

بررسی و بهینه‌یابی خشک کردن تمشک و انرژی مصرفی آن در روش خشک کردن ترکیبی بسترسیال - مایکروویو با کمک روش سطح پاسخ

قاسم یوسفی^۱ - زهرا امام جمعه^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۷

چکیده

در این مطالعه، اثر پنج فاکتور شامل توان مایکروویو، دمای هوا، سرعت جریان هوا، زمان شروع مایکروویو و مقدار ماده بر روی زمان و انرژی لازم برای خشک کردن تمشک سیاه تا محتوای رطوبت ۵۰ درصد بر مبنای خشک در یک خشک‌کن ترکیبی بستر سیال - مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت. طرح آزمایشی شامل استفاده از روش آماری سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی بود. برای هر پاسخ از آنالیز رگرسیون خطی - چندگانه استفاده گردید و مدل‌های چند جمله‌ای درجه دوم به دست آمد. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) برای بررسی کفایت و دقت برازش مدل انجام شد. با مدل تجربی بدست آمده ارتباط بین متغیرها و پاسخ‌های مورد مطالعه توسط روش سطح پاسخ تشخیص داده شد. ضرایب همبستگی مدل‌های رگرسیون برای زمان خشک کردن و انرژی مصرفی به ترتیب ۰/۹۶۴ و ۰/۹۷۰ بود. شرایط بهینه خشک کردن شامل: توان مایکروویو ۶۰۰ وات، دمای هوا ۸۵°C، سرعت جریان هوا ۱۵ متر بر ثانیه، زمان شروع مایکروویو از لحظه‌ای که محتوای رطوبتی ۳۴۴ درصد کاهش یافته و مقدار ماده ۷۳ گرم تعیین گردید که تحت این شرایط زمان و انرژی مصرفی به ترتیب ۵۲/۶۶ دقیقه و ۶۵/۲ کیلوژول توسط مدل پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که زمان و انرژی مصرفی با افزایش دما، توان و مدت مایکروویو و کاهش سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد. در این رابطه نمودار سینتیک خشک شدن نمونه‌ها تحت شرایط ذکر شده رسم گردید که نشان داد با افزایش دما از ۵۵ به ۸۵°C زمان خشک کردن ۷۶٪ می‌یابد و مایکروویو این زمان را ۳۰ تا ۸۰٪ کاهش می‌دهد

واژه‌های کلیدی: تمشک، خشک کردن، روش سطح پاسخ، انرژی، مایکروویو

مقدمه

باشد (Tulio et al., 2008). خشک کردن مواد غذایی، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری آنهاست. طی این فرایند، حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم صورت می‌گیرد. در اثر کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی امکان فساد میکروبی از بین می‌رود و سرعت دیگر واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی نیز به مقدار قابل توجهی کم می‌شود (Fellows, 1990). خشک کردن یکی از دشوارترین عملیات فرآوری مواد غذایی محسوب می‌شود که عمدتاً به دلیل ایجاد تغییرات نامطلوب در کیفیت محصولات طی خشک کردن با روش‌های معمولی با هوای داغ باعث آسیب جدی به محصول خشک شده می‌شود (Lurie et al, & Moreira et al, 2000). (1996).

از معایب اصلی خشک کردن با هوای گرم، بهره‌وری کم انرژی و مدت زمان طولانی خشک کردن بخصوص در طول دوره سرعت نزولی می‌باشد. در حال حاضر بسیاری از محصولات کشاورزی و غذایی با استفاده خشک‌کن‌های ترکیبی با هوای داغ فرایند می‌شوند

تمشک (*Rubus idaeus*) درختچه‌ای از خانواده *Rosaceae* و تیره *Idaeobatus* که به دو صورت وحشی یا اصلاح شده در جنگل‌های شمال کشور، دامنه‌های شمالی و جنوبی البرز و نواحی غرب کشور فراوان است. این میوه بومی آمریکا می‌باشد ولی امروزه در اکثر نقاط معتدله دنیا تولید می‌شود. تمشک با طعم و مزه بی‌نظیر حاوی مقادیر بالای ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مثل آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها و ترکیبات فنولی می‌باشد که می‌تواند در برابر رادیکال‌های آزاد مقاومت ایجاد کند و نقش بسزایی در کاهش انواع سرطان‌ها، بیماری‌های قلبی و بسیاری از بیماری‌های مزمن داشته

۱، ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(Email: emamj@ut.ac.ir)

* - نویسنده مسئول:

بطوریکه امروزه جهت جلوگیری از کاهش کیفیت محصولات خشک شده و برای افزایش سرعت پردازش حرارتی، استفاده از مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی رواج پیدا کرده است (Li et al, 2007). حرارت‌دهی و خشک کردن با استفاده از پرتوهای مایکروویو و رادیویی متفاوت از خشک کردن به روش‌های رایج است. روش‌های رایج تابع گرادیان دمای موجود بین سطح و داخل ماده غذایی هستند در حالی‌که روش حرارت‌دهی و تولید حرارت در مایکروویو و امواج رادیویی تابع گرادیان دما نیست. حرارت‌دهی با استفاده از مایکروویو و امواج رادیویی برای افزایش کارایی و سرعت فرایند خشک کردن می‌باشد که در اکثر موارد به همراه هوای داغ به کار می‌رود (Feng et al, 2000 & Mujumdar, 1998). خشک کردن کامل غذاهای مرطوب بوسیله مایکروویو غالباً غیراقتصادی است. بطوریکه هزینه خشک کردن کامل آنها ۱۰ برابر هزینه خشک کردن به روش متداول است، و همچنین امکان پخت فرآورده غذایی در خشک کردن کامل با مایکروویو وجود دارد (عسکری، ۲۰۰۸).

