مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک قارچ دکمه‌ای در خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز–هوای داغ

فخرالدین صالحی[1*]، مهدی کاشانی نژاد[2]، علیرضا صادقی ماهونک[2]، امان محمد ضیائی فر[3]

١- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
٢- دانشیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
٣- استادیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
(تاریخ دریافت: ٩٣/١٢/١٠ تاریخ پذیرش: ٩٤/٢/١٠)

چکیده

خشک شدن قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز- هوای داغ در توان‌های ١٥٠، ٢٥٠ و ٣٧٥ وات، دماهای ٥٠، ٦٠ و ٧٠ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ١، ٢ و ٣ متر بر ثانیه بررسی شد. تأثیر توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا بر زمان و آهنگ خشک شدن، ضرایب نفوذ رطوبت و انرژی فعال‌سازی در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. نتایج نشان‌داد تأثیر توان لامپ، دما و سرعت جابه‌جایی هوا بر فرآیند خشک شدن محصول قارچ دکمه‌ای معنی‌دار می‌باشد ($p<0.05$). افزایش توان لامپ مادون‌قرمز از ١٥٠ به ٣٧٥ وات، افزایش دما از ٥٠ به ٧٠ درجه سلسیوس و تغییر سرعت جریان هوا از ١ به ٣ متر بر ثانیه زمان خشک شدن نمونه‌ها را به ترتیب ٢٨/٦، ٤٢/٧ و ١٥/٢ درصد کاهش داد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی قارچ دکمه‌ای به ترتیب بین $٦/٢\times١٠^{-٩}$ تا $١٩/٧\times١٠^{-٩}$ مترمربع بر ثانیه و ٢٣/٧٦ تا ٣٠/٧٣ کیلوژول بر مول به دست آمد. برای مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، مدل‌های پیج، نیوتن و لگاریتمی به ترتیب با میانگین ضریب تبیین برابر ٠/٩٩٦، ٠/٩٨٨ و ٠/٩٩٨ و میانگین خطای استاندارد برابر ٠/٠٢٣، ٠/٠٤٢ و ٠/٠١٥، در مقایسه با سایر مدل‌ها، خطای کمتری داشتند.

کلید واژگان: سینتیک، قارچ دکمه‌ای، مادون‌قرمز، مدل‌سازی، هوای داغ.

*مسئول مکاتبات: fs1446@yahoo.com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

خشک‌کردن یکی از روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی بوده و یک عملیات حساس و بااهمیت در چرخه نگهداری و حمل‌ونقل آن‌هاست. در این فرآیند با استفاده از انرژی گرمایی، آب موجود در ماده تبخیر گشته و به یک ماده با میزان رطوبت کمتر تبدیل می‌شود که همراه با فرآیندهای پیچیده انتقال جرم و حرارت می‌باشد [۱].

درزمینه خشک‌کردن لایه‌نازک محصولات کشاورزی؛ مدل‌سازی، استخراج منحنی سینتیک خشک شدن، محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آن‌ها تحقیقات فراوانی صورت گرفته است. لی و موری [۲] با خشک‌کردن ذرت به‌صورت لایه‌نازک به این نتیجه رسیدند که دما، سرعت، رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول بستگی تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن دارد. نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نشان‌داد که مدل تقریب انتشار در خشک‌کردن لایه‌نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل‌قبول و سادگی معادله پیج، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است [۳]. گزار و مینایی [٤] تأثیر تغییرات دما و سرعت بر سینتیک خشک شدن کلزا را مطالعه کردند و نشان‌دادند که در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیج دارای برازش بهتری بوده، ولی به دلیل کمتر بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی شاخص‌های مورد ارزیابی، کاربرد مدل نیوتن را توصیه کردند. در مطالعه دیگری مدل‌سازی خشک شدن لایه‌نازک برنج در دما و سرعت‌های مختلف هوا انجام بررسی‌شده است. بر اساس نتایج، مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن لایه‌نازک برنج می‌باشد [۵].

قارچ دکمه‌ای سفید (*Agaricus bisporus*) معروف‌ترین قارچ خوراکی در دنیا است و بیشترین سطح زیر کشت را در ایران و جهان به خود اختصاص داده است. اولین نژادهای اصلاح‌شده این قارچ یعنی دو نژاد U_1 و U_3، در حدود ۳۰ سال پیش در هلند از طریق دو رگ گیری تولید و معرفی شدند . این نژادها منشأ اکثر نژادهایی هستند که امروزه به‌طور تجاری در دنیا کشت و کار می‌شوند [٦]. قارچ‌ها پس از برداشت به دلیل عدم وجود کوتیکول، سرعت‌بالای تنفس، رطوبت زیاد و فعالیت آنزیمی شدید دارای ماندگاری کمتری نسبت به سایر سبزی‌ها بوده و به‌سرعت فاسد می‌شوند و بلافاصله پس از برداشت تغییر رنگ آن‌ها آغاز می‌شود [۸-۷]. لذا به دلیل گسترش زمان نگهداری، باید تحت فرایند قرار گیرند. ازاین‌رو محققین روش‌های مختلفی نظیر استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر تغییریافته، منجمد کردن، خشک‌کردن، تیمار با محلول‌های آبی حاوی ترکیبات مهارکننده فعالیت آنزیمی و غیرفعال کردن آنزیم‌ها را جهت نگهداری و افزایش زمان ماندگاری قارچ موردبررسی قرار داده‌اند [۹]. حذف آب و خشک‌کردن یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای قارچ‌های صدفی مورداستفاده قرارگرفته است و برای انجام این فرایند از خشک‌کن‌های مختلفی از قبیل خشک‌کن کابینتی، هوای داغ، انجمادی، بسترسیال و خورشیدی استفاده‌شده است [۱۱-۱۰].

