

بررسی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی به (*Cydonia oblonga*) با روش جابه‌جایی هوای داغ

مرتضی محمدی^{1*}، زهرا پورفلاح¹، عبدالمجید مسکوی²، منیره نهاردانی¹

¹ دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران
² استاد یار گروه علوم و صنایع غذایی پژوهشکده علوم و صنایع غذایی خراسان رضوی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: 90/8/3 تاریخ پذیرش: 90/12/12

چکیده

در مطالعه‌ی انجام شده بر روی برش‌های میوه‌ی به با قطرهای 3، 5 و 7 میلی متر به منظور بررسی سینتیک خشک کردن آن در دماهای 60 و 70 و 80 درجه‌ی سانتیگراد، از خشک کن جابه‌جایی هوای داغ استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها با سه تکرار انجام گرفت. برای بررسی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی به، از پارامتر ضریب نفوذ موثر بهره گرفته شد. مقدار ضریب نفوذ موثر با افزایش دما و ضخامت بین $2/77 \times 10^{-8}$ تا $8/12 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ در تغییر بود. نتایج، نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ضریب نفوذ در ضخامت‌های مختلف مشاهده شد. هم‌چنین برای مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن از ده مدل مختلف استفاده شد که این مدل‌ها براساس ضریب تبیین (R^2)، میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای کاهش یافته (χ^2) با یکدیگر مقایسه شدند و در پایان، مدل منتخب که بهترین برازش را از داده‌های حاصل از فرآیند خشک کردن ارائه نمود، مدل میدلی بود.

واژه‌های کلیدی: سینتیک خشک کردن، میوه‌ی به، ضریب نفوذ، مدل‌سازی ریاضی.

1- مقدمه

میوه‌ی به با نام علمی *Cydonia oblonga* میوه‌ای با طعم و آرومای اسیدی بوده و دارای مقدار بسیار زیادی فیبر رژیمی و پکتین می‌باشد (27). در حال حاضر، میوه‌ی به به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع دارای ترکیبات سلامتی بخش به خاطر دارا بودن خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و التیام‌دهنده زخم‌ها مطرح می‌باشد (10). این میوه، مقوی معده و متوقف‌کننده اسهال‌های ساده و خونی است. در ورم حاد روده، اثر بسیار موثری دارد و در تقویت اعمال دستگاه گوارش، مخاط و سرفه، کاملاً موثر است. دم کرده برگ‌های به، برای تسکین سرفه شهرت فراوان دارد (4).

خشک کردن، یک روش قدیمی برای نگه‌داری مواد غذایی است که همراه با افزایش زمان ماند¹، باعث کاهش وزن و حجم محصول و در نتیجه، تسهیل حمل و نقل و انبارداری شده و در حال حاضر به روش‌های متفاوتی انجام می‌شود (12). اساس این روش بر کاهش آب مواد غذایی یا به عبارت دیگر، کاهش فعالیت آبی² در آن‌هاست که منجر به جلوگیری از فساد میکروبی، شیمیایی و بیوشیمیایی می‌شود و عمر نگه‌داری مواد غذایی را افزایش می‌دهد (7). فرآیند خشک کردن دارای دو مرحله است: مرحله‌ی اول که در سطح مواد در حال خشک شدن و در یک سرعت ثابت اتفاق می‌افتد و شبیه تبخیر آب می‌باشد و مرحله‌ی دوم که با کاهش سرعت خشک شدن همراه است (19).

کوشش بر این است تا آهنگ خشک کردن از طریق انتقال گرما و رطوبت به بیش‌ترین مقدار ممکن رسانده شود (2). خشک کردن با هوای داغ به دلیل برداشتن هزینه‌های کم‌تر از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در تولید مواد گیاهی خشک می‌باشد (6). اکثر خشک‌کن‌های صنعتی از جریان هوای داغ جهت خشک کردن استفاده می‌کنند (3). استفاده از خشک‌کن‌های جریان هوای گرم سبب تسریع در فرآیند خشک شدن شده و امکان رعایت شرایط بهداشتی را فراهم می‌آورد (1). روش‌های مدرن طراحی تجهیزات خشک کردن، بر پایه‌ی مدل‌سازی‌های ریاضی که زمان خشک کردن را ارزیابی می‌کنند، استوار می‌باشد (17). روش متداول تحلیل پارامترهای کیفی و منحنی خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی در چرخه‌ی فرآوری بر مبنای روش حل معادلات انتقال جرم و حرارت و روش‌های

آماری یا معادلات رگرسیونی است. فرض اصلی مدل‌های مذکور بر آن است که داده‌های آزمایشی بیانگر واقعیت پدیده هستند و به کمک معادلات جبری بیان می‌شوند. مطالعه‌ی سنتتیک خشک کردن برای به دست آوردن اطلاعات راجع به زمان مورد نیاز برای خشک کردن و هم‌چنین انتخاب مدل خشک کردن مناسب، ضروری می‌باشد (9). به علت امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن، کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در نتیجه برای نگه‌داری مطمئن مواد غذایی لازم است آن‌ها را به رطوبت مشخصی رساند. برای دستیابی به این هدف باید خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدلسازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک شدن محصول را پیش‌بینی نمود.

