

## یادداشت تحقیقاتی

### بررسی تغییرات و مدل سازی ریاضی چروکیدگی سیر (*Allium sativum* L.) در طی خشک کردن به صورت همرفتی

مجید رسولی<sup>۱\*</sup> - صادق سیدلو<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۸

#### چکیده

سیر یکی از مهم‌ترین گونه‌های پیاز می‌باشد. سیر خشک شده از نظر اقتصادی دارای اهمیت زیادی است. در این تحقیق، لایه‌های نازک سیر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در خشک‌کن هوای داغ آزمایشگاهی با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه خشک شدند. متوسط چروکیدگی ورقه‌های سیر، ۶۹/۸ درصد به دست آمد. منحنی‌های تغییرات چروکیدگی حجمی ورقه‌های سیر براساس داده‌های بدست آمده از آزمایش، برازش شد. نتایج بررسی تغییرات درصد چروکیدگی طی خشک‌شدن 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. با بررسی ۴ مدل تجربی مختلف و با محاسبه ضرایب همبستگی ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، در محیط نرم‌افزار متلب، مناسبترین مدل توصیف‌کننده تغییرات چروکیدگی ورقه‌های نازک سیر انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن سیر، چروکیدگی، مدل ریاضی

#### مقدمه

در طول خشک کردن، چروکیدگی وابسته به ساختار بافت و مقدار رطوبت ماده غذایی است (Sjoholm and Gekas, 1995; Wang and Brennan, 1995). از دست دادن آب و گرم شدن باعث ایجاد تنش در ساختار سلولی مواد غذایی می‌گردد که نتیجه این حالت تغییر شکل و کاهش ابعاد آن است. در طی خشک کردن مواد غذایی، چروکیدگی به طور مداوم اتفاق می‌افتد و خصوصیات فیزیکی ماده و خصوصیات ترموفیزیکی از جمله پدیده‌های انتقال جرم و گرما را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین چروکیدگی هم روی بافت و هم روی کیفیت محصول تاثیرگذار است (Mayor and Sereno, 2004; Schultz et al., 2007).

تغییرات شکل و کاهش حجم در اکثر موارد یک ویژگی منفی از نظر مصرف‌کننده محسوب می‌شود. چروکیدگی غیریکنواخت باعث ایجاد ترک‌های سطحی در محصول، طی فرآیند خشک کردن می‌شود که منجر به ایجاد فشارهای نامتعادل و شکست مواد می‌شود. از نتایج دیگر پدیده چروکیدگی، کاهش قابلیت آگیری مجدد محصول خشک است (Mayor and Sereno, 2004).

سیر "*Allium sativum* L." گیاهی است علفی تک لپه از خانواده لیلیاسه<sup>۲</sup> با نام انگلیسی Garlic که از مصارف فراوان غذایی و دارویی برخوردار می‌باشد (Dyer, 2004). در طی فرآیند خشک شدن، تغییرات فیزیکی و مکانیکی عمده‌ای بر روی محصول اتفاق می‌افتد که موجب تغییر خصوصیات کیفی مذکور و نیز کیفیت محصول نهایی خشک شده نسبت به محصول تازه اولیه می‌گردد (Koc et al., 2008; Mayor and Sereno, 2004; Talla et al., 2004).

یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی در ساختار بافت گیاهی در طول خشک کردن، چروکیدگی است که از همان مراحل اولیه فرآیند خشک کردن شروع می‌شود (Witrowa-Rajchert and Turek, 2004).

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تبریز

(Email m.rasouli@tabrizu.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

3- Liliaceae

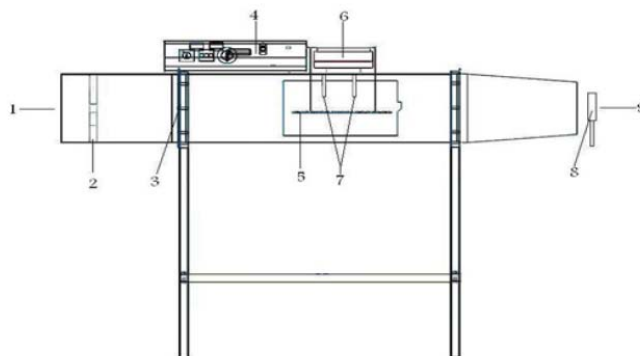
## مواد و روش‌ها

### تهیه و نگهداری مواد اولیه

سیر سفید مورد نیاز از مزرعه‌ای واقع در آذرشهر (یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی) تهیه گردید و تا زمان استفاده، در یخچال و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. حدود ۲ تا ۳ ساعت قبل از انجام فرآیند خشک کردن، نمونه‌های سیر از یخچال خارج می‌شد تا به دمای محیط برسند.