امروزه تکنیک‌های خشک‌کردن از قبیل خشک‌کردن انجمادی، پفکی و همچنین روش‌های ترکیبی مانند ماکروویو، مادون‌قرمز، میدان الکتریکی همراه با هوای داغ جهت خشک‌کردن محصولات کشاورزی پیشنهادشده‌اند که در این میان روش‌های ترکیبی گسترش زیادی پیداکرده‌اند [۱۱-۱۰]. طبق گزارش محققان خشک‌کن انجمادی روشی مناسبی جهت تولید محصولی با ساختار متخلخل و باکیفیت بالا می‌باشد، اما گران‌قیمت بوده و برای هر محصولی قابل‌استفاده نیست. لذا بررسی و یافتن یک روش مناسب برای خشک‌کردن قارچ خوراکی که باعث تولید محصولی باکیفیت بالا شود، ضروری می‌باشد.

خشک‌کردن به‌وسیله اشعه مادون‌قرمز به‌ویژه به شکل لایه‌نازک روش مناسبی است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود، درنتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد [۱۳-۱۲]. 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 که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود سریع‌تر است و راندمان بالاتری دارد و کیفیت محصولات خشک‌شده به این روش در مقایسه با روش هوای داغ بالاتر می‌باشد [۱۵-۱٤].

Archive of SID

www.SID.ir

مصرف انرژی و کیفیت جو خشک‌شده در دو خشک‌کن همرفتی و ترکیبی مادون‌قرمز و هوای داغ توسط افضل و همکاران (١٩٩٩) بررسی‌شده است. گزارش‌ها حاکی از این است که استفاده از اشعه مادون‌قرمز در خشک‌کن همرفتی باعث افزایش سرعت خشک شدن و کاهش قابل‌توجه انرژی مصرفی خشک‌کن می‌شود [١٦].

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برش‌های بادمجان در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ- مادون‌قرمز صالحی و همکاران (٢٠١٥) بررسی شده است. افزایش دمای خشک‌کن از ٦٠ به ٨٠ درجه سانتی‌گراد در توان ١٥٠ وات باعث کاهش زمان خشک‌کردن از ٤٨ دقیقه به ٣٥ دقیقه شده است. با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز از ١٥٠ وات به ٣٧٥ وات نیز، زمان خشک شدن برش‌های بادمجان از ٣٥ دقیقه به ١٥ دقیقه کاهش یافت. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بادمجان در محدوده $^{-9}$ ١٠×٢/٤ تا $^{-9}$١٠×٨/١ مترمربع بر ثانیه بوده و مدل پیج برای مدل‌سازی ای نوع فرآیند خشک‌کردن توصیه شده است [١٢].

صالحی و همکاران (٢٠١٥) به بررسی خشک شدن قارچ دکمه‌ای با استفاده از سامانه مادون قرمز پرداختند. نتایج خشک کردن به این روش نشان داد با افزایش توان لامپ و کاهش فاصله نمونه ها از منبع حرارتی، سرعت خشک کردن افزایش می یابد. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ١٥٠ به ٣٧٥ وات، سرعت خشک شدن ١٠٤/٩ درصد و با کاهش ضخامت نمونه ها از ١به ٠/٥ سانتی متر، سرعت خشک شدن ١٥/٨ درصد افزایش یافت [٧].

با توجه به کیفیت بالای محصولات خشک شده در سامانه مادون قرمز- هوای داغ و همچنین راندمان بالای انرژی در این روش، استفاده از این روش برای سایر محصولات کشاورزی نیز توصیه شده است. بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان داد که تاکنون پژوهشی در خصوص خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز-هوای داغ به‌صورت لایه‌نازک و اثر شرایط خشک‌کردن بر آن صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر عوامل مختلف شامل توان لامپ پرتودهی مادون‌قرمز، دمای هوا و سرعت جریان هوای داغ بر سینتیک خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای به روش ترکیبی مادون‌قرمز-هوای داغ و مدل‌سازی سینتیک خشک شدن آن می‌باشد.

٢- مواد و روش‌ها

خشک‌کردن

در این تحقیق از یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز - هوای داغ آزمایشگاهی باقابلیت اتصال به کامپیوتر (شکل ١) جهت پایش پیوسته خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای استفاده گردید. جهت بررسی سینتیک خشک شدن، ترازوی دیجیتالی لوترون[1]باقابلیت اتصال به کامپیوتر (با دقت g ٠/٠١±) در قسمت پایینی خشک‌کن قرارگرفته و هر یک دقیقه تغییرات وزن را ثبت می‌کرد. ابتدا قارچ‌های دکمه‌ای سفید با قطر کلاهک ٥ سانتی‌متر تهیه و با آب سرد شستشوی سطحی داده و سپس آب سطحی آن‌ها توسط دستمال تمیز گرفته شد. سپس با یک چاقوی تیز، قارچ‌ها به‌طور عمودی به ورقه‌هایی به ضخامت ١ سانتی‌متر برش داده شدند.



شکل ١ خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز- هوای داغ مورداستفاده در این تحقیق.

جهت خشک‌کردن نمونه‌های برش خورده با خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز – هوای داغ از متغیرهایی شامل توان‌های متفاوت لامپ مادون‌قرمز[2] (١٥٠، ٢٥٠ و ٣٧٥ وات) در فاصله ٥ سانتی‌متر از ورقه‌های قارچ، دمای هوای داغ (٥٠، ٦٠ و ٧٠ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا (١، ٢ و ٣ متر بر ثانیه) استفاده شد.

1. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)
2. Infrared Heat Lamp (NIR), Noor Lamp Company, Iran.

Archive of SID
www.SID.ir

در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه محصول از آون با دمای ۱۰۴ درجه سلسیوس و به مدت ٤ ساعت استفاده گردید که میانگین رطوبت اولیه‌ی ۸۹/٦ درصد بر پایه مرطوب به دست آمد.

با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، شاخص‌هایی نظیر متوسط زمان خشک شدن برای تیمارهای آزمایش و همچنین نحوه تغییرات رطوبت محصول برای هر تیمار به دست آمد. لذا ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید [۱۷]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (۱)$$

MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t: رطوبت نمونه‌ها در هرلحظه بر پایه خشک (d.b)، M_e: رطوبت تعادلی نمونه‌ها (d.b) و M_0: رطوبت اولیه نمونه‌ها (d.b) می‌باشند. با توجه به رابطه۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هرلحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_t ,M_o بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به‌صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به‌اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست [۱۷].

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \qquad (۲)$$

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) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف کند:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff}\,\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \qquad (۳)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه‌ی انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره‌ی سرعت نزولی خشک‌کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد [۱۸]. برای بکار بردن قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک‌بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله فیک برای یک تیغه به‌صورت زیر می‌باشد:

(٤)

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left(-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

در اینجا، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته‌شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2s^{-1}) می‌باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله زیر به دست می‌آید:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2}\exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \qquad (۵)$$

ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک‌کردن برحسب LnMR نسبت به زمان تعیین می‌گردد. زمانی نمودار مقدار LnMR نسبت به زمان رسم گردد، شیب‌خط به‌دست‌آمده را در معادله زیر قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید:

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \qquad (٦)$$

K_0 شیب‌خط می‌باشد. برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به‌دست‌آمده میانگین گرفته و نتیجه اعلام شد.

با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال‌سازی هر تیمار از رابطه آرنیوس (رابطه ۷) استفاده شد [۱۹]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right) \qquad (۷)$$

در اینجا، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2s^{-1})، D_0 ضریب نفوذ در دمای مبنا (ms^{-1})، Ea انرژی فعال‌سازی ($kJ\ mol^{-1}$)، R

Archive of SID

www.SID.ir

ثابت جهانی گازها ($8/314$ J mol^{-1}K^{-1})، T_{abs} دمای مطلق (K) می‌باشد.

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک‌کردن که توسط محققان جهت بررسی این‌گونه فرآیندها توصیه‌شده است، استفاده گردید. معادله‌های مورداستفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در جدول ١ به نمایش درآمده است [١٩، ١٧،١٠].

در این مطالعه به‌منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن، و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ١/٣٤ استفاده شد.

جدول ١ مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن قارچ دکمه‌ای.

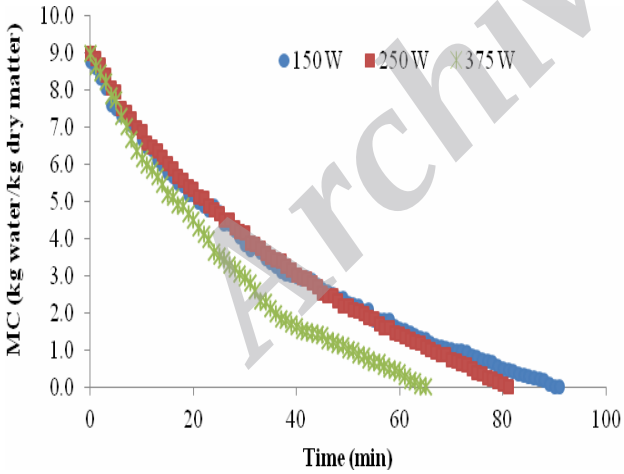
مدل Model	معادله Equation
انتشار فیک Fick's Diffusion	$MR = a\exp(-c(t/t^2))$
تقریب انتشار Approximation of diffusion	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$
پیج Page	$MR = \exp(-kt^n)$
پیج اصلاح‌شده Modified Page –II	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
نیوتن Newton	$MR = \exp(-kt)$
میدیلی Midilli	$MR = a\exp(-kt^n) + bt$
لگاریتمی Logarithmic	$MR = a\exp(-kt) + c$
ورما Verma	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$
دوجمله‌ای Two term	$MR = a\exp(-k_0t^n) + b\exp(-k_1t)$

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

٣- نتایج و بحث

اثر تیمارها بر فرآیند خشک‌کردن

در طی خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای، مدت‌زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به محدوده رطوبت ١٠ درصد (بر پایه مرطوب) یادداشت و به‌عنوان زمان خشک شدن استفاده گردید. نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن قارچ آنالیز و در جدول ٢ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان، دما و سرعت در سطح ٥٪ معنی‌دار شده است درحالی‌که اثر متقابل توان×سرعت و توان×دما×سرعت بر مدت‌زمان خشک شدن معنی‌دار نشده است. اثر فاکتورهای موردبررسی در پژوهش بر تغییرات مقدار رطوبت بازمان در شکل‌های ٢، ٣ و ٤ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه‌های قارچ افزایش می‌یابد (شکل٢). مقایسه زمان خشک شدن ورقه‌های قارچ نشان می‌دهد که در اثر افزایش توان لامپ مادون‌قرمز از ١٥٠ به ٣٧٥ وات زمان خشک شدن ٢٨/٦ ٪ کاهش می‌یابد.



