

بررسی سینتیک انتقال جرم در طی خشک کردن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز برش‌های بادمجان

فخرالدین صالحی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۲، علیرضا اسدی امیرآبادی^۳

1. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
2. دانشیار، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
3. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: 93/10/12، تاریخ پذیرش: 93/11/13)

چکیده

خشک کردن به‌عنوان یک روش مناسب فراوری جهت افزایش ماندگاری محصولات مختلف کشاورزی به‌کار برده می‌شود. برش‌های خشک‌شده بادمجان می‌توانند در انواع فراورده‌های غذایی کاربرد داشته باشند. در این پژوهش مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برش‌های بادمجان در یک خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز بررسی شد. تأثیر دمای هوای داغ در سه سطح 60، 70 و 80 درجه سانتی‌گراد و توان لامپ پرتودهی در سه سطح 150، 250 و 375 وات، بر زمان خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت در طی خشک شدن برش‌های بادمجان بررسی شد. نتایج نشان داد تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ پرتودهی بر فرایند خشک شدن برش‌های بادمجان معنی‌دار است. افزایش دمای خشک‌کن از 60 به 80 درجه سانتی‌گراد در توان 150 وات باعث کاهش زمان خشک کردن از 48 دقیقه به 35 دقیقه شد. با افزایش توان لامپ مادون قرمز از 150 وات به 375 وات، زمان خشک شدن برش‌های بادمجان از 35 دقیقه به 15 دقیقه کاهش یافت (80 درجه سانتی‌گراد). نتایج نشان داد که با افزایش توان منبع حرارتی مادون قرمز مقدار ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بادمجان در محدوده $2/4 \times 10^{-9}$ تا $8/1 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه بود. مدل پیچ در مدل‌سازی فرایند خشک کردن برش‌های بادمجان هم‌خوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت.

واژه‌های کلیدی: بادمجان، سینتیک، ضریب نفوذ، مدل پیچ.

1- مقدمه

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک و هم‌چنین محاسبه انرژی فعال‌سازی و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برخی از محصولات کشاورزی توسط محققان انجام گرفته است. لی و موری (1984)، با خشک کردن ذرت به صورت لایه نازک به این نتیجه رسیدند که دما، سرعت جابجایی، رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه محصول تأثیر مستقیمی بر سرعت خشک شدن دارد [12]. نتایج مدل‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر نشان داد که مدل تقریب انتشار در این خشک کردن، نسبت به سایر مدل‌ها، از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ، این مدل برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن شلتوک توصیه شده است [13]. گازر و مینایی (2008)، تأثیر تغییرات دما و سرعت جابه‌جایی هوا بر سینتیک خشک شدن کلزا را مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل‌سازی فرایند 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 [14]. در مطالعه دیگری، مدل‌سازی خشک شدن لایه نازک برنج در دما و سرعت‌های مختلف هوا بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی رفتار خشک شدن لایه نازک برنج هست [15].

تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی سینتیک انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن برش‌های بادمجان در خشک‌کن ترکیبی هوای داغ-مادون قرمز صورت نگرفته است. لذا، هدف این تحقیق بررسی اثر دمای خشک‌کن و توان لامپ پرتودهی مادون قرمز بر خشک کردن برش‌های بادمجان و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم آن می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تهیه نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، بادمجان واریته قلمی کشیده (*S. M var. Serpentinum*) از بازار گرگان تهیه گردید. برای انجام فرایند خشک کردن ابتدا بادمجان‌ها به ضخامت 0/5 سانتی‌متر برش عرضی داده شدند. برش‌های بادمجان بلافاصله پس از برش جهت پرتودهی توسط سامانه هوای داغ-مادون قرمز (شکل 1)

