



## بررسی اثر دما و سرعت هوای خشک کن بر سینتیک خشک شدن و ترکیبات فنلی برگ استویا

لیلا ناطقی\*<sup>۱</sup>

۱- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد ورامین-پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران

| اطلاعات مقاله  | چکیده   |
|--|---|
| تاریخ های مقاله :  | <p>استویا گیاهی فصلی است که حاوی مقادیر بالایی از ترکیبات فنولیک و قندی به نام استویوزید و ربادیوزید است. به دلیل فصلی بودن این گیاه، مناسب‌ترین روش برای قابل دسترس نمودن آن، استفاده از روش‌های خشک کردن است. انتخاب روش مناسب خشک کردن اندام‌های گیاهی از موارد مهم در عملیات پس از برداشت می‌باشد. استفاده از روش نامناسب می‌تواند منجر به از بین رفتن اندام‌های گیاهی یا از بین رفتن کل مواد مؤثر موجود در آن شود. هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر دما و سرعت هوای خشک کن بر روند خشک شدن، مقدار ترکیبات فنولیک کل و مدل سازی سینتیک خشک شدن برگ استویا بود. بدین منظور از دمای هوا در سه سطح (۷۰°C، ۵۵°C و ۴۵°C) و سرعت هوا در سه سطح (۱/۵ m/s، ۱ m/s و ۰/۵ m/s) برای خشک کردن برگ‌های استویا استفاده شد. در این تحقیق از پنج مدل ریاضی پلگ، توزیع ویبول، لگاریتمی، پیچ و خزائی به منظور مدل‌سازی نتایج روند خشک کردن برگ استویا استفاده شد. نتایج نشان داد مدل‌های تجربی ارائه شده عملکرد مطلوبی را در مدل‌سازی فرآیند کاهش نسبت رطوبت استویا داشتند (R<sup>2</sup> &gt; ۰/۹۴۵). با مقایسه مقادیر خروجی R<sup>2</sup> و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل‌های ارائه شده نشان داد که مدل پیچ دارای عملکرد مدل‌سازی بهتری نسبت به چهار مدل دیگر بود. بعلاوه اینکه نتایج نشان دادند که در فرآیند خشک شدن، مهم‌ترین فاکتور در کنترل نرخ خشک شدن برگ استویا، دمای هوا بود. همچنین زمان خشک شدن برگ استویا با افزایش دما و سرعت هوای خشک کن کاهش یافت. دمای هوای خشک کن تاثیر معناداری بر محتوای ترکیبات فنولیک کل داشت. به این ترتیب که با افزایش دمای هوا از ۴۵°C به ۷۰°C، مقدار ترکیبات فنولیک برگ استویا، کاهش یافت. بهترین دما و سرعت هوا برای حفظ ترکیبات فنولیک برگ استویا، دمای ۴۵°C و سرعت ۱ m/s بود.</p> |
| تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۱۲<br>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱                  |   |
| کلمات کلیدی:<br>خشک کردن استویا،<br>مدل‌سازی ریاضی،<br>محتوای فنل. |   |
| DOI: 10.29252/fsct.18.06.21  |   |
| * مسئول مکاتبات:<br>leylanatheghi@iauvaramin.ac.ir                 |   |

1. Root Mean Square Error (RMSE)

## ۱- مقدمه

موارد مهم در عملیات پس از برداشت می‌باشد. استفاده از روش نامناسب می‌تواند منجر به از بین رفتن اندامهای گیاهی یا از بین رفتن کل مواد مؤثر موجود در آن شود [۸]. استفاده از هوای داغ برای پیدا کردن سینتیک خشک کردن بهینه و ایده‌آل هر محصول، کمترین اثر را بر رنگ محصول خواهد گذاشت. یکی از راه‌های کنترل سینتیک خشک کردن با هوای داغ، کنترل سرعت دمیده شدن هوا است بطوری که سرعت‌های پایین مزیت بیشتری نسبت به سرعت‌های بالا دارند [۹]. کرمی و همکاران، (۱۳۹۵) به بررسی اثر دما و سرعت جابه‌جایی هوا بر سینتیک خشک کردن برگ پونه پرداختند و گزارش نمودند تاثیر سرعت جابه‌جایی هوا بر مدت زمان خشک کردن در دماهای پایین بیش‌تر بود [۱۰]. در پژوهشی دیگر عباسی و همکاران، (۱۳۸۷) به بررسی خشک کردن لایه نازک زعفران با هوای داغ پرداختند و دریافتند تاثیر درجه حرارت به مراتب بیشتر از تاثیر سرعت هوا است [۱۱].

موسویان و بصیری (۱۳۸۷) نیز در پژوهشی به منظور خشک کردن یک گونه بومی آویشن در استان خراسان با استفاده از خشک کن کابینتی انجام دادند به نتایج مشابهی دست یافتند و گزارش نمودند بین سرعت‌های مختلف جریان هوا در خشک کن کابینتی، اختلاف معنی‌دار وجود نداشت، ولی بیشترین اسانس، زمانی حاصل شد که سرعت جریان هوا در خشک کن کابینتی، ۱/۵ متر بر ثانیه بود [۱۲]. کنترل سرعت و دمای هوای خشک کن، نقش مؤثری در انرژی صرف شده برای به جریان انداختن هوای خشک کن و همچنین انرژی صرف شده جهت گرم کردن هوا دارد [۹].

تاکنون پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با خشک کردن و ارائه مدل قابل قبول جهت توضیح هرچه بهتر سینتیک خشک شدن صورت گرفته است [۱۳-۱۵]. این مدل‌ها قادر به توصیف فرایند خشک شدن گستره وسیعی از محصولات کشاورزی هستند. برخی از مهمترین مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۶].

استویا گیاهی از خانواده *Asteraceae* است که در برزیل، پاراگوئه، آمریکای مرکزی، تایلند، کره و چین می‌روید. این گیاه دارای رویش فصلی بوده و در آب و هوای مناطق استان گیلان به خوبی رشد می‌نماید [۱، ۲]. برگ‌های گیاه استویا حاوی مقادیر بالای فنول، فلاونوئید، بتاکاروتن، نیاسین، دالکوزید، ربادیوکسید، ریوفلاوین، ویتامین C، کلسیم، کروم، آهن، منیزیم، پتاسیم، پروتئین، فیبر و تیامین می‌باشد. این گیاه علفی چند ساله، دی‌ترین‌های گلیکوزیدی از جمله استویوزید و ربادیوزید تولید می‌کند که کم کالری بوده و ۳۰۰ برابر ساکارز شیرین هستند و به صورت تازه و خشک برای بیماری‌های هیپوگلاسمی، دیابت نوع ۲، آلرژی، مشکلات گوارشی، اضطراب و فشارخون بالا مفید می‌باشد. به دلیل فصلی بودن این گیاه ارزشمند، مناسب‌ترین روش برای قابل دسترس نمودن آن، استفاده از روش‌های خشک کردن است [۳، ۴].

خشک شدن یکی از فرایندهای مهم پس از برداشت مواد غذایی و گیاهی می‌باشد و از قدیمی‌ترین راه‌های نگهداری مواد غذایی محسوب می‌شود که برای جلوگیری از خرابی مواد غذایی با کاهش دادن محتوای رطوبتی منجر به کاهش یا توقف فعالیت‌های آنزیمی یا میکروبی می‌شود و روشی برای بالا بردن ارزش افزوده فرآورده‌های غذایی شناخته شده است. از اینرو سرعت واکنش‌های مضر و قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی به مقدار قابل توجهی کم شده و از طرف دیگر محصولات با وزن و حجم کم تولید می‌شود که جابجایی و فرآوری آنها آسان‌تر می‌شود [۵، ۶].

برای تولید محصول بهتر از نظر بافت، رنگ و... نیاز به خشک کردن در شرایط عملیاتی مناسب و کنترل شده می‌باشد. در نتیجه برای بدست آوردن شرایط عملیاتی مناسب در فرایند خشک کردن باید سینتیک خشک کردن ماده خشک شونده را در شرایط عملیاتی موجود بررسی نمود. سینتیک خشک کردن به خواص فیزیکی مواد و نحوه خشک کردن وابسته است [۷]. انتخاب روش مناسب خشک کردن اندام‌های گیاهی از

Table 1 Empirical models used to model data on drying agricultural products

| Equation | Mathematical equation                   | Model       |
|----------|---|-------------|
| 1        | $M_R = \exp(-Kt^n)$                     | Page        |
| 2        | $M_R = \exp(-(\frac{t}{\beta})^\alpha)$ | Weibull     |
| 3        | $M_R = a \exp(-Kt) + b \exp(-K_o t)$    | Two-term    |
| 4        | $M_R = A \exp(-Kt) + C$                 | Logarithmic |
| 5        | $M_t = M_o - \frac{t}{K_1 + K_2 t}$     | Peleg       |

ciocalteu. کربنات سدیم محصول شرکت سیگما کشور آمریکا بودند.

