



انتخاب بهترین مدل سینتیکی در خشک کردن قارچ دکمه‌ای توسط سامانه مادون قرمز

فخرالدین صالحی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۲، علیرضا صادقی ماهونک^۲، امان محمد ضیائی فر^۲

^۱ دانش آموخته دکتری، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۲ دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۹

چکیده

سابقه و هدف: قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) حدود ۴۰ درصد از سهم بازار قارچ خوراکی را به خود اختصاص می‌دهد. این ماده غذایی با ارزش تغذیه‌ای بالا حاوی ۳۲/۵ درصد پروتئین، ۱/۶ درصد چربی، ۹/۲ درصد فیبر، ۷/۵ درصد خاکستر، ۶/۸ درصد رطوبت و ۴۲/۴ درصد کربوهیدرات بر اساس ماده خشک می‌باشد. قارچ دکمه‌ای محصولی با فسادپذیری بالا بوده و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد حداکثر ۸ روز ماندگاری دارد. در این پژوهش جهت افزایش زمان ماندگاری قارچ دکمه‌ای و تولید محصولی با کیفیت بالا از خشک‌کن مادون‌قرمز (IR) استفاده و سینتیک انتقال جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

مواد و روش‌ها: در پژوهش حاضر خشک‌شدن قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن مادون‌قرمز در توان‌های پرتودهی ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات و در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر بررسی شد. تأثیر توان لامپ و فاصله نمونه از منبع پرتودهی بر زمان و آهنگ خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. جهت مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن، ۹ مدل ریاضی شامل انتشار فیک، تقریب انتشار، پیچ، پیچ اصلاح‌شده، نیوتن، میدیلی، لگاریتمی، ورما و دوجمله‌ای بررسی و بهترین مدل با بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد انتخاب شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد تأثیر توان و فاصله لامپ پرتودهی بر فرآیند خشک‌شدن قارچ دکمه‌ای معنی‌دار می‌باشد. افزایش توان لامپ مادون‌قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات و کاهش فاصله لامپ پرتودهی از ۲۰ به ۵ سانتی‌متر، زمان خشک‌شدن قارچ دکمه‌ای را به ترتیب ۵۶/۷ و ۵۵/۳ درصد کاهش داد. بیشترین زمان خشک‌شدن (۱۹۰ دقیقه) مربوط به توان ۱۵۰ وات و فاصله ۲۰ سانتی‌متری لامپ بود. همچنین کمترین زمان خشک‌شدن مربوط به توان ۳۷۵ وات و فاصله ۵ سانتی‌متری لامپ با مدت‌زمان ثبت شده ۳۰ دقیقه بود. با افزایش توان لامپ و کاهش فاصله لامپ پرتودهی در فرآیند خشک‌شدن قارچ دکمه‌ای، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت روندی افزایشی داشت. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، ضریب نفوذ رطوبت (در فاصله ۵ سانتی‌متری از لامپ) از $3/8 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $11 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. با افزایش فاصله نمونه (از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر) از لامپ ۲۵۰ وات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای قارچ دکمه‌ای از $7 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $2/2 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: ضریب نفوذ مؤثر رطوبت قارچ دکمه‌ای بین $1/2 \times 10^{-9}$ تا 11×10^{-9} مترمربع بر ثانیه تعیین شد. در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن قارچ مدل پیچ همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

