

تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن پسته در خشک کن مایکروویو بسترسیال

معین زرین نژاد^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۲۹)

چکیده

در این پژوهش اثر شرایط مختلف خشک کردن مایکروویو بسترسیال (دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و توان مایکروویو) بر روی زمان خشک شدن، ضریب پخش رطوبت مؤثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل مغز پسته مورد مطالعه قرار گرفت. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن پسته از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد. پارامترهای ورودی (مستقل) عبارتند از: دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و توان مایکروویو و پارامترهای وابسته (خروجی یا پاسخ) عبارتند از: زمان خشک شدن، ضریب پخش رطوبت مؤثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل. رطوبت اولیه نمونه‌های پسته رقم اکبری ۰/۵۶۹ برپایه خشک بدست آمد. برای خشک کردن نمونه‌ها از سه سرعت هوای ورودی ۱/۱۶، ۳/۳۲، ۸/۴۸ متر بر ثانیه، سه دمای هوا ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سلسیوس و سه سطح توان مایکروویو ۲۰، ۳۳۰ و ۴۴۰ وات استفاده شد. مقادیر زمان خشک شدن، ضریب پخش رطوبت مؤثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل به ترتیب ۱/۲ تا ۳/۸۳ ساعت، 10^{-1} تا 2.7×10^{-9} متربرثانیه، ۱/۱۲/۰۱ تا ۳۵/۴۳٪ و ۰/۳۳۷ تا ۱/۶۳ کیلووات ساعت به دست آمدند. نقطه بهینه خشک کردن پسته در دمای هوای ۳۸/۴۸ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۱۶ متر بر ثانیه و توان مایکروویو ۴۴۰ وات به دست آمد و مقادیر متغیرهای پاسخ در نقطه بهینه زمان خشک کردن، ضریب پخش رطوبت مؤثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل برای خشک کردن پسته با خشک کن مایکروویو بسترسیال به ترتیب ۲/۶۷۷ ساعت، 5.179×10^{-1} مترمربع بر ثانیه، ۱/۱۸/۴۱ و ۰/۷۱۰۹ کیلووات ساعت محاسبه شد.

کلید واژگان: بهینه‌سازی، پسته، چروکیدگی، انرژی مصرفی کل

* مسئول مکاتبات: amirireza@basu.ac.ir

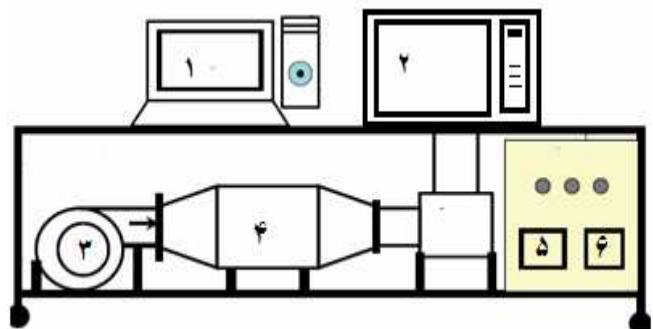
۱- مقدمه

در طول ۵۰ سال اخیر تولید پسته در ایران به طرز چشمگیری افزایش پیدا کرده و هم اکنون در حدود ۲۵۷۹۲۵ هکتار از اراضی کشور زیر کشت این محصول است و سالانه ۴۷۲۰۹۷ تن پسته تولید می‌شود. ایران مهم‌ترین صادرکننده پسته است به طوری که ۱۳۰۱۳۷ تن صادرات دارد [۱]. یکی از مهمترین مراحل پس از برداشت و فرآوری پسته، فرآیند خشک کردن آن است. انتخاب نوع خشک‌کن به عواملی مانند شرایط منطقه‌ای، مقدار محصول، وارپته، منابع انرژی موجود، شرایط اقتصادی، الگوهای بازار، زمان در دسترس برای خشک کردن محصول، قیمت اولیه به ازای هر تن از ظرفیت خشک‌کن، مصرف انرژی به ازای کیلوگرم آبی که دفع شده است، هزینه‌های نگهداری و آسانی کار بستگی دارد [۲]. امواج مایکروویو دارای فرکانس ۳۰۰-۳۰۰۰۰۰ مگاهرتز و طول موج ۱-۰/۰۰۱ متر در هوا می‌باشند. این امواج در ماده غذایی نفوذ کرده و باعث گرمایش می‌شود. مواد غذایی دارای مولکول‌های قطبی مانند آب هستند. این مولکول‌ها عموماً دارای جهت‌گیری تصادفی می‌باشند. در گستره فرکانس مایکروویو، چرخش دو قطبی مولکول‌های آب بر اثرات حرارتی غالب است. تغییر قطبیت میدان الکتریکی موجب چرخش دو قطبی مولکول‌های آب می‌شود. این چرخش مولکول‌ها منجر به ایجاد اصطکاک با محیط اطراف و تولید گرما می‌شود. مهم‌ترین اصل مورد توجه در فرآیند خشک کردن، افزایش سرعت آن تا حدی است که با اطمینان نسبت به اقتصادی بودن فرآیند، محصولی با کیفیت حاصل گردد. بررسی میزان و نحوه خشک شدن بر اساس کاربرد شرایط گوناگون در مقیاس کوچک قبل از طرح و اجرا در کارخانه امری ضروری می‌باشد. عوامل مؤثر در سرعت خشک شدن در خشک‌کن مایکروویو بسترسیمال شامل خصوصیات فیزیکی هوا، ویژگی‌های فیزیکی محصول و توان مایکروویو می‌باشد. چروکیدگی یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی نامطلوب در ساختار بافت گیاهی در طول خشک کردن است. در طی خشک کردن مواد غذایی، چروکیدگی به طور مداوم اتفاق می‌افتد و خصوصیات فیزیکی ماده و خصوصیات ترموفیزیکی از جمله پدیده‌های انتقال جرم و گرما را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین چروکیدگی هم روی بافت و هم روی کیفیت محصول تأثیرگذار است [۳].

بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرآیند به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل افزایش بازدهی فرآیندهای حرارتی به شمار می‌رود. پیدا کردن روابط بین عوامل موثر و محصول نهایی برای محققین بسیار ارزشمند است. هر چند برخی روش‌های عددی تا حدی توانسته‌اند در حل پیچیدگی رفتارهای غیرخطی برخی مسائل کارگشا باشند. به دلیل یک سری نقاط ضعف این روش‌های عددی، محققین بر روی روش‌های دیگر آماری متمرکز شده‌اند [۴]. از متداول‌ترین روش‌های بهینه‌سازی می‌توان به روش شبکه عصبی مصنوعی، بهینه‌سازی ریاضی و روش سطح پاسخ اشاره کرد. از معایب روش شبکه عصبی مصنوعی می‌توان به وابسته بودن دقت نتایج به اندازه مجموعه آموزشی، مشکل بودن آموزش شبکه و نیاز به تعداد داده‌های ورودی زیاد اشاره کرد [۵]. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که برای فرآیندهای گسترش، بهبود و بهینه‌سازی مفید بوده و می‌تواند با کمترین منابع و داده‌های کمی، با طرح آزمایشی مناسب، همزمان بهینه چندین متغیر را تعیین کند. هنگامی که عوامل و روابط زیادی روی متغیر پاسخ تأثیر داشته باشند، طرح سطح پاسخ یکی از ابزارهای موثر برای بهینه‌سازی فرآیند می‌باشد [۶]. عمده‌ترین کاربرد روش بهینه‌سازی سطح پاسخ (RSM¹) در صنعت به-ویژه در جاهایی است که چندین متغیر ورودی، اثر بالقوه روی اندازه عملکرد یا مشخصه‌هایی کیفی محصول و یا فرآیند دارند. این اندازه عملکرد یا مشخصه‌های کیفی، پاسخ نامیده می‌شوند. اکثر کاربردهای واقعی RSM بیشتر از یک پاسخ دارند. متغیرهای ورودی گاهی متغیرهای مستقل نامیده می‌شوند و موضوعی هستند که توسط دانشمندان و یا مهندسين، کنترل شده تا برای یک آزمون و یا آزمایش پیشنهاد شوند. مزیت اصلی RSM کاهش تعداد تکرار آزمایش‌ها برای ارزیابی پارامترهای چندگانه و روابط متقابل آنهاست. بنابراین به طور کلی اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- محاسبه پارامترهای ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی کل و چروکیدگی مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسیمال و ۲- بهینه‌سازی پارامترهای خشک کردن پسته در روش ترکیبی مایکروویو بسترسیمال به کمک روش سطح پاسخ.

۲- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها یک خشک‌کن میکروویو بسترسیال در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا ساخته شد (شکل ۱). خشک‌کن شامل یک دمنده سانتریفیوژ، موتور الکتریکی، المنت گرم‌کننده هوا (۹ المنت)، لوله‌های رابط برای جریان و انتقال هوا، محفظه استوانه‌ای خشک‌کن، میکروویو، اینورتر برای تنظیم سرعت چرخش دمنده و سیستم تنظیم دمای هوای ورودی بود. با تنظیم هر یک از متغیرهای ورودی، آزمایش‌ها در سطوح دمایی، سرعت هوای دمنده و توان‌های میکروویو مورد نظر انجام شد (شکل ۱).



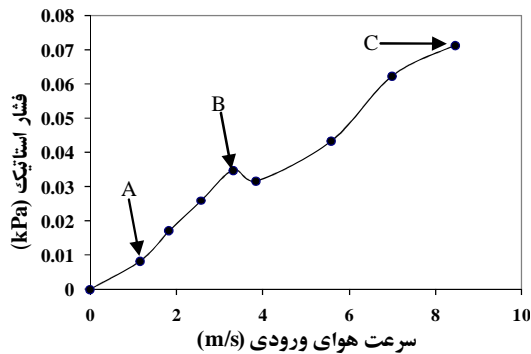
شکل ۱ شکل شماتیک خشک‌کن میکروویو بسترسیال (۱- رایانه، ۲- میکروویو، ۳- دمنده سانتریفیوژ، ۴- محفظه المنت‌ها، ۵- اینورتر و ۶- ترموستات)

برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها در حین مراحل خشک‌کردن از یک ترازوی دیجیتال AND GF-6000، ساخت ژاپن با درجه تفکیک ۰/۰۱ گرم استفاده شد. از یک ترموستات آتیین ساخت ایران که با ترموکوپل نوع k کار می‌کرد، برای تنظیم دمای هوای ورودی استفاده شد. برای انجام آزمایش‌ها از میکروویو پاناسونیک مدل NN-ST757W ساخت چین با حداکثر توان ۱۱۰۰ وات و با درجه تفکیک ۱۱۰ وات استفاده شد. این میکروویو قابلیت تنظیم توان در سطوح ۱۱۰، ۲۲۰ و ۳۳۰ تا ۱۱۰۰ وات را داشت.

برای تعیین رطوبت اولیه مغز پسته، سه نمونه‌ی ۱۴ گرمی در آون در دمای 103 ± 2 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شده و بعد از بیرون آوردن نمونه، بلافاصله نمونه‌ها را وزن کرده و وزن ثانویه آنها به دست آمد و رطوبت اولیه مغز پسته بر مبنای وزن خشک محاسبه شد [V].

برای اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی (بستر ثابت، بستر نیمه‌سیال و بسترسیال) و به دست آوردن رابطه سرعت

هوای خروجی و افت فشار استاتیک پسته در محفظه خشک‌کن، از سرعت‌سنج توربینی Lutron-YK,80AM ساخت تایوان با درجه تفکیک ۰/۰۱ m/s استفاده شد. برای اندازه‌گیری فشار از فشارسنج ST-8897 ساخت چین با درجه تفکیک ۰/۰۱ kPa استفاده شد. سرعت هوای خروجی و فشار ستون پسته به طور همزمان با افزایش تدریجی فرکانس موتور دمنده از صفر ثبت شدند و نمودار فشار استاتیک در مقابل سرعت هوا به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۲ منحنی مشخصه سیال سازی مغز پسته (رقم اکبری) در خشک‌کن میکروویو بسترسیال (A بستر ثابت، B حداقل سیال سازی و C بستر سیال)

با تنظیم فرکانس اینورتر، سرعت هوای ورودی (بستر ثابت، بسترنیمه‌سیال و بسترسیال) تنظیم شد، به این صورت که برای پسته رقم اکبری فرکانس‌های ۳، ۹ و ۱۶ هرتز به ترتیب برای سرعت‌های هوای ۱/۱۶، ۳/۳۲ و ۸/۴۸ متر بر ثانیه برای بستر ثابت، بسترنیمه‌سیال و بسترسیال محاسبه شد.

برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از قانون دوم فیک استفاده شد. با فرض این که ضریب پخش رطوبت مؤثر ثابت و چروکیدگی قابل صرف نظر کردن باشد و توزیع رطوبت در جرم ماده به صورت یکنواخت باشد، مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)$$

که در آن n تعداد جملات خشک شدن یعنی ۱، ۲، ۳، ...، r شعاع هندسی پسته (m) است. M ، M_e و M_0 به ترتیب رطوبت نمونه در هر زمان، تعادلی و اولیه بر مبنای خشک

استفاده از روابط ۵، ۶ و ۷ محاسبه شد:

$$E_m = W \times t_1$$

$$E_f = \frac{(T_{in} - T_{am})Q t_2}{V_h \times 3.6 \times 10^6} (C_{pa} + C_{pv} h_a)$$

$$E_t = E_m + E_f$$

که در رابطه‌های فوق E_m انرژی مصرفی کل مایکروویو (kWh)، t_1 زمان روشن بودن مایکروویو (ساعت)، W توان مایکروویو (W)، E_f انرژی مصرفی کل خشک‌کن بسترسیال (kWh)، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای هوای ورودی به داخل محفظه خشک‌کن و دمای هوای محیط (درجه سلسیوس)، V_h حجم مخصوص هوا (مترمکعب بر کیلوگرم)، Q دبی هوای ورودی به محفظه خشک‌کن (مترمکعب بر ثانیه)، t_2 زمان کل استفاده از خشک‌کن بسترسیال (ثانیه)، C_{pa} و C_{pv} به ترتیب ظرفیت گرمای ویژه بخار و هوا (با مقدار $1004/16$ و $1828/8$ ژول بر کیلوگرم درجه سلسیوس)، h_a رطوبت مطلق هوا (کیلوگرم بخار بر کیلوگرم هوای خشک) و E_t انرژی مصرفی کل خشک‌کن مایکروویو بسترسیال (kWh) است.

بهینه‌سازی خشک‌کردن مغز پسته با خشک‌کن مایکروویو بسترسیال با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ۷ انجام شد. پارامترهای ورودی به نرم‌افزار عبارتند از: دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و توان مایکروویو و پارامترهای وابسته عبارتند از: زمان خشک‌کردن، ضریب پخش مؤثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل. متغیرها و سطوح کدبندی شده آنها و تعداد آزمایش‌ها برای خشک‌کن مایکروویو بسترسیال در جداول ۱ و ۲ آمده است.

هستند. MR نسبت رطوبت، t زمان خشک‌شدن (ثانیه) و D_{eff} ضریب پخش رطوبت مؤثر (m^2/s) است.

برای محاسبه چروکیدگی در ابتدا و انتهای هر آزمایش قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتال (Groz EDF-6) ساخت آمریکا اندازه‌گیری شد و از معادله (۲) قطر میانگین هندسی محاسبه شد [۸].

$$D = \sqrt[3]{A \times B \times C}$$

که در آن D قطر میانگین هندسی (m) و A ، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک بر حسب متر می‌باشد. حجم پسته قبل از خشک‌کردن (حجم اولیه) از معادله (۳) به دست آمد.

$$V_o = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

برای محاسبه درصد چروکیدگی پسته از معادله (۴) استفاده شد:

$$SK = \left(\frac{V_o - V}{V_o}\right) \times 100$$

که SK درصد چروکیدگی، V_o و V حجم پسته (مترمکعب) به ترتیب قبل و بعد از خشک کردن است.

انرژی کل مورد نیاز یک دستگاه خشک‌کن برای عملیات خشک‌کردن را انرژی مصرفی می‌گویند که واحد آن بر حسب کیلووات ساعت می‌باشد. برای طراحی و ارزیابی خشک‌کن‌ها میزان انرژی مصرفی بسیار اهمیت دارد. انرژی مصرفی کل خشک‌کن مایکروویو بسترسیال از مجموع انرژی صرف شده از تابش مایکروویو و انرژی صرف شده در بخش جابه‌جایی محاسبه شد. انرژی مصرفی کل برای تمامی آزمایش‌ها با

جدول ۱ سطوح کدبندی شده پیشینه، متوسط و کمینه متغیرهای مستقل در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال

متغیر	نماد	سطوح کدبندی شده متغیر	
		۰	۱
دمای هوای ورودی (°C)	T	۴۵	۵۵
سرعت هوای ورودی (m/s)	V	۳/۳۲	۸/۴۸
توان مایکروویو (W)	W	۳۳۰	۴۴۰

جدول ۲ نقشه طرح مرکب مرکزی آزمایش‌های فرآیند خشک‌کردن مغز پسته برای خشک‌کن مایکروویو بسترسیال در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت

مقادیر حقیقی (کد) هر متغیر مستقل (ورودی)				
شماره آزمایش	دمای هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	توان مایکروویو (W)	تکرار
۱	۳۵(-۱)	۳/۳۲(۰)	۳۳۰(۰)	۱
۲	۴۵(۰)	۱/۱۶(-۱)	۳۳۰(۰)	۱
۳	۴۵(۰)	۳/۳۲(۰)	۳۳۰(۰)	۶
۴	۵۵(۱)	۳/۳۲(۰)	۳۳۰(۰)	۱
۵	۵۵(۱)	۸/۴۸(۱)	۴۴۰(۱)	۱
۶	۳۵(-۱)	۱/۱۶(-۱)	۴۴۰(۱)	۱
۷	۴۵(۰)	۳/۳۲(۰)	۴۴۰(۱)	۱
۸	۳۵(-۱)	۱/۱۶(-۱)	۲۲۰(-۱)	۱
۹	۳۵(-۱)	۸/۴۸(۱)	۲۲۰(-۱)	۱
۱۰	۴۵(۰)	۳/۳۲(۰)	۲۲۰(-۱)	۱
۱۱	۵۵(۱)	۸/۴۸(۱)	۲۲۰(-۱)	۱
۱۲	۴۵(۰)	۸/۴۸(۱)	۳۳۰(۰)	۱
۱۳	۳۵(-۱)	۸/۴۸(۱)	۴۴۰(۱)	۱
۱۴	۵۵(۱)	۱/۱۶(-۱)	۲۲۰(-۱)	۱
۱۵	۵۵(۱)	۱/۱۶(-۱)	۴۴۰(۱)	۱

۳- نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه واریانس جهت بررسی اثر دمای هوا، سرعت هوا و توان مایکروویو بر ضریب پخش-رطوبت موثر، چروکیدگی، زمان خشک‌شدن و انرژی مصرفی کل مغز پسته را در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال، اثر دمای هوا (در سطح احتمال ۱٪) و توان مایکروویو (در سطح احتمال ۵٪) بر زمان خشک‌شدن معنی‌دار می‌باشند. در شکل ۳ تأثیر پارامترهای دمای هوا، توان مایکروویو و سرعت هوا بر زمان خشک‌کردن در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال مشاهده می‌شود.