## ۲-۲- آماده سازی نمونه

برگ های استویا به دقت شسته شده و پس از آبگیری، بصورت دستی جدا شدند. سپس مقدار رطوبت اولیه آن اندازه گیری شد و در پاکت پلی اتیلنی دو لایه بسته بندی و تا زمان انجام آزمون در یخچال نگهداری شد [۱۸].

## ۲-۳- دستگاه خشک کن

خشک کن مورد استفاده در این تحقیق توسط دپارتمان فنی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران طراحی گردیده بود. بخش های مختلف این دستگاه شامل یک فن گریز از مرکز قابل تنظیم، کانال انتقال هوای گرم، محفظه خشک کن، سینی حاوی نمونه ها و سیستم های اندازه گیری و کنترل دما بود (شکل ۱).

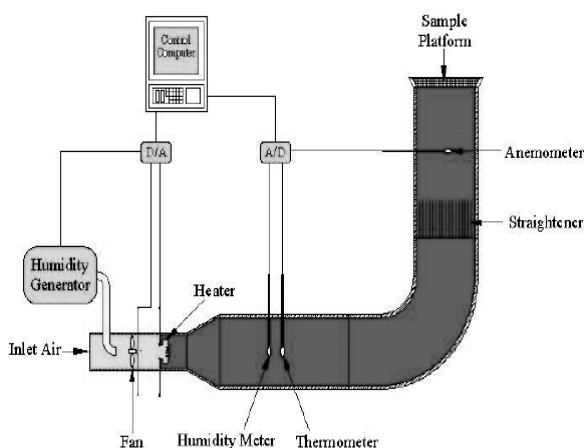


Fig 1 Schematic shape of the laboratory dryer

در این دستگاه، سرعت هوای ورودی با تغییر دور فن و بصورت دستی تنظیم می شد. سیستم گرمادهی این دستگاه شامل یک هیتر برقی بود که در داخل کانال تعبیه شده بود. دما از طریق یک سیستم کنترل که بر اساس میکروکنترلرها کار می کرد با دقت  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  کنترل می شد. سرعت هوا از طریق یک سرعت سنج دیجیتالی با محدوده اندازه گیری صفر تا  $15\text{ m/s}$ ، اندازه گیری شد. سیستم توزین مورد استفاده در این آزمایشات شامل یک ترازوی دیجیتالی با دقت  $0.01\text{ g}$  بود که در بیرون محفظه خشک کردن در کنار دستگاه جاسازی شده بود. این دستگاه همچنین شامل یک سیستم رطوبت ساز و سیستم کنترل مقدار رطوبت هوای ورودی بود که البته در این تحقیق مورد استفاده قرار نگرفت.

قانون دوم فیک انتقال رطوبت را در خشک شدن مواد غذایی به روش پخش بیان داشته و آن را در ارتباط با برگ های گیاه استویا که به صورت مسطح در نظر گرفته می شود توسط فرمول زیر بیان می دارد [۱۸].

محتوای رطوبتی در هر نقطه  $x$  در داخل ماده و در هر زمان  $t$  پس از خشک شدن می تواند به صورت معادله زیر بیان شود.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

با فرض ثابت ماندن شکل جسم در طول فرآیند خشک شدن، انتقال سریع گرما و یکنواختی پخش رطوبت در داخل محصول، رابطه دیفرانسیلی ۱ را می توان به راحتی حل کرد. برای اجسامی با هندسه مسطح و با فرض اینکه انتقال رطوبت از طریق فرآیند پخش صورت می گیرد و همچنین مقدار چروکیدگی ماده در اثر خشک شدن ناچیز است، حل رابطه دیفرانسیلی ۱ به صورت زیر بیان می شود [۱۷]. مهمترین متغیر در این مدل، ضریب نفوذ موثر رطوبت است که با استفاده از این مدل و به کمک داده های آزمایشی براحتی قابل تعیین خواهد بود.

(رابطه ۲)

$$M_r = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -(2m-1) \frac{\pi^2 D_{eff}}{L^2} t \right]$$

که در آن :

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} : \text{نسبت رطوبت (MR)}$$

$$D_{eff} : \text{ضریب نفوذ موثر رطوبتی (m}^2\text{/s)}$$

$$L : \text{نصف ضخامت ورقه (m)}$$

$$n : \text{عدد صحیح مثبت}$$

برگ استویا حاوی ترکیبات سودمند بسیاری چون ترکیبات فنولیک و مواد آنتی اکسیدانی و... است. شرایط خشک کردن تاثیر فراوانی بر محافظت از ترکیبات فنلی و خصوصیات کیفی محصول دارد. بنابراین هدف کلی از این پژوهش بررسی اثر سه دمای  $70^\circ\text{C}$ ،  $55^\circ\text{C}$  و  $45^\circ\text{C}$  و سه سرعت هوای خشک کن ( $1/5\text{ m/s}$ ،  $1\text{ m/s}$  و  $0/5\text{ m/s}$ ) بر روند خشک شدن و ترکیبات فنلی برگ گیاه استویا بود.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- مواد

در این تحقیق، گیاه استویا از شرکت نیشای مازندران، (ایران) تهیه گردید. کلیه مواد شیمیایی شامل: متانول، معرف Folin-

## ۳- آزمون‌ها

## ۳-۱- آزمون اندازه‌گیری رطوبت

حدود ۱۰ g برگ استویا پس از شستشو و خشک شدن از ساقه جدا شد و در یک پلیت شیشه‌ای که ظرف قبلاً خشک و وزن شده بود قرار داده شد. سپس ظرف در یک آون (Galenkamp, CHF097, UK) در دمای ۱۰۲ °C قرار داده شد و فرایند خشک شدن تا زمانی که نمونه‌ها به وزن ثابت برسند ادامه یافت. سپس نمونه‌ها از آون خارج و در دسیکاتور قرار داده شدند و پس از توزین از طریق رابطه ۳، مقدار رطوبت آن‌ها محاسبه گردید [۱۹].

(رابطه ۳)

$$W.b.\% = \frac{A-B}{A} \times 100$$

w.b. %: درصد رطوبت نمونه‌ها بر حسب وزن مرطوب

A: وزن اولیه نمونه

B: وزن نمونه پس از خشک شدن و رسیدن به وزن ثابت

بر این اساس رطوبت اولیه نمونه برگ‌های استویا، ۸۶ % w.b. اندازه‌گیری شد.

## ۳-۲- خشک کردن برگ استویا

در ابتدا برای رسیدن به شرایط ثابت و یکنواخت دمای هوای خشک کردن، خشک کن به مدت ۲۰ min روشن گردید. سپس برای هر آزمایش در حدود ۱۰ g از برگ‌های شسته شده استویا با محتوای رطوبتی ۸۶ % w.b. که از قبل آماده شده بودند بطور یکنواخت در داخل سبدهای که بر بالای محفظه خشک کن قرار گرفته بود پخش شدند. نمونه‌ها در سه سطح دمایی متفاوت (۷۰ °C، ۵۵ °C و ۴۵ °C) در سه سرعت هوای متفاوت (۱/۵ m/s، ۱ m/s و ۵/۵ m/s) خشک گردیدند. برای تهیه سینتیک کاهش رطوبت نمونه‌ها تغییرات وزن آنها در فواصل زمانی مشخص (فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای در یک ساعت اول و سپس در فواصل ۱۵ دقیقه‌ای تا انتهای فرآیند خشک شدن) با استفاده از ترازوی دیجیتالی (EMB 600-2, 600 g × 0.01 g) ساخت شرکت KERN آلمان ثبت گردید. خشک کردن تا رسیدن رطوبت نهایی محصول به حدود ۱۲ % w.b. ادامه یافت [۱، ۲۰].