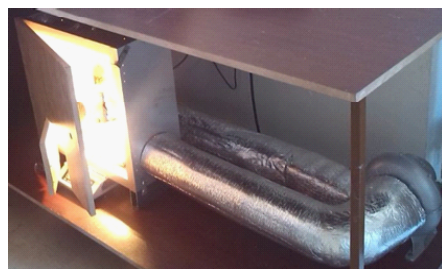
بادمجان¹ (*Solanum melongena. L*) به دلیل کاهش رطوبت و فعالیت آنزیمی بالا، دارای ماندگاری محدودی بوده و برای افزایش ماندگاری و کاهش سرعت تخریب ویژگی‌های کیفی آن می‌توان از روش‌هایی مانند انجماد، نگهداری در اتمسفر کنترل شده و خشک کردن استفاده نمود [3-1]. خشک کردن به عنوان یک روش مناسب فراوری جهت افزایش ماندگاری محصولات مختلف کشاورزی به کار برده می‌شود. برش‌های خشک شده بادمجان می‌توانند در انواع فرآورده‌های غذایی کاربرد داشته باشند [2، 4].

خشک کردن محصولات کشاورزی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری و محافظت آن‌ها به شمار می‌آید. با کاهش میزان آب موجود در محصولات، فعالیت میکروبی در آن‌ها کاهش می‌یابد. به علاوه، کاهش رطوبت محصولات، باعث کاهش مقدار وزن و حجم آن‌ها شده و بازده حمل و نقل و انبارداری محصولات را افزایش می‌دهد. در بعضی مواقع، خشک کردن بعضی تولیدات کشاورزی برای آسان تر شدن مصرف آن توسط مصرف کننده است [2، 5].

آکپینار و بیسر (2005)، رفتار خشک شدن لایه نازک ورقه‌های بادمجان در یک خشک‌کن هوای داغ را مورد بررسی قرار دادند. دماهای هوای خشک‌کن برابر 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد و سرعت جابجایی هوا نیز در دو سطح 1 و 1/5 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. اثر دمای هوای خشک‌کن و سرعت جریان هوا بر سرعت خشک کردن ورقه‌های بادمجان معنی دار گزارش شده است [6].

خشک کردن به وسیله اشعه مادون قرمز به ویژه به شکل لایه نازک روش مناسبی است. در این روش حرارت در محصول بدون ایجاد تغییرات نامطلوب ایجاد می‌شود. در نتیجه کیفیت محصول نهایی بالاتر و هزینه‌های فرایند خشک شدن کاهش می‌یابد [7-8]. اشعه مادون قرمز با سرعت بالاتری جذب پوسته محصول شده و سبب ایجاد حرارت می‌شود که نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی، که در آن بخشی از حرارت توسط خروج هوا به هدر می‌رود، راندمان بالاتری داشته و کیفیت محصولات خشک شده با این روش در مقایسه با روش هوای داغ بهتر می‌باشد [9-11].

1. Eggplant



شکل (1) سامانه هوای داغ-مادون قرمز جهت خشک کردن برش‌های بادمجان

مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس بررسی منابع انتشار یافته، سرعت جریان هوای 1 متر بر ثانیه، به دلیل این که سرعت متداول در خشک‌کن‌های صنعتی است، و فاصله 5 سانتی متری نمونه‌ها از لامپ، به دلیل اثر بیشتر و راندمان بالاتر خشک کردن، جهت تیمار دهی برش‌ها در نظر گرفته شدند.

2-2- خشک کردن

جهت خشک کردن نمونه‌های برش خورده با سامانه هوای داغ-مادون قرمز از متغیرهایی شامل دمای هوای داغ در سه سطح 60، 70 و 80 درجه سانتی‌گراد و توان‌های لامپ مادون قرمز¹ در سه سطح 150، 250 و 375 وات استفاده شد.

تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن، هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی² با دقت $\pm 0/01$ گرم که در درون دستگاه خشک‌کن تعبیه شده بود، به‌طور پیوسته ثبت گردید.