خشک‌کن‌های بسترسیال از رایج‌ترین سامانه‌هایی هستند که در صنعت برای خشک کردن محصولات گرانولی، دانه ای و ذره‌ای و برای کاهش رطوبت موادی که رطوبت آنها در خشک‌کن‌های دیگر به حد نهایی کاهش نیافته، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان روش‌های جدید خشک کردن، روش بسترسیال از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (Ullmann, 2003 & Van der Hoef et al, 2008). یکنواختی توزیع رطوبت در کل بستر، درجه‌ی بالای انتقال جرم و حرارت بین هوای گرم و ذرات، اختلاط مناسب و انتقال آسان ذرات، از جمله مزایای استفاده از خشک‌کن‌های بستر سیال است. یکی از مهم‌ترین معایب سیستم‌های خشک‌کن بسترسیال اتلاف انرژی آن می‌باشد که در مقایسه با سایر روش‌های خشک کردن بسیار چشم‌گیر می‌باشد بطوریکه برای اکثر محصولات خشک شده راندمان انرژی کمتر از ۱۲٪ بوده است (Kunni et al, 1991 & Nikulshin, 2002). بنابراین توجه به بهینه‌سازی و مدل‌سازی بازده مصرف انرژی هر یک از قسمت‌های خشک‌کن بخصوص دمنده و گرم‌کننده‌ها می‌تواند هزینه‌های انرژی مصرفی را کاهش دهد. در این نوع خشک‌کن‌ها به علت بالا بودن سرعت جریان هوا جهت شناورسازی، هوا بدون اشباع شدن از رطوبت از خشک‌کن خارج می‌شود. در انتهای مراحل خشک کردن (بخصوص در مرحله سرعت نزولی) به علت کاهش نرخ خروج رطوبت از ماده غذایی زمان فرایند طولانی‌تر می‌گردد و به موازات آن انرژی بیشتری مصرف می‌شود. بنابراین استفاده از سیستم ترکیبی بستر سیال- مایکروویو در انتهای فرایند خشک کردن می‌تواند یکی از موثرترین روش‌ها برای کاهش مصرف انرژی باشد (عسکری، ۲۰۰۸). تاکنون محققین زیادی در زمینه خشک کردن بستر سیال، استفاده از مایکروویو و محاسبه انرژی

مصرفی در فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی کار کرده‌اند. Brod و همکاران (۱۹۹۸) از یک سامانه بسترسیال ارتعاشی برای خشک کردن برش‌های هویج استفاده کردند و گزارش کردند که در مقایسه با روش هوای داغ، در دمای ۵۰ تا ۶۰°C میزان زمان صرف شده برای خشک کردن برش‌های هویج در روش بستر سیال کمتر است. Boudhriou و همکاران (۲۰۰۳) خشک کردن موز با هوای داغ را به سه روش خشک‌کن هوای داغ، مایکروویو و ترکیب دو روش بررسی نمودند. استفاده از مایکروویو در انتهای فرایند، زمان خشک کردن را تا ۶۴ درصد کاهش داد. قارچ‌های دکمه‌ای توسط Giri و همکاران (۲۰۰۷) تحت یک سیستم اصلاح شده مایکروویو - خلاء با انرژی خروجی صفر تا ۶۰۰ وات خشک شدند. اثر متغیرهای خشک کردن مثل انرژی مایکروویو، فشار سیستم، ضخامت محصول بر روی منحنی‌های خشک بررسی شدند. خشک‌کن هوای داغ تحت درجه حرارت‌های مختلف برای مقایسه با خشک‌کن ترکیبی استفاده شد. خشک‌کن هوای داغ - مایکروویو ۷۰ تا ۹۰ درصد زمان خشک کردن را کاهش داد. تاثیر سه روش خشک کردن هوای داغ، تحت خلاء و روش ترکیبی مایکروویو همراه با هوای داغ بر روی سینتیک خشک کردن، بافت، رنگ، ظرفیت و سرعت بازجذب آب ورقه‌های قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) توسط شمائی و امام جمعه (۱۳۸۹) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که انرژی مایکروویو زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد و می‌تواند ساختار، رنگ و بافت نهایی را متعادل کند.

Nazghelichi و همکاران (۲۰۱۱) توانستند با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و ژنتیک الگوریتم و روش سطح پاسخ (RSM) خشک کردن تکه‌های هویج را در خشک‌کن بستر سیال از لحاظ مصرف انرژی و انرژی هدر رفته^۱ بهینه‌سازی نمایند. همچنین طی تحقیقی میزان راندمان انرژی را در سه خشک‌کن سینی دار، بستر سیال و پمپ حرارتی در دمای ۴۵-۵۵°C با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه را برای خشک کردن تکه‌های آلو محاسبه گردید که به ترتیب ۳۸-۴۰، ۲۲-۲۴ و ۷۵-۷۲ درصد بودند (Hepbasli et al, 2010).

هدف از انجام این تحقیق، بررسی سسینتیک خشک شدن تمشک تحت شرایط مختلف در یک خشک‌کن ترکیبی بسترسیال- مایکروویو و بهینه‌سازی انرژی لازم جهت خشک کردن آن می‌باشد

مواد و روش‌ها

مواد

تمشک سیاه (*Rabus fruticosus L*) از بازار محلی (در استان گیلان، ایران) تهیه گردید و در اسرع وقت در دمای ۴°C ذخیره گردید. برای انجام آزمایش‌ها، آنها را با آب شستشو و سطح آنها را با

مصرف کرده‌اند را محاسبه و با توجه به مشخص بودن توان مصرفی آنها کل انرژی صرف شده جهت خشک کردن طبق رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$W = (P_{Mw} \times t_{mw}) + (P_{Heater} \times t_{Heater}) + (P_{blower} \times t_{blower}) \quad (2)$$

که:

W: انرژی مصرفی بر حسب- ساعت

P: توان مصرفی بر حسب وات

t: مدت زمان استفاده هر یک از قسمت‌های خشک‌کن بر حسب ساعت

تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش سطح پاسخ^۱ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر توسط تعدادی از متغیرها تحت تاثیر قرار می‌گیرد. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه‌ی روش سطح پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند. مهم‌ترین مسئله این تحقیق بررسی آثار اصلی و متقابل فاکتورها بود، از این رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد در این مطالعه اثر متغیرهای مستقل شامل: توان مایکروویو (X_1)، دمای هوای ورودی (X_2)، سرعت جریان هوا (X_3)، زمان شروع اعمال مایکروویو بر حسب کاهش محتوای رطوبتی (X_4) و مقدار نمونه در بستر (X_5) در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت؛ در جدول ۱ متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آنها نشان داده شده است.

جدول ۱- متغیرهای فرایند خشک کردن و سطوح آنها در طرح مرکب مرکزی

سطوح متغیر	نماد	سطوح متغیر
۰ ۳۰۰ ۶۰۰	X_1	توان مایکروویو (وات)
۵۵ ۷۰ ۸۵	X_2	دمای هوا (سلسیوس)
۱۵ ۲۰ ۲۵	X_3	سرعت جریان هوا (متر در ثانیه)
۳۳۴ ۴۰۰ ۴۶۶	X_4	زمان شروع مایکروویو دهی بر حسب کاهش محتوای رطوبتی (درصد بر مبنای خشک)
۵۰ ۱۰۰ ۱۵۰	X_5	مقدار نمونه (گرم)

مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ عموماً رابطه‌ی درجه دوم می‌باشد. در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را بر روی هر متغیر جداگانه بیان می‌نماید، مدل چند متغیره به صورت معادله زیر می‌باشد.

