



انتخاب و ارزیابی مدل‌های خشک‌کردن لایه نازک برای توصیف سینتیک خشک شدن برش‌های سیر در

خشک‌کن فروسرخ

اشرف گوهری اردبیلی^{۱*}، نوید گودینی^۲، فخرالدین صالحی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی بهار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی و افزایش کیفیت محصول خشک‌شده، یک خشک‌کن فروسرخ ساخته شد که می‌توان از آن برای خشک‌کردن میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده کرد. در این پژوهش مدل‌سازی سینتیک خشک شدن سیر در یک خشک‌کن فروسرخ بررسی شد. تأثیر فاصله نمونه‌ها از لامپ پرتودهی در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر و اثر ضخامت برش‌های سیر در سه سطح ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر بر سرعت انتقال جرم و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در طی فرآیند خشک شدن سیر بررسی شد. برای تعیین مدل سینتیکی مناسب در فرآیند خشک‌کردن، منحنی‌های خشک‌کردن می‌توانند تحت شرایط تعریف‌شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. لذا، در این پژوهش، جهت بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های سیر، مدل‌های استاندارد بر داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. با افزایش فاصله نمونه‌ها از منبع حرارتی از ۵ به ۱۰ سانتی‌متر، میانگین زمان خشک شدن سیر از ۳۵/۸ دقیقه به ۳۷/۳ دقیقه افزایش یافت. با افزایش ضخامت نمونه‌ها از ۳ به ۹ میلی‌متر نیز میانگین زمان خشک شدن سیر از ۲۲/۷ دقیقه به ۵۰/۹ دقیقه افزایش یافت. اثر فاصله نمونه از لامپ حرارتی فروسرخ و ضخامت نمونه بر تغییرات ضریب نفوذ مؤثر رطوبت سیر بررسی و نشان داد که با کاهش فاصله و افزایش ضخامت نمونه‌ها، مقادیر این ضریب افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله نمونه از لامپ از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از $2/71 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $9 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش‌های سیر برای ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر به ترتیب برابر $0/94 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، $2/72 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و $5/04 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. در مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن سیر مدل میدیلی نسبت به سایر مدل‌ها با بزرگ‌ترین مقدار ضریب تبیین و کوچک‌ترین خطا، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایش را داشت.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

زمان خشک شدن،

سیر،

مدل میدیلی،

نفوذ مؤثر رطوبت.

DOI: 10.22034/FSCT.19.132.377
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.132.28.1

* مسئول مکاتبات:

a.gohari@basu.ac.ir

۱- مقدمه

سیر (*Allium sativum* L.) تازه یک محصول کشاورزی با ارزش تغذیه‌ای بالا است که در اوایل تابستان بیشتر در بازار عرضه می‌شود. سیر غنی از آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، ترکیبات فنلی و ترکیبات ضد میکروبی است. سیر به صورت تازه یا خشک‌شده، به عنوان طعم‌دهنده در انواع غذاها استفاده می‌شود. سیرهای خشک‌شده ماندگاری بیشتری نسبت به سیرهای تازه دارند. سیر خشک یکی از افزودنی‌های غذایی است که از نظر تجاری اهمیت زیادی دارد و به صورت ورقه یا پودر تهیه می‌شود. سیر، به دلیل داشتن ترکیب‌های عطر و طعم‌دهنده، نسبت به گرما حساس است، از این رو فرآیند خشک‌کردن آن باید به گونه‌ای باشد تا کیفیت محصول نهایی از نظر رنگ، عطر، طعم، و مواد تشکیل‌دهنده تا حد امکان حفظ شود [۱، ۲]. بیات (۲۰۰۶) در پژوهشی، اثر شرایط گوناگون خشک‌کردن با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس بر کیفیت نهایی سیر خشک را بررسی کرد. منحنی‌های خشک‌کردن نشان داد که رطوبت سیر به صورت تابعی نمایی با مدت زمان خشک‌کردن کاهش یافته و خشک‌کردن سیر بیشتر در مرحله نزولی فرآیند انجام می‌شود. ضخامت ۳ میلی‌متر ورقه‌های سیر در هر یک از شرایط دمایی مناسب‌ترین کیفیت را به دست داد ولی با طولانی‌ترین زمان خشک‌کردن همراه بوده است. بر اساس نتایج این پژوهش، از این ضخامت می‌توان در شرایط دمایی بالاتر از ۶۰ درجه سلسیوس به منظور جبران آثار منفی ناشی از دماهای بالا استفاده کرد [۱]. بیات و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش دیگری پایداری فیزیکی پودر سیر خشک‌شده با روش‌های خشک‌کردن انجمادی و جریان هوای گرم را بررسی کردند. نتایج خشک‌کردن ورقه‌های ۲ میلی‌متری سیر با دو روش انجمادی و جریان هوای گرم نشان داده است که مقدار پیرووات پودر سیر انجمادی بیشتر و دانسیته و تغییرات رنگ آن به صورت معنی‌داری کمتر از نمونه دیگر بوده است [۳]. پیشوافرد و آزادمرد دمیرچی (۲۰۲۰) تأثیر پیش تیمارهای مختلف پیش از خشک‌کردن سیر بر کیفیت پودر سیر تولیدی را بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مقدار رطوبت در همه تیمارها در طی نگهداری تغییر معنی‌داری نداشته است. نمونه کنترل بیشترین میزان بذرنگی و قهوه‌ای شدن را در بین نمونه‌ها داشته است. به علت محلول بودن فلاونوئیدها و ویتامین ث در آب، تمامی