### تجهیزات خشک کردن

برای انجام آزمایش‌ها، از یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی به صورت سینی‌دار یا قفسه‌ای موجود در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تبریز، استفاده شد که طرحواره آن در زیر آورده شده است. این خشک‌کن شامل چهار قسمت اصلی بود که عبارتند از: محفظه ورودی شامل دمنده و گرم‌کن الکتریکی، محفظه میانی شامل خطی‌سازهای جریان هوا و قفسه‌های خشک‌کن، محفظه خروجی هوا و نهایتاً تابلو فرمان دستگاه. خشک‌کن آزمایشگاهی مورد استفاده به یک واحد سامانه داده برداری به همراه یک واحد کنترل مجهز بود. اندازه‌گیری و کنترل دمای هوای داخل خشک‌کن، اندازه‌گیری درصد رطوبت نسبی هوا، کنترل سرعت جریان هوای گرم و نیز اندازه‌گیری و کنترل حداکثر دمای کاری خشک‌کن برای ملاحظات ایمنی و نهایتاً کنترل مدت زمان کل اجرای عملیات خشک‌کنی توسط تابلو و مدار فرمان مربوط صورت گرفت.



شکل ۱- طرحواره خشک‌کن همرفتی: (۱) ورودی هوا؛ (۲) فن؛ (۳) گرم‌کن؛ (۴) کنترل‌کننده دما و سرعت هوا؛ (۵) سینی سوراخ‌دار؛ (۶) ترازوی دیجیتال؛ (۷) سنسور رطوبت؛ (۸) سرعت سنج دیجیتال هوا؛ (۹) خروجی هوا

Fig.1: Schematic diagram of the convectional drying equipment (1) Air inlet; (2) Fan; (3) Heaters; (4) Temperature and air flow velocity controlling; (5) Perforated tray; (6) Digital balance; (7) Relative humidity sensor and thermocouple to data logger; (8) Digital anemometer; (9) Air outlet.

همچنین مقدار چروکیدگی وابسته به روش خشک‌کردن و پارامترهای فرآیند مانند دما و سرعت خشک‌کردن است. اندازه چروکیدگی بر میزان تخلخل ماده خشک که یک پارامتر مهم در انتقال جرم، خواص مکانیکی و بافت ماده می‌باشد، تاثیرگذار است. مایور و سرنو، مدل‌های ریاضی مختلفی را که برای توصیف پدیده چروکیدگی بکار رفته‌اند بررسی کرده و میزان انطباق داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل را با نتایج تجربی حاصل از خشک‌کردن سیب، هویج و سیب زمینی مقایسه نمودند (Mayor and Sereno, 2004).

رتی، داده‌های تجربی چروکیدگی را به عنوان تابعی از مقدار آب، برای قطعات استوانه‌ای و ورقه‌ای شکل سبب‌زمینی، سیب و هویج و تحت شرایط مختلف خشک‌کردن (هوا با ۵ تا ۵۰ درصد رطوبت نسبی و دماهای ۶۰°C، ۵۰°C، ۴۰°C و جریان هوای ۱ تا ۵ متر بر ثانیه) بدست آورده است. نتایج او نشان می‌دهد که میزان چروکیدگی عمدتاً توسط سرعت هوا تحت تاثیر قرار می‌گیرد در حالیکه تاثیر دیگر متغیرهای خشک‌کردن قابل چشم‌پوشی است (Ratti, 1994). تلا، یک مدل ریاضی برای چروکیدگی موز در دماهای مختلف خشک‌کردن به دست آوردند که بین داده‌های تجربی و محاسبه شده همبستگی بالایی وجود داشت (Talla et al., 2004). پاییس و جاروس، روشی برای تعیین مدل بیان‌کننده رابطه بین تغییرات غیرخطی میزان آب و چروکیدگی مواد، طی خشک‌کردن به دست آوردند و مدل‌هایی نیز برای برش‌های سبزیجاتی مانند هویج به دست آوردند (Pabis and Jaros, 2002).