کاغذ صافی خشک کرده، و سپس آنها را بر اساس اندازه، رنگ، استحکام و آسیب‌های فیزیکی از هم جدا گردیدند.

روش‌ها

خشک‌کن آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده

در این پژوهش از یک سیستم خشک‌کن ترکیبی بستر سیال- مایکروویو در مقیاس آزمایشگاهی که در تحقیقی دیگر برای محصولات ذره‌ای در گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده بود (عسکری ۲۰۰۶)، جهت خشک کردن تمشک‌ها استفاده گردید. از ویژگی‌های این سیستم قابلیت اندازه‌گیری و ثبت آنالین تغییرات وزن نمونه، دمای هوا و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی خشک‌کن، فشار هوا در ابتدا و انتهای بستر و سرعت هوا قبل و پس از بستر می‌باشد. به صورت کلی توزین ذراتی که در داخل هوا شناور هستند امکان‌پذیر نیست. بنابراین در خشک‌کن‌های بستر سیال که تابع چنین شرایطی هستند، روشی برای اندازه‌گیری وزن وجود ندارد و به تبع آن سامانه‌ای برای اندازه‌گیری پیش‌بینی نمی‌شود. برای غلبه بر این مشکل خشک‌کن مورد استفاده در این طرح در فاصله‌های زمانی مشخص، جریان هوای ورودی بسته شده و سپس وزن دقیق ثبت می‌گردد. محفظه خشک‌کن به شکل یک استوانه با ابعاد ۱۲×۴ اینچ از جنس پلکسی گلاس شفاف می‌باشد. نمونه‌ها طبق طرح آماری روش سطح پاسخ تا کاهش محتوای رطوبت از ۵±۵۶٪ به ۲±۵٪ بر مبنای خشک در آن خشک گردیدند و جهت اندازه‌گیری کاهش رطوبت و رسم منحنی سینتیک آنها، در فواصل زمانی (۵، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و مابقی هر ۳۰ دقیقه تا رسیدن به محتوای رطوبت مورد نظر) با دقت ۰/۰۱ گرم توزین گردیدند. برای محاسبه نسبت رطوبت در طول فرایند از رابطه (۱) استفاده شد.

$$MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (1)$$

که:

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)

M_t : محتوای رطوبت در هر لحظه از فرایند خشک کردن

(کیلوگرم ماده جامد / کیلوگرم آب)

M_0 : محتوای رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد / کیلوگرم آب)

M_e : محتوای رطوبت نهایی که ۵۰٪ می‌باشد (کیلوگرم ماده

جامد / کیلوگرم آب)

محاسبه انرژی مصرفی خشک‌کن بستر سیال- مایکروویو

برای محاسبه انرژی، زمان‌های صرف شده برای قسمت‌هایی از خشک‌کن (دمنده، گرم کننده، مایکروویو) که طی هر آزمایش انرژی

بررسی راحت‌تر تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل بر روی زمان خشک شدن، پلات‌های سطحی ترسیم شد. همان طور که در نمودار شکل ۱ مشخص است با افزایش دمای هوای ورودی و توان مایکروویو زمان لازم برای خشک شدن کاهش می‌یابد. همچنین هر چه مایکروویو در طول فرایند خشک کردن زودتر شروع شود این زمان بیشتر کاهش می‌یابد. کار انجام شده مشابهی که توسط کانتراس (۲۰۱۲) در مورد خشک کردن توت فرنگی با هوای گرم همراه مایکروویو صورت گرفته بیانگر تاثیر مثبت مایکروویو بر کاهش زمان لازم برای خشک کردن بوده است.

تاثیر سرعت جریان هوا بر زمان خشک کردن در محدوده ۱۵۰-۵۰ گرم نمونه در بستر در نمودار شکل C-۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان هوا از داخل بستر خشک‌کن تاثیر کمی در کاهش زمان خشک کردن در مقایسه با فاکتورهای دیگر دارد. بطور کلی عامل محدودکننده انتقال جرم را می‌توان به عامل درونی (ماده غذایی) و عامل بیرونی (سرعت جریان هوا، رطوبت هوا و...) تقسیم کرد. مقاومت داخلی در برابر انتقال رطوبت عامل مهم و کنترل کننده فرایند خارج شدن آب از نمونه‌ها می‌باشد و افزایش سرعت هوا بعنوان یکی از عوامل موثر در انتقال رطوبت در سیستم‌های خشک‌کن بستر سیال نمی‌تواند تاثیر چندانی در مقاومت داخلی و در نتیجه فرایند جدا شدن آب داشته باشد. منحنی خشک کردن نمونه‌های خشک شده با هوای داغ در سه دمای ۵۵، ۷۰ و ۸۵ درجه سلسیوس بدون مایکروویو و اعمال مایکروویو (۶۰۰ وات) از لحظه‌ای که محتوای رطوبت به مقدار ۳۳۴ و ۴۰۰ گرم رطوبت در گرم ماده خشک کاهش می‌یابد، مورد بررسی قرار گرفت. در این رابطه نمودار سینتیک خشک شدن نمونه‌ها تحت شرایط ذکر شده که در شکل ۲ نشان داده شده است رسم گردید. محتوای رطوبت اولیه تمشک تازه 56.0 ± 5 درصد گرم آب بر مبنای خشک بوده است که در نهایت رطوبت نهایی آنها را به 5.0 ± 0.2 درصد گرم آب بر مبنای خشک رسانیده شد. همان طور که در نمودار شکل ۲ مشاهده می‌شود مقدار رطوبت به طور مداوم طی زمان خشک کردن کاهش می‌یابد و زمان لازم برای خشک کردن در دماهای بالاتر کمتر می‌باشد، بطوریکه با افزایش دما از ۵۵ به ۷۰ و ۸۵ درجه سلسیوس، زمان لازم برای خشک کردن به ترتیب ۳۸ و ۷۶ درصد کاسته می‌شود. همان طور که در منحنی افت رطوبت مشاهده می‌شود شیب منحنی‌ها طی زمان تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد و این کاهش در مورد دماهای کمتر محسوس‌تر می‌باشد. این پدیده نشانگر این است که با تغییر شیب منحنی خشک شدن محصولات وارد مرحله خشک شدن با آهنگ نزولی می‌گردد. اگر منحنی سرعت کاهش رطوبت را طی زمان برای دماهای مختلف رسم گردد ما شاهد دو قسمت سرعت ثابت و سرعت نزولی هستیم که با افزایش دما از