2- مواد و روش‌ها

2-1 آماده‌سازی مواد اولیه

میوه‌ی به وارپته‌ی اصفهان از فروشگاه‌های سطح شهر تهیه و برای جلوگیری از آسیب در طی حمل و نقل، کاغذ پیچ و درون جعبه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شده و تا زمان مصرف، درون یخچال در دمای 4 درجه‌ی سانتیگراد نگه‌داری شدند. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقات علوم و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار انجام شد.

2-2 اندازه‌گیری رطوبت اولیه

ابتدا رطوبت اولیه‌ی نمونه توسط آون گذاری در دمای 105 درجه‌ی سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت، اندازه‌گیری شد (12).

2-3 آزمون خشک کردن

برش³‌های میوه در ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر، توسط دستگاه برش گیر (TEFAL) تهیه و برای ایجاد برش‌هایی با مساحت سطح ثابت از یک قالب استیل دایره‌ای شکل با قطر 4/5 سانتی‌متر استفاده شد. برش‌های تهیه شده بدون هیچ پیش‌تیماری، به صورت تیغه‌ی نازک، درون پلیت‌های شیشه‌ای قرار گرفته و در نهایت درون خشک‌کن جابه‌جایی هوای داغ⁴ (JEIO TECH, F-02G) در سه دمای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتیگراد قرار گرفتند. در فاصله‌های زمانی مختلف، پلیت‌ها خارج شده و توسط

3 - Slab

4- Hot air condition oven

1 - Shelf life

2 - Water activity

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_P - MR_E)^2 \right]^{1/2} \quad [4]$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_P - MR_E)^2}{N - Z} \quad [5]$$

که MR_P نسبت رطوبت پیش بینی شده، MR_E نسبت رطوبت آزمایشی، N تعداد داده‌ها و Z تعداد ضرایب ثابت در هر مدل می‌باشد.

7-2 محاسبه‌ی ضریب نفوذ موثر⁸

برای محاسبه‌ی ضریب نفوذ موثر از قانون دوم فیک⁹ استفاده شد (15).

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad [6]$$

که در آن، x مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان، x مشخصه فضایی¹⁰ و D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m^2/s) می‌باشد. قانون دوم فیک، اغلب برای توصیف پدیده‌ی نفوذ رطوبت به کار می‌رود (8). حل معادله‌ی فیک برای یک تیغه به صورت زیر می‌باشد:

$$MR = \frac{(x_t - x_e)}{(x_0 - x_e)} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{L^2}\right) \quad [7]$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ موثر، L نیمی از ضخامت تیغه (m) و t زمان خشک کردن بر حسب دقیقه می‌باشد.

8-2 آنالیز آماری

آزمون مقایسات میانگین توسط نرم افزار *SPSS 16* و در سطح 99% صورت گرفت. کلیه‌ی آزمایش‌ها در 3 تکرار انجام شد و مدل سازی ریاضی مورد نظر توسط نرم افزار *Sigma plot* نسخه 10 انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

1-3 اندازه‌گیری رطوبت اولیه

میانگین رطوبت اولیه‌ی میوه‌ی به، 81/5% در مبنای تر و 440/5% در مبنای خشک، محاسبه گردید.

ترازوی دیجیتالی با دقت 0/01 (AND Company, N92,) تا رسیدن به رطوبت تعادلی 2 تا 4 درصد، در مبنای تر، توزین شدند.

4-2 محاسبه‌ی آهنگ خشک کردن¹

آهنگ خشک کردن برش‌های میوه با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (5):

$$D.R = \frac{M_{(t+\Delta t)} - M_t}{\Delta t} \quad [1]$$

که در آن $M_{(t+\Delta t)}$ رطوبت در لحظه $(t + \Delta t)$ ، M_t مقدار رطوبت در هر لحظه و Δt فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی بر حسب دقیقه می‌باشد.

5-2 محاسبه‌ی نسبت رطوبت²

این پارامتر مقدار رطوبت برش‌های میوه را در هر لحظه، نسبت به رطوبت اولیه و نهایی بیان کرده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (21):

$$MR = \frac{M(t) - M(e)}{M_0 - M_e} \quad [2]$$

که در آن MR ، $M(t)$ ، $M(e)$ و M_0 به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت در مبنای خشک در لحظه t ، رطوبت تعادلی در مبنای خشک و رطوبت اولیه در مبنای خشک ($\frac{kg_{water}}{kg_{d.m}}$) می‌باشد. رطوبت تعادلی رطوبتی بود که فرآیند کاهش وزن در دمای مورد مطالعه متوقف شده بود.

