

مدل سازی خشک کردن لایه نازک خرمالو به دو روش هوای داغ و مادون قرمز

سیده فاطمه موسوی بایگی¹، عاطفه فرهمند²، مسعود تقی زاده^{3*}، امین ضیافروغی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

3- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

4- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: 93/4/11 تاریخ پذیرش: 93/8/24)

چکیده

خشک کردن یکی از روش های نگهداری می باشد که حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم صورت می گیرد. به دلیل بهره وری کم انرژی و مدت زمان طولانی خشک کردن با هوای داغ، استفاده از تکنیک های نوین خشک کردن نظیر مادون قرمز باید مورد مطالعه قرار گیرد. در این پژوهش اثر دما و روش خشک کردن بر پارامترهای سینتیکی برگه خرمالو به ضخامت 5 میلی متر بررسی شد. آزمون ها در سه سطح دمایی 50، 60 و 70 درجه سانتی گراد و دو نوع خشک کن هوای داغ و مادون قرمز با 3 تکرار انجام شد. داده های آزمایشی مربوط به رفتار خشک شدن نمونه ها بر اساس 9 مدل ارائه شده در منابع به منظور ارزیابی سینتیک خشک کردن برگه های خرمالو مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. کیفیت برازش مدل های پیشنهاد شده بر اساس پارامترهای ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، کای مربع (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) ارزیابی گردید. طبق نتایج به دست آمده بهترین مدل جهت برازش داده های خشک کردن هوای داغ در هر سه سطح دمایی، مدل ونگ و سینگ بود. برای داده های مربوط به خشک کردن توسط مادون قرمز در دو سطح دمایی 50 و 60 درجه سانتی گراد، مدل لگاریتمی و در دمای 70 درجه سانتی گراد، مدل دوجمله ای برازش مناسبی را نشان دادند. این مدل ها دارای بالاترین ضریب تبیین و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا، کای مربع و مجموع مربعات خطا، نسبت به سایر مدل ها بودند.

کلید واژگان: خرمالو، سینتیک خشک کردن، مادون قرمز، هوای داغ

* مسئول مکاتبات: mtaghizadeh@um.ac.ir

1- مقدمه

خرمالو متعلق به خانواده انباسه¹ است که شامل 400 گونه بوده و توزیع وسیعی در مناطق معتدل آسیا، آفریقا و مرکز آمریکای جنوبی دارد [1]. این میوه غنی از ویتامین A، کلسیم و آهن است [2] و خواص درمانی آن مربوط به فعالیت آنتی اکسیدانی ترکیبات تاننی با وزن ملکولی بالا و اسید آسکوربیک می باشد [3]. از مشکلات اصلی حمل و نقل این میوه پس از برداشت در ایران، نرم شدن شدید و بروز بیماری ها بر روی میوه است [4].

خشک کردن یکی از روش های قدیمی حفظ مواد غذایی است که به افزایش زمان ماندگاری، کاهش وزن برای حمل و نقل و کاهش فضا برای ذخیره سازی کمک می کند [5]. امروزه علاوه بر خشک کردن به روش هوای داغ از روش مادون قرمز استفاده می شود زیرا استفاده از تکنولوژی تابش مادون قرمز در خشک کردن محصولات کشاورزی نسبت به روش جابه جایی هوای داغ، دارای چندین مزیت از جمله کاهش زمان خشک شدن، کاهش مصرف انرژی، کیفیت بالاتر محصول نهایی و ایجاد دمای یکنواخت داخل محصول است [6].

مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم های خشک کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می شود [7]. اخیرا مطالعات زیادی به منظور مدل سازی میوه و سبزیجات مختلف جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف رفتار خشک شدن صورت گرفته است. دویماز (2009) خشک کردن کیوی را مدل سازی کرد، آزمایش ها در سه سطح دمایی 50، 55 و 60 درجه سانتی گراد و سرعت هوای 2/4 متربرثانه و رطوبت نسبی بین 10-25% انجام شد [8]. در این تحقیق مدل هنرسون و پابیس اصلاح شده و مدل ورما و همکاران نتایج بهتری نشان دادند. اب و افضل (1997) خشک کردن لایه نازک شلتوک برنج² را با مادون قرمز مدل سازی کردند و مدل پیچ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد [9]. طقرل (2006) خشک شدن هویج را با مادون قرمز در دامنه ی دمایی 50-80 درجه سانتی گراد مدل سازی کرد و مدل میدلی را جهت توصیف رفتار خشک کردن پیشنهاد داد [10]. آکپینار و همکاران (2003) رفتار خشک کردن فلفل قرمز را در سه سطح دمایی 55، 60 و 70 درجه سانتی گراد با جریان هوای 1/5 متربرثانه مدل سازی کرد و مدل انتشار دارای بالاترین ضریب همبستگی بود [11]. بابلیس و همکاران (2006) خشک کردن لایه نازک انجیر را مورد آزمایش قرار دادند، آزمایش ها در دامنه دمایی 55-85 درجه سانتی گراد و