واژه‌های کلیدی: سینتیک خشک‌کردن، ضریب نفوذ مؤثر، مادون‌قرمز، مدل پیچ

* مسئول مکاتبه: F.Salehi@Basu.ac.ir

مقدمه

قارچ دکمه‌ای سفید (*Agaricus bisporus*) معروف‌ترین قارچ خوراکی در دنیا با بیشترین سطح زیر کشت در ایران و جهان است. اولین نژادهای اصلاح‌شده این قارچ یعنی دو نژاد U_1 و U_3 ، در حدود ۳۰ سال پیش در هلند از طریق دورگه‌گیری تولید و معرفی شدند. این نژادها منشأ اکثر ارقامی هستند که امروزه بطور تجاری در دنیا کشت و برداشت می‌شوند. قارچ‌ها پس از برداشت به دلیل عدم وجود کوتیکول، سرعت بالای تنفس، رطوبت زیاد و فعالیت آنزیمی شدید دارای ماندگاری کمتری نسبت به سایر سبزی‌ها بوده؛ بطوریکه بلافاصله پس از برداشت تغییر رنگ آن‌ها آغاز و به سرعت فاسد می‌شوند. لذا استفاده از روش‌های مختلف فرآوری جهت افزایش زمان ماندگاری این محصول ضروری بنظر می‌رسد. در این خصوص روش‌های مختلفی نظیر استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر تغییر یافته، انجماد، خشک‌کردن، تیمار با محلول‌های آبی حاوی ترکیبات مهارکننده فعالیت آنزیمی و آنزیم‌بری جهت نگهداری و افزایش زمان ماندگاری قارچ مورد بررسی قرار گرفت (۱، ۲). حذف آب و خشک‌کردن با استفاده از خشک‌کن‌های مختلف از قبیل خشک‌کن کابینتی، هوای داغ، انجمادی، بسترسپال و خورشیدی از معمول‌ترین روش‌های افزایش ماندگاری قارچ‌های صدفی محسوب می‌شود (۲، ۳، ۴).

امروزه در بین روش‌های مختلف خشک‌کردن از قبیل خشک‌کردن انجمادی، پفکی و ... استفاده از روش‌های ترکیبی مانند ریزموج، مادون‌قرمز، میدان الکتریکی همراه با هوای داغ جهت خشک‌کردن محصولات کشاورزی گسترش زیادی دارد (۵). طبق گزارش محققان خشک‌کن انجمادی روشی مناسبی جهت تولید محصولی با ساختمان متخلخل و باکیفیت بالا می‌باشد، اما گران‌قیمت بوده و برای هر محصولی

قابل استفاده نمی‌باشد. لذا بررسی و یافتن روش مناسب برای خشک‌کردن قارچ خوراکی برای تولید محصولی باکیفیت بالا ضروری می‌باشد.

خشک‌کردن به وسیله اشعه مادون‌قرمز بویژه به شکل لایه‌نازک روش مناسبی است. در این روش محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب حرارت را دریافت کرده، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد (۴، ۶، ۷). یکی دیگر از مزایای استفاده از اشعه مادون‌قرمز به حداقل رساندن ضایعات محصول است. همچنین اشعه مادون‌قرمز سبب ایجاد حرارت سریع و مستقیم بر روی محصول می‌شود. خشک‌کن‌های مادون‌قرمز علاوه بر تسریع فرآیند نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود از راندمان بالاتری برخوردارند. همچنین کیفیت محصولات خشک‌شده در روش مادون‌قرمز در مقایسه با روش هوای داغ بالاتر می‌باشد (۸، ۹، ۱۰). افضل و همکاران (۱۹۹۹) با بررسی مصرف انرژی و کیفیت جو خشک‌شده در دو خشک‌کن همرفتی و ترکیبی مادون‌قرمز و هوای داغ نشان دادند استفاده از اشعه مادون‌قرمز در خشک‌کن همرفتی به افزایش سرعت خشک شدن و کاهش قابل توجه انرژی مصرفی توسط خشک‌کن منتج می‌شود (۱۱).

در زمینه خشک‌کردن لایه‌نازک محصولات کشاورزی، مدل‌سازی، بررسی سینتیک خشک شدن، محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت تحقیقات فراوانی صورت گرفت؛ از جمله لی و موری (۱۹۸۴) با خشک‌کردن لایه‌نازک ذرت دریافتند دما، سرعت، رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن دارد (۱۲). نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک شلتوک برنج رقم فجر نشان داد مدل تقریب انتشار در

روش مادون قرمز و مدل سازی سینتیک خشک شدن آن می باشد.

مواد و روش ها

خشک کردن قارچ: این پژوهش در سال ۱۳۹۳ در دانشکده صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام گردید. در این تحقیق از یک خشک کن مادون قرمز آزمایشگاهی (شکل ۱) جهت خشک کردن قارچ دکمه ای استفاده شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن، با استفاده از ترازوی دیجیتال لوترون (با دقت ± 0.01 g) تغییرات وزن ثبت شد. ابتدا قارچ های دکمه ای سفید با قطر کلاهک ۵ سانتی متر تهیه و با آب سرد شستشوی سطحی داده شد. سپس آب سطحی آنها توسط دستمال تمیز گرفته شد و با یک چاقوی تیز، قارچ ها به طور عمودی به ورقه هایی به ضخامت ۱ سانتی متر برش داده شدند.