## ۳-۳- اندازه‌گیری ترکیبات فنولیک کل

برای اندازه‌گیری ترکیبات فنولی از روش فولین سیو کالوتو استفاده شد. در این روش ۲۰ μl از عصاره تهیه شده با ml ۱/۱۶ آب مقطر، مخلوط و ۱۰۰ μl معرف فولین به محلول

فوق اضافه شد. پس از ۵ دقیقه ۳۰۰ μl محلول سدیم کربنات ۲۰٪ به محلول اضافه و نمونه‌ها بعد از هم زدن با همزن لوله‌ای به مدت ۳۰ دقیقه در بن ماری ۴۰ °C نگهداری شدند. سپس جذب نمونه‌ها با دستگاه طیف نورسنج در طول موج ۷۶۰ nm خوانده شد. نتایج برحسب میلی گرم اسید گالیک در ۱۰۰ g نمونه خشک محاسبه شد. برای رسم منحنی درجه‌بندی از اسید گالیک به عنوان استاندارد استفاده شد و نتایج برحسب میلی گرم اسید گالیک در ۱۰۰ g وزن خشک نمونه محاسبه شد [۲۱، ۲۲].

## ۳-۴- مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برگ

## استویا

داده‌های رطوبت محصول، طبق رابطه  $(M-M_e)/(M_0-M_e)$  به صورت عامل بی بعد نسبت رطوبتی تبدیل شدند. البته در این تحقیق به علت نوسان پیوسته رطوبت نسبی هوا در طول فرایند خشک کردن، برای نرمالایز کردن داده‌ها از روش  $M/M^0$  استفاده شد [۱۹، ۱]. به منظور پیش بینی روند خشک شدن برگ‌های استویا، سینتیک کاهش نسبت رطوبت  $(MR)^2$  با استفاده از مدل‌های پیچ، توزیع ویبول، لگاریتمی، پلگ و خزائی مدل‌سازی گردید. برازش این مدل‌ها بر داده‌های به دست آمده از خشک کردن توسط نرم‌افزار MATLAB R2013b انجام شد و بر اساس مقادیر ضریب تبیین  $(R^2)$  و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE) با هم مقایسه گردید و بهترین مدل جهت برآورد نسبت رطوبت مدل پیچ با توجه به ضریب همبستگی بالا و میزان ریشه میانگین مربعات خطا پایین برای توصیف و پیش بینی سینتیک خشک کردن استویا انتخاب شد.

## ۳-۵- روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

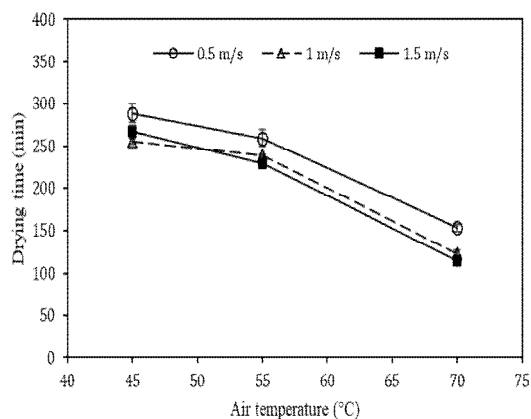
این طرح تحقیقاتی در قالب آزمایش فاکتوریل شامل دو فاکتور سرعت هوای ورودی خشک کن (سه سطح ۱/۵ m/s، ۱ m/s و ۵/۵ m/s) و دمای هوای ورودی خشک کن (سه سطح ۷۰ °C، ۵۵ °C و ۴۵ °C) با ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج حاصل با استفاده از روش آنالیز واریانس تجزیه و تحلیل و معنی‌دار بودن یا نبودن اثر متغیرها توسط نرم‌افزار SPSS تعیین گردید. مقایسه بین میانگین تیمارها با استفاده از روش آزمون چند مرحله‌ای دانکن در سطوح احتمال ۵ و ۱٪ انجام گرفت (۲۳). بعلاوه اینکه

2. Moisture ratio

3. Coefficient of determination

4. Root Mean Square Error (RMSE)

شکل ۳ تاثیر سرعت و دمای هوای خشک کن بر روی زمان کاهش رطوبت برگ‌های استویا از ۱۲ % wb تا ۸۶ % wb را نشان می‌دهد. مطابق شکل سرعت و دمای هوای ورودی خشک کن تاثیر قابل توجهی بر کاهش زمان خشک شدن و کاهش رطوبت برگ‌های استویا داشت (شکل ۳). دمای هوا در مقابل سرعت هوا تاثیر بالاتری در کاهش زمان خشک شدن برگ استویا داشت (به ترتیب ضریب استاندارد رگرسیون جزئی (SPRC)  $-۳۷/۳۳$  برای دما و  $-۵/۴۲$  برای سرعت هوای ورودی خشک کن). مقادیر SPRC نشان داد که دما تقریباً  $۶/۹$  برابر نسبت به سرعت هوای ورودی خشک کن در کاهش زمان خشک شدن محصول تاثیر داشت. نتایج مشابهی از تاثیر بالاتر دما در مقابل سرعت هوای خشک کن برای خشک کردن نعنای [۲۴]، بابونه [۲۵] و شوید و جعفری [۲۶] گزارش شده است. در دمای هوای  $۷۰^{\circ}\text{C}$  تقریباً  $۱۲۰$  الی  $۱۵۰$  دقیقه زمان برای کاهش رطوبت در سرعت هوای  $۱/۵$  الی  $۰/۵$  خشک کن مورد نیاز بود. مقادیر متناظر برای دماهای  $۴۵^{\circ}\text{C}$  و  $۵۵^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $۲۵۰$  الی  $۲۸۰$  دقیقه و  $۲۲۵$  الی  $۲۶۰$  دقیقه محاسبه شد. بیشترین تاثیر سرعت هوای خشک کن در کاهش زمان خشک شدن استویا برای دمای  $۷۰^{\circ}\text{C}$  بدست آمد ( $p \leq ۰/۰۱$ ). نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد که تغییر سرعت هوای ورودی تاثیر قابل توجهی در کاهش زمان خشک شدن حتی در یک دمای ثابت داشت.



**Fig 3** The effect of air temperature and temperature on the time needed to reduce the moisture content of stevia leaf from 12 % (wb) to 86 % (wb)

بطور کلی با توجه به نتایج بدست آمده، نرخ خشک شدن برگ استویا در طی زمان خشک شدن دارای مقدار ثابتی نبوده است (شکل ۴).

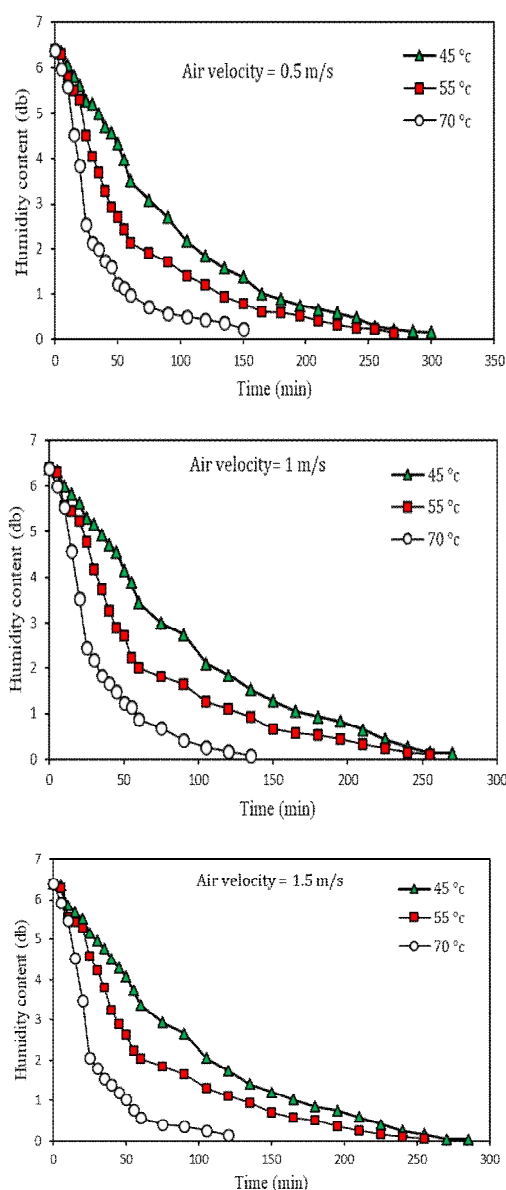
نرخ خشک شدن استویا در ابتدا دارای مقدار کم و سپس یک

نمودارهای رسم شده تحقیق نیز در نرم افزار Excel 2013 رسم گردیدند.