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{55} X_5^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{15} X_1 X_5 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{25} X_2 X_5 + \beta_{34} X_3 X_4 + \beta_{35} X_3 X_5 + \beta_{45} X_4 X_5 \quad (3)$$

در معادله مذکور، Y پاسخ پیش بینی شده، β_0 ضریب ثابت، β_1 ، β_2 ، β_3 ، β_4 و β_5 ضرایب خطی، β_1^2 ، β_2^2 ، β_3^2 ، β_4^2 و β_5^2 اثرات مربعی و β_{12} ، β_{13} ، β_{14} ، β_{15} ، β_{23} ، β_{24} ، β_{25} ، β_{34} ، β_{35} و β_{45} اثرات متقابل می‌باشند. در این تحقیق از طرح کامپوزیت مرکزی^۱ با پنج متغیر مستقل شامل توان مایکروویو، دمای هوا، سرعت جریان هوا، زمان شروع مایکروویو و مقدار نمونه، در سه سطح، یک بلوک و ۱۰ تکرار در نقطه مرکزی طرح (برای محاسبه تکرار پذیری فرآیند) جهت بررسی تاثیر شرایط بر طول دوره خشک کردن و انرژی مصرفی و بهینه سازی فرآیندهای مذکور استفاده شد (جدول ۲) (Kargozari et al, 2010).

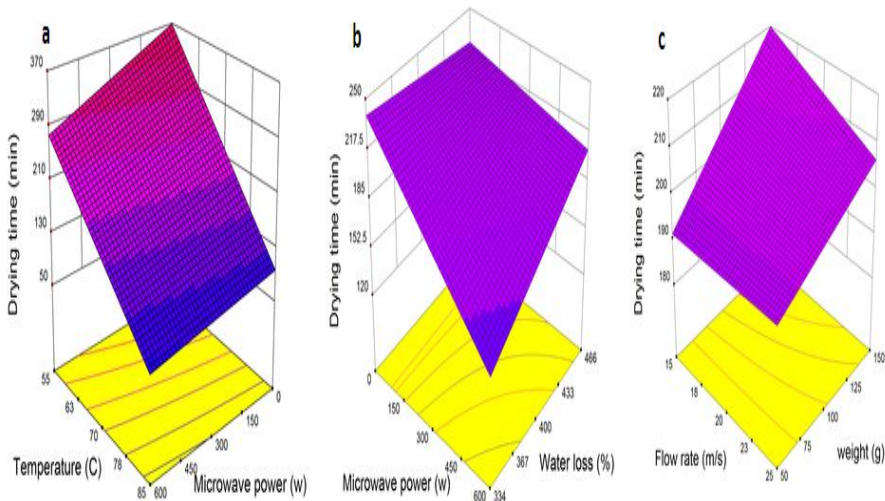
نتایج و بحث

پس از محاسبه زمان و انرژی مصرفی برای خشک کردن تمشک تا محتوای رطوبت ۵۰ درصد بر مبنای خشک در یک خشک‌کن ترکیبی بسترسیال - مایکروویو در مقیاس آزمایشگاهی، داده‌های به دست آمده را بوسیله طرح روش سطح پاسخ با پنج فاکتور توان مایکروویو (صفر، ۳۰۰ و ۶۰۰ وات)، دمای هوای ورودی به بستر (۲۵، ۷۰ و ۸۵ درجه سانتی‌گراد)، سرعت جریان هوا (۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه)، زمان شروع مایکروویو بر اساس کاهش محتوای رطوبت (۳۳۴، ۴۰۰ و ۴۶۶ درصد بر مبنای خشک) و مقدار نمونه‌ها در بستر (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم) تجزیه و تحلیل گردید و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۳ نیز نتایج آنالیز واریانس حاصل از بررسی متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته آورده شده است. طبق نتایج آنالیز واریانس مدل رگرسیون زمان لازم برای خشک کردن تا محتوای رطوبتی ۵۰ درصد بر مبنای خشک در سطح ۵٪ معنی‌دار، به صورت بدست آمده است:

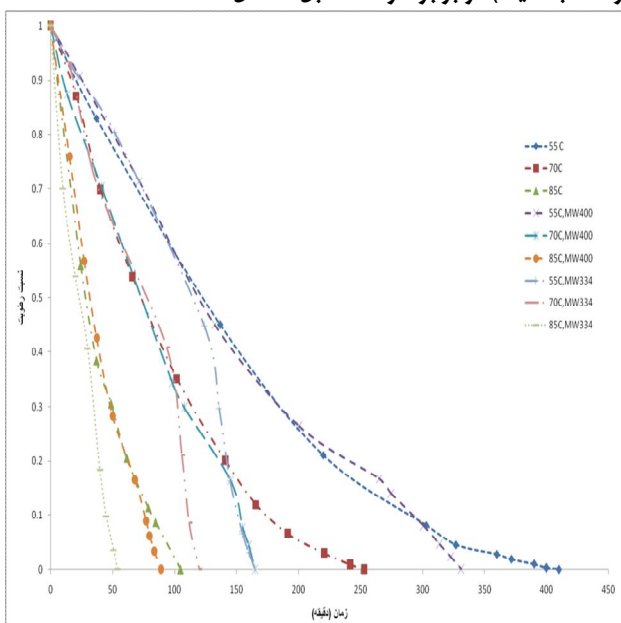
$$Y_{\text{drying time}} = 960.97 - 0.711X_1 - 35.25X_2 + 284.4X_4 + 2.67X_5 + 0.207X_2^2 + 0.0036X_1X_2 + 0.0998X_1X_4 \quad (4)$$

از تجزیه و تحلیل نتایج آمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر توان مایکروویو و دمای هوا در سطح $p < 0.001$ زمان اعمال مایکروویو در سطح $p < 0.01$ و مقدار ماده در بستر در سطح $p < 0.05$ بر روی زمان لازم جهت کاهش محتوای رطوبت به یک مقدار مشخص معنی‌دار بوده است در صورتی که تاثیر سرعت جریان هوا در محدوده مورد مطالعه در سطح $p < 0.05$ معنی‌دار نیست و ضریب همبستگی مدل رگرسیون زمان خشک کردن 0.964 بود. به منظور

قسمت سرعت نزولی کاسته می‌شود و بر قسمت سرعت ثابت افزوده می‌شود.