هدف از این تحقیق بررسی تغییرات چروکیدگی و تعیین مدل ریاضی مناسب برای پیش‌بینی چروکیدگی سیر و در نتیجه تعیین بهترین شرایط خشک‌کردن سیر به صورت همرفتی می‌باشد.

(Mohsenin, 1986). از روابط (۱) و (۲) برای محاسبه جرم و حجم تولوئن جایجا شده و به تبع آن محاسبه حجم و دانسیته نمونه‌ها استفاده شد.

$$V = \frac{M}{\rho_{to}} = \frac{(m + m') - m''}{\rho_{to}} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

$V$ : حجم تولوئن جایجا شده = حجم نمونه ها ( $m^3$ )

$m', m$ : به ترتیب جرم پیکنومتر حاوی تولوئن و جرم نمونه‌ها (kg)

$m''$ : جرم پیکنومتر حاوی تولوئن و نمونه‌ها (kg)

$M$ : جرم تولوئن جایجا شده (kg)

$\rho_{to}$ : دانسیته تولوئن ( $kg.m^{-3}$ )

$\rho$ : دانسیته ظاهری نمونه‌های سیر ( $kg.m^{-3}$ )

مقدار چروکیدگی حجمی نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

$V_t$ : حجم نمونه خشک شده در زمان مورد نظر

$V_0$ : حجم اولیه همان نمونه (قبل از خشک کردن)

$Sh$ : درصد چروکیدگی

### تعیین بهترین مدل ریاضی برای توصیف چروکیدگی

در این مطالعه، تعدادی از مدل‌های ریاضی برای توصیف تغییرات چروکیدگی ورقه‌های سیر مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). منحنی‌های چروکیدگی بدست آمده برای سیر در شرایط مختلف خشک کردن، روی ۴ مدل از مدل‌های مذکور منطبق شده و ضرایب مدل‌ها برآورد شدند. برآورد ضرایب مدل‌ها در محیط نرم افزار متلب<sup>۱</sup> و به کمک ابزار برازش منحنی<sup>۲</sup> صورت گرفت.

برای انتخاب مناسب ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن لایه نازک ورقه‌های سیر، معیارهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و مجموع مربعات خطا ( $SSE$ ) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. بهترین مدل با بالاترین مقدار  $R^2$  و پایین ترین مقادیر  $RMSE$  و  $SSE$  انتخاب شد. مقادیر  $RMSE$  از رابطه (۴) محاسبه گردید:

### اندازه‌گیری میزان رطوبت

اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌های سیر بر اساس استاندارد AOAC انجام شد (AOAC, 1990). در این روش محصول قبل و پس از انجام هر آزمایش خشک‌کنی، در آون با دمای  $102 \pm 1^\circ C$  قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت آنها محاسبه گردید. آزمایش‌ها در ۳ تکرار انجام شدند.

### خشک کردن نمونه‌ها

حدود یک ساعت قبل از شروع فرآیند خشک کردن، دستگاه خشک‌کن روشن شد و بر اساس مشخصه‌های هر آزمایش، دمای هوای داخل خشک‌کن روی اعداد مورد نظر تنظیم گردید تا اینکه دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. سرعت هوای داخل خشک‌کن روی عدد ۱/۵ متر بر ثانیه تنظیم شد. نمونه‌ها روی سه عدد سینی توری چیده شدند. دو تا از سینی‌ها در داخل خشک‌کن روی قفسه‌ای که به طور مستقیم به ترازو متصل شده بود، قرار داده شد. سینی سوم روی قفسه‌ای به فاصله ۱۰ سانتی متر از کف خشک‌کن قرار داشت که این قفسه به ترازو متصل نبود. خشک‌کردن نمونه‌ها با ضخامت‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به محتوی رطوبت ۹ درصد (بر پایه خشک) انجام شد. جریان هوای گرم به طور موازی با سطح نمونه‌ها دمیده می‌شد. وزن نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه ترازوی دیجیتال با مارک AND (مدل GF 3000، ژاپن) که با یک اتصال RS۲۳۲ به یک واحد کامپیوتر متصل بود، در فواصل زمانی ۱۲۰ ثانیه‌ای و با دقت  $\pm 0.1$  گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. همچنین درصد رطوبت نسبی و سرعت هوای داخل خشک‌کن در هر پنج دقیقه، اندازه‌گیری و ثبت شد.