6-2 مدل سازی ریاضی³

ده مدل مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است که مدل‌های مورد استفاده در بررسی داده‌های حاصل از خشک کردن محصولات، به صورت لایه‌ی نازک کاربرد دارد. بهترین مدل براساس بالاترین مقدار ضریب تبیین⁴ (R^2) و کم‌ترین مقادیر برای میانگین نسبی درصد انحراف⁵ (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا⁶ (RMSE) و مربع کای کاهش یافته⁷ (χ^2) انتخاب شد.

$$MRPD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|MR_P - MR_E|}{MR_E} \quad [3]$$

- 1 - Drying rate
- 2 - Moisture ratio
- 3 - Mathematical modeling
- 4 - Coefficient of determination
- 5 - Mean relative percent deviation
- 6 - Root mean squares error
- 7 - Reduced chi - square

8 - Effective moisture diffusivity

9 - Fick second's law

10 - Spatial coordinate

جدول 1- جدول مدل های ریاضی

معادله	مدل	Refrence
1 نیوتنی ¹	$MR = \exp(-k.t)$	Sarsavadia et al (1999)
2 پیج ²	$MR = \exp(-k.t^n)$	Sun and Woods (1994)
3 پیج اصلاح شده ³	$MR = \exp(-(k.t)^n)$	Yaldız et al. (2001)
4 هندرسون و پابیس ⁴	$MR = a.\exp(-k.t)$	Yagcioglu et al. (1999)
5 لگاریتمی ⁵	$MR = a.\exp(-k.t) + c$	Yaldız and Ertekin (2001)
6 دو جمله ای ⁶	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-h.t)$	Rahman et al. (1998)
7 دو جمله ای نمایی ⁷	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-h.t)$	Sharaf-Eldeen et al (1980)
8 هندرسون و پابیس اصلاح شده ⁸	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-g.t) + c.\exp(-h.t)$	Verma et al. (1985)
9 تقریب نفوذ ⁹	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Kassem (1998)
10 میدلی ¹⁰	$MR = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al (2002)

جدول 2 - ضریب نفوذ در ضخامت ها و دماهای آزمایش

	$D_{eff} (m^2/s)$		
	80°C	70°C	60°C
3 ^{mm}	$4/09 \times 10^{-8}$	$3/53 \times 10^{-8}$	$2/77 \times 10^{-8}$
5 ^{mm}	$5/71 \times 10^{-8}$	$5/66 \times 10^{-8}$	$3/44 \times 10^{-8}$
7 ^{mm}	$8/12 \times 10^{-8}$	$6/49 \times 10^{-8}$	$4/51 \times 10^{-8}$

- 1 - Newton
- 2 - Page
- 3 - Modified page
- 4 - Henderson and Pabis
- 5 - Logarithmic
- 6 - Two term
- 7 - Two term exponential
- 8 - Modified Henderson and Pabis
- 9 - Diffusion approximation
- 10 - Midli

جدول 3- میانگین مقادیر R^2 و MRPD و RMSE و C^2 برای مدل‌های مورد مطالعه.

	R^2	χ^2	MRPD	RMSE
نیوتنی	0/980167	0/001601	99/03446	0/033872
پیچ	0/99675	0/000288	0/52522	0/01551
پیچ اصلاح شده	0/99675	0/000288	49/52445	0/015386
هندرسون و پاییس	0/9826	0/001607	105/2261	0/034856
لگاریتمی	0/9979	0/000204	38/80751	0/299196
دو جمله‌ای	0/99715	0/000264	29/01789	0/013326
دو جمله‌ای نمایی	0/995183	0/000442	59/35382	0/015728
هندرسون و پاییس اصلاح شده	0/996833	0/000263	41/19183	0/012333
تقریب نفوذ	0/998317	0/000174	24/77398	0/011661
میدلی	0/999117	$8/9 \times 10^{-5}$	17/40564	0/009626

جدول 4- پارامترهای ثابت مدل میدلی* در تیمارهای آزمایش

دما (°C)	ضخامت (mm)	پارامترهای ثابت			
		a	b	k	n
60	3	0/9959	-0/0003	0/0068	0/0068
	5	1/0016	$-9/40 \times 10^{-5}$	0/0079	1/0433
	7	1/0026	$-3/07 \times 10^{-5}$	0/0017	1/2284
70	3	0/9955	-0/0004	0/0085	1/2266
	5	1/0001	$-5/55 \times 10^{-5}$	0/0058	1/1579
	7	0/9942	$-2/20 \times 10^{-6}$	0/0027	1/2503
80	3	1/0003	-0/0264	-0/0051	1/1422
	5	0/9911	0/0001	0/0063	1/1528
	7	0/9924	-0/0002	0/0043	1/1791

جدول 5- سرعت متوسط خشک شدن در دماها و ضخامت‌های مختلف.