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- سیتیک خشک شدن برگ استویا

رطوبت اولیه نمونه برگ‌های استویا (۸۶ %wb) در دمای هوای  $۷۰^{\circ}\text{C}$ – $۴۵^{\circ}\text{C}$  و جریان هوای  $۱/۵$ – $۰/۵$  m/s تا حدود رطوبت ۱۲ % wb کاهش یافت. نمودار سیتیک خشک شدن نمونه برگ‌های استویا در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق انتظار شاهد افزایش شتاب روند خشک شدن نمونه‌ها با افزایش دما و سرعت هوای ورودی خشک کن بودیم.

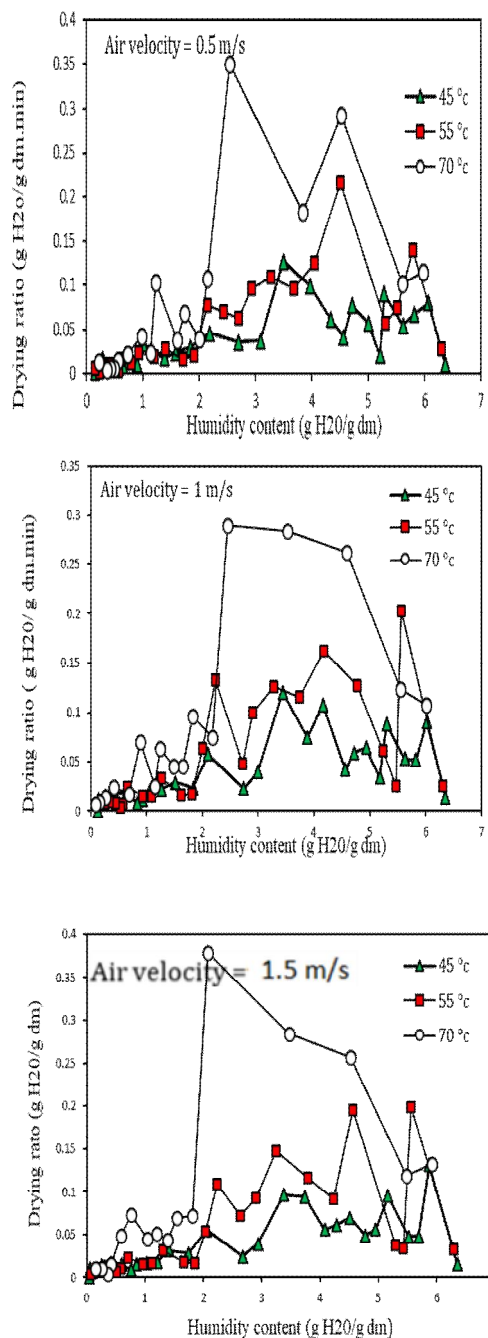


**Fig 2** Kinetics of stevia leaf drying at 0.5 m/s, 1 m/s و 1.5 m/s air velocity

شدن برگ استویا در سرعت‌های  $0.5 \text{ m/s}$  و  $1 \text{ m/s}$  به ترتیب برابر با  $0.058$ ،  $0.063$  و  $0.066$  بدست آمد. نتایج بدست آمده نشان داد که مقاومت در انتقال وزن داخلی در طی دوره کاهش نرخ خشک شدن زمان خشک شدن برگ استویا را کنترل می‌کند، لذا نتایج آزمایشگاهی را می‌توان توسط رابطه ضریب پخش فیک تفسیر گردد (رابطه ۱). افزایش نرخ خشک شدن در طی افزایش دمای هوا به دلیل افزایش پتانسیل انتقال حرارت بین هوا و محصول می‌باشد که گرمای نهان تبخیر لازم برای تبخیر آب از محصول را تامین می‌کند.

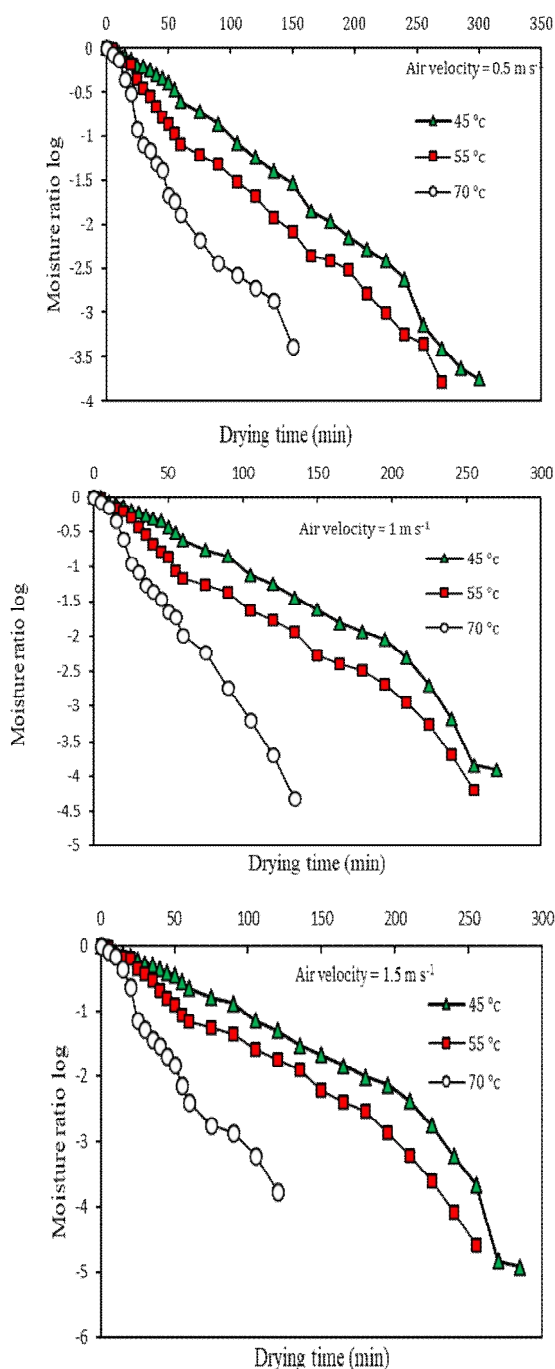
در حقیقت در روش خشک کردن با هوای داغ، گرما از سطح خارجی محصول از طریق هدایت منتقل می‌شود. هنگامی که هوا گرم می‌شود، بخار آب بیشتری را با خود حمل می‌کند. به عبارت دیگر، رطوبت نسبی آن کاهش می‌یابد، بنابراین محصولات با هوای گرم‌تر، بهتر خشک می‌شوند زیرا نرخ خشک شدن به مقدار محتوای رطوبتی محصول نیز بستگی دارد. هر چه محتوای رطوبتی زیادتر باشد، فرآیند خشک شدن با نرخ بالاتری انجام می‌گیرد. هنگامی که محتوای رطوبتی محصول کمتر از محتوای رطوبت بحرانی باشد، نرخ انتقال رطوبت از داخل محصول کمتر از نرخ انتقال بخار آب به هوای اطراف خواهد شد و در نتیجه از فشار جزئی بخار بالای سطح ماده نیز کاسته می‌شود و نرخ خشک شدن نسبت به زمان به آهستگی کاهش می‌یابد. در ابتدای فرآیند خشک کردن، آهنگ خشک کردن بالا است ولی با گذشت زمان به دلیل چروکیدگی بافت محتوای رطوبتی به سرعت کاهش می‌یابد ولی در مراحل بعدی، کاهش محتوای رطوبتی به آرامی صورت می‌گیرد. چروکیدگی سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول می‌شود که منجر به کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی کار می‌شود. همچنین زمان مورد نیاز برای کاهش یک مقدار معین از محتوای رطوبت وابسته به شرایط عملیاتی است [۲۸]. با توجه به داده‌های تغییرات رطوبت و سرعت خشک شدن می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه‌ها در ناحیه خشک شدن نزولی قرار دارند که این امر تاثیر اندک سرعت جریان هوا بر سرعت خشک شدن و بی اثر بودن میزان جریان هوا را در تغییرات رطوبت آنها را توجیه می‌کند، چون در این

روند افزایشی و در انتهای فرآیند روند کاهشی را دنبال می‌کند.



