



مدل سازی ریاضی لایه نازک سیر در خشک کن هوای داغ و تحت خلاء

فربیا سهرابی^۱، نارملا آصفی*^۲، ارمغان سالم^۳

۱- دانش آموخته، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

۳- دانشجوی دکتری علوم و صنایع غذایی، مسئول تحقیقات و توسعه شرکت آذر نان نظری، تبریز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

سیر،

خشک کن تحت خلاء،

خشک کن هوای داغ،

ضریب نفوذ رطوبت،

انرژی فعال سازی

DOI: 10.52547/fsct.18.113.363

* مسئول مکاتبات:

n.asefi@iaut.ac.ir

سیر یکی از محصولات مهم کشاورزی در ایران و یکی از منابع عمده تحصیل ارز برای کشور می باشد. با توجه به ضایعات بالا در این محصول جهت نگهداری، افزایش زمان ماندگاری و حفظ کیفیت آن لازم است از روش های مناسب نگهداری مانند خشک کردن استفاده شود. در این تحقیق، ورقه های سیر بصورت لایه نازک در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس و در دو نوع خشک کن تحت خلاء و هوای داغ خشک شدند. سپس مناسب ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن ورقه های سیر بصورت لایه نازک در محدوده دما و نوع خشک کن به کاررفته، توسعه داده شد. ضریب نفوذ موثر رطوبت، مقدار انرژی فعال سازی، چروکیدگی، قابلیت جذب مجدد آب نمونه های سیر طی فرایند خشک کردن مورد اندازه گیری قرار گرفت. در تحقیق حاضر با بررسی ۹ مدل تجربی مختلف و با محاسبه معیارهای آماری R^2 ، $RMSE$ ، x^2 بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط هر مدل، مناسب ترین مدل توصیف کننده سینتیک خشک کردن ورقه های نازک سیر مدل پیچ انتخاب شد. نتایج نشان داد که مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه های سیر برای دماهای مختلف و در دو نوع خشک کن در محدوده $10^{-9} \times 1/5$ تا $10^{-9} \times 7/6$ متر مربع بر ثانیه متغیر است. تغییرات ضریب نفوذ رطوبت به عنوان تابعی از دمای هوای خشک کردن با رابطه آرنیوس توصیف گردید و مقدار انرژی فعال سازی بین $14/673$ و $53/175$ کیلوژول بر مول محاسبه شد. همچنین نتایج بیانگر آن بود که چروکیدگی محصول به دمای هوا و نوع خشک کن وابسته نمی باشد و قابلیت جذب مجدد آب نمونه های سیر با کاهش محتوی رطوبت آنها بطور جزئی افزایش پیدا کرد.

۱- مقدمه

سیر^۱ حاوی آلپسین و پلی فنول‌های فراوانی است و در سراسر جهان به عنوان یک طعم‌دهنده یا گیاه دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. سیر تازه با توجه به میزان بالای آب (بیش از ۷۵٪)، پتانسیل جوانه زدن، پوسیده شدن و در نهایت کاهش مدت زمان ماندگاری را دارد. از این رو زیان‌های اقتصادی زیادی را به فروشندگان وارد می‌کند [۱-۳]. بنابراین، برای افزایش ماندگاری و حفظ ارزش غذایی و افزایش مدت زمان نگهداری، باید از یک روش فرآوری مناسب برای کاهش رطوبت سیر استفاده شود. فرایند خشک کردن می‌تواند ۹۰٪ از آب موجود در مواد غذایی را حذف کند و در نتیجه این عملکرد فساد ناشی از رشد میکروارگانیسم‌ها و واکنش تخریبی در اثر رطوبت را به تأخیر بیندازد و هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهد [۴]. در حال حاضر، روش‌های خشک کردن محصولات کشاورزی به طور عمده به خشک کردن حرارتی و غیرگرمایی تقسیم می‌شوند. روش‌های خشک کردن حرارتی عمدتاً شامل خشک کردن هوای گرم، مادون قرمز، خشک کردن مایکروویو، خشک کردن در خلا و خشک کردن اصلاح شده می‌باشد [۵]. فرایندهای مختلف آبرزایی تأثیرات متفاوتی بر خصوصیات کیفی مواد غذایی مورد نظر بر جای می‌گذارد [۶]. بهینه‌سازی عملیات خشک کردن منجر به بهبود کیفیت محصول خروجی، کاهش هزینه پردازش و همچنین بهینه‌سازی بازده تولید خواهد شد [۷]. مدلسازی و ترسیم منحنی‌های خشک شدن در شرایط متفاوت به کنترل بهتر فرایند خشک کردن و افزایش کیفیت نهایی محصول کمک می‌کند. [۸]. به منظور کنترل و بهینه‌سازی فرایند خشک کردن و طراحی تجهیزات مناسب خشک کردن، استفاده از مدل‌های ریاضی توصیف سینتیک خشک کردن ضروری است. بیشتر این مدل‌ها تجربی هستند و عمدتاً از مدل انتشار مبتنی بر قانون دوم فیک برای هندسه‌های مختلف گرفته شده‌اند [۹]. به

1. *Allium sativum* L.

منظور پیش بینی بهتر فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی، خشک کردن به روش لایه نازک بهترین حالت می‌باشد [۱۰].

یونسی و همکاران (۲۰۱۹) اثر خشک کردن لایه نازک سیر را به وسیله شدت‌های مختلف اشعه مادون قرمز و سرعت جریان هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش سرعت جریان هوا و افزایش شدت تابش اشعه مادون قرمز میزان خشک شدن افزایش و مدت زمان خشک شدن کاهش یافت. ضریب نفوذپذیری رطوبت به وسیله معادله انتشار فیک بدست آمد و مقادیر متوسط آن برای تمام شرایط بررسی شده بین 1.0×10^{-11} و 7.66×10^{-10} متر مربع بر ثانیه بدست آمد. سیزده مدل مختلف ریاضی برای تجزیه و تحلیل رگرسیون غیر خطی برای توصیف روند خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مدل اصلاح شده هندرسون و پایس بعنوان بهترین مدل در خشک شدن برش‌های سیر انتخاب شد [۱۱]. نتایج بررسی فیکل (۲۰۰۹)، در رابطه با خشک کردن برش‌های سیر با روش میکروویو تحت خلأ، نشان داد که افزایش قدرت میکروویو منجر به افزایش سرعت خشک‌کن و افزایش ظرفیت جذب آب شد [۱۲]. رسولی و همکاران (۲۰۱۲) لایه‌های نازک سیر را در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد و ضخامت ۲، ۳ و ۴ میلیمتر در خشک‌کن هوای داغ آزمایشگاهی با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه خشک کردند. متوسط چروکیدگی ورقه‌های سیر ۶۹/۸٪ بدست آمد [۱۳]. محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی به روش لایه نازک جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به خشک کردن انجیر هندی [۱۴]، خرما [۱۵]، برش‌های ورقه‌ای انبه [۱۶]، قطعات سیب زمینی [۹]، هویج [۱۷]، کدو حلوایی [۱۸]، پیاز [۱۹]، سیر [۱۱]، گلابی [۲۰] اشاره کرد.