ضخامت (mm)	3			5			7		
	60	70	80	60	70	80	60	70	80
سرعت متوسط خشک شدن ($\text{kgw.kgdm}^{-1}.\text{h}^{-1}$)	1/84	2/27	3/07	0/73	0/95	0/97	0/42	0/44	0/99

2-3 محاسبه آهنگ خشک کردن

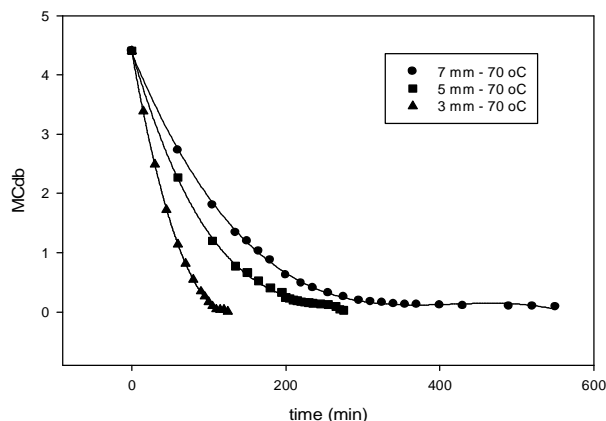
مطابق شکل 1، منحنی آهنگ خشک کردن به دو بخش جداگانه تقسیم می‌شود. بخش نخست مربوط به آهنگ ثابت خشک کردن¹ می‌باشد که در این مرحله، آب ناپیوسته به گونه‌ای جدا می‌شود که گویی جسم جامدی وجود ندارد. در اولین نقطه‌ی تغییر شیب منحنی، بخش آهنگ ثابت از بخش کاهنده² جدا شده و مقدار رطوبت در این نقطه، رطوبت بحرانی³ نامیده می‌شود (7، 13، 24).

همان‌طور که در شکل 1 مشاهده گردید، آهنگ خشک کردن در طی زمان، دارای یک شیب کاهشی می‌باشد. این شیب کاهشی در زمان‌های ابتدایی بیش‌تر و در انتهای زمان خشک شدن از مقدار شیب کاسته می‌شود که مربوط به پدیده‌ی کاهش رطوبت اشباع⁴ می‌باشد. به این صورت که در زمان‌های ابتدایی با توجه به مقدار بالای رطوبت در بافت میوه، سرعت خروج رطوبت بالا بوده و در نتیجه سرعت کاهش رطوبت از بافت میوه نیز زیاد و نمودار دارای شیب کاهشی شدیدی می‌باشد، ولی با گذشت زمان، با توجه به این که از مقدار آب محصول کاسته شد، سرعت انتقال رطوبت از عمق محصول به سطح آن و خروج آن از بافت، کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش آهنگ خشک کردن گردید. این مساله در مورد تیمارهای مربوط به ضخامت^{7mm} کاملاً مشهود بود اما برای تیمارهای مربوط به ضخامت^{3mm}، مرحله‌ی نخست خشک شدن کاملاً مشخص بود. به نظر می‌رسد کم بودن ضخامت این تیمار، باعث بروز این تفاوت بود که باعث شد مرحله‌ی دوم از فرآیند خشک شدن، مانند ضخامت‌های 5 و 7 میلی‌متر طولانی نشود، زیرا خشک شدن قبل از این که پدیده‌ی کاهش اشباعیت آغاز گردد، به پایان می‌رسد (20).

3-3 مدل سازی ریاضی

داده‌های حاصل از خشک کردن، به رطوبت نسبی (MR) تبدیل و این داده‌ها به همراه داده‌های زمان خشک کردن بر حسب دقیقه با استفاده از ده مدل ارائه شده در جدول 3، برازش داده شدند. برای انتخاب بهترین مدل، از داده‌های مشاهده شده حاصل از برازش هر مدل و استفاده از فرمول‌های 6 و 7 و 8، مقادیر² R²، MRPD،

RMSE و χ^2 محاسبه و با هم مقایسه شدند. بهترین مدلی که بهترین برازش را از کار خشک کردن برش‌های میوه‌ی به ارائه می‌کرد، مدل میدلی بود. رنج تغییرات مقادیر² R²، MRPD، RMSE و χ^2 برای مدل میدلی در جدول 3 آورده شده است.



شکل 1 - منحنی آهنگ خشک کردن ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر در دمای 70 درجه‌ی سانتیگراد.

داده‌های آزمایشی به صورت رضایت بخشی توسط این مدل برازش می‌شد. در جدول 4 نیز پارامترهای ثابت مدل میدلی در دماها و ضخامت‌های مختلف در مورد این مطالعه آورده شده است. هم‌چنین ارتیکن و یالدیز⁵ در سال 2004، مدل میدلی را به عنوان بهترین مدل برازشی در بین 12 مدل پیشنهاد کردند (12). مدل دو جمله‌ای به عنوان بهترین مدل برازش داده‌های خشک کردن پسته پیشنهاد شده است (19).

$$\text{midli equation: } MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$$

شکل‌های 2 و 3 برازش داده‌های خشک کردن میوه‌ی به، توسط مدل میدلی در سه ضخامت دمای 70°C و سه دمای ضخامت^{7mm} را نشان می‌دهد که حاکی از برازش بسیار خوب و بالای این داده‌ها توسط این مدل می‌باشد. شکل 4 به عنوان مثال، مقایسه‌ای برای بیان تفاوت برازش مدل میدلی با چند مدل انتخابی از جمله تقریب نفوذ، هندرسون و پاییس اصلاح شده، پیچ اصلاح شده و هندرسون و پاییس، نشان داد که مدل میدلی با توجه به ضریب تبیین بالاتر (R²) برازش بهتری از فرآیند خشک کردن میوه‌ی به ارائه می‌کند.

