

مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک قارچ دکمه‌ای در خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ

فخرالدین صالحی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۲، علیرضا صادقی ماهونک^۲،

امان محمد ضیائی فر^۳

۱- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۲- دانشیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- استادیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۱۰)

چکیده

خشک شدن قارچ دکمه‌ای در یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ در توان‌های ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات، دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه بررسی شد. تأثیر توان لامپ، دما و سرعت جریان هوا بر زمان و آهنگ خشک شدن، ضرایب نفوذ رطوبت و انرژی فعال سازی در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. نتایج نشان داد تأثیر توان لامپ، دما و سرعت جابه‌جایی هوا بر فرآیند خشک شدن محصول قارچ دکمه‌ای معنی دار می‌باشد ($p < 0.05$). افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سلسیوس و تغییر سرعت جریان هوا از ۱ به ۳ متر بر ثانیه زمان خشک شدن نمونه‌ها را به ترتیب ۲۸/۶، ۴۲/۷ و ۱۵/۲ درصد کاهش داد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی فعال سازی قارچ دکمه‌ای به ترتیب بین 6.2×10^{-9} تا 1.97×10^{-9} مترمربع بر ثانیه و ۲۳/۷۶ تا ۳۰/۷۳ کیلوژول بر مول به دست آمد. برای مدل سازی فرآیند خشک شدن، مدل‌های پیچ، نیوتن و لگاریتمی به ترتیب با میانگین ضریب تبیین برابر ۰/۹۹۶، ۰/۹۸۸ و ۰/۹۹۸ و میانگین خطای استاندارد برابر ۰/۰۲۳، ۰/۰۴۲ و ۰/۰۱۵، در مقایسه با سایر مدل‌ها، خطای کمتری داشتند.

کلید واژگان: سینتیک، قارچ دکمه‌ای، مادون قرمز، مدل سازی، هوای داغ.

*مسئول مکاتبات: fs1446@yahoo.com

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 فرایندهای پیچیده انتقال جرم و حرارت می‌باشد [۱].

در زمینه 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 به صورت 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 نشان داد 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 پیچ، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است [۳].

گزار و مینایی [۴] تأثیر تغییرات دما و سرعت بر سینتیک خشک شدن کلزا را مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیچ 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 بررسی شده 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 رگ‌گیری تولید و معرفی شدند. این نژادها منشأ اکثر نژادهایی هستند که امروزه به‌طور تجاری در دنیا کشت و کار می‌شوند [۶]. 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 [۷-۸]. لذا به دلیل گسترش زمان نگهداری، باید تحت فرایند قرار گیرند. از این‌رو محققین روش‌های مختلفی نظیر استفاده از بسته‌بندی با اتمسفر تغییر یافته، منجمد کردن، خشک‌کردن، تیمار با محلول‌های آبی حاوی ترکیبات مهارکننده فعالیت آنزیمی و غیرفعال کردن آنزیم‌ها را جهت نگهداری و افزایش زمان ماندگاری قارچ مورد بررسی قرار داده‌اند [۹]. حذف آب و خشک‌کردن یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای قارچ‌های صدفی مورد استفاده قرار گرفته است و برای انجام این فرایند از خشک‌کن‌های مختلفی از قبیل خشک‌کن کابینتی، هوای داغ، انجمادی، بستریال و خورشیدی استفاده شده است [۱۰-۱۱].

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 پیشنهاد شده‌اند که در این میان روش‌های ترکیبی گسترش زیادی پیدا کرده‌اند [۱۰-۱۱]. 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، در نتیجه کیفیت ساختاری محصول نهایی افزایش و هزینه‌های فرآیند خشک شدن کاهش می‌یابد [۱۲-۱۳]. 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 [۱۴-۱۵].

مادون قرمز-هوای داغ و مدل سازی سینتیک خشک شدن آن می باشد.