دامنه ی 0/5-3 متربرثانه جریان هوا انجام شد، مدل دو جمله ای نمایی بهترین مدل جهت پیش گویی رفتار خشک کردن انتخاب شد [12]. امیر نجات و همکاران (1390) خشک شدن لایه نازک قارچ خوراکی را با مادون قرمز در سه سطح شدت 0/22، 0/31 و 0/49 w/cm² و سه سطح سرعت جریان هوا 0/5، 0/7 و 1 متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار دادند، مدل لوجستیک نسبت به سایر مدل ها نتایج نزدیک تری به داده های آزمایشی داشت [13]. مدل سازی های دیگری نظیر لایه نازک سیب، سیب زمینی، کدو تنبل [14]، موز [5]، زرد آلو [15]، ورقه های نازک پیاز [16]، سیب زمینی ترش [17]، آناناس [18] و آلبالو [19] صورت گرفته است. هدف از این تحقیق پیش بینی رفتار خشک کردن لایه نازک خرمالو به دو روش هوای داغ و مادون قرمز است.

2- مواد و روش ها

2-1- آماده سازی نمونه

میوه خرمالو واریته کاکي با درجه رسیدگی و رنگ یکنواخت، از بازار محلی در شهر مشهد خریداری و تا زمان انجام آزمون ها داخل یخچال با دمای 4 درجه سانتی گراد نگهداری شد. به منظور رسیدن به دمای اتاق، میوه ها 2 ساعت قبل از برش زدن از یخچال خارج می شدند. نمونه ها با استفاده از دستگاه کاتر (مدل 195 GL DOM، شرکت بلوگنا ایتالیا) از مقطع عرضی و با ضخامت 5 میلی متر برش زده شد. رطوبت اولیه نمونه ها به کمک قرار دادن در آون تحت خلا با دمای 60 درجه سانتی گراد طی 72 ساعت، تعیین گردید که به طور میانگین برابر با $78/2 \pm 1\%$ بر مبنای وزن مرطوب بود. در این تحقیق برگه ها تا رسیدن به رطوبت نهایی $10 \pm 1\%$ [20] خشک شده و با استفاده از معادله (1) وزن نهایی برگه ها محاسبه گردید:

$$M_1 (1-X_1) = M_2 (1-X_2)$$

که M_1 : وزن اولیه برش های خرمالو، M_2 : وزن نهایی برش ها، X_1 : رطوبت اولیه و X_2 : رطوبت نهایی برگه ها می باشد.

2-2- آزمون خشک کردن

برش های خرمالو با ضخامت 5 میلی متر در سه سطح دمایی 50، 60 و 70 درجه سانتی گراد، پس از رسیدن به شرایط پایدار خشک کن در دو نوع هوای داغ و مادون قرمز تا رسیدن به رطوبت 10% خشک شدند. تمامی آزمون ها در 3 تکرار انجام گرفت.

خشک کن غیر مداوم کابینتی با جریان هوای داغ (ساخت شرکت طب سروش) مجهز به سه سینی مشبک فلزی بود که در آن، هوای داغ از قسمت مرکزی با سرعت ثابت 1/5 متر بر

1. Ebenaceae
2. Rough Rice

در نظر نگرفتن Me، معادله (3) بصورت رابطه ی ساده تر (4) تبدیل خواهد شد (6):

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

به منظور مدل سازی ریاضی سینتیک خشک کردن داده های آزمایشگاهی از مدل های جدول 1 استفاده گردید (7). مدل سازی توسط نرم افزار Matlab 2009 (نسخه 7/8) انجام شد.

جدول 1 برخی مدل های ریاضی ارائه شده برای منحنی های

خشک کردن

نام مدل	مدل
1 نیوتن ²	$MR = \exp(-kt)$
2 لگاریتمی ³	$MR = a \exp(-kt) + c$
3 هندرسون و پابیس اصلاح شده ⁴	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
4 ورما و همکاران ⁵	$MR = a \exp(-k_1 t) + (1-a) \exp(-g_1 t)$
5 دو جمله ای ⁶	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
6 دو جمله ای نمایی ⁷	$MR = a \exp(-k_1 t) + (1-a) \exp(-k_2 t)$
7 پیج ⁸	$MR = \exp(-k_1 t^n)$
8 ونگ و سینگ ⁹	$MR = 1 + at + bt^2$
9 تقریب نفوذ ¹⁰	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 b_1 t)$

2-4- تجزیه و تحلیل آماری داده ها

پس از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل های خشک کردن بهترین مدل براساس بالاترین مقدار ضریب تبیین (R^2)¹¹ (معادله 5)، و کم ترین مقادیر برای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)¹² (معادله 6)، مربع کای کاهش یافته (χ^2)¹³ (معادله 7) و مجموع مربعات خطا (SSE)¹⁴ (معادله 8) انتخاب شد.