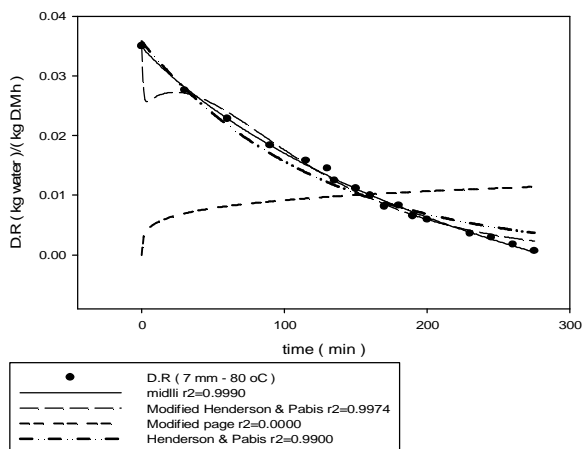
1 - Constant rate period

2 - Falling rate period

3 - Critical moisture content

4 - Saturated moisture

وقوع چروکیدگی سطحی در ضخامت‌های 5 و 7 میلی‌متر که منجر به کاهش انتقال جرم در این ضخامت‌ها و عدم اتفاق این فرآیند و یا کم‌تر بودن مقدار آن در ضخامت 3 میلیمتر، به خاطر انجام سریع فرآیند خشک کردن قبل از چروکیدگی سطحی بود که باعث شد در ضخامت 3^{mm} خروج رطوبت با سرعت بیش‌تری اتفاق بیفتد.



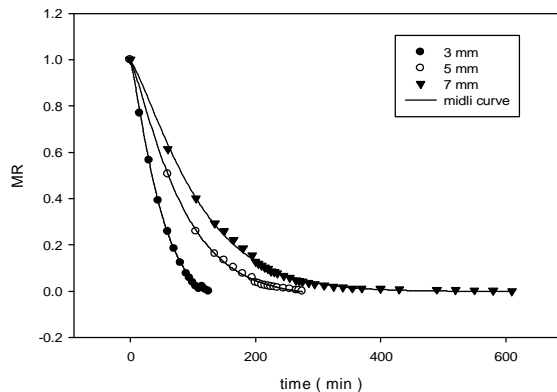
شکل 4- مقایسه ضریب تبیین (R^2) چند مدل با مدل میدلی در مورد داده‌های ضخامت 7^{mm} در 80 °C

3-4 محاسبه ضریب نفوذ موثر

با استفاده از قانون فیک و معادله‌ی 4 که شکل بسط داده شده معادله‌ی 3 برای تیغه می‌باشد ضریب نفوذ در دماهای مختلف محاسبه و نتایج آن در جدول 1 گزارش شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، مقدار ضریب نفوذ از ضخامت 3 تا 7 میلی‌متر افزایش یافت. مقدار ضریب نفوذ از کم‌ترین مقدار m^2/s $2/77 \times 10^{-8}$ برای ضخامت 3 میلی‌متر در دمای 60 درجه‌ی سانتیگراد تا بیش‌ترین مقدار $8/12 \times 10^{-8} m^2/s$ برای ضخامت 7 میلی‌متر در دمای 80 درجه‌ی سانتیگراد در حال افزایش بود. همچنین می‌توان گفت که با افزایش ضخامت در هر دما، مقدار ضریب نفوذ افزایش می‌یابد.

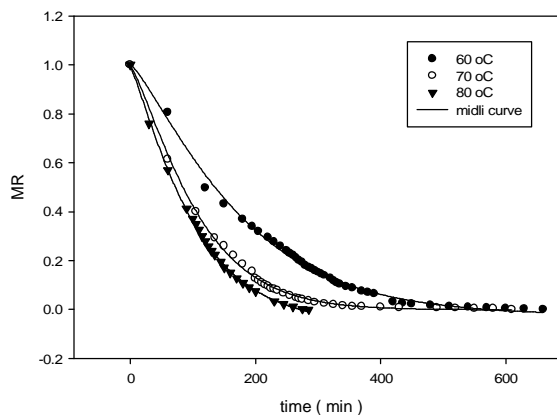
وگا¹ و همکاران در سال 2007 مقدار ضریب نفوذ موثر برای آلونته‌ورا در خشک کن هوای داغ، در دامنه‌ی دمایی صفر تا 90 درجه‌ی سانتیگراد را بین $5/3 \times 10^{-10} m^2/s$ تا $17/73 \times 10^{-10} m^2/s$

70 °C



شکل 2- برازش داده‌های خشک کردن در ضخامت‌های مختلف و دمای ثابت 70 °C توسط مدل میدلی.