هدف از این پژوهش مدلسازی فرایند خشک کردن لایه نازک سیر در دو نوع خشک‌کن هوای داغ و تحت خلأ و در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و تعیین اثر دما و نوع خشک‌کن بر ضریب

۲-۳- خشک کردن با هوای داغ و تحت خلاء

سپس نمونه‌ها در داخل پلیت‌ها برای انتقال به خشک‌کن چیده شدند. حدود یک ساعت قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن، به منظور رسیدن دمای هوای داخل خشک‌کن به دمای مورد نظر، دستگاه خشک‌کن روشن شد. خشک‌کردن نمونه‌ها در دو نوع خشک‌کن هوای داغ (memmert) با سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه و خشک‌کن تحت خلاء (memmert) با فشار خلاء ۱۰۰ میلی بار در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به محتوی رطوبت ۷٪ (برپایه ی خشک) انجام شد. وزن نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه ترازوی دیجیتال (مارک متلرتولدو) با دقت ۰/۱ گرم در فواصل زمانی ۶۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد. نمونه‌های خشک شده تا زمان انجام آزمایشات در کیسه‌های پلی اتیلن غیر قابل نفوذ به رطوبت نگهداری شدند.

بر اساس معادله (۱) معادله موازنه جرم میزان تغییرات وزن نمونه‌ها به میزان رطوبت تبدیل شد و در نهایت با استفاده از معادله (۲) رطوبت‌های بدست آمده در هر زمان به نسبت رطوبتی تبدیل گردید [۲۳]:

$$MR = M/M_0 \quad (2)$$

که در این معادله M میزان رطوبت در هر لحظه از زمان خشک کردن، M_0 میزان رطوبت اولیه، نسبت رطوبت در هر لحظه طی خشک شدن به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها بستگی دارد [۲۴].

۲-۴- انتخاب مناسب‌ترین مدل برای توصیف

سینتیک خشک شدن

مدل‌های تجربی خشک کردن لایه نازک مواد غذایی که در جدول (۱) نشان داده شده‌است، جهت مدلسازی داده‌های تغییرات MR در برابر خشک کردن مورد استفاده قرار گرفتند.

نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعالسازی، چروکیدگی، جذب مجدد آب نمونه‌ای سیر بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نحوه آماده سازی نمونه‌ها

سیر سفید مورد نیاز از مزرعه‌ای واقع در آذر شهر (یکی از شهرستان‌های استان آذربایجان شرقی) تهیه گردید و تا زمان استفاده در دمای ۳ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شده. حدود ۲ تا ۳ ساعت قبل از انجام فرآیند به منظور رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای محیط، نمونه‌ها از یخچال خارج شدند. نمونه‌ها پس از پوست‌گیری بوسیله دستگاه اسلایسر دوار (مارک محک) بصورت طولی برش داده شدند. برای جلوگیری از تغییر رنگ و قهوه‌ای شدن، نمونه‌ها در محلول متابیسولفیت سدیم ۰/۴٪ ($Na_2O_5S_2$) و در دمای محیط به مدت یک دقیقه قرار داده شدند [۲۱]. متابیسولفیت سدیم با خلوص بالای ۹۹/۵ درصد از شرکت مرک^۳ تهیه گردید.

۲-۲- تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها

اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌های سیر بر اساس استاندارد AOAC انجام شد. 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 با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید. آزمایش‌ها در ۳ تکرار انجام شدند [۲۲].

$$W.b.\% = A - B/A \times 100 \quad (1)$$

W.b.%: درصد رطوبت نمونه‌ها برحسب وزن تر، A: وزن اولیه نمونه، B: وزن نمونه پس از خشک‌شدن و رسیدن به وزن ثابت خشک‌کردن با هوای داغ و تحت خلاء

1. Allium Sativum L
2. Sodum metabisulfite
3. Merk

Table 1 Descriptive models used in food thin layer drying

model	Mathematical model	source
Newton	MR= exp(-kt)	[25]
page	MR=exp(-ktn)	[26]
Henderson and pabis	MR= a×exp(-kt)	[26]
logarithmic	MR= a×exp(-kt)+c	[27]
Diffusion approach	MR= a×exp(-kt)+(1-a) ×exp(kbt)	[25]
Midiliy	MR= a×exp(-ktn)+bt	[28]
vibel	MR= exp(-(t/b) ^ a)	[29]
verna	MR=a× exp(-kt)+(1-a) × exp (-qt)	[27]
Two- term model	MR=ax × exp (-k1 t)+b × exp (k2 t)	[30]

MR* = Moisture ratio, t= time(minutes) ,D_{eff}= Effective moisture diffusion coefficient (m²/s),a & c = Coefficients, n,k,k₀,k₁= constant in drying models, L= Thickness (m)

مورد مقایسه قرارگرفت [۲۵, ۲۷, ۲۸]. بهترین مدل با بالاترین مقدار R² و پایتترین مقادیر RMSE و x² انتخاب شد [۲۸].

۲-۵- تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت از داده‌های خشک‌کردن استفاده شد. با استفاده از این داده‌ها در هر دمایی، ضریب نفوذ از طریق رسم Ln(MR) به عنوان تابعی از زمان تعیین گردید و از روی شیب خط برازش شده روی داده‌های مذکور، مقدار ضریب نفوذ با استفاده از رابطه زیر بدست آمد. با استفاده از معادله زیر، تغییرات Ln(D_{eff}) در دماهای مختلف و بر حسب رسم $\frac{1}{T}$ شد. شیب خط حاصل برابر با $\frac{Ea}{R}$ و عرض از مبدا آن برابر با Ln(D₀) بود. بنابراین با این روش مقادیر Ea و D₀ تعیین شدند.

$$D_{eff} = -K4 \times L^2 / \pi^2 \quad (6)$$

K: شیب خط، L: نصف ضخامت نمونه

ضریب نفوذ موثر رطوبت تابعی از دمای هوای خشک‌کن (T) است که با استفاده از رابطه‌ی آرنیوس توصیف می‌شود [۹ و ۳۱].

$$\left(\frac{-Ea}{R \times T_{abs}}\right) \exp D_{eff} = D_0 \quad (7)$$

$$(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{Ea}{R \times T_{abs}} \ln \quad (8)$$

که در آن Ea: انرژی فعال سازی (ژول برمول)، D₀: فاکتور پیش‌نمایی (متر مربع بر ثانیه) جامد، R: ثابت عمومی گازها (ژول برمول - درجه کلوین)، T_{abs}: دمای مطلق هوا (کلوین) می‌باشد.