۲- مواد و روش ها

خشک کردن

در این تحقیق از یک خشک کن ترکیبی مادون قرمز - هوای داغ آزمایشگاهی با قابلیت اتصال به کامپیوتر (شکل ۱) جهت پایش پیوسته خشک کردن قارچ دکمه ای استفاده گردید. جهت بررسی سینتیک خشک شدن، ترازوی دیجیتالی لوترون با قابلیت اتصال به کامپیوتر (با دقت ± 0.01 g) در قسمت پایینی خشک کن قرار گرفته و هر یک دقیقه تغییرات وزن را ثبت می کرد. ابتدا قارچ های دکمه ای سفید با قطر کلاهک ۵ سانتی متر تهیه و با آب سرد شستشوی سطحی داده و سپس آب سطحی آن ها توسط دستمال تمیز گرفته شد. سپس با یک چاقوی تیز، قارچ ها به طور عمودی به ورقه هایی به ضخامت ۱ سانتی متر برش داده شدند.



شکل ۱ خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای داغ مورد استفاده در این تحقیق.

جهت خشک کردن نمونه های برش خورده با خشک کن ترکیبی مادون قرمز - هوای داغ از متغیرهایی شامل توان های متفاوت لامپ مادون قرمز^۱ (۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۷۵ وات) در فاصله ۵ سانتی متر از ورقه های قارچ، دمای هوای داغ (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا (۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه) استفاده شد.

مصرف انرژی و کیفیت جو خشک شده در دو خشک کن همرفتی و ترکیبی مادون قرمز و هوای داغ توسط افضل و همکاران (۱۹۹۹) بررسی شده است. گزارش ها حاکی از این است که استفاده از اشعه مادون قرمز در خشک کن همرفتی باعث افزایش سرعت خشک شدن و کاهش قابل توجه انرژی مصرفی خشک کن می شود [۱۶].

مدل سازی سینتیک خشک شدن برش های بادمجان در یک خشک کن ترکیبی هوای داغ- مادون قرمز صالحی و همکاران (۲۰۱۵) بررسی شده است. افزایش دمای خشک کن از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد در توان ۱۵۰ وات باعث کاهش زمان خشک کردن از ۴۸ دقیقه به ۳۵ دقیقه شده است. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ وات به ۳۷۵ وات نیز، زمان خشک شدن برش های بادمجان از ۳۵ دقیقه به ۱۵ دقیقه کاهش یافت. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بادمجان در محدوده^۹ $2/4 \times 10^{-9}$ تا $8/1 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بوده و مدل پیچ برای مدل سازی ای نوع فرآیند خشک کردن توصیه شده است [۱۲]. صالحی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی خشک شدن قارچ دکمه ای 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 ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، سرعت خشک شدن ۱۰۴/۹ درصد و با کاهش ضخامت نمونه ها از ۱ به ۰/۵ سانتی متر، سرعت خشک شدن ۱۵/۸ درصد افزایش یافت [۷].

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. بررسی های به عمل آمده نشان داد که تاکنون پژوهشی در خصوص خشک کردن قارچ دکمه ای در خشک کن ترکیبی مادون قرمز-هوای داغ به صورت لایه نازک و اثر شرایط خشک کردن بر آن صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر عوامل مختلف شامل توان لامپ پرتو دهی مادون قرمز، دمای هوا و سرعت جریان هوای داغ بر سینتیک خشک کردن قارچ دکمه ای به روش ترکیبی

1. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

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

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 به صورت زیر می‌باشد:

(۴)

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

در اینجا، 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 ($m^2 s^{-1}$) می‌باشند. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله زیر به دست می‌آید:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

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

$$K_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

K_0 شیب خط می‌باشد. برای هر تیمار از ضریب نفوذهای به دست آمده 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]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right) \quad (7)$$

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

در ابتدای آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه محصول از آون با دمای 104 درجه سلسیوس و به مدت 4 ساعت استفاده گردید که میانگین رطوبت اولیه‌ی $89/6$ 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]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

MR : نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t : رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک ($d.b$)، M_e : رطوبت تعادلی نمونه‌ها ($d.b$) و M_0 : رطوبت اولیه نمونه‌ها ($d.b$) می‌باشند. با توجه به رابطه ۱، نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن وابسته است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_t و M_0 بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست [۱۷].