7 mm

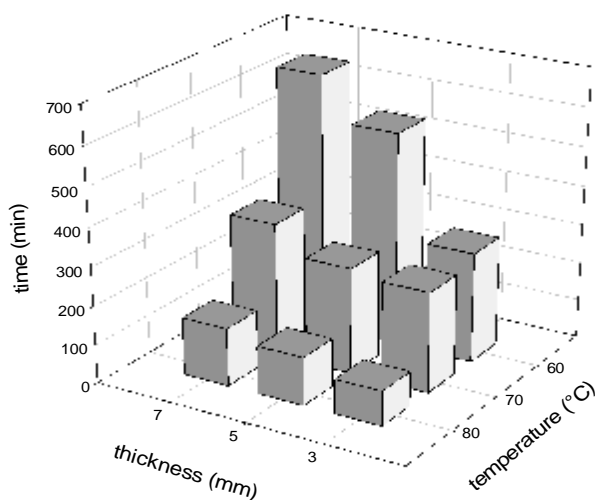


شکل 3- برازش داده‌های خشک کردن در ضخامت ثابت 7^{mm} توسط مدل میدلی برای دماهای مختلف.

اثر ضخامت تیغه‌ها بر زمان خشک کردن در شکل 5 نشان داده شده است. میانگین زمان خشک کردن در دمای 60 °C، در ضخامت‌های 3 و 5 و 7 میلی‌متر به ترتیب 141/67، 355 و 615 دقیقه بوده است. مشاهده شد که با افزایش ضخامت، زمان خشک کردن افزایش یافت که به خاطر افزایش مقاومت در برابر انتقال رطوبت در ضخامت‌های بالاتر بود (13).

هنگامی که ضخامت از 3 به 5 میلی‌متر افزایش یافت، زمان خشک کردن 250/58 درصد و هنگامی که ضخامت از 5 به 7^{mm} میلی‌متر افزایش یافت، زمان خشک کردن 173/24 درصد افزایش نشان داد. درصد افزایش زمان خشک کردن از ضخامت 5 به 7 میلی‌متر، کم‌تر از درصد آن در 3 به 5 میلی‌متر بود. این امر به دلیل

با افزایش ضخامت، انتقال جرم کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت متوسط خشک شدن با تغییرات دما نشان دهنده‌ی یک رابطه‌ی مستقیم بین این دو پارامتر بود.



شکل 5- اثر ضخامت تیغه‌ها بر زمان خشک کردن در دمای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد

شکل 5، رابطه‌ی بین تغییرات دما و ضخامت و اثر توأم این دو پارامتر بر زمان خشک کردن در دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌راد را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌نمایید که زمان خشک کردن با افزایش ضخامت و کاهش دما، افزایش یافت. همان‌طور که در شکل 6، مشاهده شد نقطه‌ی شکست نمودارها در رطوبت حدود 2% در مینای خشک و 67% در مینای تر بود. این شکل همچنین فرآیند خشک شدن برش‌های میوه‌ی به تار رسیدن به نقطه‌ی شکست و ادامه‌ی فرآیند تا رطوبت نهایی را در مورد تکرارهای تیمار ضخامت 3^{mm} در دمای 70°C، با هم مقایسه می‌کند.

گزارش کردند (29). دیسا¹ و همکاران در سال 2010 بر روی خشک کردن اسپیرولینا² که یک فرآورده باکتریایی مغذی می‌باشد مطالعه نمودند، گزارش کردند که با افزایش ضخامت از 3 به 6 میلی‌متر، مقدار ضریب نفوذ از $1/06 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ $1/67 \times 10$ افزایش یافت (11). پژوهش‌های انجام شده بر روی خشک کردن میوه‌ی استوایی³، نتایج مشابهی را در مورد تغییرات ضریب نفوذ با ضخامت و دمای خشک کردن گزارش نموده‌اند (34).

همچنین، مقایسه‌ی میانگین در مورد این پارامتر که توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفت بیانگر وجود اختلاف معنی‌داری با $\alpha=0/01$ بین سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر بود و نیز برای دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتیگراد مشاهده شد که مقدار ضریب نفوذ در مورد دماهای 60 و 70°C، دارای تفاوت معنی‌داری است ولی بین ضریب نفوذ در دماهای 70 و 80 درجه‌ی سانتیگراد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($\alpha=0/01$). هرچند که افزایش دما از 70 به 80°C باعث افزایش ضریب نفوذ در تمامی ضخامت‌های مورد مطالعه گردید. افزایش دما از 60 به 70 درجه‌ی سانتیگراد باعث افزایش $1/65 \times 10^{-8}$ واحد در مقدار ضریب نفوذ گردید اما افزایش دما از 70 به 80 درجه‌ی سانتیگراد، $0/74 \times 10^{-8}$ واحد، ضریب نفوذ را افزایش داد. با توجه به این که مواد مختلفی در بافت میوه‌ی به همراه با آب وجود دارد به نظر می‌رسد اعمال دمای 70 درجه‌ی سانتیگراد، حداقل انرژی مورد نیاز برای جدا شدن آب از بافت در مدت زمان مشخص، نسبت به دمای 60°C را فراهم می‌کند و همین باعث بروز اختلاف میان این دو دما گردیده که چنین امری در دمای 80 درجه‌ی سانتیگراد مشاهده نشده است.