**Fig 4** Changes in the drying rate of stevia leaves versus moisture content for different temperatures at  $0.5 \text{ m/s}$ ,  $1 \text{ m/s}$  and  $1.5 \text{ m/s}$  air velocity

نتایج نشان داد که مقادیر نرخ خشک شدن با افزایش دما و سرعت هوای خشک کن افزایش می‌یابد. میانگین نرخ خشک شدن استویا با افزایش دمای هوا از  $45^\circ\text{C}$  تا  $70^\circ\text{C}$  به میزان  $2/26$  برابر افزایش یافت. نتایج مشابهی در خشک شدن محصولاتی مانند برگ چغندر [۲۷]، نعناع [۲۴]، زعفران [۱۱] توسط سایر محققان گزارش شده است و متوسط نرخ خشک



**Fig 5** Changes in logarithmic ratio of moisture content versus drying time at speeds of 0.5 m/s, 1 m/s and 1.5 m/s

مقادیر ضریب نفوذ موثر محاسبه شده برای تیمارها در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر میانگین ضریب نفوذ موثر محاسبه شده در بازه‌ی  $3.21 \times 10^{-8}$  تا  $8.15 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$  متغیر بود (جدول ۲). دما و سرعت هوای خشک کن تاثیر معناداری ( $p \leq 0.01$ ) بر مقادیر ضریب نفوذ موثر برگ استویا داشتند.

مرحله آنچه که سرعت خشک شدن را تحت تاثیر قرار می‌دهد پدیده انتشار و حرکت مولکول‌های آب در داخل ماده غذایی است و شرایط هوای خشک کن نظیر سرعت و فشار بر آن تاثیر قابل توجهی ندارد، اما چون دما روی میزان انتشار اثر می‌گذارد، این امر باعث تسریع سرعت خشک شدن می‌شود و زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد. نتایج مشابهی در یافته‌های سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۹]. فلاد و همکاران، (۲۰۰۹) در خشک کردن سه واریته خرمای Red به این نتیجه رسیدند که هر سه واریته خرما در ناحیه خشک شدن نزولی قرار دارند و دما بیشترین نقش را بر سرعت خشک شدن آنها دارد [۲۹]. عرب حسینی و همکاران تاثیر سطوح دمایی  $40^\circ\text{C}$ ،  $45^\circ\text{C}$ ،  $50^\circ\text{C}$ ،  $55^\circ\text{C}$ ،  $60^\circ\text{C}$ ،  $70^\circ\text{C}$ ،  $80^\circ\text{C}$  و  $90^\circ\text{C}$  را بر روی خشک شدن برگ ترخون در رطوبت‌های نسبی متفاوت تحت سرعت هوای  $0.6 \text{ m/s}$  بررسی نمودند و گزارش نمودند [۱۴]. در تحقیقی تاثیر سطوح دمایی  $30^\circ\text{C}$ ،  $40^\circ\text{C}$  و  $50^\circ\text{C}$  و سرعت هوای ورودی  $0.5 \text{ m/s}$  و  $1 \text{ m/s}$  بر روی خشک شدن برگ‌های نعنای بررسی شد و نتایج گزارش شده حاکی از تاثیر بالاتر دمای هوای ورودی در مقابل سرعت جریان هوای ورودی در زمان خشک شدن نمونه‌ها بود [۳۰]. همچنین تاثیر بالای دمای هوا (سطوح  $30/1^\circ\text{C}$ ،  $44/6^\circ\text{C}$  و  $58/8^\circ\text{C}$ ) در خشک کردن برگ‌های بابونه گزارش گردید [۲۵].

#### ۴-۲- محاسبه ضریب پخش و انرژی

##### فعال‌سازی برگ استویا

ضریب پخش نمونه برگ‌های استویا با توجه به مقدار شیب خط برازش شده بر نمودار  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک شدن برای تمام تیمارها محاسبه گردید (رابطه ۴). روند تغییرات  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک شدن در شکل ۵ نشان داده شده است.

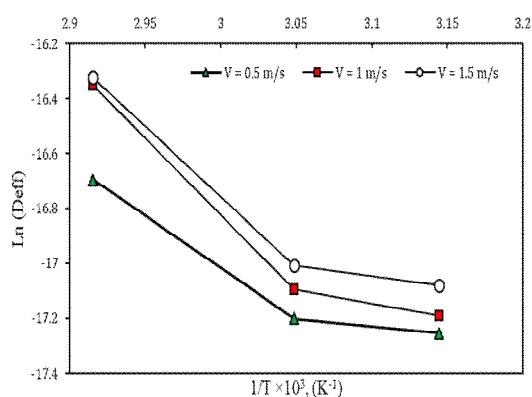
(رابطه ۴)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t}{M_0}\right) = \ln\frac{S}{\pi^2} - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{H^2}\right)$$

$$\text{شیب خط برازش شده} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{H^2}$$

**Table 2** The effective diffusion coefficient (m/s) calculated for stevia leaf at different temperature and air velocity of the dryer

| Temperature (°C) | Air velocity (m/s)     |                        |                        | Average                |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                  | 0.5                    | 1                      | 1.5                    |                        |
| 45               | 3.21e <sup>-08</sup>   | 3.38 e <sup>-08</sup>  | 5.61 e <sup>-08</sup>  | 4.07 e <sup>-08c</sup> |
| 55               | 4.42e <sup>-08</sup>   | 3.76 e <sup>-08</sup>  | 7.93 e <sup>-08</sup>  | 5.04 e <sup>-08b</sup> |
| 70               | 3.82 e <sup>-08</sup>  | 4.10 e <sup>-08</sup>  | 8.15 e <sup>-08</sup>  | 5.36 e <sup>-08a</sup> |
| <b>Average</b>   | 3.48 e <sup>-08b</sup> | 3.75 e <sup>-08b</sup> | 7.23 e <sup>-08a</sup> |                        |

**Fig 6** The Arrhenius relationship between the effective penetration coefficient of the stevia leaf and the absolute air temperature at different speeds of the air of dryer

مقادیر ضریب نفوذ موثر برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی بین  $10^{-9}$  تا  $10^{-11}$  مترمربع بر ثانیه می‌باشد [۳۲]. مقدار انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) برای سرعت‌های ۰/۵ m/s، ۱ m/s و ۱/۵ m/s به ترتیب  $28/5 \text{ kJ mol}^{-1}$ ،  $31/5 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $21 \text{ mol}^{-1}$  محاسبه گردید. مقادیر محاسبه شده به مراتب کمتر از مقادیر گزارش شده برای شوید و جعفری (به ترتیب برابر با  $35/05 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $43/92 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) توسط دویماز و همکاران، (۲۰۰۶) بود [۳۱].

#### ۴-۳- مدل‌سازی ریاضی روند کاهش نسبت

##### رطوبت (MR) برگ استویا

نتایج حاصل از مدل‌سازی سینتیک نسبت رطوبت برگ استویا توسط مدل‌های ویبول، لگاریتمی، پیچ، پلگ و خزائی در جداول ۳، ۴ و ۵ آورده شده است. عملکرد مدل‌سازی مدل‌های مذکور توسط دو پارامتر  $R^2$  و RMSE ارزشیابی گردید. مدل‌ها با مقادیر  $R^2$  بالاتر و RMSE کمتر دارای عملکرد مدل‌سازی بالاتری بودند.

مقادیر ضریب نفوذ موثر با افزایش دما از  $45^\circ\text{C}$  تا  $70^\circ\text{C}$  به میزان  $2/08$  برابر افزایش یافت. نتایج مشابهی دلیلی بر افزایش مقدار ضریب نفوذ موثر در اثر افزایش دمای خشک کن برای برگ شوید و جعفری [۳۱] توسط محققین گزارش شده است. مقدار میانگین این پارامتر با افزایش سرعت هوای خشک کن از  $0/5 \text{ m/s}$  تا  $1/5 \text{ m/s}$  به میزان  $1/32$  برابر افزایش یافت. نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش مقدار ضریب نفوذ موثر با افزایش سرعت هوای خشک کن گزارش شد [۱۷، ۲۴].

برای محاسبه انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) با استفاده از معادله آرنیوس نمودار  $\ln D_{eff}$  در مقابل  $T^{-1}$  رسم و با استفاده از شیب نمودار به دست آمده انرژی فعال‌سازی محاسبه شد (رابطه ۵).

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

تاثیر دمای هوای خشک کن بر مقادیر ضریب پخش آب مطابق با معادله آرنیوس بیان گردید (رابطه ۵). وابستگی مقادیر ضریب پخش آب بر دمای هوای خشک کن در شکل ۶ نشان داده شده است. معادلات خطی برازش شده با دقت بالایی ( $R^2 > 0/88$ ) تاثیر دما بر ضریب پخش را مدل‌سازی نمودند. مقدار انرژی فعال‌سازی ( $E_a$ ) محاسبه شده از شیب معادله خطی برازش شده برای سرعت‌های  $0/5 \text{ m/s}$ ،  $1 \text{ m/s}$  و  $1/5 \text{ m/s}$  به ترتیب  $28/5 \text{ kJ mol}^{-1}$ ،  $31/5 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $21 \text{ kJ mol}^{-1}$  محاسبه گردید.