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

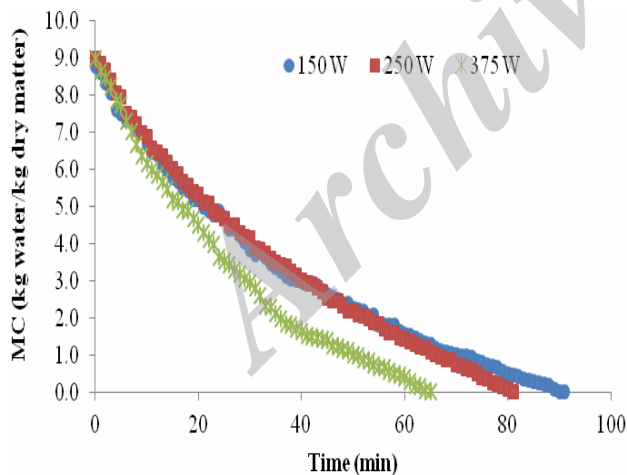
تعداد مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌های انتقال معمولاً برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف کند:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3)$$

۳- 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 مرطوب) یادداشت و به عنوان 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 ۲ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر فاکتورهای توان، دما و سرعت در سطح ۵٪ معنی‌دار شده است درحالی‌که اثر متقابل توان×سرعت و توان×دما×سرعت بر مدت زمان خشک شدن معنی‌دار نشده است. اثر فاکتورهای مورد بررسی بر پژوهش بر تغییرات مقدار رطوبت بازمان در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون قرمز، سرعت خشک شدن و کاهش رطوبت نمونه‌های قارچ افزایش می‌یابد (شکل ۲). مقایسه زمان خشک شدن ورقه‌های قارچ نشان می‌دهد که در اثر افزایش توان لامپ مادون قرمز از ۱۵۰ به ۳۷۵ وات زمان خشک شدن ۲۸/۶٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۲ تغییرات مقدار رطوبت بازمان و توان لامپ در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه.

ثابت جهانی گازها ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، T_{abs} دمای مطلق (K) می‌باشد.

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن ورقه‌های قارچ دکمه‌ای، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن که توسط محققان جهت بررسی این‌گونه فرآیندها توصیه شده است، استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن قارچ دکمه‌ای در جدول ۱ به نمایش درآمده است [۱۹، ۱۰، ۱۷].

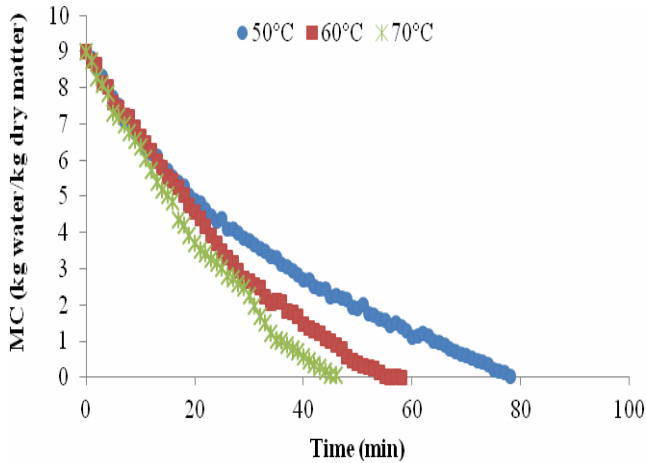
در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن، و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد.

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

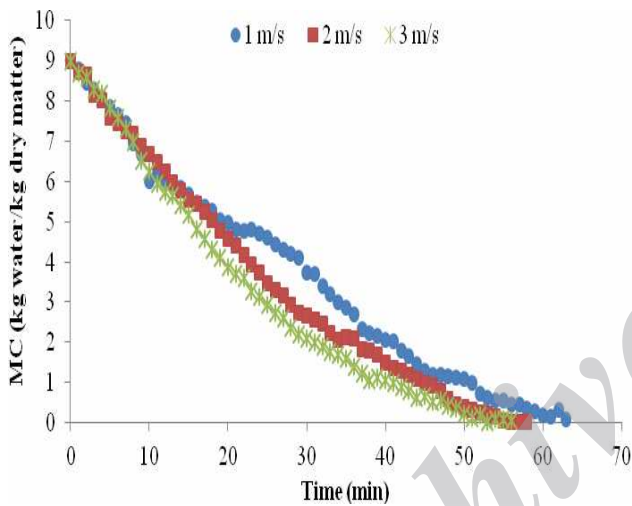
مدل	معادله
Model	Equation
انتشار فیک	$MR = a \exp(-c(t/t^2))$
Fick's Diffusion	
تقریب انتشار	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Approximation of diffusion	
پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$
Page	
پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
Modified Page -II	
نیوتن	$MR = \exp(-kt)$
Newton	
میدیلی	$MR = a \exp(-kt^n)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

MR: نسبت رطوبت، t زمان (min) و a, b, k, n, c, g, d.

ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند.



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



شکل ۴ تغییرات مقدار رطوبت با زمان و سرعت جریان هوای (۲۵۰ وات و ۶۰ 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 ثبت شده برای این تیمار ۲۷ دقیقه بود.

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	۴۹۹/۷	۲۴۹/۸	۰/۰۰۰
توان × دما	۴	۳۵۶/۶	۹۱/۴	۰/۰۰۰
توان × سرعت	۴	۱۰/۵	۲/۶	۰/۲۹۰
دما × سرعت	۴	۷۷/۲	۱۹/۳	۰/۰۰۰
توان × دما × سرعت	۸	۹/۹	۱/۲	۰/۷۵۳
خطا	۲۷	۵۴/۰	۲	
کل	۵۳	۹۰۳۹/۵		

به منظور جلوگیری از وارد آمدن صدمات به بافت محصولات کشاورزی حداکثر دما جهت خشک کردن آن‌ها ۸۰°C توصیه شده است [۲۰]. لذا حداکثر سطح دمایی انتخاب شده در این تحقیق ۷۰°C بود. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به دست آمده در مورد تغییرات رطوبت و آهنگ خشک شدن گردیده و نشان‌دهنده سرعت بالاتر فرآیند می‌باشد (شکل ۳). همچنین در اثر افزایش دما از ۵۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۲۶/۸٪ و ۲۱/۸٪ زمان خشک شدن کاهش یافت. افزایش دما از یک طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود و در نهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد [۵].

افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۲ و از ۲ به ۳ متر بر ثانیه، به ترتیب باعث کاهش ۷/۰۱٪ و ۸/۷۶٪ 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 به دست آمده از تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روندهای کاهش قابل توجهی باشند [۲۱،۵].

سلسیوس برابر $3/4 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $7/3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است [۲۲]. همچنین در مطالعه دیگری، ضریب نفوذ مؤثر برای ذرت در محدوده دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت بین $3/6 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $8/3 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ گزارش شده است [۱].

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

توان (W)	دما (°C)	سرعت (m/s)	ضریب نفوذ ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)
		۱	$6/2 \times 10^{-9}$
	۵۰	۲	$6/7 \times 10^{-9}$
		۳	$7/7 \times 10^{-9}$
		۱	$9/0 \times 10^{-9}$
۱۵۰	۶۰	۲	$10/0 \times 10^{-9}$
		۳	$11/5 \times 10^{-9}$
		۱	$11/5 \times 10^{-9}$
	۷۰	۲	$12/2 \times 10^{-9}$
		۳	$13/2 \times 10^{-9}$
		۱	$6/6 \times 10^{-9}$
	۵۰	۲	$7/2 \times 10^{-9}$
		۳	$7/5 \times 10^{-9}$
		۱	$9/6 \times 10^{-9}$
۲۵۰	۶۰	۲	$11/1 \times 10^{-9}$
		۳	$13/3 \times 10^{-9}$
		۱	$12/8 \times 10^{-9}$
	۷۰	۲	$14/0 \times 10^{-9}$
		۳	$14/5 \times 10^{-9}$
		۱	$9/2 \times 10^{-9}$
	۵۰	۲	$10/3 \times 10^{-9}$
		۳	$11/8 \times 10^{-9}$
		۱	$11/5 \times 10^{-9}$
۳۷۵	۶۰	۲	$13/5 \times 10^{-9}$
		۳	$17/7 \times 10^{-9}$
		۱	$17/7 \times 10^{-9}$
	۷۰	۲	$19/3 \times 10^{-9}$
		۳	$19/7 \times 10^{-9}$

هبار و همکاران [۲۳] از یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز با هوای داغ در سه حالت ترکیبی، مادون قرمز به تنهایی و هوای داغ به تنهایی برای خشک کردن سیب زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به مادون قرمز و هوای داغ بود.

تعیین ضریب نفوذ مؤثر

مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۳ گزارش شده 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 یکه‌روند 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 ۱۵۰ به ۳۷۵ وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $6/2 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $11/5 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد (۷۰ درجه سلسیوس و ۱ متر بر ثانیه).