میانگین سرعت خشک کردن سه ضخامت 3 و 5 و 7 میلی‌متر در دمای 60°C تا رسیدن به رطوبت تعادلی 6% به ترتیب، 1/840، 0/734 و 0/424 کیلوگرم آب به ازای هر کیلوگرم ماده‌ی خشک در ساعت بود.

جدول 5، سرعت متوسط خشک شدن در تمامی تیمارهای این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، سرعت متوسط خشک شدن کاهش یافته که رابطه‌ی معکوس بین انتقال جرم و افزایش ضخامت را نشان می‌دهد. یعنی

3- خوش تقاضا، م.ه، م. صادقی، ر، امیری چایچیان، 1386،
 بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و
 سیال، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی، 14، 1:11.

4- خواجه پور، م. ر. 1376. اصول و مبانی زراعت. نگارش دوم،
 مرکز انتشارات واحد صنعتی جهاد دانشگاهی اصفهان. صفحات
 123 – 124.

5- رفیعی، ش، 1385، اصلاح رطوبت تعادلی شلتوک برنج
 (سپید رود) برای شبیه سازی خشک کردن توده‌ی بستر نازک،
 علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، 10، 175:183.

6- عزیزی، م، م، رحمتی، ت، عبادی، م، حسن زاده خیاط،
 1388، بررسی تاثیر روش‌های مختلف خشک کردن بر سرعت
 کاهش وزن، میزان اسانس و درصد کامازولن گیاه دارویی
 بابونه، فصلنامه‌ی علمی - پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و
 معطر ایران، 25، 182:193.

7- مصباحی، غ، ر، ع، زمردیان، م، داداش زاده، ع، فرحناکی،
 1385، بررسی مقایسه‌ی ای تولید کشمش به وسیله‌ی خشک کن
 خورشیدی و سایر روش‌های خشک کردن، مجله‌ی
 پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، 61:75.

8-Babalís, S.J., &Belessiotis, V.G. 2004. Influence
 of the drying conditions on the drying constants and
 moisture diffusivity during the thin-layer drying of
 figs. *Journal of Food Engineering*, 65:449–458.

9-Baini. R, T.A.G. Langrish, 2008, An assessment
 of the mechanisms for diffusion in the drying of
 bananas, *Journal of Food Engineering*, 85, 201:215

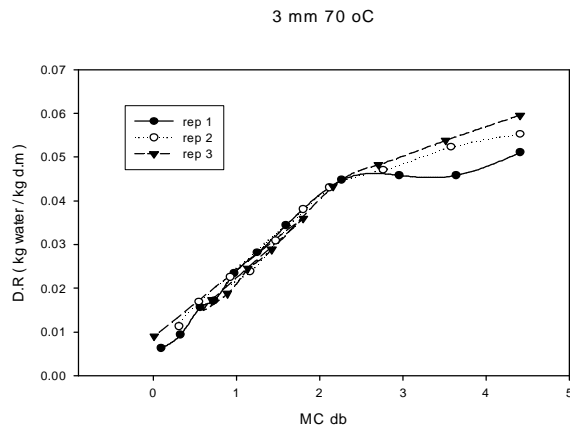
10-Costa.R. M, A.S. Magalhães, J. A. Pereir, P. B.
 Andrade, P. Valentão, M. Carvalho, B. M. Silva
 2009, Evaluation of free radical-scavenging and
 antihemolytic activities of quince (*Cydoniaoblonga*)
 leaf: A comparative study with green tea (*Camellia
 sinensis*), *Food and Chemical Toxicology*, 47,
 860:866

11-Dissa. A.O, H. Desmorieux, P.W. Savadogo ,
 B.G. Segda , J. Koulidiati, 2010, Shrinkage,
 porosity and density behaviour during convective
 drying of spirulina, *Journal of Food Engineering*,
 97, 410:419

12-Ertekin. C, O. Yaldiz, 2004, Drying of eggplant
 and selection of a suitable thin layer drying model,
Journal of Food Engineering, 63, 349:360

13-Ertekin. F. K, A. Gedik 2005, Kinetic modelling
 of quality deterioration in onions during drying and
 storage, *Journal of Food Engineering*, 68, 443:454.

14-Goyal, R. K.,Kingsly, A. R. P., Manikantan, M.
 R. &Ilyas, S. M. 2007. Mathematical modelling of
 thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer.
Journal of Food Engineering, 79:176–180.