(5)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pred}) \cdot \sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{pred})^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (MR_i - MR_{exp})^2 \right]}}$$

2. Newton

3. Logarithmic

4. Modified Henderson and Pabis

5. Verma

6. Two-term

7. Two term exponential

8. page

9. Wang and sing

10. Diffusion approximation

11. Coefficient of determination

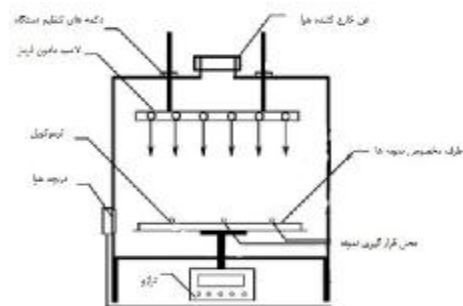
12. Root mean squares error

13. Reduced chi - square

14. Sum square error

ثانیه دمیده می شد. برش های خرمالو در طبقه دوم خشک کن قرار گرفته و تغییرات وزن آن ها در فاصله زمانی هر 10 دقیقه توسط ترازو دیجیتال با دقت 0/01 گرم اندازه گیری شد.

خشک کن آزمایشگاهی مادون قرمز (شکل 1) مجهز به یک لامپ مادون قرمز گازی با المان فلزی و توان 1300 وات بود که در بالای سطح نمونه ها به صورت عمودی و در فاصله 20 سانتی متر قرار گرفته و به نمونه ها تابیده می شد. به منظور جابجایی هوا و خروج رطوبت از داخل محفظه خشک کن، از یک فن مکشی استفاده شد و دو دریچه در بالای فن مکنده ایجاد گردید. در این خشک کن شدت تابش لامپ قابل تغییر بوده و برای ایجاد دماهای 50، 60 و 70 درجه سانتی گراد، قبل از قرار دادن نمونه های اصلی، دمای مرکز نمونه ها با استفاده از یک ترموکوپل نوع k با اندازه نوک 1 mm تعیین گردید و بعد از ایجاد شرایط پایدار دمایی، نمونه های اصلی خشک شدند. تغییرات رطوبت با توزین برش های خرمالو در فاصله های زمانی هر 5 دقیقه توسط ترازو دیجیتال با دقت 0/01 گرم اندازه گیری شد.



شکل 1 خشک کن آزمایشگاهی مادون قرمز

2-3- مدل سازی سینتیک خشک شدن

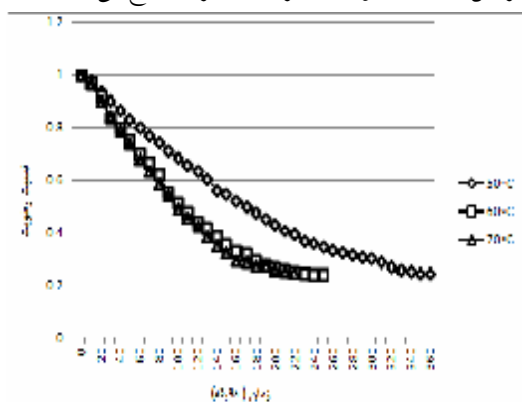
برای مدل سازی سینتیک خشک کردن لایه های نازک خرمالو از نسبت رطوبت استفاده شد. نسبت رطوبت¹، مقدار رطوبت نمونه را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و نهایی بیان کرده و از معادله 3 به دست می آید:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

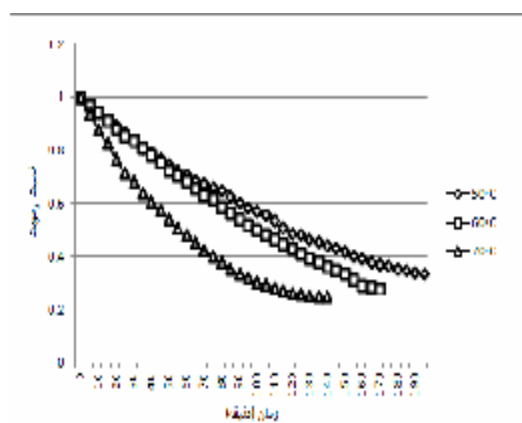
که در آن MR نسبت رطوبت (بدون واحد)، M_t رطوبت توده در لحظه t، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه می باشد. کلیه رطوبت ها بر حسب درصد و بر پایه خشک (db) است. مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_t کوچک بوده، لذا با

1. Moisture ratio

دمای محصول، گرادیان حرارتی داخل و سطح بیرونی قارچ افزایش یافت و رطوبت با سرعت بیشتری خارج می شد [13].