نهایتاً اینکه مقدار ضریب نفوذ موثر با افزایش دمای هوا از  $45^\circ\text{C}$  تا  $70^\circ\text{C}$  و سرعت هوا از  $0/5 \text{ m/s}$  تا  $1/5 \text{ m/s}$  به ترتیب به میزان  $2/08$  و  $1/32$  برابر افزایش یافت. نتایج نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین نفوذ موثر و درجه حرارت وجود دارد به این صورت که با افزایش دما، ضریب موثر نیز افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی برای برگ جعفری [۳۱] گزارش شده است.



**Table 3** Kinetic Modeling Reduction of Stevia leaf moisture content by weibull and logarithmic models

| m s <sup>-1</sup><br>Velocity | °C<br>Temperature | Weibull     |         |                |       | Logarithmic |                          |        |                |       |
|-------------------------------|-------------------|-------------|---------|----------------|-------|-------------|--------------------------|--------|----------------|-------|
|                               |                   | a,<br>min/% | b, min  | R <sup>2</sup> | RMSE  | A           | K1,<br>min <sup>-1</sup> | C      | R <sup>2</sup> | RMSE  |
| 0.5                           | 45                | 1.215       | 104.059 | 0.998          | 0.016 | 1.102       | -0.01                    | -0.033 | 0.996          | 0.023 |
|                               | 55                | 0.971       | 74.217  | 0.977          | 0.048 | 1.017       | -0.017                   | 0.031  | 0.991          | 0.031 |
|                               | 70                | 1.093       | 38.662  | 0.956          | 0.066 | 1.045       | -0.032                   | 0.016  | 0.979          | 0.047 |
| 1                             | 45                | 1.222       | 99.879  | 0.997          | 0.017 | 1.087       | -0.011                   | 0.002  | 0.991          | 0.032 |
|                               | 55                | 1.013       | 70.882  | 0.978          | 0.048 | 1.028       | 0.016                    | 0.007  | 0.988          | 0.036 |
|                               | 70                | 1.172       | 35.746  | 0.970          | 0.056 | 1.075       | -0.034                   | 0.003  | 0.982          | 0.045 |
| 1.5                           | 45                | 1.174       | 93.847  | 0.998          | 0.015 | 1.079       | -0.011                   | -0.016 | 0.996          | 0.023 |
|                               | 55                | 1.047       | 69.309  | 0.987          | 0.037 | 1.029       | -0.016                   | 0.008  | 0.989          | 0.035 |
|                               | 70                | 1.294       | 32.211  | 0.967          | 0.061 | 1.096       | -0.036                   | 0.014  | 0.972          | 0.057 |

**Table 4** Kinetic Modeling Reduction of Stevia leaf moisture content by Page and Peleg models

| m s <sup>-1</sup><br>Velocity | Temperature<br>°C | Page    |      |       |       | Peleg             |                   |       |       |
|-------------------------------|-------------------|---------|------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------|-------|
|                               |                   | K, s-n  | n    | R2    | RMSE  | K1,<br>%d.b.min-1 | K2,<br>%d.b.min-1 | R2    | RMSE  |
| 0.5                           | 45                | -0.0035 | 1.22 | 0.998 | 0.015 | 106.2             | 0.617             | 0.989 | 0.037 |
|                               | 55                | -0.0146 | 1.01 | 0.987 | 0.038 | 53.04             | 0.800             | 0.981 | 0.045 |
|                               | 70                | -0.0166 | 1.17 | 0.977 | 0.049 | 26.29             | 0.807             | 0.955 | 0.069 |
| 1                             | 45                | -0.0036 | 1.22 | 0.997 | 0.017 | 107.9             | 0.581             | 0.991 | 0.033 |
|                               | 55                | -0.0125 | 1.06 | 0.986 | 0.039 | 53.22             | 0.780             | 0.978 | 0.049 |
|                               | 70                | -0.0152 | 1.21 | 0.983 | 0.044 | 26.85             | 0.762             | 0.961 | 0.066 |
| 1.5                           | 45                | -0.0048 | 1.17 | 0.998 | 0.015 | 97.96             | 0.627             | 0.994 | 0.026 |
|                               | 55                | -0.0129 | 1.04 | 0.987 | 0.038 | 53.46             | 0.775             | 0.981 | 0.046 |
|                               | 70                | -0.0114 | 1.34 | 0.981 | 0.048 | 24.53             | 0.747             | 0.945 | 0.080 |

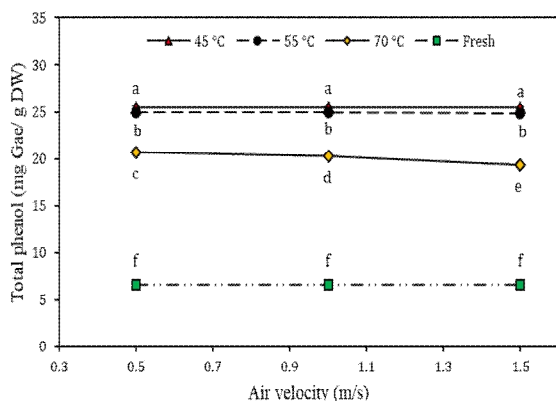
**Table 5** Kinetic modeling of reducing the moisture content of stevia leaves by Khazaie model

| m s <sup>-1</sup><br>Velocity | °C<br>Temperature | Khazaie model |                 |              |                     |       | R <sup>2</sup> | RMSE |
|-------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|--------------|---------------------|-------|----------------|------|
|                               |                   | MR0,<br>%d.b. | MRrel,<br>%d.b. | Trel,<br>min | Krel,<br>%d.b.min-1 |       |                |      |
| 0.5                           | 45                | 1.03          | -1.163          | 118          | 0.0549              | 0.995 | 0.024          |      |
|                               | 55                | 1.00          | -0.984          | 56           | 0.0326              | 0.991 | 0.032          |      |
|                               | 70                | 1.01          | -0.977          | 28           | 0.0315              | 0.976 | 0.050          |      |
| 1                             | 45                | 0.99          | -0.769          | 93           | -0.0011             | 0.992 | 0.032          |      |
|                               | 55                | 1.02          | -0.898          | 55           | -0.0003             | 0.985 | 0.040          |      |
|                               | 70                | 0.98          | -1.017          | 27           | 0.0425              | 0.979 | 0.048          |      |
| 1.5                           | 45                | 1.01          | -0.822          | 90           | -0.0008             | 0.996 | 0.023          |      |
|                               | 55                | 1.00          | -0.955          | 49           | -0.0001             | 0.987 | 0.038          |      |
|                               | 70                | 0.99          | -1.080          | 25           | 0.0837              | 0.973 | 0.056          |      |

پارامتر شکل (a) در مدل ویبول یک شاخص رفتاری بوده و وابسته به مکانیزم فرآیند می‌باشد. مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر روند کند فرآیند در فاز اولیه خود بودند. پارامتر میزان (b) در مدل ویبول یک پارامتر مهم بوده و مانند پارامتر Trel در مدل خزائی معرف مدت زمان لازم برای طی شدن تقریباً ۶۳٪ از فرآیند مورد نظر بود [۳۳]. ماکزیمم و مینیمم مقدار پارامتر Trel متعلق به حالت دمایی ۴۵ °C و سرعت هوای

مدل‌های ارائه شده عملکرد مطلوبی را در مدل‌سازی فرآیند کاهش نسبت رطوبت استویا داشتند ( $R^2 \geq 0.945$ ). مقایسه مقادیر خروجی  $R^2$  و RMSE برای پنج مدل ارائه شده نشان داد که مدل پیچ عملکرد مدل‌سازی بهتری نسبت به چهار مدل دیگر داشت. بهترین عملکرد را مدل پیچ برای مدل‌سازی سینتیک نسبت رطوبت در دما ۴۵ °C و سرعت ۰/۵ m/s از خود نشان داد ( $R^2 = 0.998$  و  $RMSE = 0.015$ ).

معناداری بر محتوای فنولیک کل برگ‌های استویا داشت ( $p \leq 0.01$ )، به این شکل که محتوای ترکیبات فنولیک کل محصول خشک شده در دمای  $70^\circ\text{C}$  کمتر از دو دمای  $55^\circ\text{C}$  و  $45^\circ\text{C}$  بود. تغییرات سرعت هوای ورودی بخصوص تاثیر معناداری بر محتوای ترکیبات فنولیک کل استویا در دمای  $70^\circ\text{C}$  داشت که روند افزایشی آن بخصوص در دمای  $70^\circ\text{C}$  باعث کاهش بیشتر ترکیبات فنولیک کل گردید ( $p \leq 0.01$ ).



**Fig 7** Changes in the content of total phenolic compounds of stevia leaves in the process of hot air drying

تاثیر معنادار دما بر محتوای فنولیک کل برگ‌های استویا احتمالاً به علت افزایش فعالیت آنزیم‌ها متناسب با زمان خشک شدن، و تجزیه پلی فنول‌ها می‌باشد. روش خشک کردن محصولات کشاورزی نقش بارزی در تعیین ویژگی‌های شیمیایی و حسی آن‌ها دارد. با این وجود، رسیدن به شرایطی که تمامی ویژگی‌های محصول در آن شرایط به طور مطلوب تامین شوند، مشکل است. اختلاف مقدار پلی فنل در دماهای مختلف خشک کردن، بیشتر به دلیل مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در معرض دما است [۳۷]. افزایش بیش از حد دما نه تنها باعث غیرفعال شدن پلی فنل اکسیدازها می‌شود، بلکه سبب تخریب ساختار ترکیبات پلی فنلی می‌گردد [۳۷].

لیم و مورتیجایا، (۲۰۰۷) گزارش نمودند که دمای بالا به دلیل تخریب زنجیره‌های فنلی و همچنین دیواره‌های سلولی موجب رها شدن و از بین رفتن ترکیبات فنل دار می‌شود [۳۸]. تحقیقات مشابهی به منظور بررسی اثر روش خشک کردن محصول و زمان نگهداری محصول بر محتوای ترکیبات فنولیک کل برای رزماری، پونه کوهی، مرزنجوش، سن، ریحان و آویشن و خرما گزارش شده است [۳، ۲۲]. در تمامی موارد،

$0.5\text{ m/s}$  و  $70^\circ\text{C}$  تعیین گردید (به ترتیب برابر ۱۱۸ و ۲۵ دقیقه). مقادیر متناظر برای فاکتور  $b$  برابر با  $1.04/0.059$  و  $32/211$  دقیقه محاسبه شد. در حالت کلی پارامترهای  $Trel$  و  $b$  بیانگر نرخ خشک شدن در فاز اولیه سنتیک خشک شدن استویا بودند. نتایج نشان داد با افزایش دما و سرعت هوای خشک کن به مقادیر  $70^\circ\text{C}$  و  $1.5\text{ m/s}$ ، مدت زمان جهت خشک کردن برگ استویا به میزان یک چهارم کاهش یافت. در نهایت مدل پیچ عملکرد مناسب تری در مدل‌سازی تغییرات نسبت رطوبت استویا در طی فرآیند خشک شدن در مقایسه با مدل‌های ویبول، لگاریتمی، خزائی و پلگ داشت.

ضریب نفوذ قویاً با دما و اغلب به صورت کم با رطوبت محصول در ارتباط می‌باشد. در مواد متخلخل حباب‌های موجود به صورت معناداری بر ضریب نفوذ تاثیر گذار می‌باشد. همچنین ساختار منافذ و توزیع آنان در سطح کل نمونه‌ها منجر به تاثیر بالاتری بر مقادیر ضریب نفوذ می‌گردند. وابستگی ضریب نفوذ به دما به راحتی از معادله آرنوس قابل دریافت می‌باشد. وابستگی مقدار ضریب نفوذ به رطوبت محصول را با وارد کردن یک فاکتور در معادله آرنوس به عنوان مقدار انرژی فعال سازی یا فاکتور آرنوس قابل بررسی می‌باشد [۳۲].

خزایی و همکاران، (۲۰۰۸) سنتیک خشک شدن برگ‌های آویشن تحت شرایط دمایی  $30^\circ\text{C}$ ،  $40^\circ\text{C}$  و  $50^\circ\text{C}$  و سرعت هوای خشک کن،  $0.5\text{ m/s}$ ،  $0.8\text{ m/s}$  و  $1.8\text{ m/s}$  را مدل‌سازی نمودند. نتایج حاکی از قابلیت بالای مدل پیچ در مدل‌سازی فرآیند در تمامی شرایط بود ( $R2 \geq 0.99$ ).  $\overline{X^2} < 0.0011$  و  $RMSE < 0.0301$  [۲۳]. از این مدل برای توضیح ویژگی‌های خشک کردن لایه نازک گیاه خرفه، بادنجان، ترخون، قطعات سرخدار توسط محققین دیگر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۳۴، ۳۵، ۳۶، ۱۸].

#### ۴-۴- تاثیر دما و سرعت هوای خشک کن بر

##### محتوای ترکیبات فنولیک کل استویا

نتایج حاصل از مقایسه میانگین تاثیر فاکتورهای دما و سرعت هوای خشک کن بر محتوای ترکیبات فنولیک کل برگ‌های استویا در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که خشک شدن برگ استویا باعث افزایش محتوای ترکیبات فنولیک کل آن ضمن از دست دادن آب در مقایسه با نمونه شاهد که برگ تازه استویا بود، گردید (شکل ۷). دما تاثیر

- and transplanting date on herbage, stevioside, phenol and flavonoid yield of *Stevia rebaudiana* Bertoni, *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 4. 298-302.
- [3] Hossain, M., Barry-Ryan, C., Martin-Diana, A.B., and Brunton, N. 2010. Effect of drying method on the antioxidant capacity of six Lamiaceae herbs, *Food Chemistry*. 123:85-91.
- [4] Šic Žlabur, J., Voća S., Dobričević N., Ežek D., Bosiljkov T., Brnčić M. 2013. *Stevia rebaudiana* Bertoni - A Review of Nutritional and Biochemical Properties of Natural Sweetener, *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 78:1. 25-30.
- [5] Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anjum, P., and Kour, H. 2013. Different drying methods: their applications and recent advances, *International Journal of Food Nutrition and Safety*. 4:1. 34-42.
- [6] Brennan, J.G., Herrera, J., and Jowitt, R. 1971. A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice, on a laboratory scale, *International Journal of Food Science & Technology*, 6. 295-307.
- [7] Tavakkoli Pour, A. 2001. Food drying, principles and methods. First Edition, Aige Publisher (Translated in Persian).
- [8] Omidbeigi, R. 2011. Production and processing of medicinal plants, Volume 1, Eighth Edition, Astan Qods Razavi Publications (Translated in Persian).
- [9] Bhuiyan, M.H.R., Alam, M. M., and Islam, M.N. 2011. The construction and testing of a combined solar and mechanical cabinet dryer, *Journal of Environmental Science and Natural Resources*. 4:2. 35-40.
- [10] Karami, H., Rasekh, M., and Darvishi, Y. 2017. Investigation of the effect of temperature and air displacement speed on drying kinetics and extraction efficiency of pune essential oil, *The journal of Innovative Food Technologies*, 5:1. 65-75 (In Persian).
- [11] Abbasi, K., Hasan Beigi, S. R. and Kianmehr. M.H. 2008. Mathematical model of hot-air saffron thin-film drying, 5th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization (In Persian).
- [12] Mousavian, H., and Basiri, Sh. 2008. Effects of temperature and air flow rate on industrial drying of thyme leaf species on quantities of essential oils, 18th National Congress of Food Science and Technology (In Persian).
- [13] Arora, S., Bharti, S., and Sehgal, V.K. 2006. Convective drying kinetics of red

روش خشک کردن با استفاده از هوای داغ تاثیر بالاتری بر کاهش محتوای ترکیبات فنولیک کل گیاهان مذکور در مقایسه با روش‌های خشک کردن با استفاده از آون خلاء و انجمادی داشت [۲۲،۳].

## ۵- نتیجه گیری

از آنجا که روش خشک کردن با خشک کن هوای داغ، مدت زمان لازم برای خشک کردن برگ استویا را کاهش و سرعت خشک کردن را افزایش داد، برای خشک کردن برگ استویا بسیار مؤثر بود. سرعت و دمای هوای ورودی خشک کن تاثیر قابل توجهی بر کاهش زمان خشک شدن و کاهش رطوبت برگ‌های استویا داشت به طوری که دما تقریباً ۶/۹ برابر نسبت به سرعت هوای ورودی خشک کن، تاثیر در کاهش زمان خشک شدن محصول داشت. افزایش دمای هوا از ۴۵ °C تا ۷۰ °C به میزان ۲/۲۶ برابر مقدار نرخ خشک شدن را افزایش داد. با توجه به هدف نهایی خشک کردن برگ استویا، به عنوان مثال استفاده از آن در صنعت غذا و داروسازی، بهره گیری از دما و سرعت‌های پایین خشک کن هوای داغ به لحاظ حفظ بهتر کیفیت محصول و اقتصادی بودن فرایند خشک کردن توصیه می‌شود، لذا استفاده از دمای ۴۵ °C و سرعت ۱ m/s برای خشک کردن استویا با کیفیت بالاتر و محتوی ترکیبات فنلی بالاتر توصیه می‌شود. همچنین مدل پیچ دارای عملکرد مناسب‌تری در مدل‌سازی تغییرات نسبت رطوبت استویا در طی فرایند خشک شدن در مقایسه با مدل‌های ریاضی اشاره شده داشت. بطور کلی در بین تیمارهای دمایی با دستگاه خشک کن، کیفی‌ترین حالت از نقطه نظر غلظت اغلب ترکیبات مؤثر، در دمای ۴۵ °C و سرعت ۱ m/s مشاهده شد. لذا پیشنهاد می‌شود در صورت ایجاد ضرورت برای خشک کردن مصنوعی نمونه‌های برگ، به ویژه در مناطق مرطوب، از دمای ۴۵ °C و سرعت ۱ m/s استفاده شود. به علاوه اینکه کاهش بیش از حد رطوبت منجر به کاهش کیفیت و کمیت محصول نهایی شده و هزینه خشک کردن نیز افزایش می‌یابد.

## ۶- منابع

- [1] Goyal, S. K., Samsher, Goyal R. K. 2010. *Stevia (Stevia rebaudiana) a bio-sweetener: a review*, *Intl J of Food Sciences and Nutrition*. 61:1. 1-10.
- [2] Taleie, N., Hamidoghli, Y., Rabiei, B., and Hamidoghli, S. 2012. Effects of plant density

- Biosystems Engineering. 47:3.57-53.61.
26. Doymaz, İ., Tugrul, N., and Pala, M. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves, *Journal of Food Engineering*. 77. 559-565.
- [27] Alibas I. 2006. Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying, *Drying Technology*. 24.1425-1435.
- [28] Kudra, T., and Mujumdar, A.S. 2009. *Advanced drying technologies*. CRC Press.
- [29] Falade, K.O., and Abbo, E.S. 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits, *Journal of Food Engineering*. 79. 724-730.
- [30] Abu-Ghannam, N., and McKenna, B. 1997. The application of peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering*. 32. 391-401.
- [31] Doymaz, İ., Tugrul, N., and Pala, M. 2006. Drying characteristics of dill and parsley leaves, *Journal of Food Engineering*. 77. 559-565.
- [32] Madamba, P.S., Driscoll, R.H., and Buckle, K.A. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of food engineering*. 29. 75-97.
33. Khazaei, J., and Daneshmandi, S. 2007. Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling, *International Agrophysics*. 21. 335.
- [34] Kashaninejad, M., and Tabil, L. 2004. Drying characteristics of purslane (*Portulaca oleraceae* L), *Drying Technology*. 22. 2183-2200.
- [35] Akpınar, E.K., and Bicer, Y. 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin layers, *International Journal of Food Science and Technology*. 40. 273-281.
- [36] Hansen, R.C., Keener, H.M., and ElSohly, H.N. 1993. Thin-layer drying of cultivated taxus clippings, *Transactions of the ASAE*. 36.1873-1877.
- [37] Heras-Ramírez, ME., Quintero-Ramos, A., Camacho-Dávila, A.A., Barnard, J., Talamás-Abbud, R., Torres-Muñoz, J.V., and Salas-Muñoz, E. 2012. Effect of blanching and drying temperature on polyphenolic compound stability and antioxidant capacity of apple pomace, *Food and Bioprocess Technology*. 5. 2201-2210.
- [38] Lim, Y., and Murtijaya, J. 2007. Antioxidant properties of phyllanthus amarus extracts as affected by different drying methods, *LWT-Food Science and Technology*. 40.1664-1669.
- chillies. *Drying Technology*. 24:2. 189-193.
- [14] Avhad, M.R., and Marchetti, J.M. 2016. Mathematical modelling of the drying kinetic of hass avocado seeds, *Industrial Crops and Products*. 91:30. 76-87.
- [15] Crank, J. 1979. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press.
- [16] Abu-Ghannam, N., and McKenna, B. 1997. The application of peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering*. 32. 391-401.
- [17] Toğrul, İ.T., Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*. 58. 23-32
- [18] Arabhosseini, A., Huisman, W., Van Boxtel, A., and Müller, J. 2009. Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.), *Industrial crops and products*. 29.53-59.
- [19] Yousefi, A., Ghasemian, N., and Salari, A. 2017, Modeling the drying kinetics of sour lemon slices by infrared radiation using hybrid GMDH neural networks. *The journal of Innovative Food Technologies*, 1:1. 91-105 (In Persian).
- [20] Jafari Azan Akhari, P. and Azadeh Ghahfarkhi, Z. 2017. Investigation of some drying factors on the properties of medicinal plants, 8th National Conference on Medicinal Plants and Sustainable Agriculture (In Persian).
- [21] Meda, A., Lamien, C.E., Romito, M., Millogo, J., and Nacoulma, O.G. 2005. Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in burkina fasan honey, as well as their radical scavenging activity, *Food chemistry*. 91. 571-577.
- [22] Shahdadi, F., Mirzaei, H., Maghsoudlou, I., and Ghorbani, M. 2011. Effect of drying process on the amount of phenolic compounds and antioxidant activity of two date cultivars of Clute and Mazafati (*Phoenixductylifera*). *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Nutrition*, 6: 3. 67-74 (In Persian).
- [23] Duncan, D.B. 1955. Multiple range and multiple F tests, *Biometrics*. 11.1-42.
- [24] Park, K.J., Vohnikova, Z., and Brod, F.P.R. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.), *Journal of Food Engineering*, 51.193-199.
- [25] Tanko, H., Carrier, D., Sokhansanj, S., and Crowe, T. 2005. Drying of feverfew (*Tanacetum parthenium* L.), *Canadian*



## Effect of temperature and speed of air dryer on drying kinetic and phenolic compounds of stevia leaf

Nateghi, L. <sup>1\*</sup>

1. Associate professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Varamin-Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2021/ 03/ 02

Accepted 2021/ 04/ 21

#### Keywords:

Drying Stevia,  
Mathematical modeling,  
Phenol content.

**DOI: 10.29252/fsct.18.06.21**

\*Corresponding Author E-Mail:  
[leylanatheghi@iauvaramin.ac.ir](mailto:leylanatheghi@iauvaramin.ac.ir)

### ABSTRACT

Stevia is a seasonal herb that contains high levels of phenolic and sugar compounds called *stevioside rhabadiosid*. Due to the seasonality of this plant, the most suitable method for making it available is using drying methods. Choosing the proper method of plant drying is one of the most important issues in post-harvest operation. Using inappropriate methods can result in the loss of plant organs or the loss of all the effective substances in it. The main objective of this study was to evaluate the effect of temperature and velocity of dryer on drying process, total phenolic compounds and kinetic modeling of stevia leaf drying. For this purpose, air temperature was measured at three levels (45 °C, 55 °C, 70 °C) and air velocity at three levels (0.5 m/s, 1 m/s and 1.5 m/s) for drying Stevia leaves were used. In this research, five models of Pelge math, Weibull, Logarithmic, Page and Khazaei models were used to model the results of stevia leaf drying process. The results showed that the proposed experimental models had a desirable performance in the modeling of the stevia moisture reduction process ( $R^2 \geq 0.945$ ). By comparing the output values of  $R^2$  and Root Mean Square Error (RMSE) for the models presented, the Page model had better modeling performance than the other four models. In addition, the results showed that in the drying process, the most important factor in controlling the stevia leaf drying rate was the air temperature. Also, the drying time of stevia leaves decreased with increasing temperature and speed of air drying. Dryer temperature has a significant effect on the content of total phenolic compounds. As the air temperature raised from 45 °C to 70 °C, the amount of phenolic compounds of the stevia leaf decreased. The best air temperature and velocity was maintained to maintain the static fiber phenolic compounds at 45 °C and 1 m/s.