شکل 6- مقایسه‌ی نقطه‌ی شکست سه تکرار ضخامت 3^{mm} در دمای 70° C

4- نتیجه گیری

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که پس از مدلسازی فرآیند خشک کردن برش‌های میوه‌ی به توسط ده مدل مختلف، مدل میدلی بالاترین برازش را از این فرآیند داشت و می‌توان بهترین پیش‌بینی را از فرآیند خشک کردن برش‌های میوه‌ی به، به وسیله‌ی این مدل انجام داد. مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت با افزایش دما و ضخامت، به صورت معنی داری افزایش داشت. همچنین افزایش دما و کاهش ضخامت، باعث افزایش سرعت متوسط خروج رطوبت از بافت میوه گردید به طوری که بیشترین سرعت متوسط خروج رطوبت در دمای 80 درجه‌ی سانتیگراد و برای برش‌هایی با ضخامت 3 میلی‌متر اتفاق افتاد.

5- منابع

- 1- بهروزی خزائی، ن، امیری چایچیان ر، توکلی هشتجین، ت، خوش تقاضا، م.ه، 1386. بررسی شاخص‌های مهم خشک شدن انگور در روش خشک کردن با جریان هوای گرم به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی، 7، 141:155
- 2- بیات، ف، 1385، اثر شرایط گوناگون خشک کردن بر ویژگی‌های کیفی ورقه‌های سیر خشک، مجله‌ی تحقیقات مهندسی کشاورزی، 7، 1:16

- waste for animal feed, *Animal Feed Science and Technology*, 151, 268:280.
- 30-Verma, L. R., R. A. Bucklin, J. B. Endan, F. T. Wratten, 1985, Effects of drying air parameters on rice drying models, *Transactions of the ASAE*, 28, 296:301.
- 31-Yagcioglu, A. A. Degirmencioglu, F. Cagatay, 1999, Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions, In Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy, Adana, Turkey.
- 32-Yaldiz. O, C. Ertekin, 2001, Thin layer solar drying of some different vegetables, *Drying Technology*, 19, 583:596.
- 33-Yaldiz. O, C. Ertekin, H. I. Uzun, 2001, Mathematical modelling of thin layer solar drying of Sultana grapes, *Energy*, 26, 457:465.
- 34-Zuñiga. G, A. Pinedo, A. Rodrigues, R. M. Lima, C. S. S. Feitosa, 2006, Kinetic drying experimental data and mathematical model for jackfruit (*Artocarpus integrifolia*) slices, *Cienc. Tecnol. Aliment.* 5, 89:94.
- 15-Hamdami. N , J.Y. Monteau ,A. L. Bail, 2004, Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures. Part 2: Evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data, *Journal of Food Engineering*, 62, 385:393.
- 16-Kassem. A. S, 1998, Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In Proceedings of the 13th international congress on agricultural engineering. Morocco.
- 17-Ma´rquez. C, A. DeMichelis, S.A. Giner, 2006, Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglanteria* L.), *Journal of Food Engineering*, 77, 566:575.
- 18-Midilli. A, H. Kucuk, Z. Yapar, 2002, A new model for single layer drying, *Drying Technology*, 20, 1503:1510.
- 19-Midilli. A, H. Kucuk, 2004, Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion and Management*, 44, 1111:1123.
- 20-Mitra, J., Shrivastava, S. L., & Srinivasa Rao, P. 2011. Vacuum dehydration kinetics of onion slices. *food and bio products processing*, 89:1-9.
- 21-Ozdemir M. B, T. Menlik , V. Kirmaci, 2010, Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network, *Expert Systems with Applications*, 9, 1:10.
- 22-Rahman, M. S, C. O. Perera, C. Thebaud, 1998, Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas, *Food Research International*, 30, 485:492
- 23-Sarsavadia. P. N, R. L. Sawhney, D. R. Pangavhane, S. P. Singh, 1999, Drying behaviour of brined onion slices, *Journal of Food Engineering*, 40, 219:226
- 24-Sharaf-Eldeen. O, Y. I. Blaisdell, G. Spagna, 1980, A model for ear corn drying, *Transactions of the ASAE*, 23, 1261:1271.
- 25-Sharma, G.P., Verma, R.C., & Pathare, P. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71: 282-286.
- 26-Sun, D. W, J. L. Woods, 1994, Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers, *Transactions of the ASAE*, 37, 1919:1926.
- 27-Thomas. M, F. Guillemin, F. Guillon, J.F. Thibault, 2003, Pectins in the fruits of Japanese quince (*Chaenomeles japonica*), *Carbohydrate Polymers*, 53, 361:373.
- 28-Vega. A, E. Uribe, R. Lemus, M. Miranda, 2007, Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters, *LWT*, 40, 1698:1708
- 29-Vega-Galvez. A, E. Gonzalez, E. Notte-Cuello, M. Chacana, R. Lemus-Mondaca, 2009, Mathematical modelling on the drying process of yellow squat lobster (*Cervimunida jhoni*) fishery