شکل ۱- خشک کن مادون قرمز

Figure 1. Infrared dryer

۳۷۵ وات) در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متری منبع پرتو دهی از ورقه های قارچ بررسی شد. در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه محصول از آون با دمای ۱۰۴ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت

خشک کردن لایه نازک شلتوک برنج رقم فجر نسبت به سایر مدل ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت نسبتاً خوب و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شد (۱۳). در پژوهش دیگری مدل سازی خشک شدن لایه نازک برنج در دما و سرعت های مختلف جریان هوا بررسی و مدل میدیلی به عنوان مناسب ترین مدل جهت پیش بینی رفتار خشک شدن لایه نازک برنج معرفی شد (۱۴).

با توجه به بررسی منابع انجام شده تاکنون پژوهشی در خصوص کاربرد و اثر خشک کن مادون قرمز بر خشک کردن قارچ دکمه ای صورت نگرفته است. لذا هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر تغییر توان لامپ پرتو دهی مادون قرمز و فاصله نمونه از منبع پرتو دهی بر خشک کردن قارچ دکمه ای به

جهت خشک کردن نمونه های برش خورده با خشک کن مادون قرمز اثر متغیرهای دستگاهی شامل توان های متفاوت لامپ مادون قرمز (۱۵۰، ۲۵۰ و

1. Infrared Heat Lamp (NIR), Noor Lamp Company, Iran.

خشک کردن را برای شرایط ناپایدار توصیف کند (رابطه ۳).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳، X مقدار رطوبت موضعی بر مبنای وزن خشک، t زمان و X شاخص فضایی می باشد. مطالعه‌ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. برای استفاده از قانون فیک فرض می گردد که فرآورده غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک تیغه به صورت رابطه ۴ می باشد.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2})$$

در رابطه ۴، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر ($m^2 s^{-1}$) می باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب رابطه ۵ به دست می آید.

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$$

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن و برحسب $LnMR$ نسبت به زمان تعیین می گردد. با ترسیم نمودار $LnMR$ نسبت به زمان و قرارگیری شیب خط حاصل در رابطه ۶ (K_0) ضریب نفوذ مؤثر به دست می آید (۴، ۱۷).

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

استفاده گردید. میانگین (ده تکرار) رطوبت اولیه‌ی قارچ $1/61 \pm 0/40$ بر پایه وزن خشک تعیین شد.

تجزیه و تحلیل آماری و مدل سازی فرایند خشک کردن: آزمایش‌ها در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. برای رسم نمودارها از برنامه اکسل ۲۰۰۷ و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار مینی تب ۱۶ در سطح اطمینان معنی داری ۹۵ درصد استفاده شد. جهت مدل سازی فرایند خشک شدن، نخست پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (۱۵)؛ که در آن MR : نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه وزن خشک (d.b)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می باشند.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه ۱}$$

با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به میزان رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. در زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد؛ بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست (۱۵، ۱۶).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{رابطه ۲}$$

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت: تعداد مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه بندی می شود. قانون دوم فیک می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرایند

فرآیند خشک کردن قارچ دکمه‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است. در پژوهش حاضر به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها از نرم‌افزار کرواکسپرت نسخه ۱/۳۴ استفاده شد.

در پژوهش حاضر با میانگین‌گیری از ضریب نفوذهای به دست آمده از هر تیمار نتیجه اعلام شد. به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن در تحقیقات مربوطه استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن قارچ دکمه‌ای

Table 1. Applied mathematical models to kinetics modeling of button mushroom drying

مدل Model	معادله Equation
انتشار فیک Fick's Diffusion	$MR = a \exp(-c(t/l^2))$
تقریب انتشار Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
پیج Page	$MR = \exp(-kt^n)$
پیج اصلاح شده Modified Page -II	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
نیوتن Newton	$MR = \exp(-kt)$
میدیلی Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
لگاریتمی Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
ورما Verma	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
دوجمله‌ای Two term	$MR = a \exp(-k_0 t^n) + b \exp(-k_1 t)$

MR: نسبت رطوبت، t زمان (min) و (n, k, l, b, c, g, a, ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند).