2-3- آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از دو تکرار آزمایش‌ها، در قالب طرح‌های کاملاً تصادفی و به‌صورت فاکتوریل انجام شد. برای رسم نمودارها از برنامه Excel (2007) و برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار Minitab 16 در سطح معنی‌دار 5٪ استفاده شد.

2-4- مدل‌سازی سینتیکی

جهت مدل‌سازی فرایند خشک شدن، ابتدا پارامتر نسبت رطوبت در طی خشک شدن برش‌های بادمجان با استفاده از رابطه 1 محاسبه گردید [16]:

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

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 1، 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 به‌صورت رابطه 2 ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست [16].

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

2-5- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

پدیده‌های انتقال رطوبت اغلب پیچیده بوده و به‌طور معمول برحسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. قانون دوم فیک (رابطه 3) برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرایند خشک کردن را توصیف کند.

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

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی می‌باشد. مطالعه انتشار قانون دوم فیک بر نفوذ جرم در طی دوره سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد [17]. برای به‌کار بردن قانون فیک فرض می‌گردد 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

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

تیغه به صورت رابطه 4 می‌باشد [2]:

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

در رابطه 4، 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 رابطه 5 به دست می‌آید [2]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (5)$$

ضریب نفوذ به طور معمول با رسم داده‌های تجربی خشک کردن برحسب LnMR نسبت به زمان تعیین می‌گردد. با رسم نمودار LnMR در واحد زمان، شیب خط به دست آمده را در رابطه 6 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. در نهایت میانگین ضریب نفوذهای به دست آمده گزارش شد.

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن برش‌های بادمجان، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن استفاده گردید. معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرایند خشک کردن برش‌های بادمجان در جدول 1 به نمایش درآمده است [2، 3 و 6]. در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش 1/34 استفاده شد.

3- نتایج و بحث

خشک کردن یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی محسوب می‌شود. در این روش، زمان ماندگاری محصول خشک شده افزایش یافته، هزینه نگهداری، حمل و نقل و بسته‌بندی کاهش می‌یابد [18].

در طی خشک کردن برش‌های بادمجان، زمان رسیدن رطوبت نمونه‌ها به 10 درصد (بر پایه مرطوب)، به عنوان نقطه پایانی فرایند (زمان خشک کردن) گزارش گردید [2]. نتایج حاصل از تجزیه واریانس، تأثیر دمای هوای داغ و توان لامپ مادون قرمز بر زمان خشک شدن برش‌های بادمجان آنالیز و در جدول 2 به نمایش درآمده است.

همان گونه که در جدول 2 مشاهده می‌شود، اثر فاکتورهای

جدول (1) مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برش‌های بادمجان.

مدل	معادله
انتشار فیک ¹	$MR = a \exp(-c(t/t^2))$
ونگ و سینگ ²	$MR = 1 + at + bt^2$
تقریب انتشار ³	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
پیچ ⁴	$MR = \exp(-kt^n)$
پیچ اصلاح شده ⁵	$MR = \exp(-c(t/l^2)^n)$
نیوتن ⁶	$MR = \exp(-kt)$
میدیلی ⁷	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
لگاریتمی ⁸	$MR = a \exp(-kt) + c$

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

1. Fick's Diffusion
2. Wang and Singh
3. Approximation of diffusion
4. Page
5. Modified Page -II
6. Newton
7. Midilli
8. Logarithmic

جدول (2) نتایج تجزیه واریانس اثر متغیرهای دمای هوای داغ و توان لامپ بر زمان خشک شدن برش‌های بادمجان

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P
توان	2	1912/44	956/22	0/000
دما	2	163/11	81/56	0/000
توان × دما	4	60/89	15/22	0/018
خطا	9	26/0	2/89	
کل	17	2162/44		

بادمجان (ضخامت 6 میلی‌متر) در خشک کردن هوای داغ را بررسی و گزارش کردند که زمان رسیدن به مقدار رطوبت 0/04 g water/dry matter در شرایط مختلف خشک کردن، بین 180 تا 340 دقیقه است [6].