پیش تیمارها موجب کاهش مقدار این ترکیبات در پودر سیر تولیدی شدند [۴]. رسولی و سیدلو (۲۰۱۲) تغییرات و مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی سیر در طی خشک‌کردن به صورت همرفتی را بررسی کردند. در این تحقیق، لایه‌های نازک سیر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در خشک‌کن هوای داغ آزمایشگاهی با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه خشک شدند. نتایج بررسی تغییرات درصد چروکیدگی طی خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت ورقه‌ها نشان داد که اثر دمای هوای خشک‌کن و نیز ضخامت ورقه‌ها روی چروکیدگی محصول معنی‌دار نیست و چروکیدگی فقط تابعی از میزان رطوبت محصول می‌باشد [۵].

یکی از اهداف اصلی خشک‌کردن محصولات کشاورزی، کاهش محتوای رطوبت و رساندن آن به سطحی مطلوب برای دست یافتن به حداکثر مدت ماندگاری و کاهش ضایعات است. با توجه به گسترش علوم جدید و روش‌های مختلف خشک‌کردن، استفاده از روش‌های نوین نظیر پرتودهی فروسرخ لازم است مورد مطالعه قرار گیرد [۶، ۷]. در پژوهشی حسنی و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر خشک‌کردن فروسرخ بر خصوصیات کیفی میوه سماق را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خشک‌کردن به روش فروسرخ علاوه بر کاهش زمان خشک‌کردن روش مناسبی برای حفظ خواص شیمیایی و تغییرات رنگ کل میوه سماق است [۸]. رایینی‌مقبلی و همکاران (۲۰۲۱) فرایند خشک‌کردن شلتوک برنج با خشک‌کن فروسرخ را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که فاکتورهای مورد مطالعه دما و رطوبت تأثیر معنی‌داری بر روی زمان خشک شدن دارند اما هیچ کدام از دو فاکتور دما و رطوبت بر روی درصد پوسته معنی‌دار نبوده‌اند [۷]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۹) سیستیک خشک‌کردن فروسرخ برش‌های میوه به و مدل‌سازی آن با روش الگوریتم ژنتیک-شبکه‌های عصبی مصنوعی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس زمان خشک‌کردن حدود ۶۰ درصد کاهش یافت (افزایش سرعت خشک‌کردن) [۹].