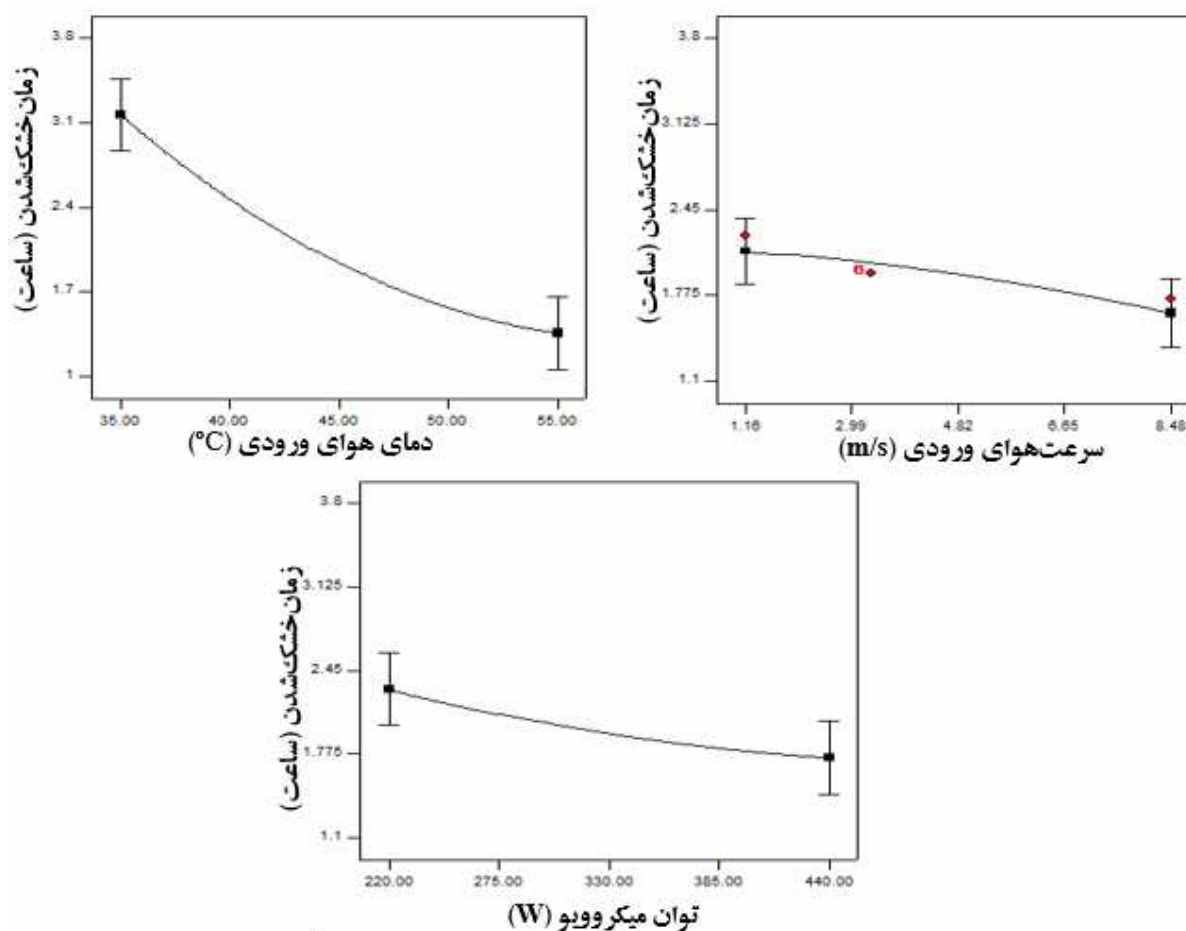
بهینه‌سازی خشک‌کردن مغز پسته با خشک‌کن مایکروویو بسترسیال برای رسیدن به کمترین مقدار چروکیدگی، انرژی مصرفی کل و زمان خشک‌کردن و بیشترین مقدار ضریب پخش-رطوبت موثر انجام شد.

در این مطالعه برای بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن مغز پسته رقم اکبری با خشک‌کن مایکروویو بسترسیال برای مقادیر چروکیدگی (به عنوان شاخص کیفیت) ضریب وزنی سه در نظر گرفته شد تا محصول خشک‌شده از بازار پسندی مطلوبی برخوردار باشد. بعد از تعیین اهداف و میزان اهمیت برای پارامترهای پاسخ، برای این که بتوان نتایج را به اهداف مورد نظر نزدیک کرد، تعداد تیمارها توسط روش سطح پاسخ پیشنهاد شد.

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس برای تغییرات پارامترهای مختلف در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال

F-Value				
منابع تغییرات	زمان خشک کردن (h)	ضریب پخش رطوبت موثر (m ² /s)	چروکیدگی (%)	انرژی مصرفی کل (kWh)
A(دمای هوا)	۶۰/۶۸**	125/6958**	۴۳/۸۲**	۱۷/۵۲**
B(سرعت هوا)	۰/۵۹	7/652943**	۵/۵۰*	۱۷/۵۲
C(توان مایکروویو)	۳/۸۵*	20/7632**	۱/۴۰	۶/۸۱*
A×B	۰/۰۸۰	0/019161	۰/۰۱۵	۰/۴۱
A×C	۱/۴۶	0/350839	۰/۰۹۴	۲/۸۱
B×C	۰/۷۱	0/169859	۲/۱۵	۱/۰۵
A ²	۰/۲۷	0/484939	۰/۸۵	۳/۳۰
B ²	۴/۶	1/409859	۱/۱۰	۲۲/۲۰**
C ²	۰/۷۵	1/904443	۱/۷۷۰×۱۰ ^{-۳}	۰/۹۸