شکل 2 منحنی خشک کردن لایه نازک خرمالو به روش هوای داغ



شکل 3 منحنی خشک کردن لایه نازک خرمالو به روش مادون قرمز

3-2- مدل سازی سینتیک خشک کردن

نتایج آماری به دست آمده از مدل سازی خشک کردن به روش هوای داغ در سه سطح دمایی 50، 60 و 70 درجه سانتی گراد نشان داد که مدل ونگ و سینگ بهترین مدل جهت برازش داده های این روش می باشد (شکل 4) به طوری که دارای بالاترین R^2 در دامنه (0/996 - 0/9988) بوده و داده های SSE ، $RMSE$ و χ^2 دارای کمترین مقادیر نسبت به سایر مدل ها بودند (جدول 2). معادلات و ضرایب برتر در هر روش در جدول 3 آورده شده است. دویماز (2008) سینتیک خشک کردن توت فرنگی را مورد مطالعه قرار داد، آزمایش ها در سه سطح دمایی 50، 55 و 60 درجه سانتی گراد و با جریان هوای 1/2 متر بر ثانیه انجام شد [21]. مدل ونگ و سینگ در دمای 60 درجه سانتی گراد و مدل لگاریتمی در دماهای 50 و 55 درجه سانتی گراد به خوبی رفتار خشک کردن توت فرنگی

(6)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}$$

(7)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n}$$

(8)

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(MR)_{pre,i} - MR_{exp,i}]^2$$

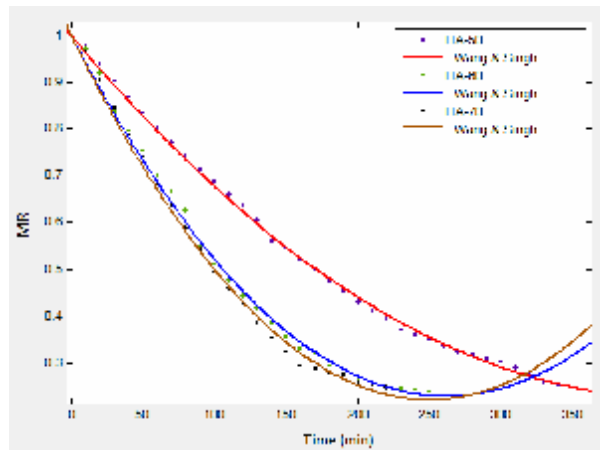
که در آن $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت تجربی و $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش بینی شده، N تعداد مشاهدات، n تعداد ثابت های هر مدل می باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر دما و روش خشک کردن بر زمان

خشک کردن

نتایج خشک کردن لایه نازک خرمالو به دو روش خشک کردن هوای داغ و مادون قرمز از رطوبت اولیه $78/2 \pm 1\%$ بر مبنای وزن مرطوب تا رطوبت نهایی $10 \pm 1\%$ بر مبنای وزن مرطوب نشان داد مدت زمان لازم جهت خشک کردن به روش هوای داغ (شکل 2) و مادون قرمز (شکل 3) در سه سطح دمایی 50، 60 و 70 سانتی گراد به ترتیب (220 و 250، 360 و 195، 170 و 140) دقیقه بود. افزایش دما، مدت زمان خشک کردن در هر دو روش کاهش می یابد و مدت زمان خشک کردن روش مادون قرمز نسبت به هوای داغ در هر سطح دمایی کمتر است. به گونه ای که طولانی ترین زمان فرآیند مربوط به خشک کردن در دمای 50 درجه سانتی گراد هوای داغ و کوتاه ترین زمان فرآیند مربوط به دمای 70 درجه سانتی گراد در روش مادون قرمز بود. این موضوع به این دلیل است که در روش مادون قرمز، لایه سطحی و قسمت های داخلی به شدت گرم شده و در نتیجه باعث افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می گردد [6] و رطوبت به سرعت خارج می شود. نتایج مطابق پژوهش امیر نجات و همکاران (1390) در ارتباط با خشک کردن قارچ دکمه ای به روش مادون قرمز بود. در این پژوهش با افزایش شدت تابش لامپ فروسرخ و در نتیجه



شکل 4 برازش داده های خشک کردن لایه نازک خرمالو در سه سطح دمایی 50، 60 و 70 سانتی گراد به روش هوای داغ با مدل ونگ و سینگ

را توصیف کرد. ایزلی و همکاران (2014) بررسی اثر روشهای مختلف خشک کردن را بر خصوصیات خشک کردن، رنگ، محتوای فنل کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی توت (*Physalis peruviana* L.) را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش های خشک کردن با روش هوای داغ، مایکروویو و هوای داغ-مایکروویو صورت گرفت مدل ونگ و سینگ و مدل میدلی و همکاران بهترین مدل ها برای توصیف رفتار خشک کردن در تمامی روش ها بود [22]. همدی و همکاران (2006) در مطالعه ای خشک کردن قطعات سیب را با ابعاد 20×5×2 میلی متر مدل سازی کرد آزمایش ها در دامنه ی دمایی 45-60 درجه سانتی گراد با جریان هوای 0/75-0/25 / متر بر ثانیه انجام شد مدل ونگ و سینگ رفتار فرآیند خشک کردن قطعات سیب را نسبت به سایر مدل ها بهتر توصیف کرد [23].