بررسی مقالات منتشر شده در زمینه خشک‌کردن محصولات کشاورزی حاکی از این بود که در ارتباط با بررسی سیستیک انتقال جرم و محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت هنگام

نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نمی باشد [۱۲].

$$MR = \frac{M_t}{M_o}$$

۲-۳- محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سراسر فرآیند خشک کردن، انتشار پدیده‌ی غالب انتقال رطوبت از مرکز نمونه به سطح است، بنابراین در این مطالعه فضای انتقال جرم به صورت یک صفحه تخت (تیغه) در نظر گرفته شد و حذف رطوبت بر اساس قانون دوم فیک، طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه شد [۱۳].

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

در این رابطه، L نصف ضخامت نمونه (برحسب متر)، n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (s) و D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2s^{-1}) می باشد. به صورت متداول، جمله‌ی اول این سری در نظر گرفته می شود و معادله‌ی بالا به صورت رابطه ۴ ساده شده و ضریب نفوذ مؤثر از طریق این رابطه و محاسبه شیب به دست می آید.

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

با گرفتن لگاریتم طبیعی از طرفین رابطه ۴، رابطه ۵ به دست می آید:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} + \left(- \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right)$$

سپس ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی ($\ln MR$) در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید.

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

در این رابطه، Slope شیب خط می باشد.

۲-۴- مدل سازی سینتیکی

اصل فرآیند مدل سازی بر اساس داشتن مجموعه‌ای از معادلات ریاضی دقیق و ساده‌ای می باشد که می تواند فرایندهایی انتقال جرم را با دقت بالا توصیف کنند. در این مطالعه، به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن سیر، با کمک

خشک کردن برش‌های سیر با روش فروسرخ مطالعه‌ای صورت نگرفته است؛ لذا، هدف از این پژوهش، بررسی اثر ضخامت برش‌های سیر و فاصله لامپ پرتودهی از نمونه بر سرعت انتقال جرم و همچنین مدل سازی فرآیند با مدل‌های تجربی می باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فرآیند خشک کردن

جهت خشک کردن سیرهای برش خورده با ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر از خشک‌کن فروسرخ با توان ۲۵۰ وات استفاده گردید و فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ در سه فاصله ۵، ۷/۵ و ۱۰ سانتی‌متر تنظیم شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن هر یک دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی^۱ با دقت ± 0.01 گرم که در زیر خشک‌کن قرار گرفته بود، ثبت گردید [۱۰]. کاهش محتوای رطوبت سیرها، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲- محاسبه نسبت رطوبت

در اکثر تحقیقات مدل‌های ریاضی حاکم بر فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی و غذایی را براساس نسبت رطوبت^۲ (MR) به دست می آورند. نسبت رطوبت می تواند داده‌های به دست آمده را یکپارچه و یکدست تر نماید و از پراکندگی داده‌ها جلوگیری می نماید. با داشتن رطوبت اولیه محصول و کاهش وزن آن، روند انتقال رطوبت و جرم در حین خشک شدن محصول از طریق رابطه ۱، محاسبه می گردد [۱۱].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

در این رابطه، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_o محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_o بسیار کوچک می باشد؛ بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه ۲ ساده

1. Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)
2. Moisture ratio (MR)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی سینتیک انتقال جرم

در بین روش‌های مختلف فرآوری، خشک‌کردن فرآیندی است که طی آن فعالیت آبی ماده غذایی با حذف آب از طریق پدیده تبخیر کاهش می‌یابد؛ اما کیفیت محصولاتی که به روش سنتی خشک می‌شوند و به شکل بارزی تحت تأثیر تغییرات طی تولید و نگهداری هستند، نسبت به ماده غذایی اصلی کمتر است [۱۵]. نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر فاصله نمونه‌ها از لامپ فرسرخ و ضخامت برش‌های سیر بر زمان خشک شدن سیر آنالیز و در جدول ۱ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر متغیر مستقل ضخامت در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است ($P < 0.05$) اما اثر متغیر فاصله و متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار نشده است ($P > 0.05$).

داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های تجربی مختلف خشک‌کردن، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندسون و پایس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن سیر و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند [۱۴]. به‌منظور مدل‌کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

۲-۵- آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تمام آزمون‌ها در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد. برای رسم نمودارها نیز از برنامه Excel (۲۰۰۷) استفاده شد.