امیری چایجان و همکاران (2013)، از یک خشک‌کن مادون قرمز با توان‌های 500، 1000 و 1500 وات جهت خشک کردن پسته استفاده کردند. نتایج حاکی از افزایش نفوذپذیری رطوبت با افزایش توان مادون قرمز است. همچنین توان مادون قرمز اثر معنی‌داری بر زمان خشک شدن پسته دارد و با افزایش توان، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [10].

شکل 4 روند تغییرات $Ln(MR)$ نسبت به زمان در توان‌های متفاوت در هوا با درجه حرارت 60 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید. مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول 3 گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، با افزایش توان لامپ پرتودهی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد. با افزایش توان لامپ از 150 به 375 وات، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $3/46 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $8/13 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد (دمای هوا 80 درجه سانتی‌گراد).

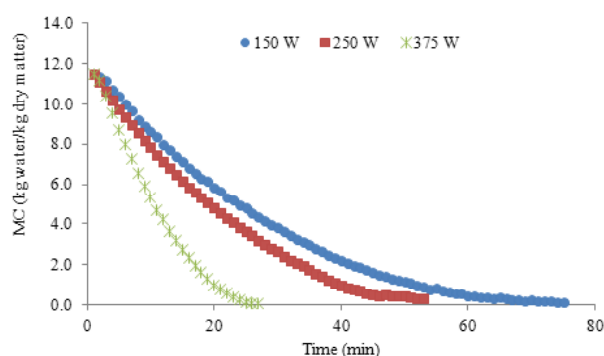
دویماز (2011)، گزارش کرد که ضریب نفوذ رطوبت برای برش‌های بادمجان با افزایش دمای خشک‌کن هوای داغ از 50 به 80 درجه سانتی‌گراد، از $5/575 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $9/475 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد [2].

میزان ضریب نفوذ مؤثر برای خشک کردن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در محدوده دمایی 60 تا 70 درجه سانتی‌گراد 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. در

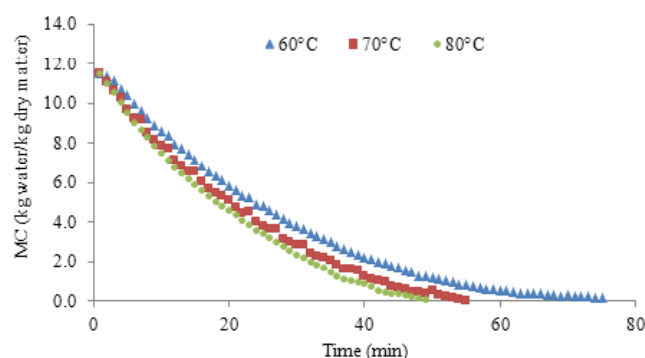
دمای هوای داغ و توان لامپ و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح 5٪ معنی‌دار شده است. اثر فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش بر تغییرات مقدار رطوبت با زمان، در شکل‌های 2 و 3 به نمایش درآمده است. افزایش دمای خشک‌کن از 60 به 80 درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش زمان خشک کردن از 48 دقیقه به 35 دقیقه شد (توان 150 وات). همچنین با افزایش توان لامپ مادون قرمز از 150 به 375 وات، زمان خشک شدن برش‌های بادمجان از 35 به 15 دقیقه کاهش یافت (80 درجه سانتی‌گراد). افزایش توان لامپ باعث افزایش دمای خشک‌کن می‌گردد که از طرف دیگر باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا، به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و باعث گرم شدن سریع‌تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می‌شود. در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [15، 19]. هبار و همکاران (2004)، 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 سیب‌زمینی و هویج استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کاهش زمان خشک شدن و کاهش انرژی مصرفی در خشک‌کن ترکیبی نسبت به سامانه‌های انفرادی مادون قرمز و هوای داغ بود [20]. همان‌طور که در شکل‌های 2 و 3 ملاحظه می‌شود با افزایش توان لامپ مادون قرمز، مقدار کاهش رطوبت برش‌های بادمجان افزایش می‌یابد. بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به دمای 60 درجه سانتی‌گراد و توان 150 وات (48 دقیقه) و کم‌ترین زمان خشک شدن نیز مربوط به دمای 80 درجه سانتی‌گراد و توان 375 وات است که مدت زمان ثبت شده برای این تیمار 15 دقیقه به دست آمد. آکپینار و بیسر (2005)، رفتار خشک شدن برش‌های

برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برش‌های بادمجان، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید [1] که در نهایت مدل پیچ به دلیل بالا بودن شاخص ضریب همبستگی و پایین بودن خطای استاندارد، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن، انتخاب گردید. بنابراین در این مقاله فقط نتایج مربوط به مدل پیچ در جدول 4 ارائه شده است. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرایند خشک کردن برش‌های بادمجان با استفاده از سامانه هوای داغ-مادون‌قرمز توصیه می‌شود.

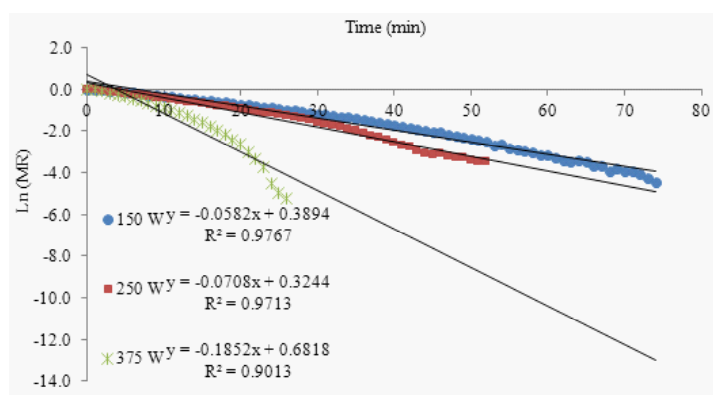
این مطالعه همچنین استفاده از مدل لگاریتمی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت ذرت توصیه شده است [21]. مدل‌های مورد استفاده جهت مدل‌سازی فرایند خشک شدن در جدول 1 گزارش شده است. با توجه به خطای کم‌تر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل پیچ، در طی بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های بادمجان، نتایج این مدل در جدول 4 گزارش و ضریب همبستگی، خطای استاندارد و ضرایب این مدل نیز ارائه شده است.



شکل (2) اثر تغییر توان منبع حرارت دهی بر رطوبت برش‌های بادمجان (درجه حرارت هوای داغ 60 درجه سانتی‌گراد)



شکل (3) اثر تغییر دمای هوای داغ بر رطوبت برش‌های بادمجان (لامپ پرتودهی 150 وات)



شکل (4) مقادیر $\ln(MR)$ در مقابل زمان برای لامپ‌های پرتودهی مادون‌قرمز در هوای با درجه حرارت 60 درجه سانتی‌گراد

دویماز (2011)، گزارش کرد که مدل‌های لگاریتمی و ننگ و سینگ و میدیلی به خوبی رفتار خشک شدن برش‌های بادمجان را در طی خشک کردن با هوای داغ نمایش می‌دهند [2]. رفتار خشک شدن لایه نازک برش‌های بادمجان در یک خشک کن آزمایشگاهی توسط ارتکین و یالدیز (2004)، مطالعه و مدل میدیلی به عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن بادمجان معرفی شد [3].

4- نتیجه گیری

خشک کردن یکی از روش‌هایی است که با کمک آن می‌توان ماندگاری بادمجان را افزایش داد. در این پژوهش خشک کردن برش‌های بادمجان در یک خشک کن ترکیبی هوای داغ- پیش‌بینی روند خشک شدن انتخاب گردید.