جدول 2 نتایج آماری بدست آمده از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل های خشک کردن به روش هوای داغ

50 درجه سانتی گراد				
مدل	R^2	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/9967	0/006692	0/01363	0/0068793
لگاریتمی	0/9981	0/003827	0/01061	0/0039341
هندرسون و پابیس اصلاح شده	0/9786	0/04283	0/03717	0/046599
ورما و همکاران	0/9985	0/002973	0/00935	0/0031424
دوجمله ای	0/9985	0/00297	0/009488	0/0031392
دو جمله ای نمایی	0/9967	0/006692	0/01383	0/0070734
پیچ	0/998	0/003998	0/01069	0/0041099
ونگ و سینگ	0/9988	0/002359	0/008209	0/002359
تقریب نفوذ	0/9967	0/00655	0/01388	0/0069233
60 درجه سانتی گراد				
مدل	R^2	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/9917	0/01295	0/02276	0/013468
لگاریتمی	0/9946	0/008515	0/01924	0/0088556
هندرسون و پابیس اصلاح شده	0/4462	0/869	0/2084	0/982839
ورما و همکاران	0/9944	0/008776	0/01953	0/0095044
دوجمله ای	0/9928	0/01124	0/0226	0/0121729
دو جمله ای نمایی	0/9917	0/01304	0/02331	0/0141223
پیچ	0/9927	0/01141	0/0218	0/0118664
ونگ و سینگ	0/9966	0/005374	0/01496	0/005374
تقریب نفوذ	0/9917	0/01296	0/02374	1/0140356

ادامه جدول 2 نتایج آماری بدست آمده از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل های خشک کردن به روش هوای داغ				
دمای 70 درجه سانتی گراد				
مدل	R ²	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/9914	0/01187	0/02323	0/0124041
لگاریتمی	0/9945	0/007621	0/01952	0/0079639
هندرسون و پاپیس اصلاح شده	0/9957	0/005991	0/01877	0/0068896
ورما و همکاران	0/9914	0/01182	0/02431	0/0129429
دوجمله ای	0/9958	0/005847	0/01754	0/0064024
دو جمله ای نمایی	0/9914	0/01187	0/02378	0/0129976
پیچ	0/9942	0/008084	0/01962	0/0084477
ونگ و سینگ	0/996	0/00549	0/01617	0/00549
تقریب نفوذ	0/9923	0/01069	0/02312	0/0117055

جدول 3 ضرایب و معادلات برتر حاصل از خشک کردن به روش هوای داغ

دما (°C)	a*	b*	MR= 1+at+bt ²
50	-0/003654	4/297×10 ⁻⁶	MR=1-0.003654t + (4.297×10 ⁻⁶) t ²
60	-0/005893	1/125×10 ⁻⁵	MR=1-0.005893t + (1.125×10 ⁻⁵) t ²
70	-0/006235	1/247×10 ⁻⁵	MR=1-0.006235t + (1.247×10 ⁻⁵) t ²

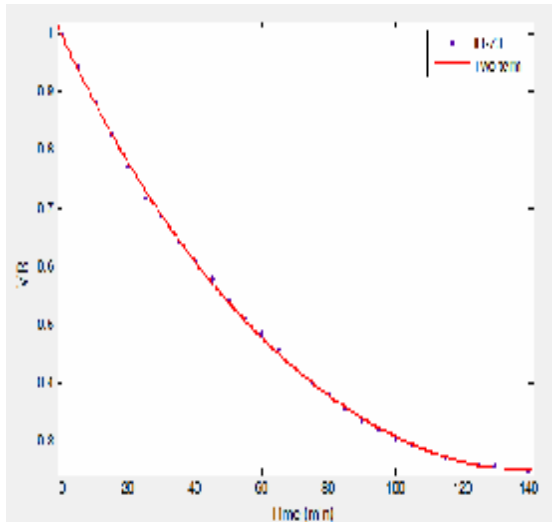
*میانگین آورده شده است.

پس از تجزیه و تحلیل داده های بدست آمده مدل لگاریتمی به عنوان بهترین مدل انتخاب شد [25]. همچنین در مدل سازی خشک کردن لایه های کدو تنبل در دمای 50، 55 و 60 درجه سانتی گراد با شدت جریان 1 متر بر ثانیه مشخص گردید که مدل لگاریتمی و ورما و همکاران برازش مناسب تری نسبت به سایر مدل ها دارد [7]. ونگ و همکاران (2007) مدل سازی خشک کردن تفاله سیب را در دمای 75، 85، 95 و 105 درجه سانتی گراد با سرعت هوای داغ $0/03 \pm 1/2$ مورد بررسی قرار داده و نشان دادند مدل لگاریتمی بهترین مدل جهت پیش بینی فرآیند خشک کردن است [26]. طغرل و پهلوان (2003) طی آزمایشی، خشک کردن زردآلو را در چهار سطح دمایی 50، 60، 70 و 80 درجه سانتی گراد و چهار سطح جریان هوای داغ 0/2، 0/5، 1 و 1/5 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار داده و نتایج نشان مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل ها رفتار خشک کردن را بهتر توصیف می کند [27].