به منظور تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تبیین (R²), مربع کای (X²) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) استفاده می‌شود. این معادلات در روابط ۳، ۴ و ۵ بیان شده‌اند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pred} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (4)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2)^{1/2} \quad (5)$$

MR_{exp,i} = نسبت رطوبت تجربی iام، MR_{pred,i} = نسبت پیشگویی شده iام، N = تعداد مشاهدات، M = تعداد ثابت‌های خشک شدن

منحنی‌های خشک‌شدن سیر در شرایط مختلف، روی ۹ مدل از مدل‌های مذکور منطبق شده و ظرایب مدل‌ها (a,b,c,n,k) بر اساس روش کمترین مربعات غیر خطی و بر اساس الگوریتم لونبرگ مورکورات^۱ برآورد شدند. برآورد ضرایب مدل‌ها در محیط نرم افزار متلب^۲ و به کمک ابزار برازش منحنی^۳ صورت گرفت.

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده سیستیک خشک‌کردن لایه نازک ورقه‌های سیر، معیارهای ضریب تبیین^۴ (R²) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (X²) بین داده‌ها تجربی خشک‌شدن، و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر

1. Levenberg- morgurat
2. Matlab
3. Curve fitting Tool
4. Coefficient of Detemination

۶-۲- چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل و بعد از خشک‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولوئن) با استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق معادله (۹) اندازه‌گیری شد [۳۲]:

$$V = M_1 + M_2 + M_3 / P \quad (9)$$

V : حجم ظاهری نمونه (cm^3)، M_1 : جرم نمونه (gr)، M_2 : جرم پیکنومتر خالی و حلال (g)، M_3 : جرم پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g^T)، P : دانسیته حلال مورد استفاده (gr/cm^3)

با بدست آوردن حجم ظاهری نمونه‌ها از رابطه بالا میزان چروکیدگی نمونه‌های خشک شده از طریق معادله (۱۰) محاسبه شد.

$$Sh = (V_0 - V_T / V_0) \quad (10)$$

Sh : درصد چروکیدگی، V_T : حجم نمونه خشک‌شده در زمان مورد نظر، V_0 : حجم اولیه همان نمونه (قبل از خشک‌کردن)

۷-۲- ظرفیت جذب مجدد آب

آزمایشات جذب مجدد آب روی نمونه‌ها طی زمان خشک‌کردن و در رطوبت‌های مختلف انجام گرفت. در هر سطح رطوبتی نمونه‌های سیر به صورت تصادفی از داخل خشک‌کن بیرون آورده شد و ۲ گرم توزین شد و سپس در ۳۰ سی‌سی آب مقطر ۵۰ درجه سلسیوس در یک بشر ۵۰ سی‌سی به مدت ۲ ساعت غوطه ور گردید (در سه تکرار). سپس نمونه‌ها از آب بیرون آورده شد و بلافاصله پس از حذف آب سطحی با دستمال کاغذی، توزین شد و با استفاده از معادله (۱۱) ظرفیت جذب مجدد آب^۱ محاسبه شد [۳۳].

$$RA = M_t / M_0 \quad (11)$$

RA : جذب مجدد آب، M_t : جرم نمونه پس از جذب آب (گرم)، M_0 : جرم نمونه خشک (گرم)

۳- طرح آماری مورد استفاده و روش

آنالیز نتایج

در این تحقیق، بررسی و تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایشات بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار *design expert* انجام شد.

1. Rehydration Ability (RA)

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تاثیر دما و روش خشک کردن بر زمان

خشک کردن

آهنگ خشک‌کردن نمونه‌ها در خشک‌کن تحت خلاء و هوای داغ در شکل (۱) نشان داده شده است.

آهنگ خشک شدن در ابتدای فرایند خشک شدن به دلیل زیاد بودن محتوای رطوبت، بیشتر از مرحله پایانی خشک شدن است. همچنین، آهنگ خشک شدن در مرحله پایانی فرایند به دلیل ایجاد مقاومت در مقابل انتقال رطوبت در نتیجه چروکیدگی و افزایش مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم به دلیل کاهش محتوای رطوبت، کاهش پیدا کرد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما تا ۷۰ درجه به دلیل افزایش ضریب نفوذ موثر رطوبت و در نتیجه تسهیل خروج رطوبت، آهنگ خشک شدن در مقایسه با سایر تیمارها افزایش یافت.

تغییرات نسبت رطوبت با زمان خشک شدن در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ در نمودار (۲) نشان داده شده است.

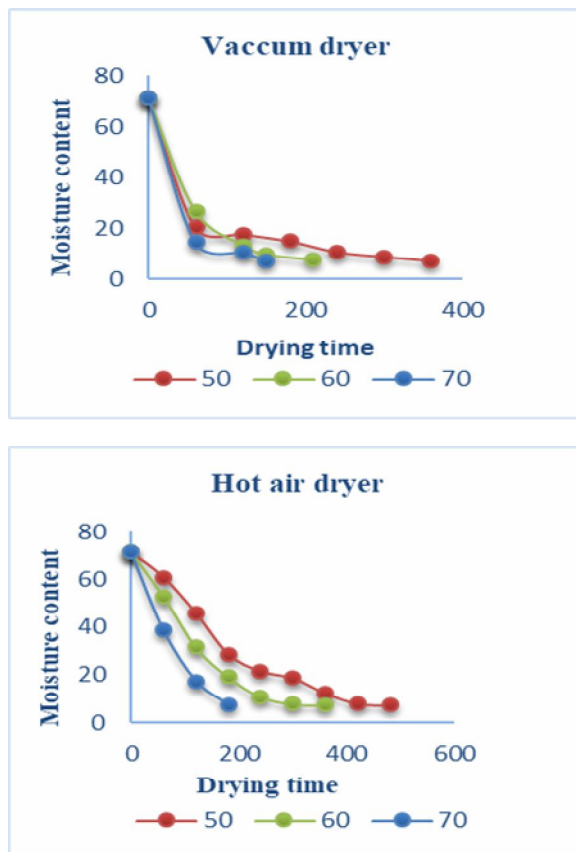


Fig 1 Absolute moisture content curves of garlic samples at different air temperatures in two types of dryers