Table 1 Results of analysis of variance for drying time parameters of garlic slices during drying by infrared

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Distance	2	11.56	5.78	0.915
Thickness	2	3584.89	1792.44	0.000
Distance × Thickness	4	66.22	16.56	0.902
Error	18	1159.33	64.41	
Total	26	4822.00		

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش ضخامت برش‌ها، زمان خشک شدن نمونه‌ها، افزایش یافته است. بیش‌ترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه با ضخامت ۹ میلی‌متر بود که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت (۵۳ دقیقه) و کمترین زمان خشک شدن نیز مربوط به نمونه با ضخامت ۳ میلی‌متر بود که در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت که میانگین مدت‌زمان خشک شدن برای این تیمار ۲۰/۷ دقیقه به دست آمد.

۳-۲- نتایج محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

امروزه، خشک‌کردن محصولات کشاورزی روشی توسعه یافته است که با حذف بخشی از رطوبت منجر به پایداری فیزیکوشیمیایی محصول شده و همچنین باعث تولید محصولات مختلف با خواص کیفی جدید و با ارزش غذایی و اقتصادی متفاوت می‌شود. ضریب نفوذ رطوبت مهم‌ترین ویژگی در محاسبات خشک‌کردن است. بررسی سینتیک انتقال

هدف اصلی از فرآیند خشک‌کردن تولیدات کشاورزی، کاهش محتوای رطوبت به سطحی ایمن برای رسیدن به حداکثر ماندگاری می‌باشد. در شکل ۱ اثر فاصله نمونه‌ها از لامپ فرسرخ و ضخامت برش‌های سیر بر زمان خشک شدن گزارش شده است.

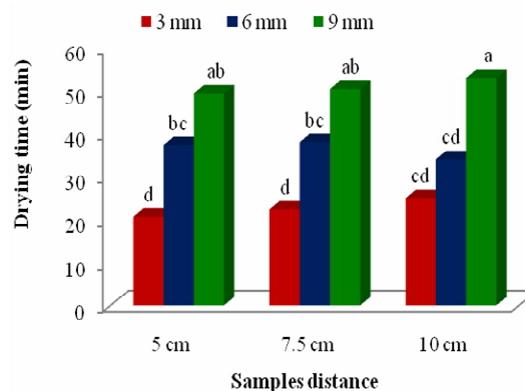


Fig 1 Average of garlic slices drying time at different drying conditions by infrared system Means with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

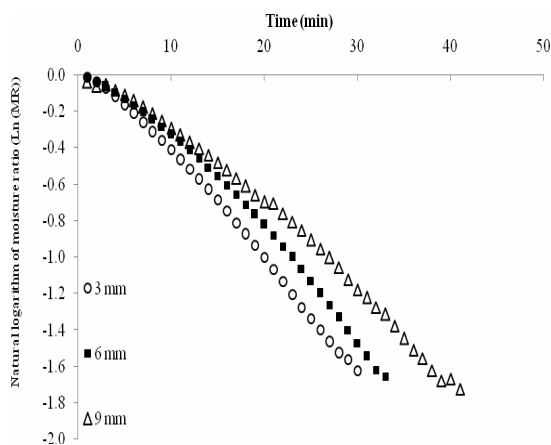


Fig 3 Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of garlic slices at different samples thickness (10 cm distance).

مقادیر مختلف میزان ضریب نفوذ مؤثر برای تیمارهای تحقیق، در جدول ۲ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با کاهش فاصله نمونه از لامپ، به دلیل افزایش نفوذ پرتو فروسرخ و افزایش سرعت انتقال حرارت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است. با کاهش فاصله نمونه از لامپ از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت از $۲/۷۱ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $۳/۶۳ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. در دمای بالاتر (کاهش فاصله با لامپ) به دلیل خروج سریع‌تر رطوبت (افزایش نفوذ رطوبت)، فرایند خشک شدن در زمان کمتری روی می‌دهد. این کاهش زمان خشک شدن که در نتیجه افزایش دما روی می‌دهد، می‌تواند به دلیل افزایش فشار بخار آب درون برش‌های سیر باشد که مهاجرت رطوبت را افزایش می‌دهد. حسنی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که استفاده از خشک‌کن فروسرخ سبب کاهش زمان خشک کردن میوه سماق نسبت به روش‌های خشک کردن سنتی (سایه و آفتابی) می‌شود. همچنین میزان اسیدهای آلی و ویتامین ث میوه سماق در خشک کردن به این روش در مقادیر بالایی نسبت به روش خشک کردن به وسیله خشک‌کن ماکروویو، حفظ می‌شود [۸]. در نتایج پژوهش دیگری، حسینی و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که افزایش توان تابش فروسرخ، سبب افزایش ضرایب نفوذ مؤثر می‌گردد [۱۷].

جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول باشد. شکل ۲ روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت (LnMR) را نسبت به زمان در فواصل مختلف و ضخامت ۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد. شکل ۳ نیز روند تغییرات لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت نسبت به زمان برای ضخامت‌های مختلف در فاصله ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. شیب این خطوط جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر استفاده گردید.

با افزایش ضخامت نمونه‌های سیر از ۳ به ۶ و از ۶ به ۹ میلی‌متر، مشاهده گردید که ضریب نفوذ رطوبت به ترتیب از $۰/۹۴ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $۲/۷۲ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و از $۲/۷۲ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $۵/۴۵ \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش می‌یابد. این بخش از نتایج هم‌راستا با نتایج محمدی و همکاران است. این پژوهشگران بهینه‌سازی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه "به" را بررسی و گزارش کردند که با افزایش ضخامت در تمامی دماهای مورد مطالعه، ضریب نفوذ رطوبت دارای روند افزایشی بوده است [۱۶]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۹) سینتیک خشک کردن فروسرخ برش‌های میوه به و مدل‌سازی آن را بررسی کردند. افزایش دما از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس سبب افزایش ضریب انتشار مؤثر از $۱۰/۸ \times 10^{-9}$ به $۲۶/۱ \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه گردید [۹].

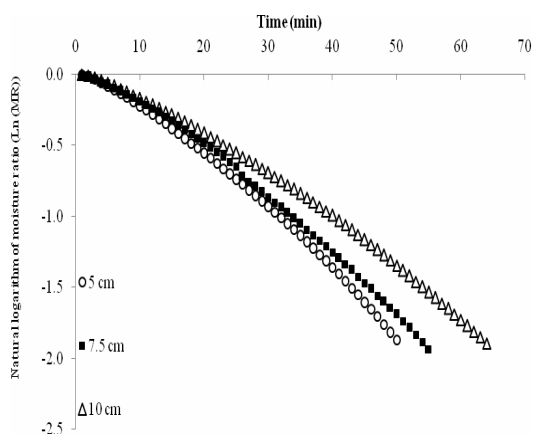


Fig 2 Variations of the natural logarithm of moisture ratio (Ln (MR)) values versus drying time of garlic slices at different samples distance (9 mm thickness).

Table 2 Effective moisture diffusivity values (D_{eff}) of garlic slices at different infrared drying conditions

Distance (cm)	Thickness (mm)	Effective diffusivity (m^2s^{-1})	r
5	3	1.25×10^{-9}	0.995
5	6	3.38×10^{-9}	0.983
5	9	6.27×10^{-9}	0.985
7.5	3	8.41×10^{-10}	0.994
7.5	6	2.49×10^{-9}	0.998
7.5	9	4.99×10^{-9}	0.995
10	3	7.42×10^{-10}	0.998
10	6	2.30×10^{-9}	0.993
10	9	5.08×10^{-9}	0.994

لگاریتمی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). در این جدول، MR، نسبت رطوبت، t زمان (min) و n، k، b، c و a، ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین و حداقل مقادیر خطا باشد. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، مطابق با شرایط ذکر شده، در مورد فرآیند خشک‌کردن سیر، مدل میدیلی است.