همچنین نتایج آماری برازش داده های آزمایشگاهی خشک کردن روش مادون قرمز نشان داد که در دو سطح دمایی 50 و 60 درجه سانتی گراد، مدل لگاریتمی بهترین مدل جهت برازش داده ها می باشد (شکل 5) به طوری که دارای بالاترین R² در دامنه (0/9996 - 0/9999) و داده های SSE، RMSE و χ^2 دارای کمترین مقدار نسبت به سایر مدل ها می باشند (جدول 4). ساسیلیک و الیکین (2006) نشان دادند که مدل لگاریتمی بهترین مدل جهت مدل سازی خشک کردن لایه نازک سیب با ضخامت های 5 و 9 میلی متر در دمای 40-60 درجه سانتی گراد هوای داغ است [24]. آکگون و دویماز (2005) خشک کردن کیک زیتون¹ که محصول فرعی از استخراج مکانیکی صنعتی روغن زیتون است را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش ها در دامنه ی وسیعی از دما (50-110 درجه سانتی گراد) و سرعت جریان هوا $0/03 \pm 1/2$ انجام شد

1. Olive cake

پس از تجزیه و تحلیل داده های به دست آمده، مدل دوجمله ای به عنوان بهترین مدل انتخاب شد [30]. زیلینسکا و مارکوسکی (2010) نشان داد بهترین مدل جهت برآزش داده های خشک کردن قطعات مکعبی هویج در دمای 60، 70، 80 و 90 درجه سانتی گراد، مدل دو جمله ای می باشد [31]. جدول 5 ضرایب و معادلات برتر خشک کردن به روش مادون قرمز آورده شده است.

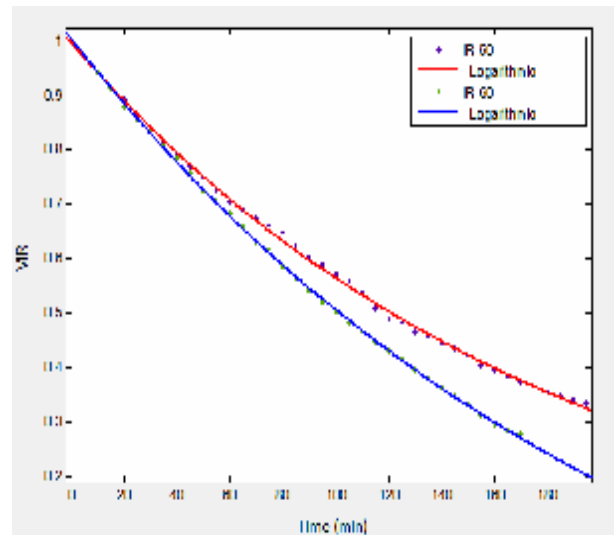


شکل 6 برآزش داده های خشک کردن لایه نازک خرمالو در دمای 70 سانتی گراد به روش مادون قرمز با مدل دو جمله ای

4- نتیجه گیری

در این تحقیق سینتیک خشک کردن لایه نازک خرمالو با استفاده از دو روش هوای داغ و مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد سرعت خشک کردن لایه نازک خرمالو به ضخامت 5 میلی متر به روش مادون قرمز در هر سه سطح دمایی (50، 60 و 70 درجه سانتی گراد) بیشتر از روش خشک کردن به روش هوای داغ می باشد که در خشک کردن میوه ها با توجه به حساسیت آن ها، کاهش مدت زمان خشک کردن می تواند باعث حفظ کیفیت اولیه محصول گردد.



شکل 5 برآزش داده های خشک کردن لایه نازک خرمالو در دو سطح دمایی 50 و 60 سانتی گراد به روش مادون قرمز با مدل لگاریتمی

نتایج نشان داد بهترین مدل جهت برآزش داده های خشک کردن به روش مادون قرمز در دمای 70 سانتی گراد، مدل دوجمله ای (شکل 6) است که دارای بالاترین R^2 (0/9996) و حداقل SSE، RMSE و χ^2 نسبت به سایر مدل ها می باشد (جدول 4) ر. چن و وو (2001) خشک کردن شلتوک برنج که حاوی رطوبت بالا است را به صورت لایه نازک در دامنه ی دمایی 35-60 درجه سانتی گراد با هوای داغ مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد مدل دوجمله ای بهترین مدل جهت برآزش داده های آزمایشگاهی نسبت به سایر مدل ها است [28]. مادامبا و همکاران (1996) خشک کردن لایه نازک سیر را به ضخامت 2-4 میلی متر مورد آزمایش قرار دادند، آزمایش ها در دامنه دمایی 50-90 درجه سانتی گراد و جریان هوای 1/5-2 متر بر ثانیه انجام شد در این تحقیق مدل دوجمله ای و پیچ به عنوان بهترین مدل جهت توصیف داده های سینتیک انتخاب شدند [29]. ساسیلیک و همکاران (2006) در آزمایشی نوعی آلو¹ را در دمای 50-70 با سرعت هوای 0/8 متر بر ثانیه خشک کردند،