نسبت رطوبت نمونه‌ها به طور مداوم طی خشک کردن به صورت نمایی کاهش می‌یابند. به عبارتی دیگر افزایش دما تاثیر معنی‌داری بر زمان خشک شدن ورقه‌های سیر داشت. زمان صرف شده برای کاهش رطوبت تا ۰/۰۷ (خشک پایه) در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که کمترین زمان مورد نظر برای کاهش رطوبت تا ۰/۰۷ (خشک پایه) مربوط به دمای ۷۰ درجه سلسیوس و خشک کن تحت خلاء می‌باشد. دلیل این امر این است که در یک فشار ثابت با افزایش دما، زمان خشک کردن برای رسیدن به یک محتوای رطوبت معین به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد چرا که در دماهای بالا نیروی محرک برای انتقال جرم و حرارت افزایش می‌یابد و با افزایش دما کاهش سریع نسبت رطوبت رخ می‌دهد و خشک شدن سیر فقط در دوره‌ی سرعت نزولی صورت می‌گیرد [۳۴، ۳۵]. کاهش زمان خشک کردن سیر با افزایش دمای هوا توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۱، ۲۱، ۳۶].

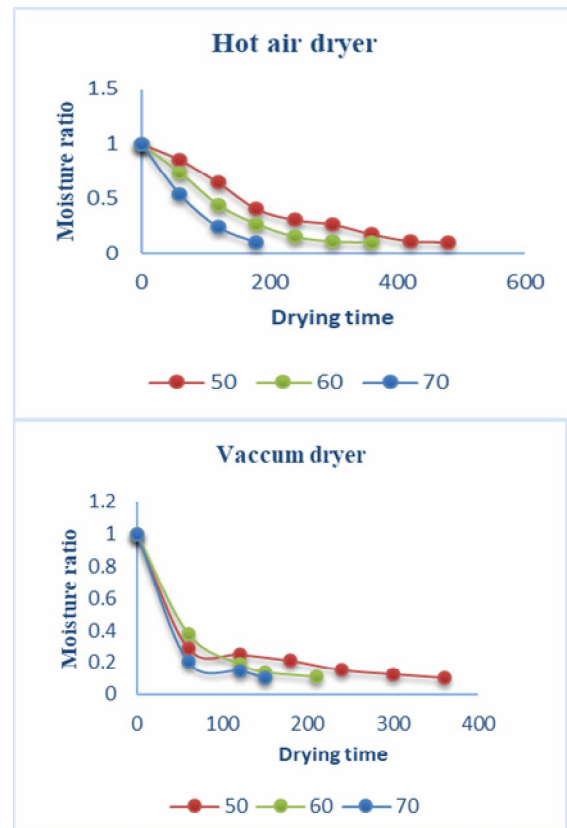


Fig 2 Moisture ratio curves of garlic samples at different air temperatures and in two types of dryers

Table 2 Final drying time at different air temperatures in two types of dryer

Temperature°C	Drying time (minutes)	
	Hot air dryer	Vacuum dryer
50	480	360
60	360	210
70	180	150

به سایر مدل‌های تجربی می‌باشد. سپس رابطه ضرایب سه مدل با دمای هوا و نوع خشک کن نمونه‌ها بررسی شد. نتایج حاصل از تجزیه ی رگرسیون چند گانه نشان داد که بالاترین مقدار (R^2) (ضریب تبیین اصلاح شده) در توصیف وابستگی ضرایب مدل‌ها به دما در خشک کن هوای داغ مربوط به مدل پیچ می‌باشد. درحالی‌که اثر دما در خشک کن تحت خلاء غیر معنی‌دار بود و این بدان معنی است که برای خشک کن تحت خلاء نمی‌توان مدلی را توصیف کرد. در پژوهشی خشک کردن لایه نازک سیر با ضخامت ۲-۴ میلی متر مورد آزمایش قرار گرفت، آزمایشات در دامنه دمایی ۵۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد و جریان هوای ۱/۵-۲ متر بر ثانیه انجام شد. در این پژوهش مدل دو جمله‌ای و پیچ به عنوان بهترین مدل جهت توصیف داده‌های سینتیک انتخاب شد [۳۷]. در مطالعه سینتیک خشک کردن چیپس کاساوا در خشک کن همرفت نیز از تمام مدل‌های

۴-۲- مدل سازی منحنی‌های خشک شدن و بر

آورد ضرایب ثابت مدل توصیفی منتخب

داده‌های تجربی مربوط به سینتیک خشک شدن ورقه‌های سیر که در دماهای مختلف هوا و در دو نوع خشک کن به دست آمده بودند روی ۹ مدل تجربی نشان داده شده در جدول (۳) 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 (X^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) صورت گرفت که نتایج این ارزیابی در دماهای مختلف هوا و خشک کن های مختلف نمونه‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. با مقایسه‌ی مقادیر مشخص شد که مدل‌های پیچ، لگاریتمیک و ویبل به ترتیب دارای بالاترین مقادیر R^2 و پایین‌ترین مقادیر X^2 و RMSE نسبت

انتشار در خشک کردن لایه نازک شلتوک نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به علت دقت قابل قبول و سادگی معادله پیچ این مدل برای مدلسازی سینتیک خشک کردن شلتوک توصیه شد [۴۱]. بررسی فرایند خشک کردن برگ های جعفری و مدلسازی ریاضی خشک کردن این گیاه به وسیله آون جریان هوای داغ و خورشیدی هم نشان از این داشت که با افزایش دما از ۵۶ تا ۹۳ درجه سانتیگراد مدل ریاضی پیچ نسبت به سایر مدل‌ها برازش مناسب تری از داده‌های خشک کردن نشان داد [۴۲].