۳-۳- انتخاب بهترین مدل برای برازش داده‌ها

برای تعیین مدل مناسب در فرآیند خشک‌کردن، منحنی‌های خشک‌کردن می‌توانند تحت شرایط تعریف‌شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک‌کردن سیر (با استفاده از رابطه شماره ۲) و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و

Table 3 The statistical parameters obtained in order to verify the fit of each mathematical model to the observed data during the garlic slices drying (distance=10cm and thickness=9 mm)

Model number	Model name	Model equation	Model constants	SSE	r	RMSE
1	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	a=-0.018 b=8.5e-5	0.0128	0.997	0.0143
2	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a=1.086 k=0.027	0.0435	0.990	0.0262
3	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	a=1.192 k=0.024 b=0.942	0.1083	0.976	0.0418
4	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k=0.008 n=1.295	0.0011	0.999	0.0042
5	Newton	$MR = \exp(-kt)$	k=0.0244	0.1085	0.975	0.0411
6	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	a=1.012 k=0.0105 n=1.222 b=-0.0006	0.0004	0.999	0.0027
7	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	a=1.41 k=0.016 c=-0.368	0.0046	0.999	0.0086

خشک‌کردن به‌عنوان تابعی از متغیرهای گوناگون دست یافت [۱۸]. با توجه به خطای کمتر حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل میدیلی و تناسب بیشتر این معادله با داده‌های آزمایشگاهی، در طی بررسی سینتیک خشک شدن سیر، نتایج این مدل در جدول ۴ گزارش شده است. در این

اصل مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی و غذایی منطبق کردن معادله‌های ریاضی بر فرآیند خشک‌کردن است که می‌تواند به‌اندازه کافی خصوصیات سیستم را بیان کند. همچنین با به‌کارگیری مدل‌های ریاضی می‌توان با صرف هزینه و زمان کمتر به درک بهتر از فرآیند

۲۰۰ و ۳۰۰ وات را توصیه کرده‌اند [۱۷]. در پژوهشی، ادبی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی مدل‌سازی ریاضی فرآیند و سینتیک خشک شدن زل آلوئه‌ورا در خشک‌کن جریان هوای گرم با چرخه هوای بازگشتی پرداختند. برای برازش مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه‌نازک با داده‌های آزمایشی، از محیط برازش منحنی‌های نرم‌افزار MATLAB 2007 استفاده کردند. با مقایسه شاخص‌های خطا و ضریب تعیین، مشخص شد که مدل میدیلی مناسب‌ترین مدل برای توصیف داده‌های آزمایشگاهی در این پژوهش است [۱۱].

جدول ضریب تبیین و ضرایب این مدل نیز ارائه شده است. لذا استفاده از این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن برش‌های سیر با استفاده از سامانه فرورسرخ توصیه می‌شود. در شکل ۴ نیز داده‌های به‌دست‌آمده توسط مدل میدیلی با نتایج تجربی مقایسه شده است. این شکل به‌خوبی توانایی مدل میدیلی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار خشک شدن سیر را نشان می‌دهد. حسینی و همکاران (۲۰۲۱) سینتیک و مدل‌سازی خشک‌کردن رزماری با استفاده از فرورسرخ را بررسی کردند. این پژوهشگران استفاده از مدل میدیلی جهت پیش‌بینی روند خشک شدن رزماری در یک خشک‌کن فرورسرخ با توان‌های

Table 4 The constants and coefficients of the accepted model (Midilli)

Distance (cm)	Thickness (mm)	a	k	n	b	SSE	r	RMSE
5	3	0.994	0.0405	1.298	-0.0021	0.0003	0.999	0.0048
5	6	1.006	0.0125	1.275	-0.0008	0.0003	0.999	0.0027
5	9	1.007	0.0107	1.271	-0.0009	0.0003	0.999	0.0024
7.5	3	0.997	0.0353	1.216	0.0098	0.0002	0.999	0.0026
7.5	6	1.001	0.0181	1.217	0.0025	6.1e-5	0.999	0.0014
7.5	9	1.01	0.0096	1.254	0.0012	0.0004	0.999	0.0028
10	3	1.003	-0.049	0.8606	-0.0753	0.0002	0.999	0.0033
10	6	1.001	-0.051	0.7765	-0.0561	0.0001	0.999	0.0019
10	9	1.012	0.0105	1.222	-0.0006	0.0004	0.999	0.0027