بر اساس نتایج جدول ۱ اثر فاکتورهای توان و فاصله بر زمان خشک شدن معنی‌دار بود ($P < 0.05$)؛ در حالی که اثر متقابل توان و فاصله بر مدت زمان خشک شدن معنی‌دار نشد ($P > 0.05$). اثر توان لامپ و فاصله لامپ پرتودهی از نمونه بر تغییرات مقدار رطوبت طی زمان در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه‌های قارچ افزایش می‌یابد (شکل ۲). با افزایش

نتایج و بحث

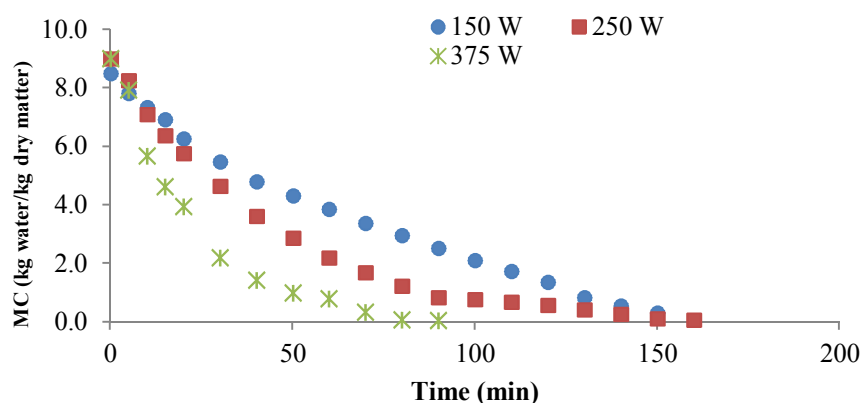
اثر تیمارها بر فرآیند خشک کردن: در طی خشک کردن قارچ دکمه‌ای، مدت زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به محدوده رطوبت ۱۰ درصد (بر پایه وزن مرطوب) یادداشت و به عنوان زمان خشک شدن استفاده گردید. آنالیز نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ و فاصله بر زمان خشک شدن قارچ در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات مدت زمان خشک شدن ورقه‌های قارچ ۵۶/۷ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۲). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد. در این شرایط ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول افزایش یافته و از طرف دیگر با گرمایش سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب زمان خشک شدن کاهش می‌یابد (۱۴).

جدول ۲- تجزیه واریانس برای پارامتر زمان خشک شدن

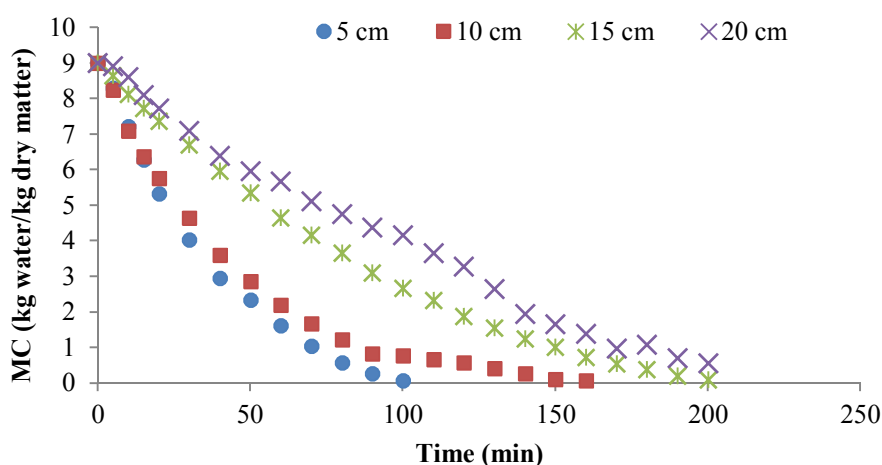
Table 2. Analysis of variance for parameter of drying time

P	میانگین مربعات Mean Square	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variation
0.000	14866.7	29733.3	2	توان Power
0.000	8644.4	25933.3	3	فاصله Distance
0.360	244.4	1466.7	6	توان × فاصله Distance × Power
	200.0	2400.0	12	خطا Error
		59533.3	23	کل Total



شکل ۲- تغییرات مقدار رطوبت با زمان و توان لامپ در فاصله ۱۰ سانتی‌متر.

