & Sons.
- Nabnean, S., Janjai, S., Thepa, S., Sudaprasert, K., Songprakorp, R., & Bala, B. (2016). Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes. *Renewable* بازده انرژی و نسبت خورشیدی به ترتیب برابر با ۱۴۹/۱۳ دقیقه، ۵۲/۳۷، ۳۸۶۸/۹۱ kJ درصد و ۰/۷۵ به دست آمد.
- ۵- نتایج به دست آمده نشان داد که با به کارگیری نقطه پیشنهادی نسبت بیشتری از انرژی خورشیدی که می‌تواند منجر به کاهش انرژی مصرفی کل و زمان خشک شدن شود، در سامانه خشک‌کن قابل دستیابی است.
- ۶- با توجه به ظرفیت‌های مناسب بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در کشور و یافته‌های این تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که با به کارگیری سامانه خشک‌کن توسعه یافته می‌توان نیاز به منابع سوخت فسیلی را در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی به طور قابل توجهی کاهش داد و از انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای به جو و اثرات نامطلوب آن جلوگیری نمود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله حاضر مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه گیلان برای حمایت‌های مادی و معنوی جهت انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

منابع

- Agh-Khani, M., Abbaspour-Fard, M., Bayati, M., Mortezapour, H., Saedi, S. A., & Moghimi, A. (2013). Investigating the performance of a solar dryer equipped with a closed air circulation system and a moisture absorbent chamber. *Journal of Agricultural Machinery*, 3(2): 92-103. (In Persian).
- Aktaş, M., Khanlari, A., Aktekeli, B. & Amini, A. (2017). Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28): 18034-18044.
- Assoa, Y.B., Sauzedde, F., Boillot, B. & Boddaert, S. (2017). Development of a building integrated solar photovoltaic/thermal hybrid drying system. *Energy*, 128: 755-767.
- Atalay, H., Coban, M.T., & Kincay, O. (2017). Modeling of the drying process of apple slices: Application with a solar dryer and the thermal energy storage system. *Energy*, 134: 382-391.
- Ceylan, İ., & Gürel, A. E. (2016). Solar-assisted fluidized bed dryer integrated with a heat pump for mint leaves. *Applied Thermal Engineering*, 106: 899-905.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*: John Wiley & Sons.

- Ullah, F., & Kang, M. (2017). Impact of air flow rate on drying of apples and performance assessment of parabolic trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 127: 275-280.
- Yuan, G., Hong, L., Li, X., Xu, L., Tang, W., & Wang, Z. (2015). Experimental investigation of a solar dryer system for drying carpet. *Energy Procedia*, 70: 626-633.
- Ziaforoughi, A., & Esfahani, J.A. (2016). A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer. *Solar Energy*, 136: 428-436.
- Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., & Abdenouri, N. (2019). Simulation, design and experimental performance evaluation of an innovative hybrid solar-gas dryer. *Energy*, 189: 116279.
- energy, 94: 147-156.
- Nassiri, S. M., & Etesami, S. M. (2015). Energy Use Efficiency of Different Drying Methods for Two Rough Rice Cultivars. *Food Science and Technology*, 3(2): 23-28.
- Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., & Aghbashlo, M. (2010). Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. *Energy*, 35(12): 4679-4684.
- Poós, T., & Varju, E. (2017). Drying characteristics of medicinal plants. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 8(1): 83-91.
- Pourbagher, R., Rohani, A., Rahmati, M., & Abbaspour-Fard, M. (2018). Modeling and optimization of drying process of paddy in infrared and warm air fluidized bed dryer. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(3): 162-171.
- Qiu, Y., Li, M., Hassanien, R.H.E., Wang, Y., Luo, X., & Yu, Q. (2016). Performance and operation mode analysis of a heat recovery and thermal storage solar-assisted heat pump drying system. *Solar Energy*, 137: 225-235.
- Razmipour, M., Alavi Naeini, N., Morteza pour, H., & Ghazanfari, A. (2015). Performance evaluation of solar dryer with a collector with a perforated finned absorber plate equipped with a drying air control system for dill drying. *Journal of Agricultural Machinery*. 5(1): 134-142. (In Persian).
- Şevik, S., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Arslan, E., & Tuncer, A. D. (2019). Performance analysis of solar and solar-infrared dryer of mint and apple slices using energy-exergy methodology. *Solar Energy*, 180: 537-549.
- Sharifi, H., Babapour, Sh., & Sherkati, Sh. (2004). Evaluation of Problems Caused By Thermal Degradation of Consumed Gas in Iran's Thermal Power Stations. Paper presented at the 18th International Conference of Electronics, Tehran, Iran.
- Singh, G.D., Sharma, R., Bawa, A., & Saxena, D. (2008). Drying and rehydration characteristics of water chestnut (*Trapa natans*) as a function of drying air temperature. *Journal of Food Engineering*, 87(2): 213-221.
- Soodmand-Moghaddam, S., Sharifi, M., & Zareiforoush, H. (2019). Investigation of fuel consumption and essential oil content in drying process of lemon verbena leaves using a continuous flow dryer equipped with a solar pre-heating system. *Journal of Cleaner Production*, 233: 1133-1145.
- Tohidi, M., Sadeghi, M., & Toriki-Harchegani, M. (2017). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70: 519-528.