### طرح‌های آماری آزمایش‌ها و روش آنالیز نتایج

در این تحقیق، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به صورت آزمون فاکتوریل و ودر قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام شد و از آزمون چند دامنه‌ای دانکن نیز برای مقایسه میانگین‌ها استفاده گردید.

### اندازه‌گیری چروکیدگی

برای محاسبه مقدار چروکیدگی و دانسیته ظاهری نمونه‌ها، حجم ورقه‌ها در طی خشک کردن و در رطوبت‌های مختلف آن اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی ۱۵ نمونه سیر به صورت تصادفی از داخل خشک‌کن از روی سینی پایینی بیرون آورده شدند و حجم آنها اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جایجایی تولوئن و یک واحد پیکنومتر صورت گرفت

1- Matlab

2- Curve Fitting Tool

3- Coefficient of Determination

جدول ۱- مدل‌های تجربی غیرخطی مورد استفاده در تعیین تغییرات چروکیدگی مواد غذایی  
Table 1. Non-linear empirical models for describe shrinkage of food materials

شماره مدل No. Model	مدل ریاضی Mathematical equation	مرجع Reference
(1)	$Sh = k_1 + k_2x / x_0 + k_3(x / x_0)^2$	Mayor and Sereno(2004)
(2)	$Sh = k_4 + k_5x + k_6x^2 + k_7x^3$	Ratti(1994)
(3)	$Sh = k_8 + k_9\left(\frac{x}{1+x}\right) + \exp\left(k_{10}\frac{x}{1+x}\right)$	Mulet et al.(1997)
(4)	$Sh = k_{11} + k_{12}x + k_{13}x^{3/2} + k_{14}\exp(k_{15}x)$	Vazquez et al.(1999)

رطوبت‌های مختلف نداشته است. به عبارت دیگر درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر تابعی از شرایط خشک‌کنی و ضخامت نمونه‌ها نبوده است.

تجزیه واریانس تاثیر دمای هوا، ضخامت نمونه‌ها و نیز مقدار رطوبت نمونه‌های سیر روی مقدار درصد چروکیدگی در طی فرآیند خشک کردن در جدول (۲) آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که اثر دما و ضخامت نمونه‌ها روی چروکیدگی معنی‌دار نمی‌باشد. غیر معنی‌دار بودن اثر دما روی درصد چروکیدگی نمونه‌ها به این دلیل است که تفاوتی بین دماهای مورد استفاده در آزمایش‌ها، روی تشکیل لایه بیرونی صلب وجود ندارد، چرا که این دماها در محدوده انتقال شیشه‌ای نمی‌باشند. (Talla et al., 2004)، در خشک کردن موز و نیز (Ratti, 1994)، در خشک کردن سیب زمینی و هویج به نتایج مشابهی رسیدند و نشان دادند که دمای هوا تاثیر معنی‌داری روی مقدار چروکیدگی این محصولات در فرآیند خشک کردن ندارد. ولی اثر مقدار رطوبت محصول در هر دما و ضخامت بخصوص نمونه‌ها، روی مقدار چروکیدگی محصول در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. دلیل اصلی آن کاهش حجم نمونه‌ها متناسب با مقدار آب بخار شده از محصول می‌باشد و به دلیل بالا بودن تفاوت حجم رطوبت کاهش یافته در ابتدا و انتهای فرآیند، کاهش حجم و چروکیدگی مربوطه نیز متفاوت و معنی‌دار می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار چروکیدگی محصول تابع مقدار کاهش رطوبت آن است. متوسط چروکیدگی نهایی در دماها و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها و در رطوبت نهایی ۰/۰۹ (خشک پایه)، به مقدار ۶۹/۸ درصد بدست آمد.