1. Uryani

جدول 4 نتایج آماری بدست آمده از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل های خشک کردن به روش مادون قرمز

دمای 50 درجه سانتی گراد				
مدل	R^2	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/999	0/001564	0/006332	0/0016041
لگاریتمی	0/999	0/001511	0/006391	0/0015497
هندرسون و پاپیس اصلاح شده	0/9989	0/001557	0/006766	0/0016832
ورما و همکاران	0/9989	0/001565	0/006505	0/0016474
دوجمله ای	0/9989	0/00156	0/006584	0/0016421
دو جمله ای نمایشی	0/999	0/001563	0/006414	0/0016453
پیچ	0/999	0/001556	0/006399	0/0015959
ونگ و سینگ	0/8477	0/2378	0/07911	0/2378
تقریب نفوذ	0/9989	0/001566	0/006505	0/0016484
دمای 60 درجه سانتی گراد				
مدل	R^2	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/9939	0/005757	0/01301	0/005926
لگاریتمی	0/9996	0/0003826	0/003458	0/000394
هندرسون و پاپیس اصلاح شده	0/9823	0/02911	0/03169	0/031839
ورما و همکاران	0/9967	0/003147	0/009916	0/003338
دوجمله ای	0/9967	0/003147	0/01007	0/003338
دو جمله ای نمایشی	0/9996	0/0007208	0/004674	0/000764
پیچ	0/9992	0/0007132	0/004649	0/000734
ونگ و سینگ	0/8586	0/1332	0/06354	0/1332
تقریب نفوذ	0/9931	0/01134	0/01883	0/012027
دمای 70 درجه سانتی گراد				
مدل	R^2	SSE	RMSE	χ^2
نیوتن	0/9915	0/01251	0/02114	0/012957
لگاریتمی	0/9987	0/001861	0/00846	0/001927
هندرسون و پاپیس اصلاح شده	0/9963	0/004452	0/01391	0/004966
ورما و همکاران	0/9996	0/0005728	0/004694	0/000615
دوجمله ای	0/9996	0/0005401	0/004648	0/000602
دو جمله ای نمایشی	0/9976	0/003475	0/01134	0/003732
پیچ	0/9965	0/005242	0/01393	0/005429
ونگ و سینگ	0/7323	0/3954	0/121	0/3954
تقریب نفوذ	0/9916	0/01246	0/02189	0/013383

جدول 5 ضرایب و معادلات برتر حاصل از خشک کردن به روش مادون قرمز

(°C) دما	a*	c*	k*	MR= a exp(-kt)+c	
50	1/022	-0/02443	0/005501	MR= 1.022 exp (-.005501t)-.02443	
60	1/396	-0/3935	0/004386	MR= 396/1 exp (-.004386t)-.03935	
(°C) دما	a*	b*	K ₀ *	K ₁ *	MR= a exp(-k ₀ .t)+ b exp(-k ₁ .t)
70	0/9956	/0008826	0/01244	-0/032	MR= .9956 exp (- .01244 t) + .0008826 exp (.032 t)

* میانگین آورده شده است

- Journal of Agricultural Engineering Research, 67: 289 – 297.
- [10] Togrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. Journal of Food Engineering, 77: 610–619.
- [11] Akpinar, E. k., Bicer. Y & Yildiz, c. 2003. Thin layer drying of red pepper. Research note. Journal of Food Engineering, 59: 99–104.
- [12] Babalis, s. j., Papanicolaou, e., Kyriakis, n., & Belessiotis, v. g. 2006. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). Journal of Food Engineering, 75: 205–214.
- [13] Amirnejad, H. Khoshtaghaza, M, H. Pahlavanzadeh, H. 1390. Determine the thin layer drying kinetics mushroom with infrared method. Iranian Journal of Biosystems Engineering Journal. Vol: 24, pp: 53- 61.
- [14] Akpinar, E. k. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. Journal of Food Engineering, 73: 75–84.
- [15] Bozkir, O. 2006. Thin layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. Journal of Food Engineering, 77: 146–151.
- [16] Sharma, G. P., Verma, R. C., & Pankaj, P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 71: 282–286.
- [17] Pourfallah, Z. Nahardani, M. Salaminia, M. Nourian, S, and Mohammadi, M. 1390. Drying kinetics slices of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) using hot air convection. Journal of Food Science and Technology. Vol:3, pp:1-13.
- [18] Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., & Siriamornpun, S. 2011. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. Food and Bio products processing, 90: 155–164.
- [19] Ghaderi, A. Abbasi, S. Motevalli, A. and Minaei, S. 1390. Mathematical model for drying kinetics of sour cherry fruit in microwave-vacuum drying. Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, Vol: 6, pp: 55- 64.
- [20] Hezbavi, A and Minaei, S. 1389. Preparation and study of qualitative properties of dried persimmon. Journal of Food Science. Vol:7, pp:65- 72.
- [21] Doymaz, I. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. Chemical Engineering

همچنین بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک کردن هوای داغ در هر سه سطح دمایی (50، 60 و 70 درجه سانتی گراد) مدل ونگ و سینگ و در روش خشک کردن به روش مادون قرمز در دو سطح دمایی (50 و 60 درجه سانتی گراد) مدل لگاریتمی و در دمای 70 درجه سانتی گراد مدل دو جمله ای بود که این مدل ها دارای بالاترین میزان R^2 و حداقل SSE، RMSE و χ^2 نسبت به سایر مدل ها بودند و در نتیجه بالاترین تطابق را با مقادیر محاسبه شده از مدل داشتند.

