

مدلسازی ریاضی و محاسبه‌ی ضریب نفوذ موثر در فرآیند خشک کردن لایه‌ی نازک برش‌های میوه‌ی کامکوات

مرتضی محمدی^{1*}، مهرداد اسدی¹، زهرا پورفلاح¹، منیره نهاردانی¹

¹دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: 90/11/15 تاریخ پذیرش: 91/2/10

چکیده

در مطالعه‌ای که بر روی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی کامکوات در دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد با ایجاد برش‌های نازکی با ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر انجام شد، مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت با استفاده از قانون دوم فیک، محاسبه و فرآیند خشک کردن به وسیله‌ی معادلات ریاضی مختلف، مدلسازی گردید. نتایج، نشان داد که با افزایش دما و ضخامت، ضریب نفوذ موثر افزایش یافت. بهترین مدل ریاضی که بهترین برازش را از داده‌های خشک کردن میوه‌ی کامکوات داشت با بالاترین ضریب تبیین (R^2) و پایین‌ترین مقادیر برای میانگین نسبی درصد انحراف (MRPD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای کاهش یافته (χ^2) انتخاب شد. مدل منتخب که برازش مناسبی نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه ارائه کرد، مدل میدلی بود.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی ریاضی، خشک کردن، کامکوات، ضریب نفوذ.

1- مقدمه

کامکوات، درختی پرپشت و انبوه با مقدار محصول بالا از خانواده‌ی روتاسه¹ می‌باشد. میوه‌های آن بیضی شکل و یا کروی، همراه با پوست نارنجی روشن هستند. میوه‌های کامکوات معمولاً به صورت کامل خورده می‌شوند و یک مزه‌ی شیرین در ابتدا و کمی طعم تند در پایان دارند. میوه‌های کامکوات در تولید فرآورده‌هایی مانند مارمالاد و سس‌ها کاربرد دارد. میوه‌ی کامکوات دارای پوسته‌ی بیرونی شیرین و ترش مزه با گوشت آبدار می‌باشد و به شکل فرآوری شده و یا خشک نگه داری می‌شود. کامکوات خشک شده اغلب به عنوان یک داروی سنتی برای درمان امراض مجاری تنفسی مانند گرفتگی صدا، گلو درد و سرفه استفاده می‌شود. مطالعات بسیاری نیز بر روی خواص دارویی ترکیبات بیواکتیو به دست آمده از پوست میوه‌ی کامکوات انجام شده است و بیشترین ترکیبات موجود در پوست میوه‌ی کامکوات، فلاونوئیدها می‌باشند (9، 12 و 16).

خشک کردن فرآورده‌های کشاورزی یکی از مهم‌ترین راه‌های عمل‌آوری جهت افزایش ماندگاری مواد غذایی می‌باشد (18). خشک کردن با هوای داغ به دلیل در برداشتن هزینه‌های کم تر از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در تولید مواد گیاهی خشک می‌باشد (3). اکثر خشک‌کن‌های صنعتی از جریان هوای داغ، جهت خشک کردن استفاده می‌کنند (2). 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 مدل سازی‌های ریاضی که زمان خشک کردن را ارزیابی می‌کنند، استوار می‌باشد (13).

روش خشک کردن لایه‌ی نازک به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای بررسی خصوصیات پارامترهای خشک کردن، کاربرد دارد. معمولاً سه نوع از مدل‌ها جهت خشک کردن لایه‌ی نازک برای توصیف خشک کردن فرآورده‌های کشاورزی با نام‌های مدل‌های تئوری، نیمه تئوری و تجربی وجود دارد. روش تئوری به معادله‌ی نفوذ گرما و معادله‌ی انتقال جرم، بستگی دارد. مدل‌های تجربی رابطه‌ی مستقیمی بین میانگین رطوبت و زمان خشک کردن به وسیله‌ی آنالیز رگرسیونی ارائه می‌کنند و مدل‌های یک رابطه‌ی جایگزینی بین مدل‌های تجربی و تئوری می‌باشند که از معادلاتی

که برای ساده سازی قانون دوم فیک و یا اصلاح مدل‌های ساده شده استفاده می‌شدند، اشتقاق پیدا کرده‌اند (18).

مطالعه‌ی سینتیک خشک کردن میوه‌ها برای رسیدن به اطلاعاتی درباره‌ی زمان مورد نیاز برای خشک کردن و انتخاب مدل مناسب، بسیار ضروری می‌باشد. بررسی سینتیک خشک کردن، به وسیله‌ی عواملی مانند دما و رطوبت هوای محل و همچنین محتوای رطوبت میوه تحت تاثیر قرار می‌گیرد همچنان که دیگر خصوصیات محصول مانند رنگ و بافت نیز با تغییر برخی خصوصیات محل رشد، تغییر می‌کند (8).