#### مدل سازی چروکیدگی ورقه‌های سیر

داده‌های تجربی مربوط به چروکیدگی، روی ۴ مدل تجربی مورد مطالعه (جدول ۱) منطبق شدند. سپس مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل با نتایج تجربی بدست آمده، با استفاده از معیارهای آماری از قبیل ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجموع مربعات خطا (SSE) و

$$RSME = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Sh_{exp,i} - Sh_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$Sh_{exp,i}$ : نسبت رطوبت تجربی

$Sh_{pre,i}$ : نسبت رطوبت پیش‌بینی شده با مدل

$N$ : تعداد مشاهده‌ها

#### نتایج و بحث

##### بررسی چروکیدگی نمونه‌های سیر طی زمان خشک شدن

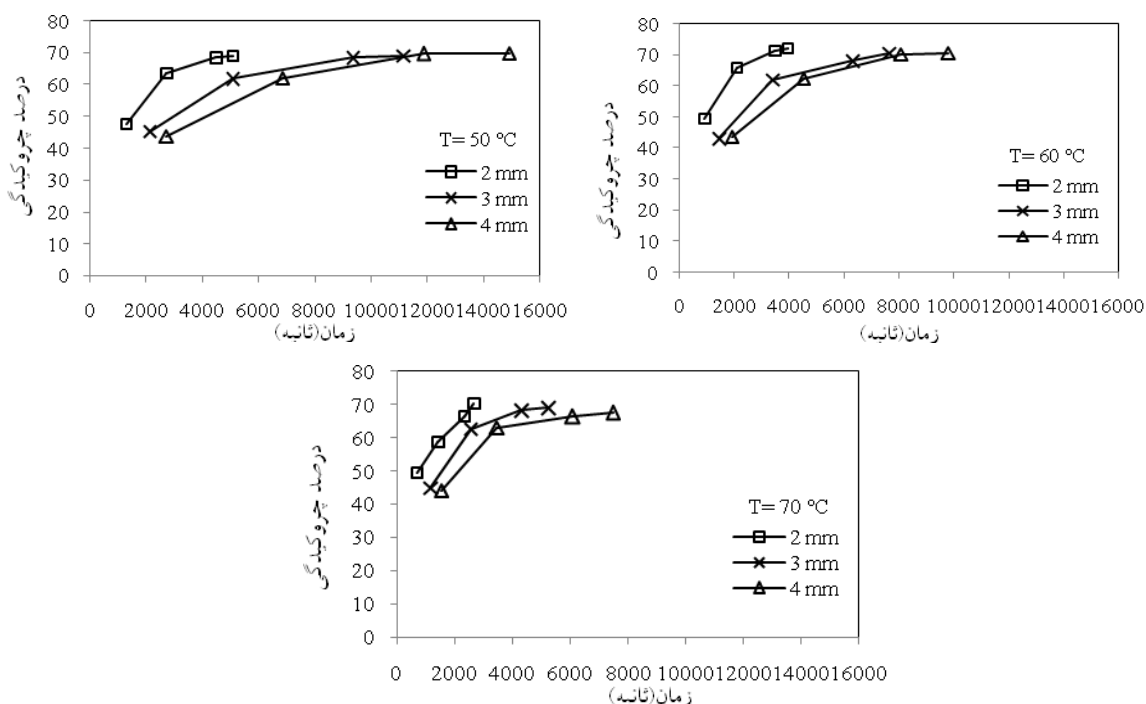
تغییرات چروکیدگی حجمی ورقه‌های سیر در حین خشک شدن بصورت تابعی از زمان و نسبت رطوبت ورقه‌ها در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است. در این شکل‌ها درصد چروکیدگی سیر در دماهای مختلف هوا و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش زمان خشک کردن و نیز کاهش نسبت رطوبت یا محتوای رطوبت، درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر افزایش می‌یابد. از شیب خطوط رگرسیونی در شکل (۲) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تاثیر دما روی سرعت چروکیدگی در ضخامت‌های پایین‌تر نمونه‌ها، بیشتر می‌باشد. ذکر این نکته قابل توجه است که هرچند زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۰/۰۹ در دماها و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها متفاوت بود، اما درصد چروکیدگی نهایی در پایان فرآیند خشک کردن در همه دماها و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها تقریباً به هم نزدیک بود و در محدوده ۶۷-۷۱ درصد قرار داشت. شکل (۳) نیز بیانگر این مطلب است که با کاهش نسبت رطوبت، مقدار چروکیدگی بصورت تابعی درجه دو از نسبت رطوبت، افزایش یافته است. به عبارت دیگر کاهش حجم محصول با مقدار رطوبت خارج شده نسبت مستقیم دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تغییرات دمای هوا و ضخامت نمونه‌ها مورد استفاده در فرآیند خشک کردن، تاثیر چندانی بر مقدار چروکیدگی محصول در