ریاضی بررسی شده مدل پیچ و میدیلی به طور رضایت بخشی رفتار خشک کردن چپس های کاساوارا در محفظه های خشک کن توصیف کردند [۳۸]. در بررسی رفتار خشک کردن خرما نیز رابطه پیچ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد [۱۵ و ۳۹]. در مدلسازی فرایند خشک کردن توت فرنگی تمامی مدل‌ها نتایج قابل قبولی را داشتند ولی در کل مدل پیچ نسبت به سایر مدل‌ها با توجه به بزرگترین ضریب تعیین و کوچکترین متوسط خطای داده‌ها نتایج نزدیک تری نسبت به داده‌های آزمایشی داشت [۴۰]. نتایج مدلسازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر نیز نشان داد که مدل تقریب

Table 3 Statistical results of the evaluation of the application of 9 models for the drying kinetics of the thin layer of garlic

model	Dryer type	Temperature of Dryer °C								
		50			60			70		
		R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE
Newton	Hot air	0.75	0.43	1.52	0.86	0.37	0.18	0.74	0.15	0.18
	Vacume	0.59	0.20	0.24	0.62	0.22	0.20	0.75	0.23	0.18
page	Hot air	0.99	0.007	0.032	0.99	0.027	0.003	1	0.0010	0.0006
	vacume	0.99	0.020	0.0020	0.99	0.013	0.005	0.99	0.0130	0.00033
Henderson and pabis	Hot air	0.75	0.46	1.52	0.86	0.41	0.18	0.86	0.19	0.07
	Vacume	0.59	0.21	0.24	0.62	0.26	0.20	0.62	0.26	0.18
logarithmic	Hot air	0.99	0.002	0.0006	0.97	0.007	0.004	0.98	0.006	0.002
	Vacume	0.98	0.05	0.011	0.92	0.14	0.044	0.99	0.071	0.005
Diffusion approach	Hot air	0.75	0.007	1.009	0.78	0.009	0.007	0.75	0.04	0.025
	Vacume	0.59	0.020	0.005	0.82	0.072	0.001	0.78	0.51	0.0001
vibel	Hot air	0.95	0.07	0.005	0.86	0.018	0.41	0.98	0.31	0.009
	vaccume	0.99	0.013	0.0005	0.99	0.020	0.0002	0.99	0.013	0.0003
Diffusion approach	Hot air	0.78	0.31	1.39	0.98	0.04	0.008	0.78	0.31	0.09
	Vacume	0.5	0.24	0.24	0.92	0.14	0.044	0.99	0.071	0.0050
verna	Hot air	0.75	0.109	0.007	0.98	0.04	0.008	0.78	0.31	0.009
	Vacume	0.82	0.009	0.0001	0.78	0.005	0.0001	0.76	0.03	0.008
Two- term model	Hot air	0.78	0.101	0.009	0.57	0.002	0.009	0.81	0.52	0.001
	Vaccume	0.82	0.23	0.002	0.67	0.022	0.008	0.73	0.42	0.0002

نمونه‌ها را در برداشته باشد و نیز دارای بالاترین مقدار (R^2) باشد، به عنوان مناسب ترین رابطه انتخاب و در مدل جدید لحاظ شد. چهارچوب روابط توسعه داده شده براساس رابطه آرینوس بود. روابط مربوط به ضرایب k و n نیز در فرم نهایی معادله نسبت رطوبت نمونه‌های سیر در خشک کن هوای داغ به صورت لایه نازک در زیر آورده شده است.

$$K = 2978380 \exp(-6943/22)/T$$

$$\bar{R}^2 = 99/98$$

(۱۲)

۴-۳- بررسی تغییرات ضرایب ثابت مدل پیچ به صورت تابعی از دمای هوا در خشک کن هوای داغ

ضرایب k و n مربوط به مدل پیچ در دماهای مختلف در خشک کن هوای داغ در جدول (۴) آورده شده است. رابطه بین ضرایب ثابت مدل (k و n) و شرایط هوا، با استفاده از رگرسیون چندگانه توسعه داده شده است. از بین روابط توسعه داده شده، مدل ترکیبی که هر دو مشخصه دمای هوا و نوع خشک کن

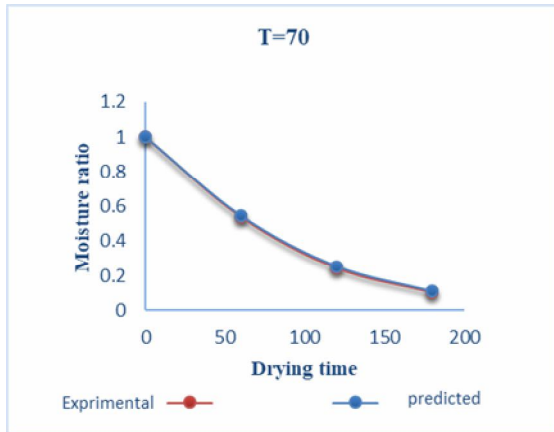


Fig 3 Experimental predicted moisture ratio values with the selected model at 50 °C, 60 °C, 70 °C

با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که انطباق خوبی بین نسبت رطوبت‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل انتخابی، وجود دارد. می‌توان نتیجه گرفت که مدل توسعه داده شده جدید (پیچ) برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن نمونه‌های سیب مناسب می‌باشد.

۴-۵- ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی

فعالسازی

بر اساس ضرایب نفوذ موثر رطوبت در جدول (۵) بیشترین مقدار این ضریب در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و خشک‌کن تحت خلاء و کمترین مقدار آن در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و خشک‌کن هوای داغ به دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش دما و استفاده از خشک‌کن تحت خلاء مقدار ضریب نفوذ موثر افزایش می‌یابد [۲۱، ۲۹]. گستره مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت، برای مقادیر مختلف دمای هوا در دو نوع خشک‌کن بین $10^{-9} \times 1/5$ تا $10^{-9} \times 6/6$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود. این مقادیر نزدیک به مقادیر بدست آمده برای سیب بود که مقادیر گزارش شده در گستره $10^{-1} \times 1/2$ تا $10^{-9} \times 3/3$ متغیر بود [۲۱]. همچنین با مقادیر بدست آمده در ترخون، تفاله زیتون و دانه طالبی نیز سازگاری داشت [۲۳، ۴۳، ۴۴].

$$n = \frac{0.734945 \exp(162/5791)}{T}$$

$$\bar{R}^2 = 78/61 \quad (13)$$

$$MR = \exp\left(-\left(\frac{2978380 \exp(-6943/22)}{T}\right)\right) \times t$$

$$\bar{R}^2 = 0.73494561 \exp(162/5791)/T \quad (14)$$

Table 4 constant coefficients related to the selected kinetic model of garlic drying

Temperature °C	k	n	\bar{R}^2
50	0.00137	1.221	0.9914
60	0.002643	1.187	0.9947
70	0.004797	1.186	1

n, k= constant of page model

۴-۴- تأیید مدل توصیفی توسعه داده

شده (مدل پیچ)

مقایسه مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل نهایی و مقادیر نسبت رطوبت تجربی بدست آمده در دماهای مختلف هوا و در خشک‌کن هوای داغ در نمودارهای (۳) نشان داده شده است.