شکل ۱- نمودار سطحی و خطی زمان خشک شدن (بر حسب دقیقه) در برابر اثرات متقابل مستقل



شکل ۲- نمودار سینتیک خشک شدن تمشک در دماهای ۷۰، ۵۵ و ۸۵ درجه سانتیگراد و بدون و با اعمال مایکروویو (۶۰۰ وات) از لحظه‌ای که محتوای رطوبت به مقدار ۳۳۴ و ۴۰۰ درصد بر مبنای خشک کاهش یافت

و موجب آسیب دیدن ماده غذایی خواهد شد. بنابراین استفاده از دماهای بالا علاوه بر افزایش آسیب حرارتی به محصول، تاثیر زیادی در تشکیل لایه سخت دارد. در این حالت حرارت دهی دی‌الکتریک با توجه به ماهیت خاص خود که تنها توسط مواد جاذب (که مهم‌ترین آنها در مواد غذایی آب است) جذب شده و با تبدیل به انرژی حرارتی در داخل محصول، می‌تواند بر این مشکل غلبه کند (عسکری و همکاران ۲۰۰۶).

استفاده از مایکروویو می‌تواند سرعت خشک شدن نمونه‌ها را افزایش داده و زمان فرایند خشک کردن را کاهش دهد. استفاده از مایکروویو در یک دمای هوای مشخص موجب کاهش زمان فرایند بسته به دمای هوا، توان و زمان شروع مایکروویو دهی به ۳۰ تا ۸۰ درصد زمان خشک کردن با هوای داغ، شده‌است. تاثیر مایکروویو بر کاهش زمان فرایند در دماهای پایین‌تر بیشتر از دماهای بالاتر می‌باشد. نتایج حاصل از خشک کردن قارچ توسط Giri (۲۰۰۷) در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس نشان داد که استفاده از مایکروویو با توان ۶۰۰ وات زمان خشک کردن را ۷۰-۹۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین لیلا مومن زاده و همکاران (۲۰۱۱) خصوصیات خشک کردن ذرت پوست کنده را در سیستم خشک‌کن بستر سیال با استفاده از توان‌های مختلف مایکروویو در دماهای مختلف بررسی کردند. آنها بیان کردند که افزایش دما تنها ۵٪ زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد در صورتی که با استفاده از مایکروویو می‌توان تا ۵۰٪ این زمان را کاهش داد. همانگونه که در نمودار شکل ۲ مشاهده می‌شود با اعمال مایکروویو شیب منحنی کاهش محتوای رطوبت افزایش می‌یابد و زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد. علت افزایش سرعت خشک کردن در این مرحله مکانیسم خاص گرمادهی توسط مایکروویو است که به صورت حجمی بوده و منجر به افزایش سریع فشار بخار داخلی شده و باعث رانده شدن جریان مایع به طرف سطح محصول می‌شود. استفاده از مایکروویو در دماهای پایین در مقایسه با دماهای بالاتر در خشک کردن مواد غذایی، کارایی بیشتری دارد.

استفاده از هوای گرم‌تر موجب افزایش سرعت خشک شدن می‌شود، اما با توجه به ایجاد مقاومت حرارتی در نتیجه به وجود آمدن یک لایه سخت در سطح محصول استفاده از هوای گرم دارای محدودیت است

انرژی مصرفی

نتایج آنالیز واریانس مدل رگرسیون انرژی مصرفی برای خشک کردن تمشک در یک خشک‌کن بسترسیال تحت مایکروویو با توان ۹۰۰ وات، گرم‌کننده ۲۰۰۰ وات و دمنده ۵۵۰ وات با ضریب همبستگی ۰/۹۷۰ در جدول ۳ آمده است. مدل به دست آمده انرژی مصرفی در سطح ۵٪ معنی‌دار به قرار ذیل بوده است.

$$Y_{\text{Energy}} = 1087.81 - 0.84425 X_1 - 22.347 X_2 + 21.0334 X_3 + 323.212 X_4 - 9.5725 X_5 + 0.02223 X_5^2 + 0.00312 X_1 X_2 + 0.1252 X_1 X_4 + 0.00087 X_1 X_5 + 0.0746 X_2 X_5 - 0.4979 X_4 X_5 \quad (4)$$

انرژی و هزینه بالای آن یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که صنعت توجه زیادی به آن دارد. در صنعت خشک‌کار نیز قسمت عمده هزینه تولید مربوط به انرژی می‌باشد؛ لذا توجه به این قسمت و کاهش مصرف انرژی از طریق مختلف مانند: چرخش هوای گرم، استفاده از پیش تیمارهای مناسب جهت کاهش زمان فرایند، استفاده از روش‌ها و تکنولوژی‌های مناسب و ... در این راستا از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشخص است با افزایش توان مایکروویو و مدت استفاده از آن در طی فرایند خشک کردن می‌توان تا حد زیادی میزان مصرف انرژی را کاهش داد. همچنین افزایش دمای هوا نیز میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. استفاده از دماهای پایین‌تر به علت طولانی بودن زمان فرایند مناسب نیست، از طرفی استفاده از دماهای بالاتر نیز به علت حساس بودن ترکیبات فیتوکیماکی و مواد مغذی امکان پذیر نمی‌باشد. بدین منظور استفاده از مایکروویو با توجه به توان مصرفی کمتر آن در مقایسه با گرم‌کننده (۹۰۰ به ۲۰۰۰ وات)، موثر بودن آن به علت حجمی بودن تابش آن و تاثیر مخرب کمتر بر مواد مغذی می‌تواند در انتهای فرایند خشک کردن مناسب باشد. دمنده یکی از قسمت‌های پر مصرف انرژی خشک‌کن‌های بستر سیال می‌باشد که به علت اینکه بتواند مواد را در محفظه بصورت شناور نگاه دارد، انرژی زیادی مصرف می‌کند. بنابراین برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی بایستی تا حد ممکن از سرعت‌های کمتر و نزدیک به حداقل سرعت شناورسازی استفاده کرد. نتایج و مطالعات صورت گرفته در زمینه راندمان مصرف انرژی جهت خشک کردن مواد غذایی در خشک‌کن بستر سیال نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان هوا بیش از حداقل سرعت شناورسازی باعث کاهش راندمان مصرف انرژی می‌شود (Nikulshin., 2002). گزارشات Nazghelichi و همکاران (۲۰۱۱) بر روی خشک کردن تکه‌های هویج بیانگر همین موضوع می‌باشد. استفاده از مواد بیشتر در بستر به علت اینکه نسبت انرژی مصرفی را به مقدار ماده کاهش می‌دهد در نگاه اول مناسب به نظر می‌رسد ولی به علت تاثیر منفی بر کیفیت محصول تولیدی مناسب نمی‌باشد.