خشک کردن ترکیبات مواد غذایی مانند میوه‌ها و سبزی‌ها یا غذاهای عملگرا²، به تکنیک‌های خاصی جهت جلوگیری از هم‌پاشیدگی دمایی و اکسیداسیون ترکیبات موثره و یا جلوگیری از واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی نیاز دارد. بافت، رنگ و آروما مهم‌ترین خصوصیات کیفی تولیدات غذایی هستند که در بازار پسندی محصولات تولید شده، اهمیت دارند.

در طی فرآیند مواد غذایی، با توجه به محتوای آب موجود در بافت محصول، ممکن است این خصوصیات کاهش پیدا کند و یا دگرگون شود مخصوصاً در مواد غذایی خشک شده (15). با توجه به مطالعات انجام شده، با تجزیه‌ی یک فرآیند ترکیبی مانند خشک کردن به عناصر اصلی آن به یک سیستم ساده‌تر تبدیل شده که می‌تواند مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. بنابراین، اندازه‌گیری خصوصیات خشک کردن، مانند پارامترهای موثر در سینتیک خشک کردن لایه‌ی نازک می‌تواند در ایجاد دور نامایی مناسب برای طراحی تجهیزات صنعتی خشک کردن، مورد استفاده قرار گیرد (13).

از این‌رو، در مطالعه‌ی پیش رو برای بررسی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی کامکوات، در ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر و سه دمای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد، از ده مدل ریاضی مختلف استفاده شد و مقدار ضریب نفوذ فرآیند خشک کردن برش‌های خشک شده در خشک‌کن هوای داغ، محاسبه گردید.

2- مواد و روش‌ها

1-1- مواد اولیه

میوه‌ی کامکوات با نام علمی *Fortunella margarita* مورد استفاده قرار گرفت که از باغات شهرستان نور استان مازندران تهیه و تا زمان مصرف درون یخچال در دمای 4 درجه‌ی سانتی‌گراد نگه‌داری شد.

2-2- روش‌ها

در ابتدا رطوبت اولیه‌ی میوه با قرار دادن 5-10 گرم نمونه‌ی آماده شده در دمای 105 درجه‌ی سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد (11). پس از آن، فرآیند خشک کردن در دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد به وسیله‌ی خشک‌کن هوای داغ (Oven, model: JEIO TECH, Type F-02G) انجام شد. با توجه به این که میوه‌ی کامکوات در بیش‌تر موارد به صورت کامل خورده می‌شود، به همراه پوست به صورت تیغه‌هایی با ابعاد 3، 5 و 7 میلی‌متر توسط چاقوی آزمایشگاهی تهیه، ضخامت تیغه‌ها به وسیله‌ی ریزسنج (کولیس) کنترل و بدون هیچ پیش‌تیماری درون پلیت‌های شیشه‌ای کاملاً تمیز قرار داده شد. پلیت‌ها درون خشک‌کن جاگذاری و در فاصله‌های زمانی مشخص خارج شده و در دسیکاتور (به منظور جلوگیری از جذب رطوبت در طی مرحله‌ی سرد شدن) قرار داده شده و به وسیله‌ی ترازوی آزمایشگاهی دیجیتال (A&D company, N92, made in Japan) با دقت 0/01 توزین شدند. فرآیند خشک کردن تا رسیدن به وزن ثابت، ادامه پیدا کرد.

2-3- مدلسازی ریاضی نمودارهای فرآیند خشک کردن

در اولین مرحله، پس از اتمام فرآیند خشک کردن، آهنگ خشک کردن¹ برش‌های میوه با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (4):

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

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

به منظور مدلسازی ریاضی داده‌های آزمایشگاهی، محاسبه‌ی نسبت رطوبت² در گام اول ضروری می‌باشد. نسبت رطوبت،

مقدار رطوبت برش‌های میوه را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و نهایی بیان کرده و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (17):

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

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.

ده مدل مورد استفاده به منظور مدل‌سازی ریاضی³ در جدول 1 آورده شده است. مدل‌های ارائه شده در جدول 1 در بررسی داده‌های حاصل از خشک کردن محصولات به صورت لایه‌ی نازک، کاربرد دارند. 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.