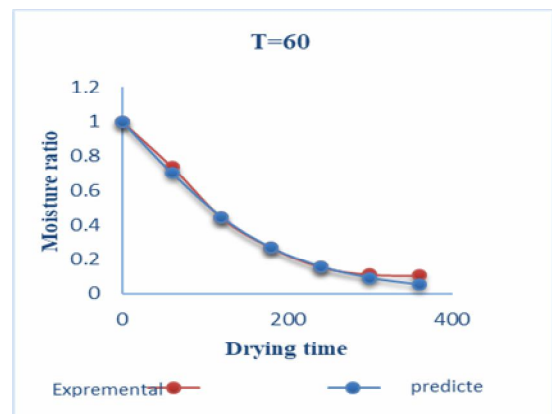
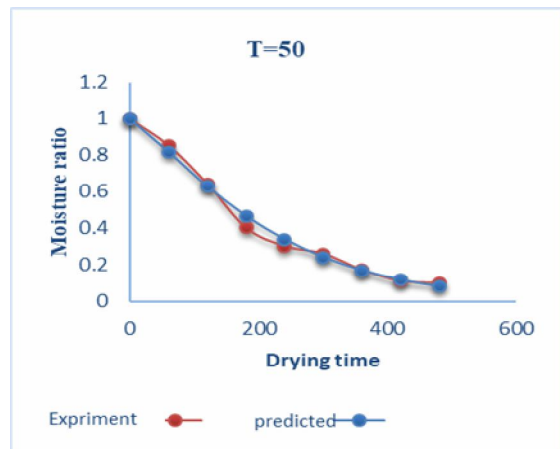


Table 5 Comparison of the means of effective moisture penetration coefficients at different air temperatures in two types of dryers

temperature (°C)	Dryer type	Effective moisture penetration Coefficient(m ² /s)
50	Vacuum dryer	4.67*10 ⁻⁹
	Hot air dryer	1.5* 10 ⁻⁹
60	Vacuum dryer	5.64*10 ⁻⁹
	Hot air dryer	2.76*10 ⁻⁹
70	Vacuum dryer	6.61*10 ⁻⁹
	Hot air dryer	4.56*10 ⁻⁹

نخود سبز کیلوژول بر مول [۴۸] همخوانی دارد. هرچند استفاده از دماهای بالا منجر به افزایش سرعت خشک شدن با افزایش نفوذ رطوبت می شود [۴۹] ولی انتخاب دمای بهینه به منظور حفظ کیفیت محصول امری منطقی می باشد [۵۰].

۴-۷- بررسی چروکیدگی نمونه های سیر

یکی از مهمترین تغییرات در ساختار بافت مواد گیاهی در طول خشک کردن چروکیدگی است که از همان مراحل ابتدائی فرایند خشک کردن شروع می شود. کیفیت محصولات خشک عمدتاً با مقدار چروکیدگی آن در پایان فرآیند خشک کردن ارزیابی می شود. نتایج تجزیه واریانس اثر دمای هوا و نوع خشک کن روی مقدار چروکیدگی نهایی ورقه های سیر در رطوبت ۰/۰۷ (خشک پایه) در جدول (۶) درج شده است. چنانچه مشاهده می شود بین دماهای مختلف هوا و نوع خشک کن نمونه ها از نظر چروکیدگی نهایی اعمال شده روی محصول، تفاوت معنی داری وجود نداشت. متوسط چروکیدگی نهایی در دماها و خشک کن های مختلف و در رطوبت نهایی ۰/۰۷ (خشک پایه) به مقدار ۶۷٪ بدست آمد. غیر معنی دار بودن اثر دما روی درصد چروکیدگی نمونه ها را می توان به این علت دانست که تفاوتی بین دماهای مورد استفاده در آزمایش ها روی تشکیل لایه بیرونی صلب وجود ندارد چرا که این دماها در محدوده انتقال شیشه ای نمی باشند. [۵۱]. در پژوهشی دیگر نیز در خشک کردن موز، سیب زمینی و هویج به نتایج مشابهی رسیدند و نشان دادند که دمای هوا تاثیر معنی داری روی مقدار چروکیدگی این محصولات در فرایند خشک کردن ندارد [۵۲]. در مطالعه ای دیگر اثر شرایط مختلف خشک کردن (رطوبت نسبی، دما و جریان هوا) بر میزان چروکیدگی سیب زمینی، سیب و هویج نشان داد که میزان چروکیدگی عمدتاً توسط سرعت هوا تحت تاثیر قرار می گیرد و تاثیر دیگر متغیرهای

۴-۶- انرژی فعال سازی

تغییرات ضریب نفوذ بصورت تابعی از دمای هوای خشک کن بوسیله رابطه آرینوس (معادله ۱۵) توصیف می شود که نمودار آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$D_{eff} = D_0 \exp(-E_a/R/T) \quad (15)$$

در این رابطه مقادیر (D_0) و انرژی فعال سازی (E_a) با استفاده از رسم منحنی لگاریتم ضریب نفوذ موثر در مقابل عکس زمان بدست آمد. مقدار انرژی فعال سازی بین ۱۴/۶۷۳ و ۵۳/۱۷۵ کیلوژول بر مول گزارش شد. محدوده مقادیر انرژی فعال سازی برای مواد غذایی بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول متغیر است. بالا بودن انرژی فعال سازی بیانگر آن است که ضریب نفوذ ($\frac{1}{T}$) حساسیت زیادی به دما دارد [۱۳].