تعیین شرایط بهینه

کمینه نمودن زمان فرایند و انرژی مصرفی به عنوان اهداف مورد نظر آزمایشات در تجزیه و تحلیل‌های آماری مورد نظر قرار گرفته و بدین گونه شرایط برای انجام فرایند بهینه که از روش سطح پاسخ حاصل شده است، بدست آمد: توان مایکروویو ۶۰۰ وات، دمای هوای خشک‌کن ۸۵ درجه سلسیوس، سرعت هوا ۱۵ متر بر ثانیه، زمان شروع مایکروویو دهی زمانی که محتوای رطوبتی ۳۳۴ درصد بر حسب ماده خشک کاهش یافت و مقدار ماده ۷۳/۲۳ گرم. تحت این شرایط مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل برای زمان لازم برای خشک شدن و انرژی مصرفی به ترتیب ۵۲/۶۶ دقیقه و ۶۵/۲ کیلوژول بود. با توجه به پاسخی که توسط مدل و نقطه بهینه با ۳ تکرار مورد آزمون قرار گرفت تا از صحت شرایط پیش‌بینی شده توسط مدل اطمینان حاصل شود. نتایج بدست آمده از آزمون نقطه بهینه پیش‌بینی شده با مقدار پیش‌بینی شده توسط آن مقایسه گردید که حاکی از دقت بالای مدل در پیش‌بینی پاسخ‌ها بود (جدول ۴).

نتیجه گیری

در این تحقیق تمشک در شرایط مختلف در یک خشک‌کن ترکیبی بسترسیال - مایکروویو خشک شد و سینتیک افت رطوبت آنها بدست آمد. همچنین مدت زمان لازم و انرژی جهت خشک کردن آنها محاسبه شد و با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی مدل‌سازی گردید. برای بررسی کفایت و دقت برازش مدل آنالیز واریانس انجام شد. تجزیه واریانس و نمودارهای سطحی تاثیر فاکتورها را بر روی پاسخ‌ها نشان دادند که افزایش دمای هوای ورودی تاثیر مثبت در کاهش انرژی مصرفی و زمان فرایند دارد. همچنین استفاده از مایکروویو در انتهای فرایند خشک کردن بخصوص در توان‌های بالاتر و زمان‌های طولانی‌تر مفید می‌باشد. در این رابطه جهت بررسی بهتر تاثیر این عوامل بر زمان خشک شدن نمودار سینتیک آنها رسم گردید که نشان داد با افزایش دما از ۵۵ به ۸۵ °C زمان خشک کردن ۳۸ تا ۷۶٪ و استفاده از مایکروویو این زمان را ۳۰ تا ۸۰٪ کاهش می‌دهد و هر چه مدت اعمال مایکروویو بیشتر باشد این زمان بیشتر کاهش می‌یابد. با توجه به اهداف مورد نظر شرایط برای انجام آزمایش بهینه‌سازی گردید که شرایط بهینه شامل: دمای هوای ۸۵ درجه سلسیوس، سرعت هوا ۱۵ متر بر ثانیه، زمان شروع مایکروویو دهی زمانی که محتوای رطوبتی ۳۳۴ درصد بر حسب ماده خشک کاهش یافت و مقدار ماده ۷۳/۲۳ گرم بود. تحت این شرایط زمان لازم برای خشک شدن و انرژی مصرفی به ترتیب ۵۲/۶۶ دقیقه و ۶۵/۲ کیلوژول پیش‌بینی شد که جهت اطمینان از صحت شرایط، آزمایش در حالت بهینه سه مرتبه تکرار گردید.

جدول ۲- طرح کامپوزیت مرکزی و نتایج آزمون‌ها در نقاط مشخص شده

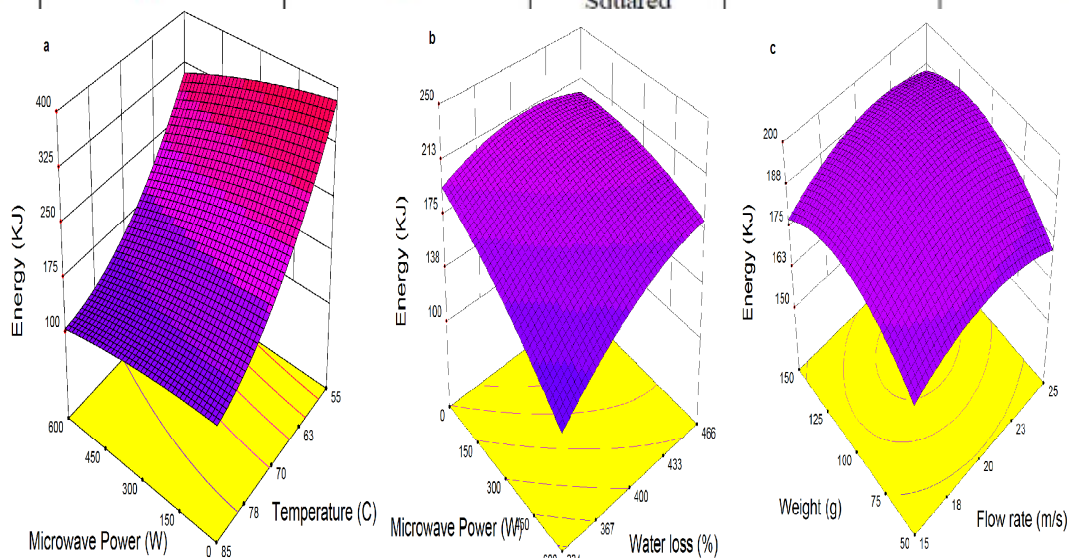
ردیف	توان مایکروویو (وات)	دمای هوا (سلسیوس)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	زمان شروع مایکروویو بر حسب کاهش محتوای رطوبت (درصد بر مبنای خشک)	مقدار نمونه (گرم)	زمان خشک شدن (دقیقه)	انرژی مصرفی (کیلوژول)
۱	۶۰۰	۵۵	۲۵	۴۶۶	۵۰	۶۶۲	۳۳۸
۲	-	۸۵	۲۵	۴۶۶	۱۵۰	۱۱۲	۱۲۷
۳	-	۸۵	۲۵	۳۳۴	۵۰	۲۴۴	۹۲
۴	-	۸۵	۱۵	۴۶۶	۵۰	۲۳۳	۹۷
۵	۳۰۰	۷۰	۱۵	۴۰۰	۱۰۰	۲۳۴	۲۰۵
۶	۶۰۰	۸۵	۱۵	۴۶۶	۵۰	۲۲۵	۹۱
۷	-	۸۵	۱۵	۴۶۶	۱۵۰	۸۰	۱۰۰
۸	۶۰۰	۵۵	۲۵	۴۶۶	۱۵۰	۲۰۶	۳۰۸
۹	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۱۱	۲۰۴
۱۰	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۲۰	۱۹۰
۱۱	-	۵۵	۱۵	۴۶۶	۱۵۰	۲۰۸	۳۷۰
۱۲	۳۰۰	۸۵	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۱۲۴	۹۳
۱۳	۶۰۰	۸۵	۱۵	۴۶۶	۱۵۰	۸۱	۹۶
۱۴	-	۵۵	۲۵	۴۶۶	۵۰	۶۶۴	۳۴۴
۱۵	۶۰۰	۸۵	۱۵	۳۳۴	۵۰	۱۴۷	۵۴
۱۶	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۵۳	۱۸۵
۱۷	-	۵۵	۱۵	۴۶۶	۵۰	۵۹۰	۳۵۰
۱۸	-	۸۵	۱۵	۳۳۴	۵۰	۲۴۵	۱۰۲
۱۹	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۶۶	۱۰۰	۲۲۵	۱۹۸
۲۰	۳۰۰	۷۰	۲۵	۴۰۰	۱۰۰	۲۱۴	۱۷۳
۲۱	-	۸۵	۲۵	۴۶۶	۱۵۰	۸۳	۹۴
۲۲	-	۵۵	۲۵	۴۶۶	۱۵۰	۲۲۵	۳۵۰
۲۳	-	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۷۴	۲۵۳
۲۴	۳۰۰	۷۰	۲۰	۳۳۴	۱۰۰	۲۰۱	۱۶۸
۲۵	۶۰۰	۸۵	۲۵	۴۶۶	۱۵۰	۷۶	۸۳
۲۶	۶۰۰	۵۵	۲۵	۳۳۴	۵۰	۴۷۵	۲۲۸
۲۷	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۵۰	۴۰۷	۱۷۳
۲۸	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۵۰	۱۵۴	۱۹۸
۲۹	-	۵۵	۲۵	۳۳۴	۵۰	۶۷۶	۳۵۰
۳۰	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۱۶	۱۹۸
۳۱	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۱۷	۱۹۰
۳۲	۶۰۰	۵۵	۲۵	۳۳۴	۱۵۰	۱۷۴	۲۴۷
۳۳	۳۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۳۰	۱۸۲
۳۴	۶۰۰	۵۵	۱۵	۴۶۶	۱۵۰	۲۰۳	۳۵۵
۳۵	۶۰۰	۷۰	۲۰	۴۰۰	۱۰۰	۱۴۷	۱۲۵
۳۶	۶۰۰	۸۵	۱۵	۳۳۴	۱۵۰	۶۷	۷۵
۳۷	۶۰۰	۸۵	۲۵	۳۳۴	۵۰	۱۷۵	۶۰
۳۸	-	۸۵	۲۵	۴۶۶	۵۰	۲۴۱	۹۱