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

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

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

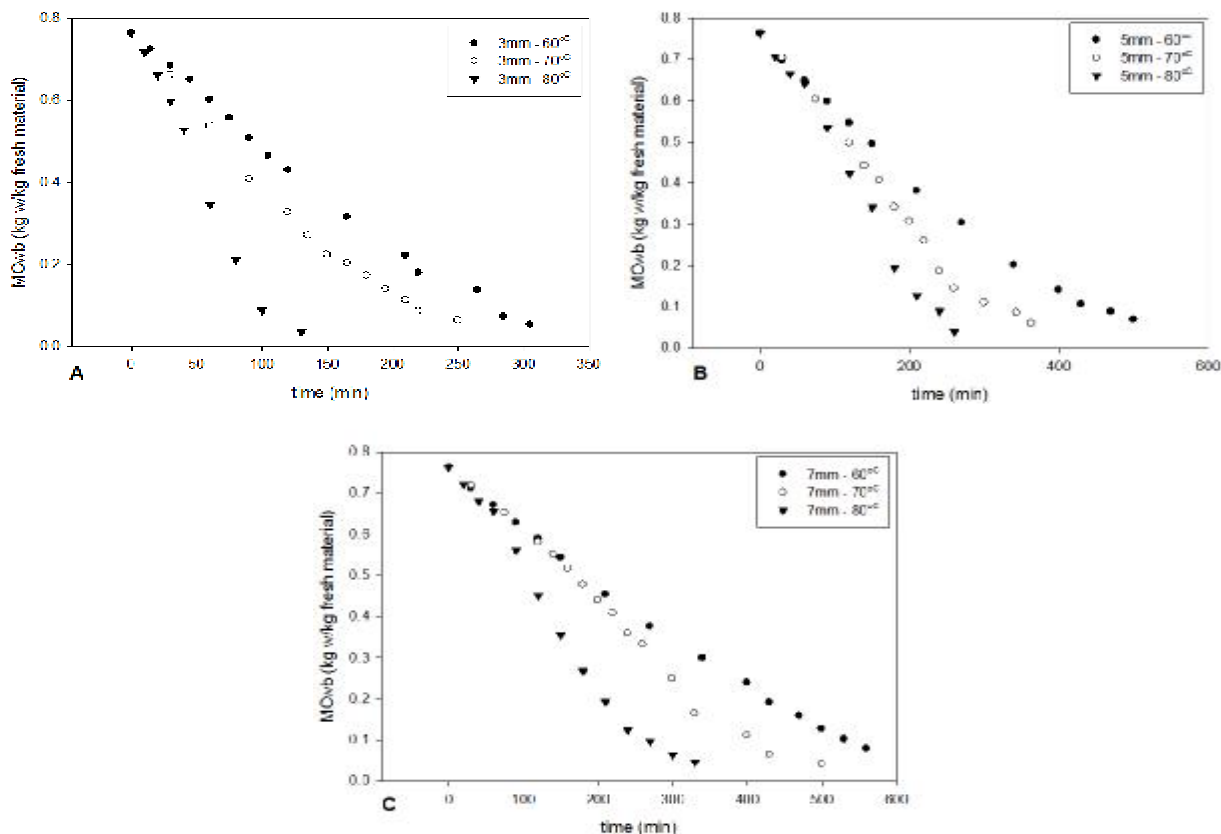
که MR_P نسبت رطوبت پیش‌بینی شده، MR_E نسبت رطوبت آزمایشی، N تعداد داده‌ها و Z تعداد ضرایب ثابت در هر مدل می‌باشد. مدل‌سازی ریاضی مورد نظر توسط نرم افزار Sigma plot نسخه 10 انجام گرفت

3 - Mathematical modeling
4 - Coefficient of determination
5 - Mean relative percent deviation
6 - Root mean squares error
7 - Reduced chi - square

1- Drying rate
2 - Moisture ratio

جدول 1- جدول مدل‌های ریاضی

معادله	مدل	Reference
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)