** معنی داری در سطح احتمال ۰٫۰۱، * معنی داری در سطح احتمال ۰٫۰۵



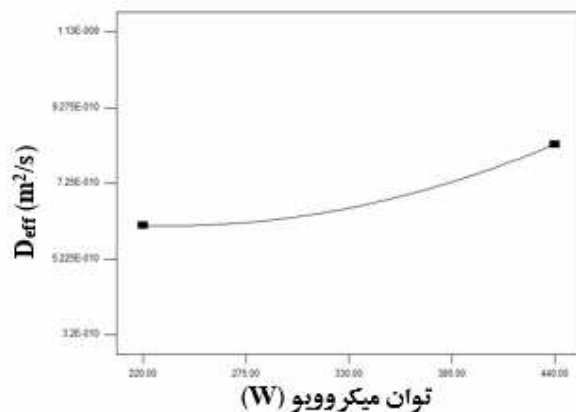
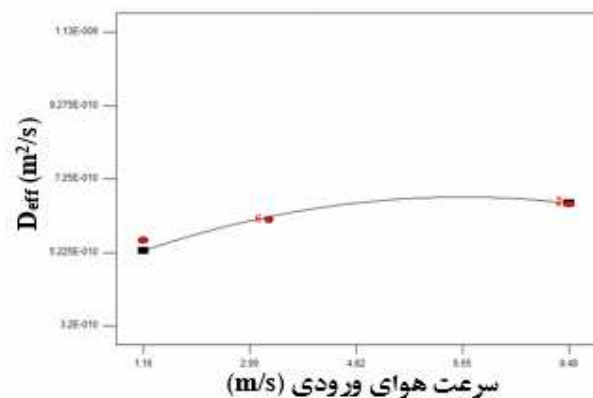
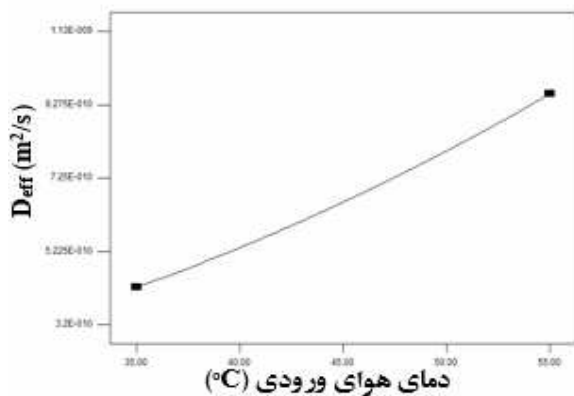
شکل ۳ تأثیر پارامتر دما، سرعت هوا و توان مایکروویو بر زمان خشک شدن مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال

کردن (۳/۸۳ ساعت) مربوط به دمای ۳۵ درجه سلسیوس، توان ۲۲۰ وات و سرعت هوای ۳/۳۲ متربرثانیه بود. در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال با افزایش دمای هوا و توان مایکروویو،

در خشک‌کن مایکروویو بسترسیال، کمترین زمان خشک کردن (۱/۲ ساعت) مربوط به دمای ۵۵ درجه سلسیوس، توان ۴۴۰ وات و سرعت هوای ۸/۴۸ متربرثانیه و بیشترین زمان خشک-

[۸] برای آلبالو با خشک کن مایکروویو-خلاء در محدوده توان مایکروویو ۳۶۰ تا ۱۲۰۰ وات و محدوده فشار خلاء ۲۰۰ تا ۸۰۰ میلی بار، ضریب پخش رطوبت موثر $۳/۲۱ \times 10^{-9}$ تا $۲۰/۰۰ \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه را گزارش کردند. نتایج جدول ۳ نشان داد دمای هوا، سرعت هوا و توان مایکروویو در سطح ۱٪ بر ضریب پخش رطوبت موثر مغز پسته معنی دار است. شکل ۴ تاثیر این پارامترها را بر ضریب پخش رطوبت موثر نشان می‌دهد. افزایش دمای هوا، توان مایکروویو و سرعت هوا باعث افزایش ضریب پخش رطوبت موثر نمونه‌های پسته شد. تجزیه و تحلیل نمودارها نشان داد در خشک‌کن مایکروویو بسترسیتال با کاهش دمای هوا، توان مایکروویو و سرعت هوا، ضریب پخش رطوبت موثر کاهش پیدا کرد. افزایش دمای هوا، توان مایکروویو و سرعت هوا به محفظه خشک‌کن باعث انتقال گرما و انتقال جرم بیشتری شده و کاهش رطوبت شدیدتر است [۹، ۱۲، ۱۳].

انرژی بیشتری برای انتقال رطوبت به سطح محصول بکار رفت و همچنین سرعت هوای ورودی در ابتدای فرآیند، به علت افزایش ضریب جابجایی و کاهش فشار بخار و دور کردن رطوبت از اطراف نمونه‌ها، باعث کاهش زمان خشک‌کردن شد. متولی و همکاران [۹] در خشک کردن آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلاء، قادری و همکاران [۱۰] در خشک‌کردن آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلاء و گازر و مینایی [۱۱] در خشک‌کردن پسته با روش لایه نازک به نتایج مشابه رسیدند. کمترین و بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در نمونه‌های خشک‌شده مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسیتال، به ترتیب $۲/۷۰ \times 10^{-10}$ و $۱/۳۲ \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بود. برای خشک‌کن مایکروویو بسترسیتال، بیشترین مقدار در دمای هوای ۵۵ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۴۴۰ وات با سرعت هوای ۳/۳۲ متربرثانیه و کمترین مقدار در دمای هوای ۳۵ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۲۲۰ وات با سرعت هوای ۳/۳۲ متربرثانیه به دست آمد. متولی و همکاران