Figure 2. Variations of moisture content with time and lamp power at a distance of 10 cm.



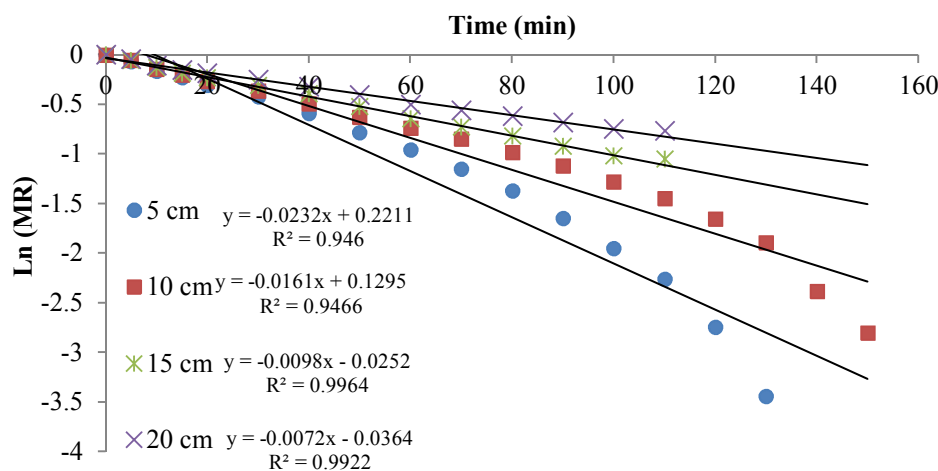
شکل ۳- تغییرات مقدار رطوبت با زمان و فاصله لامپ پرتو دهی از نمونه (۲۵۰ وات).

Figure 3. Variations of moisture content with time and distance of lamp from sample (250 W).

بود (۱۸).

تعیین ضریب نفوذ مؤثر: شکل ۴ روند تغییرات $\ln(MR)$ را نسبت به زمان در فواصل مختلف نمونه از منبع پرتودهی نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای پژوهش حاضر در جدول ۳ گزارش شد. همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ و کاهش فاصله لامپ پرتودهی در فرایند خشک شدن قارچ دکمه‌ای، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک‌روند افزایشی دارد. با افزایش توان لامپ از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات ضریب نفوذ رطوبت از $3/8 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ به $11/0 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (در فاصله ۵ سانتی‌متری از لامپ) افزایش یافت.

با کاهش فاصله لامپ پرتودهی از نمونه (از ۲۰ به ۵ سانتی‌متر) کاهش ۵۵/۳ درصدی زمان خشک شدن ورقه‌های قارچ حاصل گردید و آهنگ خشک شدن افزایش یافت (شکل ۳). بیشترین زمان خشک شدن (۱۹۰ دقیقه) مربوط به توان ۱۵۰ وات و فاصله ۲۰ سانتی‌متری لامپ و کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان ۳۷۵ وات و فاصله ۵ سانتی‌متری لامپ با مدت‌زمان ثبت شده ۳۰ دقیقه بود (شکل ۳). هبار و همکاران (۲۰۰۴) از یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون‌قرمز به‌تنهایی و هوای داغ به‌تنهایی برای خشک کردن سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به مادون‌قرمز و هوای داغ



شکل ۴- مقادیر لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان برای لامپ پرتودهی مادون‌قرمز ۱۵۰ وات.

Figure 4. Natural logarithms values of the moisture ratio versus time for the 150 W infrared lamp.

جدول ۱ گزارش شده‌است. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ در طی بررسی سینتیک خشک شدن قارچ دکمه‌ای، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده‌است. در این جدول ضریب همبستگی، خطای استاندارد و ضرایب این مدل ارائه شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های

با افزایش فاصله نمونه از لامپ ۲۵۰ وات از ۵ به ۲۰ سانتی‌متر، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای قارچ دکمه‌ای از $7/0 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ به $2/2 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ کاهش یافت.