شکل ٢ تغییرات مقدار رطوبت بازمان و توان لامپ در دمای ٥٠ درجه سلسیوس و سرعت جریان ١ متر بر ثانیه.

Archive of SID

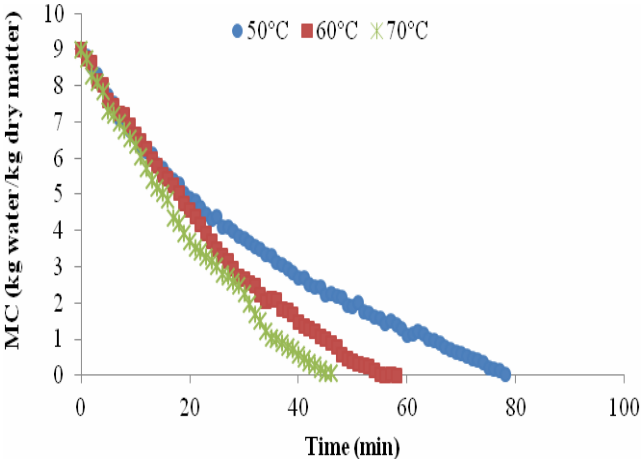
www.SID.ir

جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس متغیرها برای پارامتر زمان خشک شدن.

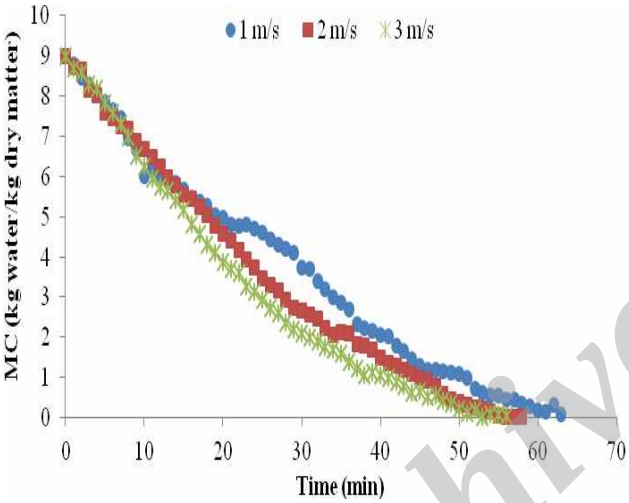
منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	۲	۲۱۲۱/۹	۱۰۶۰/۹	۰/۰۰۰
دما	۲	۵۹۰۰/۹	۲۹۵۰/۳	۰/۰۰۰
سرعت	۲	٤۹۹/۷	۲٤۹/۸	۰/۰۰۰
توان × دما	٤	۳۵٦/٦	۹۱/٤	۰/۰۰۰
توان × سرعت	٤	۱۰/۵	۲/٦	۰/۲۹۰
دما × سرعت	٤	۷۷/۲	۱۹/۳	۰/۰۰۰
توان × دما × سرعت	۸	۹/۹	۱/۲	۰/۷۵۳
خطا	۲۷	۵٤/۰	۲	
کل	۵۳	۹۰۳۹/۵		

به‌منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمات به بافت محصولات کشاورزی حداکثر دما جهت خشک‌کردن آن‌ها ۸۰°C توصیه‌شده است [۲۰]. لذا حداکثر سطح دمایی انتخاب‌شده در این تحقیق ۷۰°C بود. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به‌دست‌آمده در مورد تغییرات رطوبت و آهنگ خشک شدن گردیده و نشان‌دهنده سرعت بالاتر فرآیند می‌باشد (شکل۳). همچنین در اثر افزایش دما از ۵۰ به ٦۰ و ٦۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲٦/۸٪ و ۲۱/۸ ٪ زمان خشک شدن کاهش یافت. افزایش دما ازیک‌طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود و درنهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد [۵].

افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۲ و از ۲ به۳ متر بر ثانیه، به ترتیب باعث کاهش ۷/۰۱٪ و ۸/۷٦٪ زمان خشک شدن ورقه‌های قارچ گردید. با افزایش سرعت جریان هوا به دلیل افزایش حجم هوای عبوری از روی محصول، ظرفیت هوا برای جذب رطوبت آن بیشتر شده آهنگ خشک شدن افزایش یابد و منحنی‌های به‌دست‌آمده از تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روندهای کاهشی قابل‌توجهی باشند [۲۱،۵].



شکل ۳ تغییرات مقدار رطوبت بازمان و دمای هوای داغ (۲۵۰ وات و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه).



شکل ٤ تغییرات مقدار رطوبت بازمان و سرعت جریان هوای (۲۵۰ وات و ٦۰ درجه سلسیوس).

با افزایش دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد. افزایش دما و سرعت هوا در محفظه خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و موجب کاهش شدیدتر رطوبت می‌گردد [۲۲].

بیشترین زمان خشک شدن مربوط به توان ۱۵۰ وات، سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سلسیوس بود که برای انجام فرآیند در این تیمار ۷۱ دقیقه زمان صرف شد. همچنین کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان ۳۷۵ وات، دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان ۳ متر بر ثانیه است که مدت‌زمان ثبت‌شده برای این تیمار ۲۷ دقیقه بود.

Archive of SID
www.SID.ir

هبار و همکاران [٢٣] از یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون‌قرمز به‌تنهایی و هوای داغ به‌تنهایی برای خشک‌کردن 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 بود.