معناداری طی فرآیند داشته و باید طی خشک‌کردن سیر با خشک‌کن فرورسرخ به این دو فاکتور توجه کرد. بیش‌ترین زمان خشک شدن (۵۳/۰ دقیقه) مربوط به نمونه با ضخامت ۹ میلی‌متر بود که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت و کمترین زمان خشک شدن (۲۰/۷ دقیقه) نیز مربوط به نمونه با ضخامت ۳ میلی‌متر بود که در فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح لامپ قرار داشت. با کاهش فاصله نمونه از ۱۰ به ۵ سانتی‌متر، به دلیل افزایش نفوذ پرتو فرورسرخ و افزایش سرعت انتقال حرارت، میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $2/71 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت. برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن سیر، از مدل‌های مختلفی استفاده گردید که در نهایت مدل میدیلی به دلیل بالا بودن شاخص ضریب تبیین و پایین بودن خطای محاسبه شده، جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن برش‌های سیر انتخاب گردید.

۵- منابع

[1] Bayat, F. 2006. Effect of different drying conditions on quality of dried garlic slices,

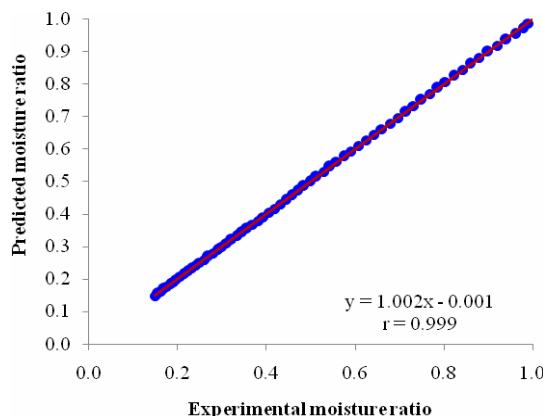


Fig 4 Comparison of fitted data by Midilli model with experimental results (10 cm distance and 9 mm thickness).

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر فاصله نمونه از لامپ پرتو دهی فرورسرخ و ضخامت نمونه‌ها بر سینتیک خشک‌کردن برش‌های سیر در یک خشک‌کن آزمایشگاهی فرورسرخ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که جهت به حداقل رساندن زمان خشک‌کردن و سرعت بخشیدن به فرآیند خشک‌کردن، فاکتورهای ضخامت نمونه و فاصله نمونه از منبع پرتو دهی اثر

- drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling, *International Journal of Fruit Science*. 21, 468-480.
- [11] Esmaili Adabi, M., Mosavi Seyedi, S. R., Kalantari, D., Ghavami Adl, B. 2015. Mathematical modelling, kinetics and energy consumption for drying aloe vera gel in hot air dryer with exhaust air recycle, *Journal of food science and technology(Iran)*. 13, 73-83.
- [12] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79, 243-248.
- [13] Wong, J. Y. 2001. Theory of ground vehicles, John Wiley & Sons,
- [14] Salehi, F., Satorabi, M. 2021. Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums, *International Journal of Fruit Science*. 21, 519-527.
- [15] Khodadadi, M., Rahmati, M. H., Alizadeh, M. R., Rezaei Asl, A. 2017. Investigating the effect of air temperature and paddy final moisture on the crack percent and conversion coefficient of Iranian rice varieties in fluidized bed dryer, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 13, 81-91.
- [16] Mohamadi, M., Pour Falah, Z., Nahardani, M., Meshkani, S. M. 2015. Mathematical modeling and optimization of drying kinetic of quince (*Cydonia olonga*) fruit slices, *Journal of Food Technology and Nutrition*. 12, 49-58.
- [17] Hosseini, S. S., Kashaninejad, M., Mirzaei, H., Maghsoudlou, Y. 2021. Modeling kinetics of rosemary drying (*Rosmarinus officinalis* L.) using infrared, *Journal of Food Processing and Preservation*. 13, 153-160.
- [18] Amini, G., Salehi, F., Rasouli, M. 2022. Color changes and drying kinetics modeling of basil seed mucilage during infrared drying process, *Information Processing in Agriculture*.
- Journal of Agricultural Engineering Research*. 7, 31-46.
- [2] Alolga, R. N., Osae, R., Essilfie, G., Saalia, F. K., Akaba, S., Chikari, F. 2021. Sonication, osmosonication and vacuum-assisted osmosonication pretreatment of Ghanaian garlic slices: Effect on physicochemical properties and quality characteristics, *Food Chemistry*. 343, 128535.
- [3] Bayat, F., Badii, F., Rafiee darsangi, Z. 2016. Evaluation of the Physical stability of garlic powder dried by freeze and cabinet drying, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 47, 31-38.
- [4] Pishva, P., Azadmard Damirchii, S. 2020. The effect of different pre-treatments prior to garlic drying on the quality of produced garlic powder, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 17, 177-184.
- [5] Rasouli, M., Seiedlou, S. 2012. A study of the shrinkage changes and mathematical modeling of garlic (*Allium sativum* L.) during convective drying, *Journal of Agricultural Machinery Engineering*. 2, 67-73.
- [6] Salehi, F. 2020. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review, *International Journal of Fruit Science*. 20, 586-602.
- [7] Rayenimoghbeli, H., Rahmati, M. h., Tash shamsabadi, H. A., Alizadeh, M. r. 2021. Optimization of rice husk drying process with infrared dryer, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 18, 317-330.
- [8] Hasani, A., Khosh Taghaza, M. H., ebadi, M. 2020. Effect of infrared drying on qualitative characteristics of sumac fruit (*Rhus coriaria* L.), *Journal of Horticultural Science*. 34, 493-504.
- [9] Yusefi, A., Dilmaghanian, S., Ziaforoughi, A., Moezzi, M. 2019. Study on infrared drying kinetics of quince slices and modelling of drying process using genetic algorithm-artificial neural networks (GA-ANNs), *Innovative Food Technologies*. 6, 175-186.
- [10] Satorabi, M., Salehi, F., Rasouli, M. 2021. The influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared



Selection and evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of garlic slices in an infrared dryer

Gohari Ardabili, A.^{1*}, Godini, N.², Salehi, F.³

1. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. MSc Student, Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Bahar Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

To improving energy efficiency and increasing quality of dried product, a infrared dryer was constructed that can be used to dry fruits and vegetables. In this study, drying kinetics modeling of garlic in an infrared dryer was investigated. The effect of samples distance from the radiation lamp in three levels of 5, 7.5 and 10 cm and the effect of garlic slices thickness in the in three levels of 3, 6 and 9 mm on the mass transfer rate and effective moisture diffusivity coefficient during the dry process of garlic was investigated. To determine the appropriate kinetics model in the drying process, the drying curves can be analyzed under the defined conditions. Therefore, in this research, to investigate on the drying kinetics of garlic slices, the standard models were fitted to the experimental data. By increasing the distance of the samples from the heat source from 5 to 10 cm, the average drying time of garlic increased from 35.8 minutes to 37.3 minutes. By increasing the thickness of the samples from 3 to 9 mm, the average drying time of garlic increased from 22.7 minutes and 50.9 minutes. The effect of sample distance from infrared heat lamp and sample thickness on changes in effective moisture diffusivity coefficient of garlic was investigated and results showed that this coefficient values were increased with decreasing in distance and increasing samples thickness. By reducing sample distance from the lamp from 10 to 5 cm, it was observed that the effective moisture diffusivity coefficient increased from $2.71 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ to $3.63 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. The average effective moisture diffusivity coefficient of garlic slices for thicknesses of 3, 6, and 9 mm were $0.94 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $2.72 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, and $5.54 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, respectively. In drying process modeling of garlic, the Midilli model with the highest coefficient of determination and the lowest error, had closer results to the experimental data than the other models.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2022/ 07/ 07
Accepted 2023/ 02/ 02

Keywords:

Drying time,
Effective moisture diffusivity,
Garlic,
Midilli model.

DOI: 10.22034/FSCT.19.132.377
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.132.28.1

*Corresponding Author E-Mail:
a.gohari@basu.ac.ir