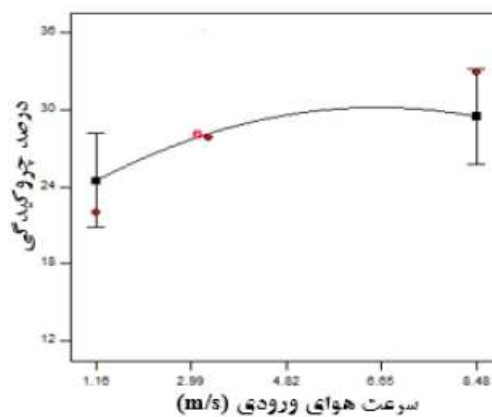
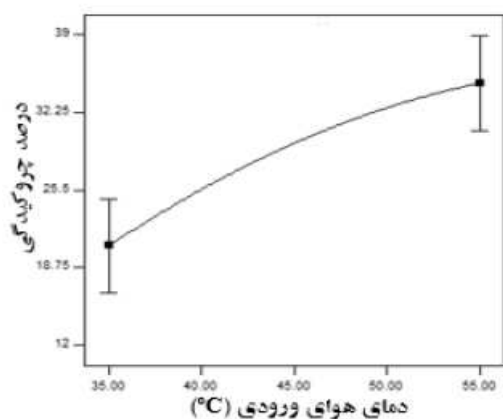
شکل ۴ اثر پارامترهای مختلف مستقل بر ضریب پخش رطوبت موثر در خشک‌کن مایکروویو بسترسیتال

۱۲/۰۱ درصد تا ۳۵/۴۳ درصد به دست آمد. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای هوای ۵۵ درجه سلسیوس، توان

نتایج نشان داد با افزایش دمای هوا و سرعت هوا، چروکیدگی نیز افزایش یافت. بیشترین و کمترین مقدار چروکیدگی بین

اعمال گردیده است. این کاهش تنش باعث چروکیدگی بافت تشکیل‌دهنده ماده می‌گردد. با افزایش دمای هوا و سرعت‌هوا، مقدار چروکیدگی افزایش می‌یابد که این امر به علت وابسته بودن چروکیدگی به رطوبت می‌باشد، به طوری که با افزایش سرعت و دمای هوا، محصول، رطوبت خود را سریعتر از دست می‌دهد و تبخیر رطوبت موجب چروکیدگی محصول می‌شود. زیرا طی فرآیند خشک‌شدن، آب بین سلولی از محصول جدا شده و هوا جایگزین آن می‌شود و باعث تنش در ساختار سلول می‌شود، در نتیجه بافت محصول قادر به نگهداری شبکه ساختمانی نمی‌باشد و ساختمان بیرونی سلول فرو می‌ریزد و چروکیدگی ایجاد می‌شود [۸، ۱۴].

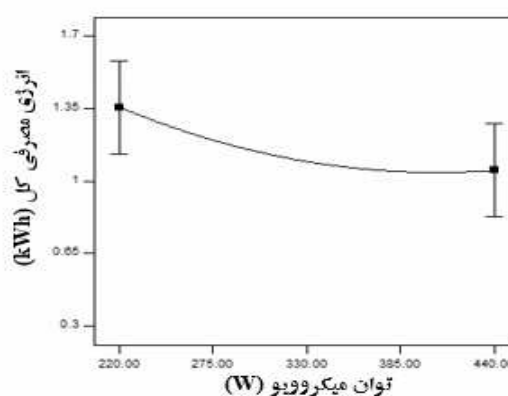
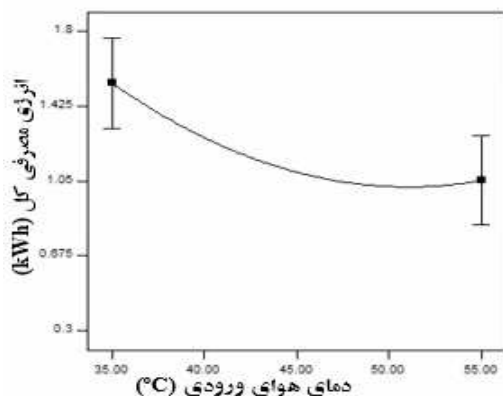
مایکروویو ۴۴۰ وات و سرعت هوای ۸/۴۸ متربرثانیه و کمترین مقدار چروکیدگی در دمای هوای ۳۵ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۴۴۰ وات و سرعت هوای ۱/۱۶ متربرثانیه اتفاق افتاد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف خشک‌کردن (دمای هوا، سرعت هوا و توان مایکروویو) بر چروکیدگی نمونه‌های مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسپال نشان داد که اثر دمای هوا در سطح ۱٪ و اثر سرعت هوا در سطح ۵٪ بر میزان چروکیدگی معنی‌دار می‌باشد (جدول ۳). شکل ۵ تغییرات چروکیدگی در برابر دما و سرعت هوا در خشک‌کن مایکروویو بسترسپال را نشان می‌دهد. در طول فرآیند خشک‌شدن، خروج آب از سلول باعث کاهش تنشی می‌گردد که از طرف مایع بر دیواره سلول



شکل ۵ تأثیر دمای هوا و سرعت هوا بر چروکیدگی نمونه‌های مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسپال

مجدور سرعت هوا در سطح ۱٪، توان مایکروویو در سطح ۵٪ و اثر مجدور سرعت در سطح ۱٪ بر میزان انرژی مصرفی کل معنی‌دار می‌باشند (جدول ۳). در شکل ۶ اثر دمای هوا، سرعت هوا و توان مایکروویو بر انرژی مصرفی کل آورده شده است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف خشک‌کردن (دمای هوا، سرعت هوا و توان مایکروویو) بر انرژی مصرفی کل نمونه‌های مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسپال نشان داد که اثر دمای هوا و



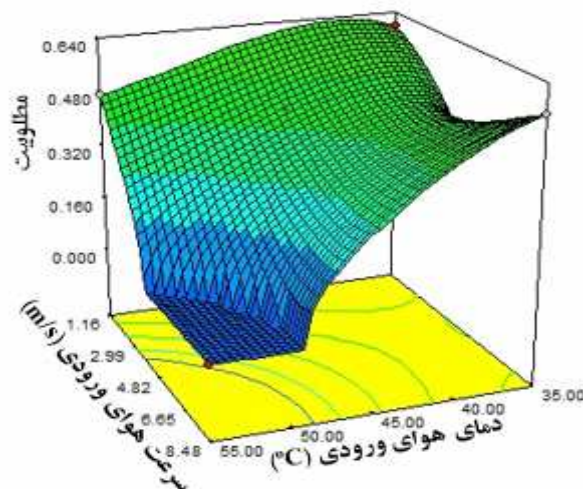
شکل ۶ اثر دمای هوا و توان مایکروویو بر انرژی مصرفی کل خشک‌شدن مغز پسته در خشک‌کن مایکروویو بسترسپال