تعیین ضریب نفوذ مؤثر

مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ٣ گزارش‌شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا در فرآیند خشک شدن قارچ دکمه‌ای، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک‌روند افزایشی دارد. کمترین توان لامپ، دما و سرعت جریان هوای خروجی سبب کمترین ضریب نفوذ شده و بیشترین مقدار ضریب نفوذ در بالاترین توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا اتفاق افتاد. با افزایش توان لامپ از ١٥٠ به ٣٧٥ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از m^2s^{-1} ٩-١٠×١١/٥ به m^2s^{-1} ٩-١٠×١٧/٧ افزایش می‌یابد (٧٠ درجه سلسیوس و ١ متر بر ثانیه).

همچنین در محدوده دمایی ٥٠ تا ٧٠ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت برای قارچ دکمه‌ای از m^2s^{-1} ٩-١٠×٩/٢ تا m^2s^{-1} ٩-١٠×١٧/٧ تغییر می‌کند (٣٧٥ وات و ١ متر بر ثانیه). با افزایش سرعت جریان هوا از ١ به ٣ متر بر ثانیه نیز ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای قارچ دکمه‌ای ٢٤/٢ درصد افزایش یافت. دلیل وقوع این مسئله تأثیر بارز دما و سرعت جریان هوا در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب نفوذ می‌باشد.

افزایش دمای و سرعت هوای ورودی، آنتالپی هوای ورودی را افزایش داده، و افزایش آنتالپی میزان انتقال جرم و حرارت را افزایش می‌دهد که باعث افزایش ضریب نفوذ مؤثر می‌شود [٢٢].

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ٦٠ تا ٧٠ درجه سلسیوس برابر m^2s^{-1} ١١-١٠×٣/٤ تا m^2s^{-1} ١١-١٠×٧/٣ گزارش‌شده است [٢٢]. همچنین در مطالعه دیگری، ضریب نفوذ مؤثر برای ذرت در محدوده دمایی ٤٠ تا ٨٠ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت بین m^2s^{-1} ١١-١٠×٣/٦ تا m^2s^{-1} ١١-١٠×٨/٣ گزارش‌شده است [١].

جدول ٣ مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک‌کردن.

توان (W)	دما (°C)	سرعت (m/s)	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})
		١	٩-١٠×٦/٢
	٥٠	٢	٩-١٠×٦/٧
		٣	٩-١٠×٧/٧
		١	٩-١٠×٩/٠
١٥٠	٦٠	٢	٩-١٠×١٠/٠
		٣	٩-١٠×١١/٥
		١	٩-١٠×١١/٥
	٧٠	٢	٩-١٠×١٢/٢
		٣	٩-١٠×١٣/٢
		١	٩-١٠×٦/٦
	٥٠	٢	٩-١٠×٧/٢
		٣	٩-١٠×٧/٥
		١	٩-١٠×٩/٦
٢٥٠	٦٠	٢	٩-١٠×١١/١
		٣	٩-١٠×١٣/٣
		١	٩-١٠×١٢/٨
	٧٠	٢	٩-١٠×١٤/٠
		٣	٩-١٠×١٤/٥
		١	٩-١٠×٩/٢
	٥٠	٢	٩-١٠×١٠/٣
		٣	٩-١٠×١١/٨
		١	٩-١٠×١١/٥
٣٧٥	٦٠	٢	٩-١٠×١٣/٥
		٣	٩-١٠×١٧/٧
		١	٩-١٠×١٧/٧
	٧٠	٢	٩-١٠×١٩/٣
		٣	٩-١٠×١٩/٧

Archive of SID

www.SID.ir

محاسبه انرژی فعال‌سازی

میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در توان‌های مختلف و سرعت جریان‌های متفاوت در جدول ٤ به نمایش درآمده است. میزان انرژی فعال‌سازی برای قارچ در سه سرعت جریان ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۳۰/۰٦، ۲۸/۸۹ و ۲۳/۷٦ $kJ\ mol^{-1}$ به دست آمد (۳۷۵ وات).

جدول ٤ مقادیر انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف خشک‌کردن.

توان	سرعت	انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)	R
۱۵۰	۱	۲۸/۵۳	۰/۹۹٤
	۲	۲۷/۷۱	۰/۹۸٤
	۳	۲٤/۹٦	۰/۹٦۷
۲۵۰	۱	۳۰/۵٦	۰/۹۹۸
	۲	۳۰/۷۳	۰/۹۸۷
	۳	۳۰/٦۰	۰/۹۲٦
۳۷۵	۱	۳۰/۰٦	۰/۹۸۰
	۲	۲۸/۸۹	۰/۹۹۵
	۳	۲۳/۷٦	۰/۹۵۳

میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در سه دبی ۱، ۱/٤ و ۱/۸ $kg\ min^{-1}$ به ترتیب برابر ۱٤/۲۹، ۱٦/۱۹ و ۱۳/۷٦ $kJ\ mol^{-1}$ گزارش‌شده است [۲۲].

در پژوهشی دیگر نرخ ثابت خشک شدن، ضرایب انتقال جرم و حرارت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال‌سازی و انرژی مخصوص مصرفی لایه‌نازک شلتوک در خشک‌کن هوای گرم در محدوده دمایی ۵۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه و عمق محصول ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر موردبررسی قرارگرفته است.

نتایج حاکی از این است که ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما افزایش می‌یابد و همچنین انرژی مخصوص مصرفی بین ۸/۵ تا ۱۰/۷ $MJ\ kg^{-1}$ گزارش‌شده است [۲٤].