محصولات کشاورزی بصورت تابعی از محتوی رطوبت آنها استفاده کردند (Mayor and Sereno, 2004). همچنین کوک و همکاران، ضرایب معادله خطی توسعه یافته توسط لوزانو و همکاران را در خشک کردن همرفتی میوه‌ی به بدست آوردند. مقدار ضریب همبستگی مورد نظر در حدود ۰/۹۰۶ بدست آمد (Koc et al., 2008).

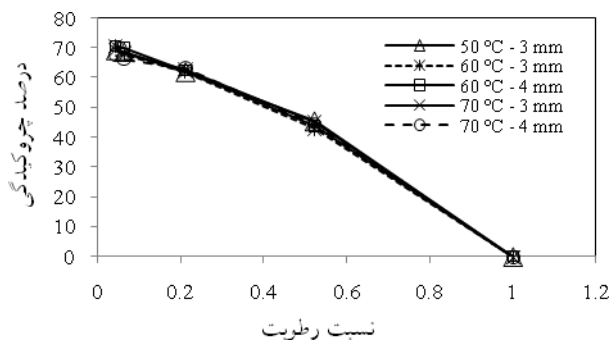
واژکوئز و همکاران، از روابط تجربی خطی و غیر خطی برای پیش‌بینی مقدار چروکیدگی نمونه های سیر در خشک کردن همرفتی استفاده کردند که روابط غیرخطی به شکل نمایی و بر اساس زمان خشک شدن بود (Vazquez et al., 1999).

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) صورت گرفت که نتایج این ارزیابی در دماهای مختلف هوا و ضخامت های مختلف نمونه ها در جدول (۳) نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر میانگین این معیارها، می توان نتیجه گیری کرد که مدل های (۴)، (۲) و (۱) به ترتیب دارای بالاترین مقادیر  $R^2$  و پایین ترین مقادیر SSE و RMSE می باشند. بنابراین می توان درصد چروکیدگی ورقه های سیر را در حین فرآیند خشک کردن همرفتی با استفاده از معادله های ذکر شده و در محدوده دمای هوا و ضخامت نمونه های مورد مطالعه، پیش بینی نمود. مدل (۳)،  $R^2$  پایینی داشت.

لوزانو و همکاران از رابطه خطی برای بیان تغییرات چروکیدگی



شکل ۲- تغییرات درصد چروکیدگی تابعی از زمان خشک شدن در دماهای مختلف هوا و ضخامت های مختلف نمونه ها  
Fig 2. Shrinkage changes of garlic slice vs. drying time at the different air temperature and slices thicknesses



شکل ۳- تغییرات درصد چروکیدگی تابعی از نسبت رطوبت نمونه ها در دماهای مختلف هوا و ضخامت های مختلف نمونه ها  
Fig3. Shrinkage changes of garlic slice vs. moisture content of samples at the different air temperature and slices thicknesses

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای هوا، ضخامت و رطوبت نمونه‌ها روی چروکیدگی ورقه‌های سیر خشک‌شده

Table 2. The analysis of variance for the effect of air temperature, slices thicknesses and moisture content on shrinkage of dried garlic slices

میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییرات Source of variation
20.483 <sup>ns</sup>	2	دما Temperature
19.375 <sup>ns</sup>	2	ضخامت Thicknesses
12.493 <sup>ns</sup>	4	دما × ضخامت Temperature × Thicknesses
5.881	18	خطا Error
373.990 <sup>**</sup>	27	رطوبت (دما × ضخامت) Moisture (Temperature × Thicknesses)
4.773	54	خطا Error
%3.54		ضریب تغییرات CV

\*\* معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد

<sup>ns</sup> غیر معنی دار

\*\* Significant at 1% probability level

<sup>ns</sup> Non significant

جدول ۳- نتایج آماری ارزیابی کاربرد ۳ مدل برای پیش بینی چروکیدگی لایه‌های نازک سیر