جدول (3) مقادیر ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک کردن

R	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})	دمای هوای داغ ($^{\circ}C$)	توان (W)
0/99	$2/42 \times 10^{-9}$	60	150
0/97	$2/96 \times 10^{-9}$	70	
0/95	$3/46 \times 10^{-9}$	80	
0/99	$2/92 \times 10^{-9}$	60	250
0/94	$3/42 \times 10^{-9}$	70	
0/96	$3/88 \times 10^{-9}$	80	
0/95	$7/71 \times 10^{-9}$	60	375
0/98	$7/21 \times 10^{-9}$	70	
0/97	$8/13 \times 10^{-9}$	80	

جدول (4) ضریب همبستگی، خطای استاندارد و ضرایب مدل پیچ.

SE	R	n	k	دمای هوای داغ ($^{\circ}C$)	توان (W)
0/012	0/999	1/254	0/017	60	150
0/022	0/996	1/219	0/024	70	
0/024	0/996	1/210	0/028	80	
0/018	0/998	1/231	0/024	60	250
0/025	0/996	1/233	0/026	70	
0/021	0/997	1/271	0/027	80	
0/016	0/998	1/424	0/035	60	375
0/016	0/998	1/223	0/073	70	
0/034	0/991	1/044	0/125	80	

- [11] Nimmol, C., Devahastin. S. (2011). *Vacuum Infra-red Drying. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. New York, CRC press.
- [12] Li, H., Morey. R.V. (1984). Thin-layer drying of yellow dent corn. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 27, 581-585.
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Doymaz, I., Pala. M., (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *J. Food Eng.*, 60, 125-130.
- [16] Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng.*, 78, 1291-1297.
- [17] Wong, J.Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*, 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc.
- [18] Salehi, F., Abbasi Shahkoh, Z., Godarzi, M. (2014). Apricot osmotic drying modeling using genetic algorithm-artificial neural network. *J. Innovative Food Sci. Technol.*, (In Farsi).
- [19] Gorjian, S. (2009). Modelling of thin layer drying kinetics of barberry fruit. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (In Farsi).
- [20] Hebbbar, H.U., Vishwanathan, K.H., Ramesh. M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *J. Food Eng.*, 65, 557-563.
- [21] Abbasi, S., Minaei, S., Khoshtaghaza. M. H. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption thin layer drying of corn. *J. Agri. Machinery*. 4(1), 98-107. (In Farsi).
- [1] اسدی امیرآبادی، ع. (1393) سینتیک غیرفعال سازی آنزیم پلی فنل اکسیداز در بادمجان توسط سامانه مادون قرمز. پایان نامه کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- [2] Doymaz, I. (2011). Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *J. Food Process. Preserv.*, 35(2), 280-289.
- [3] Ertekin, C., Yaldiz O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. Food Eng.*, 63, 349-359.
- [4] Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., Tagawa, A. (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *J. Food Eng.*, 83(3), 422-429.
- [5] Singh. P., Heldman. D.R. (1993). *Introduction to Food Engineering*. Second edition. Academic press, Inc. San Diego, CA.
- [6] Akpınar, E.K., Bicer Y. (2005). Modeling of the drying of eggplants in thin-layers. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 40, 273-281
- [7] Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J., Demirci, A., (2011). *Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*. New York, CRC press.
- [8] Strumillo, C., Kudra. T. (1987). *Drying, Principles, Applications and Design*. Gordon and Breach Science Publisher, USA.
- [9] Ratti, C., Mujumdar. A.S. (1995). *Infrared Drying. in, Mujumdar. Handbook of industrial drying*, vol. 1. New York, pp 567-588.
- [10] Amiri Chayjan, R., Tabatabaei Bahrabad, S.M., Rahimi S.F. (2013). Modeling infrared-convective drying of pistachio nuts under fixed and fluidized bed conditions. *J. Food Process. Preserv.*, pp 12083.