همچنین در محدوده دمایی ۵۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس ضریب نفوذ رطوبت برای قارچ دکمه‌ای از $9/2 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $13/3 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تغییر می‌کند (۳۷۵ وات و ۱ متر بر ثانیه). با افزایش سرعت جریان هوا از ۱ به ۳ متر بر ثانیه نیز ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای قارچ دکمه‌ای ۲۴/۲ 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 [۲۲].

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی ۶۰ تا ۷۰ درجه

محاسبه انرژی فعال‌سازی

میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن قارچ دکمه‌ای در توان‌های مختلف و سرعت جریان‌های متفاوت در جدول ۴ به نمایش درآمده است. میزان انرژی فعال‌سازی برای قارچ در سه سرعت جریان ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه به ترتیب برابر ۳۰/۰۶، ۲۸/۸۹ و ۲۳/۷۶ kJ mol^{-1} به دست آمد (۳۷۵ وات).

جدول ۴ مقادیر انرژی فعال‌سازی در شرایط مختلف خشک‌کردن.

توان	سرعت	انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)	R
	۱	۲۸/۵۳	۰/۹۹۴
۱۵۰	۲	۲۷/۷۱	۰/۹۸۴
	۳	۲۴/۹۶	۰/۹۶۷
	۱	۳۰/۵۶	۰/۹۹۸
۲۵۰	۲	۳۰/۷۳	۰/۹۸۷
	۳	۳۰/۶۰	۰/۹۲۶
	۱	۳۰/۰۶	۰/۹۸۰
۳۷۵	۲	۲۸/۸۹	۰/۹۹۵
	۳	۲۳/۷۶	۰/۹۵۳

میزان انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در سه دبی ۱، ۱/۴ و ۱/۸ kg min^{-1} به ترتیب برابر ۱۴/۲۹، ۱۶/۱۹ و ۱۳/۷۶ kJ mol^{-1} گزارش شده 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 قرار گرفته است.

نتایج حاکی از این است که ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما افزایش می‌یابد و همچنین انرژی مخصوص مصرفی بین ۸/۵ تا $۱۰/۷ \text{ MJ kg}^{-1}$ گزارش شده است [۲۴].

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرآیند خشک شدن در جدول ۱ گزارش شده است. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های پیچ، نیوتن و لگاریتمی، در طی بررسی سینتیک خشک شدن قارچ دکمه‌ای، تنها نتایج این مدل‌ها در جدول ۵ گزارش شده است. در این جدول ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب این مدل‌ها ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب مدل نیوتنی (k) رابطه مشخصی با توان لامپ، دما و سرعت جریان دارد و با افزایش متغیرهای مورد نظر، افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با این مدل‌ها نشان داد 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 مادون قرمز-هوای داغ توصیه می‌شود.

مدلی 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].

۴- نتیجه‌گیری

اثر تغییر توان لامپ مادون قرمز، دما و سرعت جریان هوا بر خشک شدن لایه‌نازک قارچ دکمه‌ای در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-هوای داغ مورد بررسی 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 $۶/۲ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ تا $۱۹/۷ \times ۱۰^{-۹} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با افزایش توان لامپ مادون قرمز، دما و سرعت جریان هوا به‌طور محسوسی افزایش می‌یافت.

جدول ۵- ضریب تبیین (R)، خطای استاندارد (SE) و ضرایب مدل‌های استفاده شده در این تحقیق