Table 3. Result of statistical analysis on three garlic thin-layer shrinkage models

مدل Model	ضخامت Thicknesses (mm)	دمای هوا Air temperature								
		50°C			60°C			70°C		
		R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE
(1)	2	0.9994	0.7987	1.2467	0.9996	0.7645	1.2267	0.9996	0.7643	1.2557
	3	0.9995	0.8001	1.2333	0.9995	0.7921	1.2311	0.9996	0.7566	1.2407
	4	0.9996	0.7825	1.2240	0.9997	0.7269	1.2154	0.9995	0.7839	1.3067
(2)	2	0.9998	0.3211	0.0921	0.9999	0.2900	0.0826	0.9999	0.2890	0.0847
	3	0.9999	0.2911	0.0844	0.9998	0.3034	0.0885	0.9998	0.2949	0.0932
	4	0.9999	0.2833	0.0795	0.9999	0.2937	0.0854	0.9999	0.2882	0.0814
(4)	2	0.9999	0.0001	0.0080	1.0000	0.0000	0.0052	1.0000	0.0000	0.0047
	3	1.0000	0.0001	0.0032	0.9999	0.0001	0.0009	0.9999	0.0002	0.0061
	4	0.9999	0.0002	0.0051	0.9999	0.0001	0.0025	0.9999	0.0000	0.0058

رطوبت محصول می‌باشد و نیز تاثیر ضخامت ورقه‌ها بر مقدار چروکیدگی غیر معنی‌دار بود.

مدل‌های (۴)، (۲) و (۱) به ترتیب دارای بالاترین مقادیر R<sup>2</sup> و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE می‌باشند. بنابراین می‌توان مقدار درصد چروکیدگی ورقه‌های سیر را در حین فرآیند خشک‌کردن همرفتی آنها با استفاده از معادله‌های ذکر شده و در محدوده دمای هوا و ضخامت نمونه‌های مورد مطالعه، پیش‌بینی نمود.

### نتیجه‌گیری کلی

متوسط چروکیدگی نهایی در دماها و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها و در رطوبت نهایی ۰/۰۹ (خشک پایه)، به مقدار ۶۹/۸ درصد بدست آمد. بررسی تغییرات درصد چروکیدگی طی خشک‌کردن در دماهای مختلف هوا نشان داد که اثر دمای هوای خشک‌کن روی چروکیدگی محصول معنی‌دار نیست و چروکیدگی فقط تابعی از میزان

- 1- AOAC. 1990. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. NO. 934. 06, Arlington. Virginia: USA.
- 2- Dyer J. 2004. Choosing, Growing, using and selling Garlic for small-scale Growers in Ontario: Seeds of Diversity Canada (SODC).
- 3- Koc B., I. Eren and F. K. Ertekin. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering* 85: 340-349.
- 4- Mayor L. and A. M. Sereno. 2004. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61: 373-386.
- 5- Mohsenin N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Sci.
- 6- Pabis S. and M. Jaros. 2002. The first period of convection drying of vegetables and the effect of shape-dependent shrinkage. *Biosystems Engineering* 81: 201-211.
- 7- Ratti C. 1994. Shrinkage during of food stuffs. *Journal of Food Engineering* 23: 91-105.
- 8- Schultz E. L., M. Mazzuco, M. M. Machado, A. Bolzan, M. B. Quadri and M. G. N. Quadri. 2007. Effect of pre-treatment on drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering* 78: 1103-1110.
- 9- Sjöholm I. and V. Gekas. 1995. Apple shrinkage upon drying. *Journal of Food Engineering* 25: 123-130.
- 10- Talla A., J. R. Puiggali, W. Jomaa and Y. Jannot. 2004. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits : application to banana. *Journal of Food Engineering* 64: 103-109.
- 11- Vazquez G., F. Chenlo, R. Moreira and A. Costoyas. 1999. The dehydration of garlic. 1. Desorption isotherms and modeling of drying kinetics. *Drying Technology* 17: 1095-1108.
- 12- Wang N. and J. G. Brennan. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering* 24: 61-76.
- 13- Witrowa-Rajchert D. and W. Turek. 1998. Effect of drying method on shrinkage and porosity of apple. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Budowa i Eksploatacja Maszyn* 5: 217-226.