خشک کردن و ... مانند استفاده ترکیبی از مایکروویو در خشک‌کن بسترسیال می‌توان به میزان زیادی در مصرف انرژی و زمان فرآیند صرفه‌جویی کرد.

نتایج این تحقیق نشان داد که در عملیات خشک کردن با دقت در انتخاب در نوع روش و تغییرات جزئی در طراحی سیستم خشک‌کن، تغییر در نوع حرارت‌دهی، چند مرحله‌ای کردن فرایند

جدول ۳- آنالیز آماری و تجزیه واریانس مربوط به زمان خشک شدن و انرژی مصرفی

	انرژی		زمان خشک کردن			انرژی		زمان خشک کردن	
	p-value	Coef	p-value	Coef		p-value	Coef	p-value	Coef
X ₁	-۳۰/۲۶	<./۰۰۰۱	-۰/۸۴	<./۰۰۰۱	X ₁ X ₂	۱۶/۲۲	-./۰۰۱۲	۰/۰۰۳	۰/۰۳۱۱
X ₂	-۱۲۰	<./۰۰۰۱	-۲۲/۳۴	<./۰۰۰۱	X ₁ X ₃	۰/۷۸	-./۸۶۴۵	۰/۰۰۱	۰/۷۳۰۷
X ₃	-۲/۹۷	۰/۵۰۵۲	۲۱/۰۳	۰/۰۲۱۱	X ₁ X ₄	۱۹/۹۰	-./۰۰۰۱	۰/۱۲۵	۰/۰۰۰۴
X ₄	۱۳/۴۴	-./۰۰۲۷	۳۲۲/۲۱	-./۰۰۳۳	X ₁ X ₅	-۱/۶۶	-./۷۱۷۸	۰/۰۰۱	۰/۰۴۴۶
X ₅	۱۰/۴۱	-./۰۲۴۶	-۹/۵۷	<./۰۰۰۱	X ₂ X ₃	۱/۲۲	-./۷۹۰۲	-./۰۱۴۵	۰/۰۹۱۵
X ₁ ^۲	-۵/۹۹	۰/۷۱۶۱	-./۰۰۰۱	۰/۵۳۷۴	X ₂ X ₄	-۵/۹۰	۰/۲۰۳	-./۰۸۲۸	۰/۱۹۵۲
X ₂ ^۲	۴۶/۵۱	-./۰۰۷۷	۰/۰۸۷	۰/۳۹۰۳	X ₂ X ₅	-۵/۴۷	-./۲۳۷۷	۰/۰۷۵	<./۰۰۰۱
X ₃ ^۲	-۵/۹۹	۰/۷۱۶۱	-./۰۰۲۵	۰/۹۷۸۱	X ₃ X ₄	-۲/۴۶	-./۵۹۰۶	-./۰۷۷۳	۰/۶۸۲۱
X ₄ ^۲	-۱۱/۹۹	۰/۴۶۸	-۲۶/۱۱	۰/۶۰۹۴	X ₃ X ₅	-۳/۹۱	-./۳۹۶۴	-./۰۰۴۳	۰/۰۹۱۸
X ₅ ^۲	-۹/۴۹	۰/۵۶۵۲	۰/۰۲۲	۰/۰۱۸۶	X ₄ X ₅	-۷/۰۳	-./۱۳۱۷	-./۰۴۹۸	۰/۰۱۲۳
Model	۱۹۴/۰۵	<./۰۰۰۱	۱۰۸۷/۸۱	<./۰۰۰۱	C.V. %	۱۳/۸۵		۱۲/۶۸	
Lack of Fit	-./۰۷۹		۰/۰۶۹		R-Squared	-./۸۷۰		۰/۹۶۴	
Mean	۲۵۴/۱۱		۲۰۲/۵۷		Adj R-Squared	-./۸۵۱		۰/۹۴۲	
Std. Dev.	۳۵/۲۰		۲۵/۶۹		Pred R-Squared	-./۸۹۸		۰/۸۸۰	



شکل ۳- نمودار سطحی و خطی انرژی مصرفی (بر حسب کیلوژول) در برابر اثرات متقابل مستقل

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از آزمون بهینه‌سازی شده و نتایج آماری

تیمار	توان مایکروویو (وات)	دمای هوا (سلسیوس)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	زمان شروع مایکروویو پودری بر حسب کاهش محتوای رطوبت (درصد بر مبنای خشک)	مقدار نمونه (گرم)	زمان خشک شدن (دقیقه)	انرژی (کیلوژول)
نقطه پیش بینی شده	۶۰۰	۸۵	۱۵	۳۳۴	۷۳	۵۲/۶۶	۶۵/۲
نقطه تجربی آزمون شده	۶۰۰	۸۵	۱۵	۳۳۴	۷۳	۵۲/۲۴ ± ۰/۹۱	۶۷/۱۶ ± ۱/۰۳

تشکر و قدردانی

تجهیزات و جناب آقای برخوردار به خاطر در اختیار دادن محصول باغ خود جهت انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

از مسئولین آزمایشگاه پدیده‌های انتقال گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی دانشگاه تهران به خاطر همکاری و در اختیار قرار دادن

منابع

- شمائی، س. ۱۳۸۸. پیش بینی خصوصیات کیفی زغال اخته خشک شده به روش ترکیبی اولتراسوند-اسمزی-مایکروویو با مدل سازی شبکه عصبی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- عسگری، غ. ر. ۱۳۸۸. مدل سازی فرآیندهای انتقال جرم و حرارت در قطعات مکعبی سیب حین خشک شدن در خشک کن ترکیبی بستر سیال-مایکروویو، پایان نامه دکتری، دانشگاه تهران.
- Askari, GR., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, SM. 2006. Effect of combined coating and microwave assisted hot-air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*. 12(1) : 39-46.
- Boudhriou, N., Giampaoli, P., and Bonazzi., C. 2003. Changes in aromatic components of banana during ripening and air-during. *U- Technol*. 36: 633-642.
- Brod, FPR., Alonso, LFT., Rosa, RHC., Minagava, FK., and Park, KJ. 1998. Carrot drying in a vibro-fluidized dryer. *Drying, proceeding of the 11th international drying symposium, Halkidiki, Greece*.
- Contreras, C., Martin-Esparza, M.E., Chiralt, A. and Martinez-Navarrete, N. 2012. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*. 88, 55-64.
- Fellows, P. 1990. *Food Processing Technology. Principles and Practice*, Ellis Horwood, New York.
- Feng, H., and Tang, J. 1998. Microwave finish drying of diced apple in a spouted bed. *Journal of Food science*. 4(63): 679-683.
- Giri, SK., and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convector hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*. 78 : 512-521.
- Hepbasli, A., Erbay, Z., Colak, N., Hancioglu, E., Icier, F. 2010. Exergetic performance assessment of three different food driers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 224, 1-12.
- Kargozari, M., Moini, S., Emam-Djomeh, Z. 2010. Prediction of some physical properties of osmodehydrated carrot cubes using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34, 1041-1063.
- Kunni, D. and O. Levenspiel. 1991. *Fluidization Engineering*. Stoneham-Butterworth Heineman, USA.
- Li, Y., Xu Shi-Ying, Da-Wen, S. 2007. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. *Journal of Food Engineering*. 83: 76-83.
- Lurie, S., and Nussiuitch, A. 1996. Compression characteristics, firmness and texture perception of the treated and unheated apples, *Int. Journal of Food science and Technology*. 31: 1-5.
- Momenzadeh, L., Zomorodian, A., and Mowla, D. 2011. Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network. *food and bioproducts processing*. 89: 15-21.
- Moreira, RM., Figueired, A., and Sereno, A. 2000. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*. 182 : 279-294.
- Mujumdar, AS. 2000. *Drying technology in agricultural and food science*. Publishers Inc. Plymouth, UK. 61-98.
- Nazghelichi, T., Aghbashlo, M., and Kianmehr, MH. 2011. Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Computers and Electronics in Agriculture*. 75: 84-91.
- Nikulshin.v. 2002. Exergy Efficiency calculation of energy intensive system , *Chemical engineering science.*, (2).
- Tulio, J.r., Reese, R.N., Wyzgoski, F.J., Rinaldi, P.L., Fu, R., Scheerens, J.C. and Miller, A.R. 2008. Cyanidin 3-rutinoside and cyanidin 3-xylosylrutinoside as primary phenolic antioxidants in black raspberry. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 56, 1880-1888.
- Ullmann, G. 2003. *Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 3rd Ed., Wiley-VCH. 14: 383-405.
- Van der Hoef, MA., Van Sint Annaland, M., Deen, NG., Kuipers, JAM. 2008. Numerical simulation of dense gas-solid fluidized beds: A multiscale modeling strategy. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 40, 47-70.



Evaluation and optimization drying raspberries and energy consumption in the combined Fluidized bed- Microwaves drying system via response surface methodology

G. Yousefi¹ - Z. Emam-Djomeh^{2*}

Received: 29-06-2013

Accepted: 16-04-2013

Abstract

The present research surveyed the effect of five factors including: microwaves power, air temperatures and its flow rates, microwaving time onset and amount of substances on the requested time and energy for combined fluidized bed- microwaves drying of black raspberry into 50% dry base wet content. Response surface methodology and Central composite was used as experimental design. Multiple linear regression was used for obtaining second polynomials models for each analyses followed by ANOVA analysis in order to confirming the adequacy and accuracy of resulted models. Using the empirical resulted model the relationship between variables and responses were determined via response surface method. Correlation coefficients of the regression models were 0.964 and 0.970 respectively for the drying time and energy consumption. The Optimized drying condition were including; 600 watts for microwaves power and microwaving onset from that time as the moisture content was 344% decreased, 73 g for amount of substances, and 85°C and 15 m.s⁻¹ for air temperatures and its flow rates respectively. Under mentioned conditions, the fitted model was predicted 52.66 Min and 65.2 KJ respectively for the requested drying time and energy consumption at combined drier. As a conclusion, the results showed that requested drying time and energy consumption were decreased with increasing of temperatures, microwaving time and its power, and decreasing of air flow rates. In this regard, the drying kinetics curve samples were drawn under the conditions listed that showed drying time is reduced to 76% with increasing temperature from 55 to 85 and use the microwave reduced drying time until 30 to 80%.

Keywords: Raspberry, Drying, Response Surface Methodology, Energy, Microwave.

1 and 2- M.Sc Student and Professors, Department of food science and Engineering, University of Tehran, Respectively (*- Corresponding Author Email: emamj@ut.ac.ir)