5- منابع

- [1] Celik, A., & Ercisl, S. 2008. Persimmon cv. Hachiya (*Diospyros kaki* Thunb.) fruit: some physical, chemical and nutritional properties. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 59: 599–606.
- [2] Nicoleti, j, f., Silveira-Jr, v., Telis-Romero, j., & Telis, v, r, n. 2005. Viscoelastic behavior of persimmons dried at constant air temperature. LWT - Food Science and Technology, 38: 143–150.
- [3] Jang, I. C., Oh, W.G., A., G.H., Lee, J.H., & Lee, S.C. 2011. Antioxidant Activity of 4 Cultivars of Persimmon Fruit. Food Science and Biotechnology, 20: 71–77.
- [4] Khademi, O., Zamani, Z., Mostofi, y., Kalantari, s., & Ahmadi.a. 2012. Extending Storability of Persimmon Fruit cv. Karaj by Postharvest Application of Salicylic Acid. Journal of Agricultural Science and Technology, 14: 1067–1074.
- [5] Dandamrongrak, R., Young, G., & Mason, R. 2002. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. Journal of Food Engineering, 5: 139–146.
- [6] Doymaz, I. 2012. Drying of Pomegranate Seeds Using Infrared Radiation. Food Science and Biotechnology. 21: 1269–1275.
- [7] Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. Journal of Food Engineering, 79: 243–248.
- [8] Doymaz, I. 2009. Mathematical Modelling Of Thin-Layer Drying Of Kiwifruit Slices. Journal of Food Processing and Preservation, 33: 145–160.
- [9] Abe, T., & Afzal, T. M. 1997. Thin-Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice.

- [26] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F. & Zhao, G. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research international*, 40: 36-46.
- [27] Togrul, i., & Pehlivan, d. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*, 58: 23-32.
- [28] Chen, C., & Wu, P. 2001. Thin-layer Drying Model for Rough Rice with High Moisture Content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80: 45-52.
- [29] Madamba, P, S., Driscoll, R, H., & Buckle, K, A. 1996. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. *Journal of Food Engineering*, 29: 15-97.
- [30] Sacilik, K., Konuralp Elicin, A., & Unal, G. 2006. Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76: 362-368.
- [31] Zielinska, M. & Markowski, M. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing*, 49: 212-218.
- and Processing: Process Intensification, 47: 914-919.
- [22] Izli, N., Yıldız, G., Unal, H., Isik, E., & Uylaser, V. 2014. Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 9-17.
- [23] Hamdami, n., Sayyad, m., & Oladegaragoze, a. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of apples slices. P. 1949- 1958. In *Proceedings of the 13th World Congress of Food Science & Technology*. 17 – 21 Sept. 2006. EDP Sciences. Nantes, France.
- [24] Sacilik, K., & Konuralp Elicin, A. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73: 281-289.
- [25] Akgun, N. A. & Doymaz, I. 2005. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68: 455-461.

Modeling on hot air and infrared thin layers drying of persimmon slices

Mousavi Bayegi, S. F. ¹, Farahmand, A. ², Taghizadeh, M. ^{3*}, Ziaforoughi, M. A. ⁴

1. MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
2. MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
3. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
4. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 93/4/11 Accepted: 93/8/24)

Drying is one of the preservation techniques in which moisture removal through simultaneous heat and mass transfer occurs. Due to low energy efficiency and prolonged time of hot air drying, the new drying techniques such as infrared, must be employed. In this study, the effects of temperature and drying method on the kinetics of persimmon slices with 5 mm fixed thickness were investigated. The tests were performed at 3 temperature levels (50, 60 and 70°C) using both hot air and infrared dryers in 3 replicates. The experimental data obtained from drying treatments were fitted to 9 mathematical models in order to evaluate the drying kinetics of persimmon slices. The fitting quality of the proposed models was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean squares error (RMSE), chi-square (χ^2) and sum square error (SSE). Based on the results, Wang and Singh model was found to be the best model fitted to the experimental hot air drying data at all temperature levels. In the case of experimental infrared drying data at 50 and 60°C, the logarithmic model showed the best fitting results while at 70°C, 2-term model showed the highest fitting quality. These models exhibited the highest value of R^2 and the least RMSE, χ^2 and SSE comparing to the other models.

Key words: Persimmon, Drying Kinetics, Infrared, Hot Air

* Corresponding Author E-Mail Address: mtaghizadeh@um.ac.ir