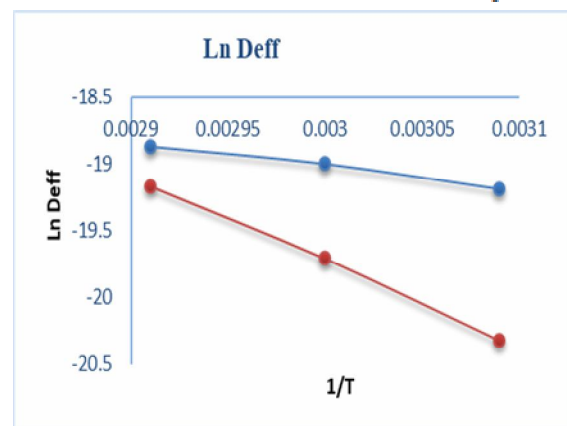


Fig 4 Description of changes in $\ln D_{eff}$ vs $\frac{1}{T}$ for two dryer type

انرژی فعال سازی محاسبه شده با داده های ارائه شده توسط سایر محققین به عنوان مثال سیب زمینی ۲۰ کیلوژول بر مول [۴۵]، ذرت ۲۷،۶۱ کیلوژول بر مول [۴۶]، هویج ۲۸/۳۶ کیلوژول بر مول [۲۶] گوجه فرنگی خشک شده ۱۷/۴۰ کیلوژول بر مول [۴۷]، انجیر ۴۰/۹۵ کیلوژول بر مول [۴۷]،

خشک کن قابل چشم پوشی است [۵۲]. در پژوهشی دیگر نیز حاصل شد [۱۳].
در خصوص چروکیدگی سیر نتایج مشابه با این پژوهش

Table 6 Results of analysis of variance (ANOVA) The effect of air temperature and dryer type on final shrinkage

Source	sum of squares	Degrees of freedom	average of squares	f	p
Model	0.077	5	0.015 ^{ns}	1.03	0.4455
Dryer	4.050E-003	1	4.050E-003 ^{ns}	0.27	0.6119
Temperature	0.048	2	0.024 ^{ns}	1.62	0.2392
Dryer* Temperature	0.024	2	0.012 ^{ns}	0.81	0.4671
error	0.18	12	0.015 ^{ns}		
Total correlation	0.26	17			

ns = nosignificant

۵- منابع

- [1] Feng, Y., et al., Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. Food Chemistry, 2020: p. 128404.
- [2] Singh, P., et al., Effect of drying characteristics of garlic-a review. Journal of Food Processing and Technology, 2014. 5(4).
- [3] Babetto, A., et al., Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best equilibrium moisture content equation. Journal of Food Engineering, 2011. 107(3-4): p. 347-352.
- [4] Lamidi, R.O., et al., Recent advances in sustainable drying of agricultural produce: A review. Applied energy, 2019. 233: p. 367-385.
- [5] Onwude, D.I., N. Hashim, and G. Chen, Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. Trends in Food Science & Technology, 2016. 57: p. 132-145.
- [6] Turkiewicz, I.P., et al., Influence of different drying methods on the quality of Japanese quince fruit. LWT, 2019. 114: p. 108416.
- [7] Madamba, P., R. Driscoll, and K. Buckle, Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. Journal of Food Engineering, 1994. 23(3): p. 309-319.
- [8] Karathanos, V.T. and V.G. Belessiotis, Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999. 74(4): p. 355-361.
- [9] Akpınar, E., A. Midilli, and Y. Bicer, Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energy conversion and management, 2003. 44(10): p. 1689-1705.

۴-۸- بررسی جذب مجدد آب طی زمان خشک کردن

داده‌های تجربی بدست آمده برای قابلیت جذب مجدد آب ورقه‌های سیر بصورت تابعی از محتوی رطوبت آنها در حین خشک شدن در دماهای مختلف هوا و در دو نوع خشک‌کن در شکل (۵) و (۶) آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود قابلیت جذب مجدد آب نمونه‌های سیر با کاهش محتوی رطوبت آنها بطور جزئی افزایش پیدا می‌کند.

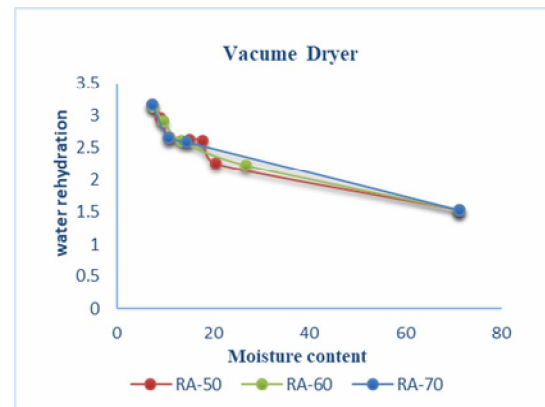


Fig 5 Changes in water reabsorption capacity of garlic samples during drying in a vacuum oven

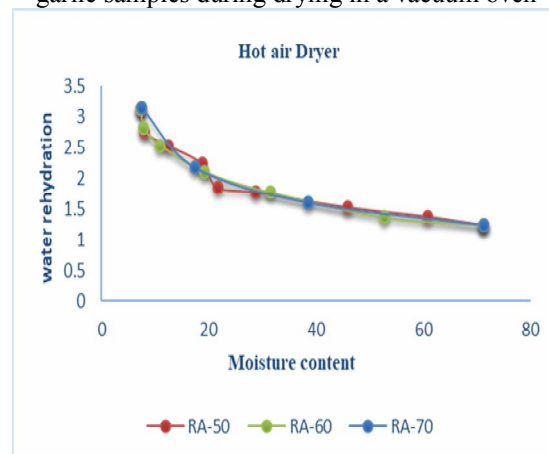


Fig 6 Changes in water reabsorption capacity of garlic samples during drying in hot air oven

- [23] Akgun, N.A. and I. Doymaz, Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of food Engineering*, 2005. 68(4): p. 455-461.
- [24] Doymaz, I., Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food engineering*, 2007. 78(4): p. 1291-1297.
- [25] Demir, V., et al., Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. *Biosystems engineering*, 3(88).2004 :(p. 325-335.
- [26] Doymaz, I., Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of food engineering*, 2004. 61(3): p. 359-364.
- [27] Toğrul, İ.T. and D. Pehlivan, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of food engineering*, 2004. 65(3): p. 413-425.
- [28] Midilli, A., H. Kucuk, and Z. Yapar, A new model for single-layer drying. *Drying technology*, 2002. 20(7): p. 1503-1513.
- [29] Seiedlou, S., et al., Convective drying of apple: Mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International journal of agriculture and biology*, 2010. 12(2): p. 171-178.
- [30] Madamba, P.S., R.H. Driscoll, and K.A. Buckle, The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 1996. 29: p. 75-97.
- [31] Babalis, S.J. and V.G. Belessiotis, Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of food Engineering*, 2004. 65(3): p. 449-458
- [32] Mohsenin, N.N., *Physical properties of plant and animal materials*. 1986.
- [33] Maskan, M., Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of food engineering*, 2001. 48(2): p. 177-182.
- [34] Koc, B., I. Eren, and F.K. Ertekin, Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of food engineering*, 2008. 85(3): p. 340-349.
- [35] Vega, A., et al., Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 2007. 40(10): p. 1698-1707.
- [36] Pirmoradi, M. and M. Mostafaei, Evaluation of the best kinetic model in thin layer drying of kumquat based on desirability function. *Agricultural Mechanization*, 2017. 4(1).
- [10] Zomorodian, A. and M. Moradi, Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for *Cuminum cyminum*. 2010.
- [11] Younis, M., D. Abdelkarim, and A.Z. El-Abdein, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi journal of biological sciences*, 2018. 25(2): p. 332-338.
- [12] Figiel, A., Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. *Journal of Food Engineering*, 2009. 94(1): p. 98-104.
- [13] Rasouli, M. and s. Seiedlou, Brief report: a study of the shrinkage changes and mathematical modeling of garlic (*Allium sativum*.) during convection drying. 2012. 2(1).
- [14] Babalis, S.J., et al., Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of food engineering*, 2006. 75(2): p. 205-214.
- [15] HASSAN, B.H. and A.I. HOBANI, Thin layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering*, 2000. 23(3): p. 177-189.
- [16] Goyal, R., et al., Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*, 2006. 95(1): p. 43-49.
- [17] Sonmete, M.H., et al., Mathematical modeling of thin layer drying of carrot slices by forced convection. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017. 11(2): p. 629-638.
- [18] Sadeghi, E., K. Movagharnejad, and A. Haghghi Asl, Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019. 43(12): p. e14229.
- [19] Sharma, G., R. Verma, and P. Pathare, Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of food engineering*, 2005. 71(3): p. 282-286.
- [20] Lahsasni, S., et al., Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin layer solar drying of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*). *Journal of food process engineering*, 2004. 27(2): p. 103-117.
- [21] Vazquez, G., et al., The dehydration of garlic. 1. Desorption isotherms and modelling of drying kinetics. *Drying technology*, 1999. 17(6): p. 1095-1108.
- [22] A.O.A.C, *Official Methods of Analysis*, in 16th ed. 1998, Association of Official Analytical Chemists: Washington, DC.

- [44] Koocheki, A., et al., Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety. *International Agrophysics*, 2007. 21(4): p. 349-359.
- [45] Bon, J., et al., Drying characteristics of hemispherical solids. *Journal of Food Engineering*, 1997. 34(2): p. 109-122.
- [46] Tolaba, M. and C. Suarez, Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. *LWT-Food Science and Technology*, 1988. 21(2): p. 83-86.
- [47] Sacilik, K., R. Keskin, and A.K. Elicin, Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of food Engineering*, 2006. 73(3): p. 231-238.
- [48] Simal, S., et al., Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 1996. 55(2): p. 121-128.
- [49] Carbonell, J., et al., The dehydration of paprika with ambient and heated air and the kinetics of colour degradation during storage. *Journal of Food Engineering*, 1986. 5(3): p. 179-193.
- [50] Kashaninejad, M., et al., Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of food engineering*, 2007. 78(1): p. 98-108.
- [51] Talla, A., et al., Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 2004. 64(1): p. 103-109.
- [52] Ratti, C., Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of food engineering*, 1994. 23(1): p. 91-105.
- [37] Madamba, P.S., R.H. Driscoll, and K.A. Buckle, The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, 1996. 29(1): p. 75-97.
- [38] Argo, B.D., S. Sandra, and U. Ubaidillah, Mathematical modeling on the thin layer drying kinetics of cassava chips in a multipurpose convective-type tray dryer heated by a gas burner. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018. 32(7): p. 3427-3435.
- [39] Ashraf, Z., E.Z. HAMIDI, and M. Sahari, Evaluation and characterization of vacuum drying of date paste. 2012.
- [40] Salehi, F., Investigation of Thin Layer-Drying Kinetics of Strawberry Using Infrared Radiation. *Journal of Food Technology & Nutrition*, 2019. 17(1): p. 109-11.
- [41] Omid, M., A. Yadollahinia, and S. Rafiee, Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering of Iran*, 2010. 41: p. 153-160.
- [42] Akpınar, E.K., Y. Bicer, and F. Cetinkaya, Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of food engineering*, 2006. 75(3): p. 308-315.
- [43] Karami, H. and M. Rasekh, Kinetics mass transfer and modeling of tarragon drying (*Artemisia dracunculus* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 2018. 34(5): p. 734-747.



Mathematical modeling of thin-layer garlic with hot air dryer and under vacuum

Sohrabi, F.¹, Asefi, N.^{2*}, Salem, A.³

1. Graduate, Department of Food Science and Technology, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
3. Ph.D. student, Research and development manager of Azar Nan Nazari company, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 2021/ 01/ 04
Accepted 2021/ 03/ 01

Keywords:

Garlic, Vacuum dryer,
Hot air dryer,
Moisture penetration
coefficient,
Activation energy

DOI: [10.52547/fsct.18.113.363](https://doi.org/10.52547/fsct.18.113.363)

*Corresponding Author E-Mail:
n.asefi@iaut.ac.ir

Garlic (*Allium Sativum* L) is one of the most important agricultural products in Iran and one of the major sources of foreign exchange for the country. Due to the high waste in this product to maintain, increase shelf life, and keep its quality, it is necessary to use appropriate storage methods such as drying. In this study, a thin layer of garlic slices was dried at 50, 60, 70 ° C, and in two types of dryers (vacuum and hot air). The most suitable model was developed to describe the drying kinetics of garlic flakes as a thin layer in the temperature range and type of dryer used. Effective moisture penetration coefficient, amount of activation energy, shrinkage, water reabsorption of garlic samples were measured during the drying process. In the present study, by examining 9 different experimental models and calculating the statistical criteria of R², RMSE, x² between the experimental data and the results predicted by each model, the most appropriate model describing the drying kinetics of garlic thin slices was the Page model. The results showed that the effective diffusion coefficient of garlic leaf moisture for different temperatures and in two types of dryers was in the range of 1.5×10^{-9} to 6.6×10^{-9} m²/s. Changes in the moisture diffusion coefficient were described as a function of drying air temperature with Arrhenius and the amount of activation energy was calculated between 14.673 and 53.175 kJ / mol. The results also showed that the shrinkage of the product was not dependent on air temperature and the type of dryer and the water re-absorption capacity of garlic samples increased slightly by decreasing their moisture content.