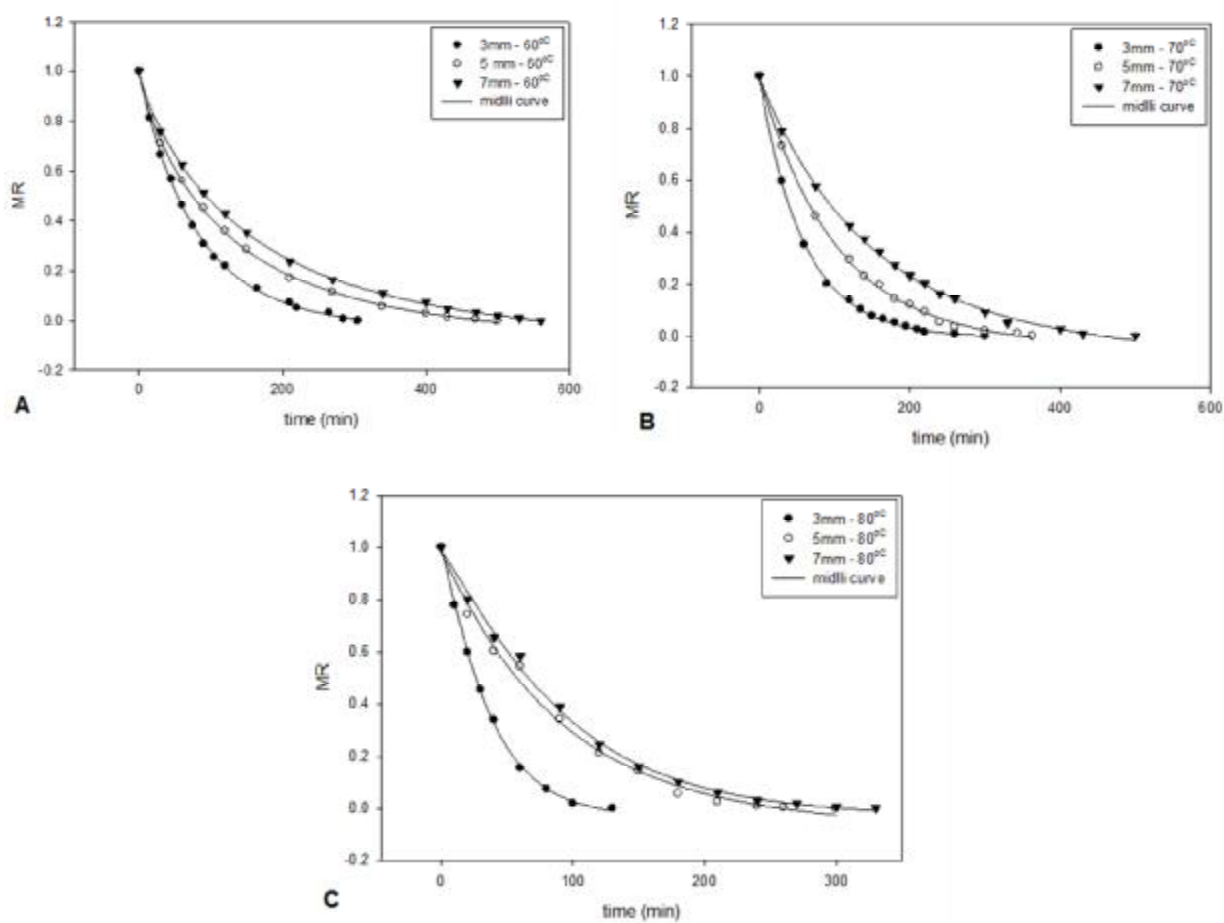


شکل 1- تغییرات مقادیر رطوبت در مبنای تر در زمان‌های مختلف.

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

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

میدلی	تقریب نفوذ	هندرسون و پابیس اصلاح شده	پیچ اصلاح شده	نیوتنی	میدلی	تقریب نفوذ	هندرسون و پابیس اصلاح شده	پیچ اصلاح شده	نیوتنی
R^2	0/997433	0/998533	0/998533	0/997678	0/998844	0/995867	0/998756	0/998967	0/997433
χ^2	0/000555	0/000336	0/000335	0/000553	0/000302	0/000407	0/000293	0/000357	0/00068
MRPD	46/788	33/6174	33/6169	45/75398	16/3351	36/38446	33/25176	21/67346	46/7869
RMSE	0/0205	0/01526	0/01526	0/019408	0/01378	0/014352	0/013948	0/012534	0/0205