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

مدل‌های مورداستفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در جدول ۱ گزارش‌شده است. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های پیج، نیوتن و لگاریتمی، در طی بررسی سینتیک خشک شدن قارچ دکمه‌ای، تنها نتایج این مدل‌ها در جدول ۵ گزارش‌شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل‌ها ارائه‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب مدل نیوتنی (k) رابطه مشخصی با توان لامپ، دما و سرعت جریان دارد و با افزایش متغیرهای موردنظر، افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با این مدل‌ها نشان‌داد که هر سه مدل مناسب بوده و ضریب تبیین (R) بالا و خطای استاندارد (SE) پایینی را در هنگام برازش کردن داده‌های تجربی دارند. لذا استفاده از این مدل‌ها برای بررسی فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از سامانه مادون‌قرمز-هوای داغ توصیه می‌شود.

میدلی و کوکوک [۲۵] مدل لگاریتمی را برای پیش‌بینی میزان رطوبت ذرت و پسته در حین فرآیند خشک شدن مناسب گزارش کرده‌اند. همچنین در مطالعه‌ای استفاده از مدل لگاریتمی را برای پیش‌بینی نسبت رطوبت ذرت در طی خشک‌کردن با هوای داغ را توصیه نموده‌اند [۲۲].

٤- نتیجه‌گیری

اثر تغییر توان لامپ مادون‌قرمز، دما و سرعت جریان هوا بر خشک شدن لایه‌نازک قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز-هوای داغ موردبررسی قرار گرفت. افزایش توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن گردید.

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای ورقه‌های قارچ در محدوده $٦/٢\times10^{-9}$ تا $19/7\times10^{-9}\ m^2s^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ مادون‌قرمز، دما و سرعت جریان هوا به‌طور محسوسی افزایش می‌یافت.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ٥- ضریب تبیین (R)، خطای استاندارد (SE) و ضرایب مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق

توان	دما	سرعت	پیج				نیوتن				لگاریتمی					
			n	k	R	SE	k	R	SE	k	c	a	k	R	SE
		١	١/١٠٢	٠/٠١٩	٠/٩٩٦	٠/٠٢٣	٠/٠٢٨	٠/٩٩٤	٠/٠٢٨	٠/٠٢١	−٠/١٤٢	١/١١٩	٠/٠٢١	٠/٩٩٩	٠/٠١١
	٥٠	٢	١/٠٩٥	٠/٠٢٠	٠/٩٩٤	٠/٠٢٩	٠/٠٢٩	٠/٩٩٢	٠/٠٣٣	٠/٠١٩	−٠/٢٠١	١/١٥٩	٠/٠١٩	٠/٩٩٨	٠/٠١٤
		٣	١/١٦٤	٠/٠١٨	٠/٩٩٨	٠/٠١٦	٠/٠٣٢	٠/٩٩٤	٠/٠٢٩	٠/٠٢٥	−٠/١٢٥	١/١٣٠	٠/٠٢٥	٠/٩٩٩	٠/٠٠٨
		١	١/٢٨٧	٠/٠١١	٠/٩٩٥	٠/٠٢٧	٠/٠٣٢	٠/٩٨٤	٠/٠٥٠	٠/٠١٨	−٠/٣٤٩	١/٣٤٦	٠/٠١٨	٠/٩٩٩	٠/٠١٠
١٥٠	٦٠	٢	١/٣٦٨	٠/٠٠٩	٠/٩٩٧	٠/٠٢٢	٠/٠٣٥	٠/٩٨١	٠/٠٥٧	٠/٠٢٣	−٠/٢٥٥	١/٢٩٢	٠/٠٢٣	٠/٩٩٨	٠/٠١٧
		٣	١/٤٦٠	٠/٠٠٨	٠/٩٩٧	٠/٠٢٢	٠/٠٣٩	٠/٩٧٧	٠/٠٦٥	٠/٠٢٩	−٠/١٨٢	١/٢٤٦	٠/٠٢٩	٠/٩٩٤	٠/٠٣١
		١	١/٢٨١	٠/٠١٩	٠/٩٩٨	٠/٠١٧	٠/٠٤٨	٠/٩٨٩	٠/٠٤٢	٠/٠٤٣	−٠/٠٦٨	١/١٢٨	٠/٠٤٣	٠/٩٩٦	٠/٠٢٥
	٧٠	٢	١/٢١٥	٠/٠٢٦	٠/٩٩٩	٠/٠١٠	٠/٠٥١	٠/٩٩٣	٠/٠٣٣	٠/٠٤٥	−٠/٠٦٨	١/١١٤	٠/٠٤٥	٠/٩٩٨	٠/٠١٤
		٣	١/٢٦٥	٠/٠٢٣	٠/٩٩٨	٠/٠١٣	٠/٠٥٣	٠/٩٨٩	٠/٠٤١	٠/٠٤٥	−٠/٠٩٧	١/١٤٢	٠/٠٤٥	٠/٩٩٨	٠/٠١٨
		١	١/١٤٦	٠/٠١٦	٠/٩٩٥	٠/٠٢٦	٠/٠٢٩	٠/٩٩١	٠/٠٣٤	٠/٠١٨	−٠/٢٥٢	١/٢٢٩	٠/٠١٨	٠/٩٩٩	٠/٠١٠
	٥٠	٢	١/٠٨٥	٠/٠٢٣	٠/٩٩٥	٠/٠٢٥	٠/٠٣١	٠/٩٩٤	٠/٠٢٨	٠/٠٢٢	−٠/١٦٨	١/١٣٨	٠/٠٢٢	٠/٩٩٨	٠/٠١٣
		٣	١/٠٨٤	٠/٠٢٣	٠/٩٩٢	٠/٠٣٣	٠/٠٣٢	٠/٩٩١	٠/٠٣٥	٠/٠٢١	−٠/٢٢٧	١/١٨٩	٠/٠٢١	٠/٩٩٦	٠/٠٢٣
		١	١/٢٩٤	٠/٠١٣	٠/٩٨٧	٠/٠٤٥	٠/٠٣٥	٠/٩٧٦	٠/٠٦٢	٠/٠١٥	−٠/٦٤٦	١/٦٢١	٠/٠١٥	٠/٩٩٦	٠/٠٢٦
٢٥٠	٦٠	٢	١/٣٦٢	٠/٠١٢	٠/٩٩٦	٠/٠٢٤	٠/٠٣٩	٠/٩٨٠	٠/٠٥٧	٠/٠٢٢	−٠/٤٢٩	١/٤٤٧	٠/٠٢٢	٠/٩٩٩	٠/٠١٣
		٣	١/٣٥٩	٠/٠١٤	٠/٩٩٨	٠/٠١٥	٠/٠٤٦	٠/٩٨٣	٠/٠٥٤	٠/٠٣٤	−٠/٢٠٣	١/٢٦٢	٠/٠٣٤	٠/٩٩٩	٠/٠١٤
		١	١/٣٦٨	٠/٠١٤	٠/٩٩٣	٠/٠٣٥	٠/٠٤٥	٠/٩٧٦	٠/٠٦٣	٠/٠٢٢	−٠/٥٢٩	١/٥٣١	٠/٠٢٢	٠/٩٩٩	٠/٠١٦
	٧٠	٢	١/٣٦٥	٠/٠١٥	٠/٩٩٤	٠/٠٣٢	٠/٠٤٧	٠/٩٧٧	٠/٠٦٢	٠/٠٢٣	−٠/٥٦٧	١/٥٧١	٠/٠٢٣	٠/٩٩٨	٠/٠١٤
		٣	١/٣١٤	٠/٠١٩	٠/٩٩٥	٠/٠٢٧	٠/٠٥٢	٠/٩٨٢	٠/٠٥٣	٠/٠٢٩	−٠/٤٠١	١/٤٠٦	٠/٠٢٩	٠/٩٩٩	٠/٠١٢
		١	١/١٧٢	٠/٠٢٢	٠/٩٩٧	٠/٠١٩	٠/٠٣٩	٠/٩٩٢	٠/٠٣٣	٠/٠٣٠	−٠/١٥١	١/١٥٥	٠/٠٣٠	٠/٩٩٩	٠/٠١١
	٥٠	٢	١/١٩٤	٠/٠٢٢	٠/٩٩٦	٠/٠٢٤	٠/٠٤١	٠/٩٩٠	٠/٠٣٨	٠/٠٢٨	−٠/٢٢٢	١/٢١٤	٠/٠٢٨	٠/٩٩٩	٠/٠١٠
		٣	١/٠٣٣	٠/٠٤٥	٠/٩٩٤	٠/٠٢٨	٠/٠٤٩	٠/٩٩٤	٠/٠٢٨	٠/٠٤٧	−٠/٠٣٠	١/٠٤٢	٠/٠٤٢	٠/٩٩٤	٠/٠٢٧
		١	١/١١٩	٠/٠٣٣	٠/٩٩٩	٠/٠٠٩	٠/٠٤٨	٠/٩٩٦	٠/٠٢١	٠/٠٤٢	−٠/٠٨٤	١/٠٩٨	٠/٠٤٢	٠/٩٩٩	٠/٠٠٧
٣٧٥	٦٠	٢	١/٢٢٢	٠/٠٢٧	٠/٩٩٨	٠/٠١٨	٠/٠٥٤	٠/٩٩٠	٠/٠٣٨	٠/٠٣٩	−٠/١٨٣	١/١٩٨	٠/٠٣٩	٠/٩٩٩	٠/٠٠٨
		٣	١/٢٩٥	٠/٠٢٧	٠/٩٩٨	٠/٠١٥	٠/٠٦٤	٠/٩٨٦	٠/٠٤٧	٠/٠٥١	−٠/١٥٣	١/٢١٦	٠/٠٥١	٠/٩٩٩	٠/٠١٣
		١	١/٢٣٩	٠/٠٣١	٠/٩٩٨	٠/٠١٧	٠/٠٦٢	٠/٩٨٩	٠/٠٤٠	٠/٠٤٧	−٠/١٦٢	١/١٨٦	٠/٠٤٧	٠/٩٩٩	٠/٠٠٨
	٧٠	٢	١/٠٨٥	٠/٠٦٠	٠/٩٩٥	٠/٠٢٥	٠/٠٧٧	٠/٩٩٤	٠/٠٢٨	٠/٠٦٦	−٠/٠٦٧	١/٠٦٦	٠/٠٦٦	٠/٩٩٦	٠/٠٢٢
		٣	١/٠٦٢	٠/٠٦٨	٠/٩٩٦	٠/٠٢٢	٠/٠٨١	٠/٩٩٥	٠/٠٢٤	٠/٠٧٤	−٠/٠٣٩	١/٠٤١	٠/٠٧٤	٠/٩٩٧	٠/٠٢١

میزان انرژی فعال‌سازی در محدوده ٢٣/٧٦ kJ/mol تا ٣٠/٧٣ kJ/mol به دست آمد. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک قارچ دکمه‌ای، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که درنهایت سه مدل پیج، نیوتن و لگاریتمی به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای استاندارد و همچنین سادگی رابطه آن‌ها نسبت به سایر مدل‌ها، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب شدند.

٥- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) (به شماره ٩٢٠٤٤٢٤٥) انجام‌گرفته است. لذا از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به خاطر تحت پوشش قرار دادن این پژوهش قدردانی می‌گردد.

٦- منابع

[1] Mujumdar, A. S., 2000, Drying technology in agriculture and food sciences. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.