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن: مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در

آزمایشگاهی با این مدل‌ها نشان داد که این مدل مناسب بوده و ضریب همبستگی (R) بالا و خطای استاندارد (SE) پایینی را در هنگام برآزش کردن داده‌های تجربی از خود نشان داد. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه مادون قرمز توصیه می‌شود.

جدول ۳- مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن

Table 3. Values of effective moisture diffusivity at different drying condition

R	ضریب نفوذ (m^2s^{-1}) Effective diffusivity	فاصله Distance(cm)	توان Power (W)
0.97	3.8×10^{-9}	5	150
0.97	2.7×10^{-9}	10	
0.99	1.5×10^{-9}	15	
0.99	1.2×10^{-9}	20	
0.96	7.0×10^{-9}	5	250
0.98	4.5×10^{-9}	10	
0.96	3.2×10^{-9}	15	
0.97	2.2×10^{-9}	20	
0.98	11.0×10^{-9}	5	375
0.98	9.3×10^{-9}	10	
0.98	6.5×10^{-9}	15	
0.99	3.0×10^{-9}	20	

جدول ۴- ضریب همبستگی، خطای استاندارد و ضرایب مدل پیج

Table 4. Correlation coefficient, standard error and coefficients of the Page model

مدل پیج Page model				فاصله (cm) Distance	توان (W) Power
SE	R	k	n		
0.028	0.996	0.007	1.219	5	150
0.028	0.995	0.09	1.093	10	
0.030	0.995	0.010	1.053	15	
0.027	0.996	0.008	1.065	20	
0.017	0.998	0.014	1.186	5	250
0.011	0.999	0.018	1.056	10	
0.021	0.997	0.004	1.259	15	
0.036	0.992	0.002	1.315	20	
0.044	0.991	0.018	1.407	5	375
0.027	0.996	0.033	1.086	10	
0.021	0.998	0.012	1.227	15	
0.017	0.998	0.013	1.065	20	

نتیجه گیری

ورقه‌های قارچ در محدوده $1/2 \times 10^{-9}$ تا m^2s^{-1} $11/0 \times 10^{-9}$ تعیین شد. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک قارچ دکمه‌ای با سامانه مادون قرمز از مدل‌های مختلفی استفاده گردید؛ که در نهایت مدل پیج به دلیل بالا بودن شاخص ضریب همبستگی، پایین بودن خطای استاندارد و همچنین سادگی رابطه جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید.

اثر تغییر توان و فاصله لامپ مادون قرمز بر خشک شدن قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. افزایش توان لامپ و کاهش فاصله لامپ موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت زمان آن گردید. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با افزایش توان لامپ مادون قرمز و کاهش فاصله لامپ بطور محسوسی افزایش یافت و برای

منابع

1. Brennan, M., Le Port, G., and Gormley, R. 2000. Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms. *LWT-Food Science and Technology*. 33: 4.285-289.
2. Salehi, F. 2019. Characterization of different mushrooms powder and its application in bakery products: A review. *International J. of Food Properties*. 22: 1.1375-1385.
3. Giri, S., and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *J of Food Engineering*. 78: 2.512-521.
4. Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A.R., and Ziaifar, A.M. 2016. Drying of button mushroom by infrared-hot air system. *Iranian J. of Food Science and Technology*. 13: 59.151-159.
5. Singh, J., Sindhu, S.C., Sindhu, A., and Yadav, A. 2016. Development and evaluation of value added biscuits from dehydrated shiitake (*Lentinus edodes*) mushroom. *International J. of Current Research*. 8: 3.27155-27159.
6. Salehi, F., and Kashaninejad, M. 2018. Mass transfer and color changes kinetics of infrared-vacuum drying of grapefruit slices. *International J. of Fruit Science*. 18: 4.394-409.
7. Salehi, F., Kashaninejad, M., Akbari, E., Sobhani, S.M., and Asadi, F. 2016. Potential of sponge cake making using infrared-hot air dried carrot. *J. of Texture Studies*. 47: 1.34-39.
8. Mehrnia, M.A., Bashti, A., and Salehi, F. 2017. Experimental and modeling investigation of mass transfer during infrared drying of Quince. *Iranian Food Science and Technology Research J*. 12: 6.758-766.
9. Nimmol, C. 2010. Vacuum far-infrared drying of foods and agricultural materials. *The J. of the King Mongkut's University of Technology North Bangkok*. 20: 1.37-44.
10. Salehi, F. 2020. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International J. of Fruit Science*. 20: 3.586-602.
11. Afzal, T., Abe, T., and Hikida, Y. 1999. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *J of Food Engineering*. 42: 4.177-182.
12. Li, H., and Moray, R.V. 1984. Thin-layer drying of yellow dent corn. *Transactions of the ASAE*. 27: 2.581-585.
13. Omid, M., Yadollahinia, A., and Rafiee, S. 2006 A thin-layer drying model for paddy dryer, in: *Proc. of the International conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, AIT, Pathumthani, Thailand, 12th, , pp. 202-211.
14. Doymaz, I., and Pala, M. 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *J of Food Engineering*. 60: 2.125-130.
15. Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J of Food Engineering*. 79: 1.243-248.
16. Salehi, F., Kashaninejad, M., Siahmansouri, P., and Moradi, E. 2017. Moisture loss kinetics of persimmon during combined hot air-infrared drying process. *J. of Food Technology and Nutrition*. 4. 2.39-48.
17. Salehi, F., Kashaninejad, M., and Jafarianlari, A. 2017. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices. *Heat Mass Transfer*. 53: 5.1751-1759.
18. Hebbar, H.U., Vishwanathan, K., and Ramesh, M. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *J of Food Engineering*. 65: 4.557-563.