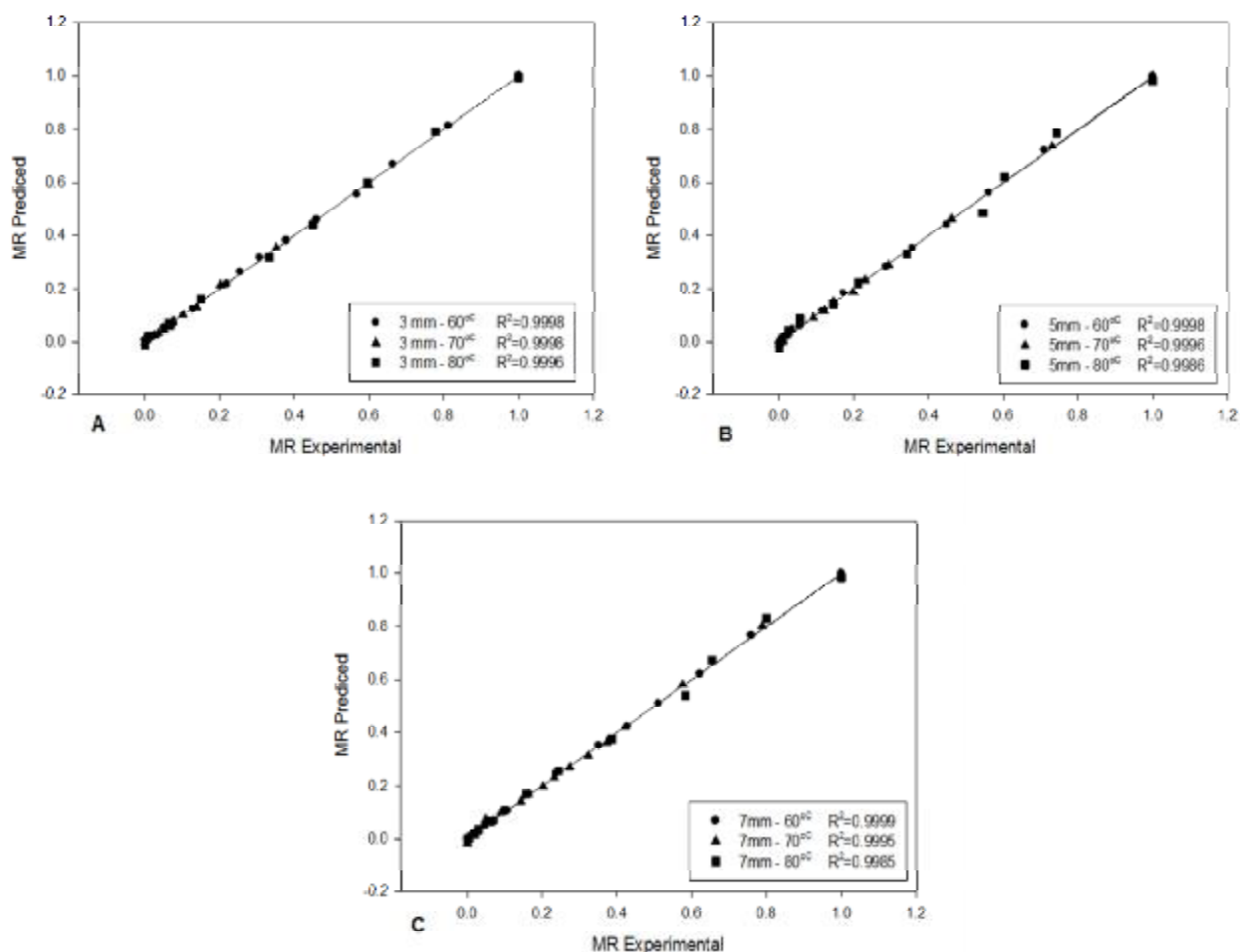


شکل 3- پرازش داده‌های حاصل از کار خشک کردن به وسیله‌ی مدل میدلی در A: ضخامت‌های مختلف دمای 60°C. B: ضخامت‌های مختلف دمای 60°C و C: ضخامت‌های مختلف دمای 60°C

جدول 3- پارامترهای ثابت مدل میدلی* در تیمارهای آزمایش

ضخامت (mm)	دما (°C)	پارامترهای ثابت معادله			
		a	b	k	n
3	60	1/0003	$\times 10^{-5}$	0/0158	0/9491
	70	1/001	$-2/09 \times 10^{-5}$	0/0189	0/9769
	80	0/9945	-0/0002	0/0165	1/1418
5	60	0/9973	$-8/57 \times 10^{-5}$	0/0193	0/8272
	70	0/9981	$-8/98 \times 10^{-5}$	0/0101	0/9996
	80	0/9826	-0/0002	0/01	1/033
7	60	0/9987	$-8/67 \times 10^{-5}$	0/0154	0/8346
	70	0/9946	-0/0001	0/0077	0/9791
	80	0/9843	$-6/77 \times 10^{-5}$	0/0054	1/149

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



شکل 4- مقایسه‌ی مقادیر آزمایشگاهی و مشاهده شده در مورد برازش داده‌ها توسط مدل میدلی.

جدول 4- مقادیر ضریب نفوذ و زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت تعادلی در تیمارهای مورد مطالعه

ضخامت (mm)	3			5			7			
	دما (°C)	60	70	80	60	70	80	60	70	80
ضریب نفوذ (m ² /s)	1/26×10 ⁻⁹	1/63×10 ⁻⁹	3/54×10 ⁻⁹	2/48×10 ⁻⁹	3/29×10 ⁻⁹	5/78×10 ⁻⁹	3/91×10 ⁻⁹	4/92×10 ⁻⁹	7/98×10 ⁻⁹	
زمان خشک شدن (min)		305	280	130	420	360	300	560	480	250

کوتاه‌ترین زمان در دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد و برای ضخامت 3 میلیمتر مشاهده گردید.

نمودارهای شکل 1، این مساله را به وضوح نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست نمودارهای تغییرات رطوبت در مبنای تر در برابر زمان، دارای شیب کاهشی بوده که این شیب با افزایش دما در ضخامت‌های ثابت از روند کاهشی شدیدتری برخوردار بود.

این موضوع به خاطر افزایش انرژی وارد شده به مولوکول‌های آب در دماهای بالاتر می‌باشد به گونه‌ای که دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد، بیش‌ترین انرژی را برای جداشدن آب موجود در بافت میوه، تأمین نمود و فرآیند تبخیر با شدت و سرعت بیش‌تری انجام و در نتیجه زمان کوتاه‌تری به پایان رسید.

با افزایش ضخامت برش‌ها، مسیر پیمایش رطوبت از عمق به سطح محصول افزایش یافته، در نتیجه، باعث افزایش زمان خشک شدن گردید.

جدول 3، اثر توأم دمای خشک کردن و ضخامت برش‌ها بر زمان خشک شدن را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست بیش‌ترین زمان خشک شدن به اثر متقابل دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد و ضخامت 7 میلی‌متر و کم‌ترین زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت تعادلی، دمای 80°C و ضخامت 3 میلی‌متر مربوط بود.

شکل 2، مقادیر رطوبت تعادلی نهایی در شرایط مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر طبق آن هرچه ضخامت تیغه‌ها افزایش یافت، درصد رطوبت تعادلی نیز افزایش یافت. به عبارتی، فرآیند خشک شدن محصول در ضخامت 7 میلی‌متر نسبت به 3 میلی‌متر، در رطوبت تعادلی بالاتری ثابت و متوقف گردید. این امر به دلیل افزایش مسیر پیمایش رطوبت از عمق به سطح محصول در ضخامت‌های بالا و چروکیدگی سطحی مربوط می‌شد.

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت (جدول 1) در زمان‌های مختلف برای هر ضخامت و دما با استفاده از فرمول 2 می‌توان مقدار محاسبه ضریب نفوذ موثر¹ را در دماها و ضخامت‌های مورد مطالعه مطالعه با توجه به قانون دوم فیک²، محاسبه نمود (13).

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

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان، x مشخصه‌ی فضایی³ و D_{eff} ضریب نفوذ موثر (m²/s) می‌باشد. قانون دوم فیک، اغلب برای توصیف پدیده‌ی نفوذ رطوبت به کار می‌رود (7). حل معادله‌ی فیک برای یک تیغه به صورت زیر می‌باشد:

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

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ موثر، L نیمی از ضخامت تیغه (m) و t زمان خشک کردن بر حسب دقیقه می‌باشد. مدل سازی ریاضی مورد نظر توسط نرم افزار Sigma plot نسخه 10 انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

پس از قرار دادن مخلوطی از پوست و گوشت میوه‌ی کامکوات در دمای 105°C، رطوبت اولیه‌ی محصول از برآیند سه تکرار، 76/31% در مبنای تر و 322/19% در مبنای خشک، محاسبه گردید. بررسی روند خشک شدن برش‌های میوه‌ی کامکوات در دماهای 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد با ضخامت 3 تا 7 میلی‌متر نشان داد که با افزایش ضخامت و کاهش دما، زمان مورد نیاز برای خشک شدن افزایش یافت. به گونه‌ای که طولانی‌ترین زمان فرآیند به دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد و برای ضخامت 7 میلی‌متر و

1 - Effective moisture diffusivity

2 - Fick second's law

3 - Spatial coordinate

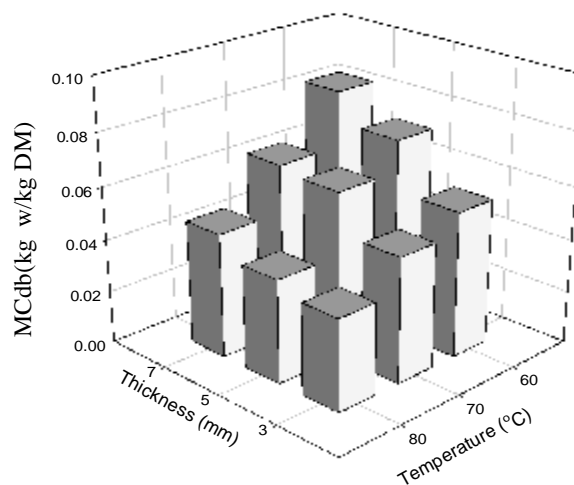
شرایط ذکر شده در مورد فرآیند خشک کردن برش‌های لایه‌ی نازک میوه‌ی کامکوات با ضخامت‌های 3 تا 7 میلی‌متر در دمای 60-80 درجه‌ی سانتی‌گراد، مدل میدلی بود. مقادیر مربوط به پارامترهای R^2 ، RMSE، MRPD و χ^2 برای تمامی ده مدل مورد بررسی در جدول 2، گزارش شده است.

نمودارهای شکل 3 نیز برآزش بسیار خوب و مناسب داده‌های فرآیند خشک کردن میوه‌ی کامکوات را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار رطوبت نسبی با افزایش زمان کاهش می‌یابد تا این‌که در نهایت به صفر می‌رسد. روند کاهش مقدار رطوبت نسبی در ضخامت‌های کم‌تر نسبت به برش‌های ضخیم‌تر در مورد هر دما، از شدت کم‌تری برخوردار بود. افزایش دما در ضخامت‌های ثابت نیز چنین روندی را نشان می‌داد. جدول 3، پارامترهای ثابت مدل میدلی در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد که با استفاده از آن‌ها می‌توان مدل ریاضی پیش‌بینی‌کننده‌ی فرآیند خشک کردن مخصوص به هر دما و ضخامت را به دست آورد.

اکپینار¹ در سال 2006 نیز نشان داد که مدل میدلی بهترین پیش‌بینی از فرآیند خشک کردن محصولاتی از قبیل سیب زمینی، سیب و کدو تنبل در میان 13 مدل مختلف مورد بررسی ارائه می‌نمود (5). بررسی مطالعات انجام شده به منظور مدل‌سازی فرآیند خشک کردن محصولات مختلف، نشان داد که مدل دو جمله‌ای بهترین برآزش را از فرآیند خشک کردن لایه‌ی نازک گندم در دماهای 40 تا 60 درجه‌ی سانتی‌گراد داشت (14). در مدل‌سازی خشک کردن برش‌های هویج در دمای‌های 70-50 درجه‌ی سانتی‌گراد با شدت جریان هوای داغ 1-0/5 متر بر ثانیه، مشخص گردید که مدل پیچ برآزش بهتری از فرآیند خشک کردن، نسبت به مدل هندرسون و پاییس، ارائه می‌کرد (10).

داده‌های به دست آمده از کار آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از برآزش شرایط به وسیله‌ی مدل میدلی نیز مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در نمودارهای شکل 4 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل منتخب پیش‌بینی قابل قبولی ارائه نموده و از طرفی کار آزمایشگاهی با دقت بسیار بالایی انجام شده است که مقدار ضریب تبیین نمودارها دلیلی بر این مدعا می‌باشد.

در حالی که در مورد تغییرات دمای خشک کردن، دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به دمای 70 و پس از آن دمای 60°C، باعث رطوبت تعادلی نهایی کم‌تری در محصول گردید و این به دلیل تامین انرژی بیش‌تری برای تبخیر آب و یا به عبارت دیگر، افزایش فشار بخار آب از محصول، مربوط بود.

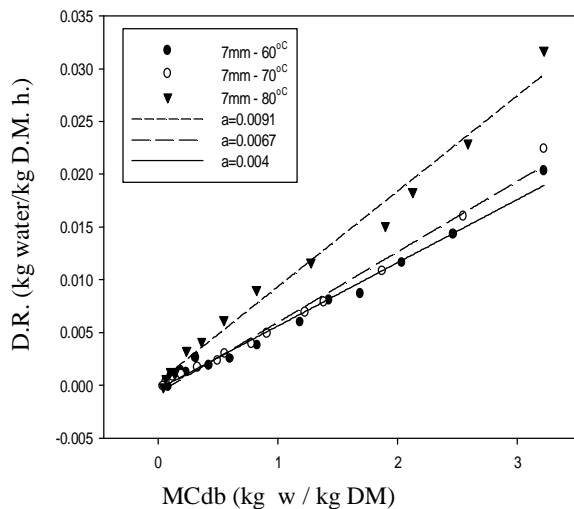


شکل 2- اثر توأم دما و ضخامت خشک کردن بر مقدار رطوبت

تعادلی بر مبنای خشک

نکته‌ی قابل توجه در مورد نمودارهای شکل 1، کاهش شیب نمودارها در رطوبت‌های حدودی کم‌تر از 15% در مبنای خشک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر ناچیزی در شیب نمودارها رخ داد که نشان از کند شدن فرآیند خشک شدن در رطوبت‌های کم‌تر از 15% است. یعنی با افزایش یک واحد ثابت از زمان، مقدار کم‌تری رطوبت از بافت محصول، جدا شده است. پس از بررسی نمودارهای خشک کردن می‌توان به مدل‌سازی فرآیند با استفاده از مدل‌های مختلف پرداخت. فرآیند مدل‌سازی به وسیله‌ی ده مدل ریاضی مختلف که به منظور بررسی سینتیک خشک کردن لایه‌ی نازک محصولات کاربرد دارد، انجام شد.

با محاسبه‌ی مقدار رطوبت نسبی برای تمامی تیمارهای مطالعه در طی فرآیند خشک کردن با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی 2 و سپس برآزش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای رطوبت نسبی - زمان به وسیله‌ی مدل‌های مذکور، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل باید دارای بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین (R^2) و حداقل مقادیر RMSE، MRPD و χ^2 می‌بود. نتایج، نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برآزش، مطابق با



شکل 5- تغییرات شیب منحنی خشک کردن

4- نتیجه‌گیری

در بررسی سینتیک خشک کردن برش‌های میوه‌ی کامکوات با ضخامت‌های 3، 5 و 7 میلی‌متر در دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد مشخص گردید که با افزایش دما و ضخامت، مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش یافت. در مدلسازی فرآیند خشک کردن که از ده مدل ریاضی مختلف استفاده شد، مدل میدلی با دارا بودن ضریب تبیین بسیار مناسب 99/925% و کم‌ترین مقادیر RMSE، MRPD و χ^2 بهترین برازش را از فرآیند خشک کردن برش‌های میوه‌ی کامکوات، نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی ارائه نمود. به طوری که مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده از مدل، مطابقت بالایی با یکدیگر داشتند.

5- منابع

- 1- بهروزی خزائی، ن.، امیری چایچیان، ر.، خوش تقاضا، م.ه. 1386. پشوهش کشاورزی، آب، خاک و گیاه در کشاورزی، بررسی شاخص‌های مهم خشک شدن انگور در روش خشک کردن با جریان هوای گرم به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، 7، 141:155.
- 2- عزیزی، م.م.، رحمتی، ت.، عبادی، م.، 1388. بررسی تاثیر روش‌های مختلف خشک کردن بر سرعت کاهش وزن، میزان اسانس و درصد کامازولن گیاه داروئی بابونه،

محاسبه‌ی مقدار ضریب نفوذ در مورد فرآیند انجام شده بر روی برش‌های میوه‌ی کامکوات، نشان داد که ضریب نفوذ موثر رطوبت از کم‌ترین مقدار $1/26 \times 10^{-9}$ تا بیش‌ترین مقدار یعنی $7/98 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در تغییر بود. ضریب نفوذ محصولات کشاورزی اکثراً بین 10^{-9} و 10^{-11} گزارش شده است (6). نتایج ارائه شده در جدول 4 برای مقادیر ضریب نفوذ موثر به دست آمده در این مطالعه با این موضوع مطابقت دارد.

بررسی نتایج، نشان داد که افزایش دما و ضخامت باعث افزایش ضریب نفوذ موثر رطوبت شده است. به طوری که بیش‌ترین ضریب نفوذ در دمای 80°C و ضخامت 7 میلی‌متر و کم‌ترین آن در دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد و ضخامت 3 میلی‌متر به دست آمد. این امر با افزایش فشار بخار آب همراه با افزایش دما، در مورد تغییرات دما و رابطه‌ی مستقیم تغییرات ضخامت و مقدار ضریب نفوذ با توجه به رابطه‌ی شماره‌ی 7، قابل تفسیر می‌باشد.

سایر محققان نیز ضریب نفوذ فرآیند خشک کردن محصولات مختلف در دماهای گوناگون را محاسبه و گزارش نموده‌اند. دویماز¹ گزارش نمود که ضریب نفوذ خشک کردن لایه‌ی نازک گندم از $9/355 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ - $0/776$ در تغییر بوده که مقدار آن با افزایش دما افزایش داشته است (10). ضریب نفوذ رطوبت در دماهای 55 - 85 درجه‌ی سانتی‌گراد در خشک کردن انجیر، $8/4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/13 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در متغیر بوده است (7).

آهنک خشک کردن برش‌هایی به ضخامت 7 میلی‌متر در دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد، در شکل 5، مورد مقایسه قرار گرفته است. این شکل، نشان می‌دهد که آهنک خشک کردن در دمای 80°C از شدت بیش‌تری برخوردار بوده است و پس از آن دمای 70°C قرار داشته است. آهنک خشک کردن در دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد پایین‌تر از دماهای 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است. نتایج مربوط به تغییرات آهنک خشک کردن با تغییرات مقدار ضریب نفوذ، دارای مشابهت بود. به عبارتی با افزایش دما، ضریب نفوذ بخار آب افزایش یافته و نتیجتاً باعث افزایش آهنک خشک کردن و در نهایت منجر به کاهش زمان فرآیند خشک شدن گردید.

- 15- Ozdemir M. B., Menlik, T. and Kirmaci, V. 2010. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network, *Expert Systems with Applications*, 9, 1:10.
- 16- Ramful, D., Tarnus, E., Aruoma, O. I., Bourdon, E. and Bahorun, T. 2011. Polyphenol composition, vitamin C content and antioxidant capacity of Mauritian citrus fruit pulps. *Food Research International*. 03.056.
- 17- Sun, D. W. and Woods, J. L. 1994, Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers, *Transactions of the ASAE*, 37, 1919:1926.
- 18- Zomorodian, A. and Moradi, M. 2010. Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for Cuminumcyminum. *J. Agr. Sci. Tech.* Vol. 12: 401-408.
- فصلنامه‌ی علمی پژوهشی تحقیقات گیاهان داروئی و معطر ایران، 25، 182:193.
- ۳- خوش تقاضا، م.ه.، صادقی م.، امیری چایچیان، ر. 1386، بررسی فرآیند خشک کردن شلتوک در شرایط بستر ثابت و سیال، مجله‌ی علوم کشاورزی و منابع طبیعی، 14، 1:11.
- ۴- 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.
- 5- Akpınar, E. K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73:75–84.
- 6- Babalis, S.J., and 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.
- 7- Babalis, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N. and 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.
- 8- Bains, R. and Langrish, T. A. G. 2008. An assessment of the mechanisms for diffusion in the drying of bananas, *Journal of Food Engineering*, 85, 201:215.
- 9- Barreca, D., Bellocco, E., Caristi, C., Leuzzi, U. and Gattuso, G. 2010. Kumquat (*Fortunella japonica* Swingle) juice: Flavonoid distribution and antioxidant properties. *Food Research International*. 11.031.
- 10- Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61:359–364.
- 11- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R. and Ilyas, S. M. 2007. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79:176–180.
- 12- Lin, C. C., Hung, P. F. & Hob, S. C. 2008. Heat treatment enhances the NO-suppressing and peroxynitrite-intercepting activities of kumquat (*Fortunella margarita* Swingle) peel. *Food Chemistry*, 109:95–103.
- 13- Ma'ruqez. C, A.DeMichelis, S.A. Giner, 2006, Drying kinetics of rose hip fruits (*Rosa eglanteria* L.). *Journal of Food Engineering*, 77, 566:575.
- 14- Mohapatra, D. and SrinivasaRao, P. 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66:513–518.