ترتیب ۲/۶۷۷ ساعت، $m^2/s \times 10^{-10}$ ۵/۱۷/۴۱، ۱۸/۴۱٪ و 0.7109 kWh ، در دمای هوای ۳۸/۴۸ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۴۴۰ وات و سرعت هوای ۱/۱۶ متر بر ثانیه پیشنهاد شد. مقدار دمای هوا تأثیر مثبتی بر ضریب پخش رطوبت موثر دارد یعنی با افزایش دمای هوا مقدار ضریب پخش رطوبت موثر نیز افزایش می‌یابد ولی به علت اثر منفی آن بر میزان چروکیدگی، مقدار کمتر آن (۳۸/۴۸) در نظر گرفته شد تا نمونه‌های پسته از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار باشند. مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در این دما تقریباً در حد متوسط قرار دارد که این نشان‌دهنده اهمیت کیفیت محصول می‌باشد. مقدار کم سرعت هوا نیز به این علت می‌باشد که سرعت هوا بر میزان چروکیدگی اثر منفی دارد. مقدار توان مایکروویو در حداکثر خود پیشنهاد داده شده است که این امر به علت کاهش زمان خشک‌کردن و اثر مثبت آن بر ضریب پخش موثر و انرژی مصرفی کل و معنی‌دار نشدن این پارامتر بر چروکیدگی می‌باشد. کارگزاری همکاران [۱۶] برای بهینه‌سازی خشک‌کردن اسبزی هویج، با استفاده از روش سطح پاسخ مقدار کمینه دما (30°C) را پیشنهاد دادند. شکل ۷ نمونه‌ای از نمودار مطلوبیت برای سطوح بهینه را نشان می‌دهد.

انرژی مصرفی کل، تابع عوامل مختلفی مانند سرعت هوا، گرمای نهان تبخیر آب، دمای هوا، گرمای ویژه هوا و دمای هوای ورودی می‌باشد. در دمای هوا و توان مایکروویو بیشتر، آب آزاد محصول سریع‌تر تبخیر شده و زمان خشک‌شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در اثر کاهش زمان خشک‌شدن، انرژی مصرفی کل کاهش می‌یابد. خفایه و همکاران [۱۲] در خشک‌کردن لایه‌های هویج با خشک‌کن مایکروویو و حاضر وظیفه و همکاران [۱۵] در خشک‌کردن برگه‌های سیب با خشک‌کن مایکروویو- جریان هوای گرم دریافتند با افزایش توان مایکروویو انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. در حالت کلی با افزایش دمای هوا و توان مایکروویو در سرعت هوای ثابت، انرژی مصرفی کل کاهش یافت.

۳-۱- بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن مغز پسته

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۴ برای خشک‌کن مایکروویو بسترسیمال آورده شده است. از میان ۱۰ تیماری که نرم-افزار پیشنهاد داده است تیماری که به هدف مورد نظر یعنی کمترین زمان خشک‌کردن، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل و بیشترین ضریب پخش رطوبت موثر نزدیک‌تر بود (مطلوبیت بیشتر)، انتخاب شد. نتایج برای خشک‌کن مایکروویو بسترسیمال برای به دست آوردن مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ زمان خشک‌کردن، ضریب پخش رطوبت موثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل به



شکل ۷ منحنی مطلوبیت (سطح بهینه) در توان ۴۲۳/۰۳ وات در دمای هوا و سرعت‌های مختلف هوا در خشک‌کن مایکروویو بسترسیمال

رخ می‌دهد. با توجه به سایر متغیرهای مستقل و وابسته و ترسیم نمودارهای مشابه برای آنها، نتایج بهینه‌یابی حاصله در جدول ۴ ارائه شده است.

شاخص مطلوبیت برای تمام متغیرهای وابسته ترسیم می‌شود و نقاط بهینه فرآیند در بیشترین مقادیر آن حاصل می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۷ می‌توان دریافت که بیشترین شاخص مطلوبیت در دما و سرعت هوای کمتر

جدول ۴ نتایج بهینه سازی فرآیند خشک کردن مغز پسته با خشک کن مایکروویو بسترسیال

شماره آزمایش	دمای هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	توان مایکروویو (W)	زمان خشک کردن (h)	ضریب پخش رطوبت موثر (m ² /s)	چروکیدگی (%)	انرژی مصرفی کل (kWh)	شاخص مطلوبیت
۱	۳۹/۱۵	۱/۱۶	۴۴۰	۲/۵۸۱	$۵/۳۴ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱۹/۰۸	۰/۶۶۶۳	۰/۶۳۰
۲	۳۹	۱/۱۶	۴۴۰	۲/۶۰۱	$۵/۳۰ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱۸/۹۴	۰/۶۷۵۶	۰/۶۳۰
۳	۳۹/۳۹	۱/۱۶	۴۳۹/۵۷	۲/۵۴۸	$۵/۱۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱۹/۳۱	۰/۶۵۱۷	۰/۶۳۰
۴	۳۹/۰۸	۱/۱۶	۴۳۹/۵۷	۲/۵۹۱	$۵/۳۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱۹/۰۱	۰/۶۷۰۰	۰/۶۳۰
۵	۳۸/۴۵	۱/۱۶	۴۴۰	۲/۶۷۷	$۵/۱۷ \times ۱۰^{-۱۰}$	۱۸/۴۱	۰/۷۱۰۹	۰/۶۳۰
۶	۳۵	۸/۴۸	۳۹۴/۳۲	۲/۵۲۳	$۵/۰۰ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲۱/۹۳	۰/۹۴۹۲	۰/۵۶۰
۷	۳۵	۸/۴۸	۳۹۶/۹۷	۲/۵۱۷	$۵/۰۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲۲	۰/۹۴۹۷	۰/۵۶۰
۸	۳۵/۰۷	۸/۴۸	۳۹۵/۴۹	۲/۵۱۰۹	$۵/۰۴ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲۲/۰۴	۰/۹۴۴۴	۰/۵۶۰
۹	۳۵	۸/۴۲	۴۲۰/۰۷	۲/۴۷۹	$۵/۴۶ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲۲/۵۴	۰/۹۷۹۳	۰/۵۶۰
۱۰	۳۶/۱۲	۸/۴۸	۳۰۳/۴۴	۲/۶۲۶	$۴/۲۰ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲۰/۹۹	۰/۹۴۵۶	۰/۵۴۲