توان	دما	سرعت	پیچ			نیوتن			لگاریتمی									
			SE	R	k	SE	R	k	SE	R	a	k	c					
		۱	۰/۹۹۶	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۹۹۹	۱/۱۰۲	۰/۰۱۹	۱/۱۱۹	۰/۰۲۱	-۰/۱۴۲	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸
	۵۰	۲	۰/۹۹۴	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۹۹۲	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۹۹۸	۱/۰۹۵	۰/۰۲۰	۱/۱۵۹	۰/۰۱۹	-۰/۲۰۱	۰/۰۳۳	۰/۹۹۲	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹
		۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۶	۰/۰۳۲	۰/۹۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۹۹۹	۱/۱۶۴	۰/۰۱۸	۱/۱۳۰	۰/۰۲۵	-۰/۱۲۵	۰/۰۲۹	۰/۹۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲
		۱	۰/۹۹۵	۰/۰۲۷	۰/۰۳۲	۰/۹۸۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۹۹۹	۱/۲۸۷	۰/۰۱۱	۱/۳۴۶	۰/۰۱۸	-۰/۳۴۹	۰/۰۵۰	۰/۹۸۴	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲
	۱۵۰	۲	۰/۹۹۷	۰/۰۲۲	۰/۰۳۵	۰/۹۸۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۹۹۸	۱/۳۶۸	۰/۰۰۹	۱/۲۹۲	۰/۰۲۳	-۰/۲۵۵	۰/۰۵۷	۰/۹۸۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
		۳	۰/۹۹۷	۰/۰۲۲	۰/۰۳۹	۰/۹۷۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۹۹۷	۱/۴۶۰	۰/۰۰۸	۱/۲۴۶	۰/۰۲۹	-۰/۱۸۲	۰/۰۶۵	۰/۹۷۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹
		۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۷	۰/۰۴۸	۰/۹۸۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۹۹۸	۱/۲۸۱	۰/۰۱۹	۱/۱۲۸	۰/۰۴۳	-۰/۰۶۸	۰/۰۴۲	۰/۹۸۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
	۷۰	۲	۰/۹۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۵۱	۰/۹۹۳	۰/۰۵۱	۰/۰۵۱	۰/۹۹۹	۱/۲۱۵	۰/۰۲۶	۱/۱۱۴	۰/۰۴۵	-۰/۰۶۸	۰/۰۳۳	۰/۹۹۳	۰/۰۵۱	۰/۰۵۱
		۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۳	۰/۰۵۳	۰/۹۸۹	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۹۹۸	۱/۲۶۵	۰/۰۲۳	۱/۱۴۲	۰/۰۴۵	-۰/۰۹۷	۰/۰۴۱	۰/۹۸۹	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳
		۱	۰/۹۹۵	۰/۰۲۶	۰/۰۲۹	۰/۹۹۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۹۹۵	۱/۱۴۶	۰/۰۱۶	۱/۲۲۹	۰/۰۱۸	-۰/۲۵۲	۰/۰۳۴	۰/۹۹۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹
	۵۰	۲	۰/۹۹۵	۰/۰۲۵	۰/۰۳۱	۰/۹۹۴	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۰/۹۹۵	۱/۰۸۵	۰/۰۲۳	۱/۱۳۸	۰/۰۲۲	-۰/۱۶۸	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱
		۳	۰/۹۹۲	۰/۰۳۳	۰/۰۳۲	۰/۹۹۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲	۰/۹۹۲	۱/۰۸۴	۰/۰۲۳	۱/۱۸۹	۰/۰۲۱	-۰/۲۲۷	۰/۰۳۵	۰/۹۹۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲
		۱	۰/۹۸۷	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	۰/۹۷۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۹۸۷	۱/۲۹۴	۰/۰۱۳	۱/۶۲۱	۰/۰۱۵	-۰/۶۴۶	۰/۰۶۲	۰/۹۷۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵
	۲۵۰	۲	۰/۹۹۶	۰/۰۲۴	۰/۰۳۹	۰/۹۸۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۹۹۶	۱/۳۶۲	۰/۰۱۲	۱/۴۴۷	۰/۰۲۲	-۰/۴۲۹	۰/۰۵۷	۰/۹۸۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹
		۳	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵	۰/۰۴۶	۰/۹۸۳	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶	۰/۹۹۸	۱/۳۵۹	۰/۰۱۴	۱/۲۶۲	۰/۰۳۴	-۰/۲۰۳	۰/۰۵۴	۰/۹۸۳	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶
		۱	۰/۹۹۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴۵	۰/۹۷۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۹۹۳	۱/۳۶۸	۰/۰۱۴	۱/۵۳۱	۰/۰۲۲	-۰/۵۲۹	۰/۰۶۳	۰/۹۷۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵
	۷۰	۲	۰/۹۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۴۷	۰/۹۷۷	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۹۹۴	۱/۳۶۵	۰/۰۱۵	۱/۵۷۱	۰/۰۲۳	-۰/۵۶۷	۰/۰۶۲	۰/۹۷۷	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷
		۳	۰/۹۹۵	۰/۰۲۷	۰/۰۵۲	۰/۹۸۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲	۰/۹۹۵	۱/۳۱۴	۰/۰۱۹	۱/۴۰۶	۰/۰۲۹	-۰/۴۰۱	۰/۰۵۳	۰/۹۸۲	۰/۰۵۲	۰/۰۵۲
		۱	۰/۹۹۷	۰/۰۱۹	۰/۰۳۹	۰/۹۹۲	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹	۰/۹۹۷	۱/۱۷۲	۰/۰۲۲	۱/۱۵۵	۰/۰۳۰	-۰/۱۵۱	۰/۰۳۳	۰/۹۹۲	۰/۰۳۹	۰/۰۳۹
	۵۰	۲	۰/۹۹۶	۰/۰۲۲	۰/۰۴۱	۰/۹۹۰	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱	۰/۹۹۶	۱/۱۹۴	۰/۰۲۲	۱/۲۱۴	۰/۰۲۸	-۰/۲۲۲	۰/۰۳۸	۰/۹۹۰	۰/۰۴۱	۰/۰۴۱
		۳	۰/۹۹۴	۰/۰۲۸	۰/۰۴۹	۰/۹۹۴	۰/۰۴۹	۰/۰۴۹	۰/۹۹۴	۱/۰۳۳	۰/۰۴۵	۱/۰۴۲	۰/۰۴۷	-۰/۰۳۰	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴	۰/۰۴۹	۰/۰۴۹
		۱	۰/۹۹۹	۰/۰۰۹	۰/۰۴۸	۰/۹۹۶	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۹۹۹	۱/۱۱۹	۰/۰۳۳	۱/۰۹۸	۰/۰۴۲	-۰/۰۸۴	۰/۰۲۱	۰/۹۹۶	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
	۳۷۵	۲	۰/۹۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۵۴	۰/۹۹۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۹۹۸	۱/۲۲۲	۰/۰۲۷	۱/۱۹۸	۰/۰۳۹	-۰/۱۸۳	۰/۰۳۸	۰/۹۹۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴
		۳	۰/۹۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۶۴	۰/۹۸۶	۰/۰۶۴	۰/۰۶۴	۰/۹۹۸	۱/۲۹۵	۰/۰۲۷	۱/۲۱۶	۰/۰۵۱	-۰/۱۵۳	۰/۰۴۷	۰/۹۸۶	۰/۰۶۴	۰/۰۶۴
		۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۷	۰/۰۶۲	۰/۹۸۹	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۰/۹۹۸	۱/۲۳۹	۰/۰۳۱	۱/۱۸۶	۰/۰۴۷	-۰/۱۶۲	۰/۰۴۰	۰/۹۸۹	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲
	۷۰	۲	۰/۹۹۵	۰/۰۲۵	۰/۰۷۷	۰/۹۹۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۹۹۵	۱/۰۸۵	۰/۰۲۵	۱/۰۶۶	۰/۰۶۶	-۰/۰۶۷	۰/۰۲۸	۰/۹۹۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
		۳	۰/۹۹۶	۰/۰۲۲	۰/۰۸۱	۰/۹۹۵	۰/۰۸۱	۰/۰۸۱	۰/۹۹۶	۱/۰۶۲	۰/۰۲۲	۱/۰۴۱	۰/۰۷۴	-۰/۰۳۹	۰/۰۲۴	۰/۹۹۵	۰/۰۸۱	۰/۰۸۱

به خاطر تحت پوشش قرار دادن این پژوهش قدردانی می‌گردد.

۶- 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).

میزان انرژی فعال‌سازی در محدوده ۲۳/۷۶ kJ/mol تا ۳۰/۷۳ kJ/mol به دست آمد. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه‌نازک قارچ دکمه‌ای، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت سه مدل پیچ، 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.

۵- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) (به شماره ۹۲۰۴۴۲۴۵) انجام گرفته است. لذا از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور

- [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] Hebbbar, 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.
- [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, Shanghai, China.
- [7] Salehi, F., Kashaninejad, M., Sadeghi Mahoonak, A. & Ziaifar, 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.

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

Salehi, F.^{1*}, Mahdi Kashaninejad², Alireza Sadeghi Mahoonak², Aman Mohammad Ziaifar³

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} m²/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