Selection of the Best Kinetic Model in Drying of Button Mushroom using Infrared System

F. Salehi^{1*}, M. Kashaninejad², A.R. Sadeghi Mahoonak², A.M. Ziaifar²

¹PhD graduate student, Faculty of food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

²Faculty member, Faculty of food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: 2018/12/06; Accepted: 2019/10/30

Abstract

Background and objectives: Button mushroom (*Agaricus bisporus*) is a food with high nutritional value that is allocated about 40% of the mushroom market share and contains 32.5 % protein, 1.6 % fat, 9.2 % fibre, 7.5 % ash, 6.8 % moisture, and 42.4% carbohydrate on dry weight basis. Button mushroom is highly perishable product with a maximum shelf-life of eight days at 4°C. Thus, in order to increase the shelf life of button mushroom and produce high quality product, infrared (IR) dryer was used in this study and mass transfer kinetics of the samples were measured.

Materials and methods: In this study, drying of button mushroom in an infrared dryer at irradiation power of 150, 250 and 375 W and distances of 5, 10, 15 and 20 cm were investigated. The effect of lamp power and sample distance from radiation source (IR lamp) on drying time and rate, and moisture diffusion coefficients was investigated in a factorial experiment by completely randomized design. For drying kinetics modeling, nine mathematical models containing Fick's Diffusion, Approximation of diffusion, Page, Modified Page –II, Newton, Midilli, Logarithmic, Verma and two term were evaluated and the best model with the highest correlation coefficient and the lowest standard error was selected.

Results: The results showed that the effect of IR lamp power and distance is significant on the drying process of button mushroom. Increase in IR lamp power from 150 to 375 W, and the reduction of distance from 20 to 5 cm decreased the drying time of button mushrooms 56.6 and 55.3 %, respectively. The maximum drying time was related to the power of 150 W and 20 cm IR lamp distance, which took 190 minutes to complete the process. Furthermore, the lowest drying time is related to 375 W power and 5 cm lamp distance with a record period of 30 min. Due to increasing the lamp power and reducing IR lamp distance in the drying process of button mushroom, the effective moisture diffusivity coefficient was an increasing trend. By increasing the lamp power from 150 to 375 W, the effective moisture diffusivity coefficient (at a distance of 5 cm from the lamp) is increased from $3.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ to $11.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. By increasing the sample distance from 250 W lamp, from 5 to 20 cm, the effective moisture diffusivity coefficient for a button mushroom decreased from $7.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ to $2.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

Conclusion: Effective diffusivity coefficient of button mushroom moisture was obtained between 1.2×10^{-9} to $11.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. In modeling of mushroom drying process, Page model was better fit with the experimental results compared to other models.

Keywords: Drying kinetics, Effective diffusivity coefficients, Infrared, Page Model.

*Corresponding author; F.Salehi@Basu.ac.ir