[2] Li, H., & Morey. R. V., 1984, Thin-layer drying of yellow dent corn. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 27, 581-585.

[3] Omid, M., Yadollahinia, A. R. & Rafiee. S., 2010, Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. Biosystem Engineering of Iran, 41, 153-160. (In Farsi).

Archive of SID
www.SID.ir

[4] Gazor, H. R., & Minaee, S. 2008, Influence of temperature and air velocity on canola drying kinetic. 5th National conference on agricultural machinery engineering and mechanization. Mshhad, Iran. (In Farsi).
[5] Doymaz, I., & Pala. M., 2003, The thin-layer drying characteristics of corn. Journal of Food Engineering, 60, 125-130.
[6] Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendricks, P. M., & Kerrigan. R. W. 2005, Breeding mushrooms, state of the art. Proceedings of the Fifth International Conference on Mushroom Biology & Mushroom Products, April, Shanghi, China.
[7] Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A. & Ziaiifar, A.M., 2015. Button Mushroom Drying Process by Infrared System. Innovative Food Science and Technologies. (In Farsi).
[8] Kotwaliwale, N., Bakane, P. & Verma. A., 2007, Changes in textural and optical properties of Oyster mushroom during hot air drying. Journal of Food Engineering, 78 (4), 1207-1211.
[9] Brennan, M., Le Port, G., Pulvirenti, A. & 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, 285-289.
[10] Giri, S. K., & Prasad. S. 2007, Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushroom. Journal of Food Engineering, 78 (2), 512-521.
[11] Singh, U., Jain, S., Doshi, A., Jain, H. & Chahar. V., 2008, Effects of Pretreatments on Drying Characteristics of Button Mushroom. International Journal of Food Engineering, 4(4), 1556-3758.
[12] Salehi, F., Kashaninejad, M. & Asadi Amirabadi, A., 2015. Investigation of Mass Transfer Kinetics during Combined Hot Air-Infrared Drying of Eggplant Slices. Innovative Food Science and Technologies. (In Farsi).
[13] Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J., & Demirci.A., 2011, Fundamentals and theory of infrared radiation. In, Pan, Z. Atungulu, G. G. (Eds.). Infrared heating for food and agricultural processing. New York. CRC press.
[14] Ratti, C. & Mujumdar. A.S., 1995, Infrared drying. in, mujumdar, A.S. (Ed.), handbook of industrial drying, vol. 1. Marcel Dekker Inc., New York., pp. 567–588.
[15] Nimmol,C., & Devahastin. S., 2011, Vacuum infrared drying. In, Pan, Z. Atungulu, G. G. (Eds.), Infrared heating for food and agricultural processing. New York. CRC press.
[16] Afzal M.T., Abe, T. & Hilida. Y., 1999, Energy and quality Aspect during Combined FIR Convection Drying of Barely. Journal of Food Engineering, 42, 177-188.
[17] Doymaz, I. 2007, Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering, 78, 1291-1297.
[18] Wong, J. Y., 2001, Theory of Ground vehicles.(3rd ed). John Wiley and Sons, Inc. www.FAOSTAT.org
[19] Babalis, S. J., & Belessiotis. V. G., 2004, Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying. Journal of Food Engineering, 65, 449-458.
[20] Gorjian, S., 2009, Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi).
[21] Panchariya, P. C., Popovic, D. & Sharma. A. L., 2002, Thin-layer modeling of black tea drying process. Journal of Food Engineering, 52, 349-357.
[22] Abbasi, S., Minaei, S. & Khoshtaghaza. M. H., 2014, Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. Journal of Agricultural Machinery, 4(1), 98-107. (In Farsi).
[23] Hebbar, H.U., Vishwanathan, K. H., & Ramesh. M. N. 2004, Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal of Food Engineering, 65, 557–563.
[23] Rao, P. S., Bal, S. & Goswami. T. K., 2007, Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. Journal of Food Engineering, 78 (2), 480-487.

Archive of SID
www.SID.ir

Kinetics Modeling of Thin-Layer Drying of Button Mushroom in Combined Infrared-Hot Air Dryer

Salehi, F. [1*], Mahdi Kashaninejad[2], Alireza Sadeghi Mahoonak[2], Aman Mohammad Ziaiifar[3]

1. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Assistant Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

(Received: 93/12/10 Accepted: 94/2/10)

Drying of button mushroom in a combined infrared-hot air dryer at power of 150, 250 and 375 W, temperatures of 50, 60 and 70 °C and air flow rates of 1, 2 and 3 m/s was investigated. The effect of lamp power, temperature and air flow rate on time and drying rate, moisture diffusion coefficients and activation energy were evaluated in a completely randomized design. The results showed that the effect of lamp power, temperature and velocity of air displacement on the drying process of button mushroom production is significant ($p<0.05$). Increase in infrared lamp power from 150 to 375 W, causes an increase in temperature from 50 to 70 ° C, and changes in the airflow rate from 1 to 3 m/s reduced the drying time of the samples 28.6, 42.7 and 15.5 %, respectively. Effective diffusivity coefficients of moisture and activation energy of button mushroom were between 6.2×10^{-9} to 19.7×10^{-9} m^2/s and 23.76 to 30.73 kJ/mol, respectively. For modeling of the drying process, Page, Newton and Logarithmic models with average correlation coefficient equal 0.996, 0.988 and 0.998 and average standard error equal 0.023, 0.042 and 0.015, had lower error compared to the other models, respectively.

Keywords: Button mushroom؛ Hot air؛ Infrared؛ Kinetics؛ Modeling

* Corresponding Author E-Mail Address: fs1446@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir