

مقاله کوتاه پژوهشی

## مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن پیاز به کمک خشک کن هوای داغ

صدیقه عباسی<sup>۱\*</sup> - سید محمود موسوی<sup>۲</sup> - محبت محبی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱/۲۸

### چکیده

هدف اصل این مقاله بدست آوردن و بررسی داده‌های آزمایشگاهی مربوط به خشک کردن پیاز به کمک خشک کن غیر مداوم کابینتی و مدلسازی این فرآیند است. برای انجام این کار تعدادی مدل تجربی و رگرسیونی جهت برازش داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده اند. از بررسی داده‌های آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که خشک کردن پیاز فقط در ناحیه شدت نزولی اتفاق می‌افتد. این داده‌ها با ۱۲ مدل تجربی و ۷۴ مدل رگرسیونی متفاوت برازش شدند که از بین این مدل‌ها، مدل تجربی میدیلی کوک برای آزمایشات انجام شده در دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. همچنین در میان مدل‌های رگرسیونی، مدل چند جمله‌ای درجه ۱۰ برای تمام آزمایشات به عنوان بهترین مدل انتخاب شده است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که در همه آزمایشات بهترین مدل چند جمله‌ای اندکی بهتر از بهترین مدل تجربی است.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، پیاز، مدلسازی، رطوبت

### مقدمه

با بکارگیری روش‌های صنعتی خشک کردن، نه تنها کیفیت مواد غذایی به نحوه مطلوبی حفظ می‌شود بلکه زمان تولید نیز به میزان چشمگیری کاهش خواهد یافت (۱۶).

پیاز با تولید سالانه ۴۷ میلیون تن در سال رتبه سوم را در بین سبزیجات در سطح جهانی دارا است. در زمان‌های قدیم پیاز به عنوان یک چاشنی برای مصارف غذایی و دارویی به وفور مورد استفاده قرار می‌گرفته است. در زمانهای اخیر نیز به عنوان یکی از سبزیجات خام در تهیه غذاها به عنوان یک ترکیب، در تهیه چیپسها به عنوان یک چاشنی و همچنین در تولید غذاهای کنسرو شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیاز خشک شده به عنوان یک محصول مهم و مورد توجه در سطح جهانی به فرم‌های گوناگون شامل پودری، ورقه‌ای، خرد شده وجود دارد. پیاز خشک شده را می‌توان به عنوان یک افزودنی معطر در غذاهای گوناگونی شامل سوپ، سس، سالاد، دسر و گوشت خرد شده استفاده کرد (۷، ۱۲ و ۱۳).

خشک کن هوای داغ برای خشک کردن مواد غذایی به طور گسترده در سطح تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این خشک کن دمای عملیاتی تأثیر عمده‌ای بر روی کیفیت محصول خشک شده می‌گذارد (۲، ۳ و ۱۰).

در طراحی یک خشک کن توجه به تعدادی از موارد از جمله نوع

طبق آمار ارائه شده میزان ضایعات فرآورده‌های کشاورزی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد برآورد شده است که بخشی از آن به دلیل کمبود صنایع تبدیلی می‌باشد. یکی از مهمترین روش‌های نگهداری مواد غذایی فرآیند خشک کردن یا آبزدایی است. خشک کردن ضمن اینکه بر روی محصول اثر حفاظتی دارد، وزن و حجم آن را به میزان چشمگیری کاهش داده و در نتیجه از هزینه‌های حمل و نقل و ذخیره سازی محصول می‌کاهد.

هنوز خشک کردن برخی مواد چون پسته، انگور، زرشک، زعفران و بسیاری از محصولات دیگر با روشهای سنتی و قدیمی متداول است. مشکل روش‌های سنتی، طولانی بودن زمان خشک کردن، امکان آلودگی میکروبی مواد غذایی در حین خشک کردن به علت دارا بودن رطوبت، کیفیت نه چندان مطلوب فرآورده نهایی و ... است که

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی گرایش صنایع غذایی، گروه مهندسی

شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد

(\*)- نویسنده مسئول (Email: abasi\_1362@yahoo.com)

۲ و ۳- به ترتیب دانشیار گروه مهندسی شیمی و استادیار گروه علوم و صنایع

غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

مدل‌های تجربی و رگرسیونی در دماهای خشک کردن مختلف می باشد.

## مواد و روش‌ها

### مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن

بیشترین مدل‌های تجربی که برای خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل ۱۲ مدل است (جدول ۱) که در این مدل‌ها منحنی‌های خشک کردن از رسم تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک کردن حاصل می‌شود. جهت برازش داده‌های آزمایشگاهی از نرم افزار DataFit 9 استفاده شده است. پارامتر بدون بعد نسبت رطوبت ( $MR$ ) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

که  $X_0$  رطوبت اولیه (گرم ماده خشک / گرم آب)،  $X_e$  رطوبت تعادلی (گرم ماده خشک / گرم آب)،  $X_t$  رطوبت در لحظه  $t$  (گرم ماده خشک / گرم آب) و  $t$  زمان خشک کردن (دقیقه) می باشد.

آزمایشات: برای کلیه آزمایش‌ها از پیاز سفید ۵ ماهه (پیازی که ۵ ماه از تاریخ برداشت آن گذشته باشد)، با قطر متوسط ۲۰ سانتیمتر استفاده شده است. برای آنکه شرایط نگهداری برای تمام نمونه‌ها قبل از خشک شدن یکسان باشد تمام پیازها به مدت ۲ روز قبل از آزمایش داخل سردخانه با دمای  $4^{\circ}C$  و رطوبت نسبی ۱۷٪ قرار داده می‌شوند. برای شروع آزمایش ابتدا مقدار پیاز لازم را از سردخانه خارج کرده و به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه نگه داشته تا با دمای محیط به تعادل برسد. در این مرحله ۳ لایه اول پیاز گرفته شده و باقیمانده پیاز را لایه لایه کرده و با قالب به قطعات دایره شکل به قطر ۳ سانتیمتر و ضخامت ۳ میلی‌متر برش داده می‌شود. در طی فرآیند خشک کردن سرعت هوای ورودی، ضخامت و قطر قطعات پیاز ثابت است.

جهت خشک کردن نمونه‌ها از خشک کن غیر مداوم کابینتی مجهز به ۳ سینی مشبک استفاده شده است در این دستگاه سرعت هوا ثابت و برابر  $1.5 m/s$  می‌باشد. شرایط دمایی در این خشک کن متغیر است و می‌توان با ترموکوپل تعبیه شده داخل دستگاه، دمای عملیاتی را تنظیم کرد (شکل ۱).

ابتدا دمای خشک کن را در دمای مورد نظر تنظیم کرده و پس از آنکه دمای خشک کن به دمای مورد نظر رسید به مدت ۳۰ دقیقه منتظر مانده تا حالت تعادل برقرار شود. سپس نمونه‌های برش داده شده را داخل خشک کن قرار می‌دهیم. داده‌های آزمایشگاهی در شرایط عملیاتی مختلف (دما در رنج ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد با فاصله ۱۰ درجه و زمان در بازه ۶ ساعتی با فواصل ۳۰ دقیقه) بدست آمده است.

خشک کن، انرژی مورد نیاز و هزینه‌های آن نقش اساسی دارد (۱۵). همچنین در طراحی و کارکردن با خشک کن‌ها، مدل‌های شبیه سازی مناسب مورد نیاز است. محققین تعدادی از مدل‌های شبیه سازی را برای سیستم‌های خشک کن با جابه‌جایی اجباری و طبیعی بیان کرده‌اند (۵ و ۱۷).

در واقع هدف از فرآیند مدلسازی، انتخاب مدل‌های مناسب قابل استفاده در حیطه کاری مورد نظر و برازش داده‌های آزمایشگاهی با این مدل‌ها می‌باشد به طوری که بتوان از بین این مدل‌ها، بهترین مدل را که داده‌های آزمایشگاهی را برازش می‌کند بدست آورد. بنابراین با انتخاب بهترین مدلی که سینتیک خشک کردن را توصیف کند، می‌توان روند تغییرات ماده غذایی را طی فرآیند خشک کردن مورد بررسی قرار داد و خشک کن‌های صنعتی مناسب را با توجه به نوع ماده غذایی طراحی کرد.

در تحقیقات انجام گرفته در این زمینه مدل‌های تجربی و نیمه تجربی متعددی برای توصیف سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی ارائه شده است (۹ و ۱۶). روابط تجربی آرنیوس و مدل توان نیز برای سینتیک خشک کردن پیاز بررسی شده است (۸). همچنین مدل تئوری نفوذ برای توصیف سینتیک خشک کردن بسیاری از محصولات کشاورزی مورد بررسی قرار گرفته است (۶).

در تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن لایه نازک پیاز به کمک خشک کن اشعه تابشی تأثیر شرایط عملیاتی مختلف از جمله شدت تابش، دمای خشک کردن و سرعت هوای ورودی به خشک کن بر روی سینتیک خشک کردن و همچنین برازش داده‌های آزمایشگاهی به کمک مدل‌های تجربی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (۱۲). با توجه به کاهش کیفیت پیاز خشک شده در خشک کن تابشی در مطالعه دیگری فرآیند خشک کردن پیاز در خشک کن تابشی همراه با هوای داغ مورد بررسی قرار گرفت در این مطالعه تأثیر دمای خشک کردن، ضخامت قطعات پیاز، سرعت هوای ورودی بر روی سینتیک خشک کردن مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های آزمایشگاهی با معادلات تجربی صفحه ای، صفحه ای اصلاح شده، فیک و مدل لگاریتمی برازش شده و بهترین مدلی را که داده‌های آزمایشگاهی را برازش می‌کند معرفی می‌کنند (۱۴). تحقیقات متعددی در زمینه مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن لایه نازک انواع فلفل از جمله فلفل تند (۱۸)، فلفل شیرین (۱۹)، فلفل سبز (۲۰) و فلفل قرمز (1) انجام شده است. در مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن لایه نازک فلفل سبز در خشک کن خورشیدی با جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری، ۱۳ مدل تجربی مختلف مورد بررسی گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که بهترین مدل انتخاب شده برای برازش داده‌ها در حالت جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری متفاوت است. هدف از این پژوهش مطالعه سینتیک خشک کردن پیاز و مدلسازی فرآیند با



شکل ۱- خشک کن هوای داغ

جدول ۱- مدل های تجربی بکار برده شده برای مدلسازی سینتیک خشک کردن

نام مدل	مدل	شماره معادله
Newton	$MR = \exp(-kt)$	۵
Page	$MR = (-kt^n)$	۶
Modified page 2	$MR = \exp(-(kt)^n)$	۷
Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt)$	۸
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	۹
Two term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	۱۰
Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	۱۱
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	۱۲
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	۱۳
Modified Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	۱۴
Verma et al	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	۱۵
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	۱۶

خطا (SSE) استفاده گردیده است. به طوری که هر چه  $R^2$  به یک نزدیکتر و مجموع مربعات خطا کوچکتر باشد مدل برازش بهتری بر داده های آزمایشگاهی دارد و به عنوان بهترین مدل انتخاب می شود.

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

بطوریکه در یک دمای مشخص در فواصل زمانی هر ۳۰ دقیقه یکی از نمونه را از خشک کن خارج کرده و میزان رطوبت را به کمک اون بدست می آوریم و سپس از معادله (۱) نسبت رطوبت را محاسبه می کنیم. با تعیین نسبت رطوبت در زمان های مختلف خشک کردن میتوان این داده ها را با ۱۲ مدل تجربی مختلف مطابق جدول ۱ و ۷۴ مدل رگرسیونی متفاوت برازش کرد.

**آنالیز آماری:** برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل های موجود از پارامترهای آماری مربع ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و مجموع مربعات

از بررسی داده‌های آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که خشک کردن پیاز فقط در ناحیه شدت نزولی اتفاق می‌افتد (شکل ۳).

تأثیر دما بر فرایند خشک کردن پیاز در دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ °C مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های تجربی و رگرسیونی برازش شده‌اند. با توجه به پارامترهای آماری  $R^2$  و  $SSE$  مشاهده می‌شود که در تمام دماهای آزمایش شده از بین مدل‌های تجربی، مدل میدیلی کوک به عنوان بهترین مدل با  $R^2 > 0.98$  و  $SSE < 0.03$ ، داده‌های آزمایشگاهی را برازش کرده است. ضرایب مدل میدیلی کوک و پارامترهای آماری در دماهای مختلف در جدول ۲ آورده شده است. در تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی فرایند خشک کردن لایه نازک پیاز به کمک خشک کن اشعه تابشی همراه با هوای داغ مدل صفحه ای اصلاح شده به عنوان بهترین مدل برای برازش داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده است (۱۴). همچنین در تحقیقات صورت گرفته در زمینه مدلسازی ریاضی فرایند خشک کردن لایه نازک فلفل سبز در خشک کن خورشیدی با جابجایی طبیعی و اجباری با توجه به نتایج ارائه شده از بین مدل‌های تجربی، برای حالت جا به جایی اجباری، مدل لگاریتمی و در حالت جابه‌جایی طبیعی، مدل میدیلی کوک به عنوان بهترین مدل گزارش شده است (۲۰).

نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های رگرسیونی مختلف نشان می‌دهد که مدل چند جمله‌ای درجه ۱۰ که با رابطه زیر بیان می‌شود برازش بهتری بر داده‌ها دارد.

$$SSE = \sum (MR_{pre} - MR_{exp})^2 \quad (3)$$

که  $MR_{exp}$  نسبت رطوبت آزمایشی و  $MR_{pre}$  نسبت رطوبت پیش بینی شده توسط مدل می‌باشند.

## نتایج و بحث

تغییرات محتوای رطوبت با زمان و شدت خشک کردن با محتوای رطوبت در دماهای مختلف به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که در ابتدای فرایند خشک کردن محتوای رطوبت به سرعت کاهش می‌یابد، ولی در مراحل بعدی کاهش محتوای رطوبت به آهستگی صورت می‌گیرد. همچنین زمان مورد نیاز برای کاهش یک مقدار معین در محتوای رطوبت، وابسته به شرایط عملیاتی است بطوریکه در دمای ۹۰ °C زمان مورد نیاز کمتر و در دمای ۶۰ °C زمان بیشتری مورد نیاز است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که شدت خشک کردن در ابتدای فرایند بیشتر از مراحل انتهایی است که این امر به دلیل زیاد بودن محتوای رطوبت در ابتدای فرایند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح قطعات پیاز است. همچنین چروکیدگی سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول شده که این امر باعث کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی خشک کردن می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای خشک کردن شدت خشک کردن نیز زیاد می‌شود. این نتایج در مطالعات انجام شده نیز گزارش شده است (۱۱۴).

جدول ۲- ضرایب و پارامترهای آماری برای بهترین مدل تجربی (میدیلی کوک) در دماهای مختلف خشک کردن

دمای خشک کردن °C	$R^2$	$SSE$
60	0.999	4.513E-05
70	0.996	0.003
80	0.999	8.916E-05
90	0.999	0.0002

جدول ۳- مقادیر پارامترهای آماری برای بهترین مدل رگرسیونی (چند جمله‌ای درجه ۱۰) در دماهای مختلف

دمای خشک کردن °C	ضرایب مدل میدیلی کوک				$R^2$	$SSE$
	$a$	$b$	$k$	$n$		
60	1.0156	7.456E-4	3.167E-5	1.399	0.989	0.012
70	1.002	6.399E-4	7.667E-5	1.878	0.995	0.002
80	1.016	6.314E-4	8.050E-5	1.954	0.982	0.021
90	1.014	5.458E-4	1.227E-4	1.922	0.991	0.010

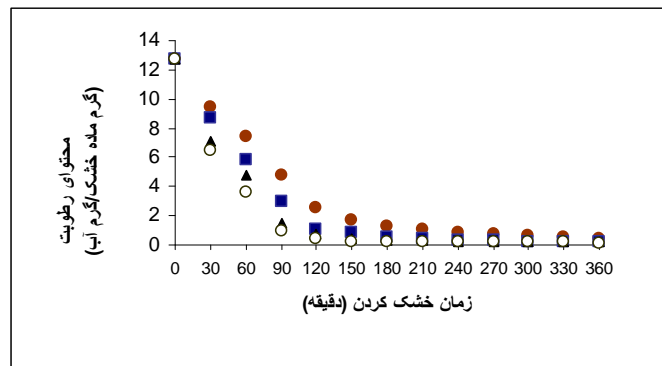
$$MR = at^{10} + bt^9 + ct^8 + dt^7 + et^6 + ft^5 + gt^4 + ht^3 + it^2 + jt + k \quad (4)$$

### قدردانی

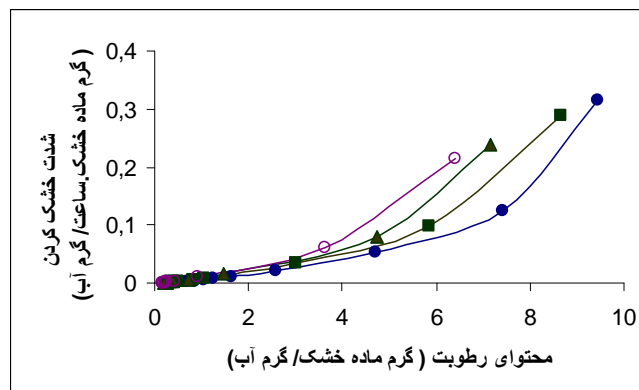
از مسئولین آزمایشگاه های تکمیلی و تجزیه مواد غذایی گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی، به خاطر همکاری تجهیزاتی در این کار تشکر و قدردانی می گردد.

که  $t$  زمان خشک کردن می باشد.

پارامتر های آماری حاصل از برازش داده های آزمایشگاهی با مدل چند جمله ای درجه ۱۰ در جدول ۳ مشاهده می شود. در مقایسه بین مدل های تجربی و رگرسیونی نیز با توجه به مقادیر  $R^2$  و  $SSE$  مشاهده می شود که مدل چند جمله ای درجه ۱۰ اندکی بهتر از مدل های تجربی، داده های آزمایشگاهی را برازش می کنند.



شکل ۲- تغییرات محتوای رطوبت با زمان خشک کردن در دماهای مختلف  
●, 60°C ; ■, 70°C ; ▲, 80°C ; ◊, 90°C



شکل ۳- تغییرات شدت خشک کردن با محتوای رطوبت در دماهای مختلف  
●, 60°C ; ■, 70°C ; ▲, 80°C ; ◊, 90°C

### منابع

- 1- Akpınar E. K., Bicer Y., and Yıldız C. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering, 59: 99–104.
- 2- Bondaruk, J., Blaszcak W. and Markowski M. 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. Journal of Food Engineering, 81: 306–312.
- 3- Bouraout, M., Richard P. and Durance T. 1994. Microwave and convective drying of potato slices. Journal of Food Process Engineering, 17: 353–363.
- 4- Doymaz I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 61: 359–364.
- 5- Exell R. H. B. 1980. Basic Design theory for simple solar rice dryer. Renewable Energy Review, 1: 101–110.

- 6- Henderson S. M., and Pabis S. 1961. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agriculture Engineering Research, 6: 169–174.
- 7- Kaymak-Ertekin, F., and A, Gedik. 2005. Kinetic modelling of quality deterioration in onions during drying and storage. Journal of Food Engineering, 68: 443–453.
- 8- Kiranoudis, C. T., Z. B, Maroulis. and M. D, Kouris. 1992. Drying kinetics of onion and green pepper. Drying Technology, 10: 995–1011.
- 9- Li, Y., Cao C. W. and Liu D. Y. 1997. Simulation of recirculating circular grain dryer with temperature stage. Drying Technology, 15: 201–214.
- 10- Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. Journal of Food Engineering, 48: 169–175.
- 11- Mwithiga, G., and Olwal J. O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. Journal of Food Engineering, 71: 373–378.
- 12- Pathare, P. B., Sharma G. P. and Verma R. C. 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 67: 361–366.
- 13- Pathare, P. B., Sharma G. P. and Verma R. C. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 71: 282–286.
- 14- Praveen Kumar, D. G., Umesh Hebbar H. and Ramesh M. N. 2006. Suitability of thin layer models for infrared–hot air-drying of onion slices. LWT, 39: 700–705.
- 15- Sinicio, R., and Muir W. 1996. Comparison of mathematical models to simulate aeration of wheat stored in Brazil. Journal of Agricultural Engineering Research, 64: 119–130.
- 16- Steinfeld, A., and Segal I. 1986. A simulation model for solar thin layer drying process. Drying Technology, 4: 535–542.
- 17- Tiris, C., Ozbalta N., Tiris M. and Dincer I. 1994. Experimental Testing of a new solar dryer. International Journal of Energy Research, 18: 483–490.
- 18- Tunde-Akintunde, T. Y., Afolabi T. J. and Akintunde B. O. 2005. Influence of drying methods on drying of bell-pepper (*Capsicum annum*). Journal of Food Engineering, 68:439–42.
- 19- Vengaiah, P. C., and J. P, Pandey. 2007. Dehydration kinetics of sweet pepper (*Capsicum annum* L). Journal of Food Engineering, 81: 282–6.
- 20- Yaldiz, O., and Ertekin C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. Drying Technology, 19: 583–96.