۴- نتیجه گیری

از بین متغیرهای مستقل، اثر دمای هوا بر همه متغیرهای پاسخ (زمان خشک کردن، ضریب پخش رطوبت موثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل) نمونه های مغز پسته در خشک کن مایکروویو بسترسیال معنی دار بود. کمترین و بیشترین مقدار زمان خشک کردن، ضریب پخش رطوبت موثر، چروکیدگی و انرژی مصرفی کل مغز پسته در خشک کن مایکروویو بسترسیال به ترتیب بین ۱/۲ تا ۳/۸۳ ساعت، $۲/۷۰ \times ۱۰^{-۱۰}$ تا $۱/۳۲ \times ۱۰^{-۹}$ مترمربع بر ثانیه، ۱۲/۰۱ تا ۳۵/۴۳ درصد و ۰/۳۳۷ تا ۱/۶۳ کیلووات ساعت به دست آمد. نقطه بهینه برای پارامترهای مستقل برای فرآیند خشک کردن مغز پسته رقم اکبری در دمای هوای ۳۸/۴۸ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۱۶ متر بر ثانیه و توان مایکروویو ۴۴۰ وات و مقادیر بهینه متغیرهای پاسخ برای زمان خشک کردن ۲/۶۷۷ ساعت، ضریب پخش رطوبت موثر $۵/۱۷ \times ۱۰^{-۱۰}$ مترمربع بر ثانیه، چروکیدگی ۱۸/۴۱٪ و انرژی مصرفی کل ۰/۷۱۰۹ kWh محاسبه شد.

۵- منابع

- [3] Tavakolipour, H. (2009). Drying Principles of Food and Agricultural Crops. Second Press. Ayiizh Publications. 328 Pages.
- [4] Abbasi Suraki, A., Sharifzade, F., Tavakkol Afshari, R., Majnoun Hosseini, N. and Gazor, HR. (2010). Optimization of processing parameters of soybean seeds dried in a constant-bed dryer using Response Surface Methodology. Journal of Agricultural Science and Technology, 12: 409-423.
- [5] Khana, T. (1990). Encyclopedia of Medicinal Plants. Rostamkhani Publication, Tehran, Iran.
- [6] Amouzegar, P., Abdul Khalil, H.P.S., Salamatinia, B., Zuhairi Abdullah, A. and Essam, A.M. (2010). Optimization of bioresource material from oil palm trunk core drying using microwave radiation; a response surface methodology application. Journal of Bioresource Technology, 101: 8396-8401.
- [7] Kashaninejad, M and Tabil, L.G. (2009). Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. 90: 104-109.
- [8] Momenzadeh, L. (2010). Experimental and Theoretical Investigation of Shelled Corn and Green Pea Drying in a Microwave Assisted Fluidized Bed. MSc Thesis, Shiraz University.
- [9] Motevali, A., Minaee, S., and Ghaderi, A. (2010). Evaluation of drying process of sour cherry in microwave- vacuum dryer. Iranian Journal of Biosystem Engineering, 2: 161-168.
- [1] F. A. O., (2011) "Statistics". Available at: www.FAO.org.
- [2] Zomorodian, A. (2008). Drying of Seeds (Theory and Practical Principles). Second Press. Author: Pabis. Agricultural Sciences Publications. Tehran. 444 Pages.

- [14] Madioli, J., Sghaier, J., Lecomte, D. and Sammouda, H. (2012). Determination of porosity change from shrinkage u_j during drying of food material. *Food and Bioproducts Processing*, 90: 43-51.
- [15] Hazervazifeh, A., Nikbakht, A. M., Ahmadi Moghadam, P., and Foj Lali, M. (2012). Effects of Microwave Power, Air Velocity and Air Temperature Evaluation on Energy Consumption Rate, Consumed Time and Quality of Dried Apple Layers using Microwave- Hot Air Flow. 7th national Symposium of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Shiraz University.
- [16] Kargozari, M., Emam Jome, Z., Moeini, S. (2011). Optimization of osmotic drying of carrot using response surface methodology. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 6: 215-224.
- [10] Ghaderi, A. Abbasi, S. Motevali, A. and Minaei, S. Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) in a microwave-vacuum dryer. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 2: 55-65.
- [11] Gazor, H.R. and Minaee, S. (2005). Influence of temperature and air velocity on drying time and quality parameters of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Drying Technology*, 23: 2463-2475.
- [12] Khafafeh, H., Banakar, A., and Motevali, A. (2012). Evaluation of energy consumption, specific energy and thermal efficiency of carrot layers in microwave dryer. 7th National Symposium of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Shiraz University.
- [13] Flores, M.J.P., Febles, V.G., Perez, J.J.C., Dominguez, G.C., Mendez, J.V.M., Gonzalez, E.P. and Lopez, G.F.G. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38: 64-71.

Determination of optimized condition of pistachio drying process in a microwave fluidized bed dryer

*Zarrin-Nezhad, M.¹, Amiri Chayjan R.²

1. MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: 93/1/17 Accepted: 93/6/29)

In this research the effect of different drying conditions of microwave fluidized bed (inlet air temperature, inlet air velocity and microwave power) on drying time, effective moisture diffusivity, shrinkage and total energy consumption of pistachio kernel was studied. Data analysis and optimization of drying process of pistachio were conducted by response surface method and central composite design. Input (independent) parameters were: inlet air temperature, inlet air velocity and microwave power. Dependent (output or response) variables were: drying time, effective moisture diffusivity, shrinkage and total energy consumption. The primary moisture content of pistachio kernels has been determined 0.569 (d.b.). Drying of the kernels was performed at three levels of air velocity (1.16, 3.32 and 8.48 m/s), three levels of input air temperature (40, 55 and 70°C) and three levels of microwave power (220, 330 and 440W). The obtained effective drying time, moisture diffusivity, shrinkage and total energy consumption of pistachio ranged between 1.2 to 3.83 h, 2.7×10^{-10} to 1.32×10^{-09} m²/s, 12.01% to 35.43% and 0.337 to 1.63 kWh, respectively. The optimum point occurred at air temperature of 38.48°C, air velocity of 1.16 m/s and microwave power of 440 W. Response variable values for drying of Akbari cultivar of pistachio with fluidized bed microwave dryer at this point were drying time of 2.677 h, effective moisture diffusivity of 5.179×10^{-10} , shrinkage percent of 18.41% and total energy consumption of 0.7109 kWh.

Keywords: Drying, Optimization, Pistachio, Shrinkage, Total energy consumption.

* Corresponding Author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir