

## بررسی سینتیک خشک‌شدن، ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی در فرآیند خشک‌کردن فندق با پوست

زهرا یوسفی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا گازر<sup>۲</sup>، کبری تجدد طلب<sup>۳</sup>، عادل واحدی<sup>۴</sup> و محمد حسین انصاری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۵

<sup>۱</sup> استادیار گروه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت

<sup>۲</sup> دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

<sup>۳</sup> استادیار موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت

<sup>۴</sup> استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

<sup>۵</sup> استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت

\*مسئول مکاتبه: Email: Zahra.yousef@gmail.com

### چکیده

هدف از انجام تحقیق مذکور، بررسی سینتیک خشک‌شدن فندق با پوست (*corylus avellana*) در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  بود که علاوه بر ترسیم منحنی تغییرات رطوبت در دماهای مختلف و مدلسازی فرایند خشک‌شدن، ضریب نفوذ موثر، انرژی فعال‌سازی، انرژی کل و انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن فندق با پوست، بصورت تک‌لایه، محاسبه شد. نتایج بررسی داده‌ها نشان داد که مدت زمان خشک‌شدن در دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ، نسبت به دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب،  $42/42\%$  و  $20\%$  درصد کمتر بود. در مدلسازی فرایند خشک‌کردن فندق، مدل میدیلی و همکاران در سه دمای خشک‌کردن، نسبت به سایر مدل‌ها، بهترین برازش را با داده‌های آزمایش داشت. همچنین مقدار ضریب پخش موثر در نمونه‌های خشک‌شده فندق در دماهای مختلف بین  $10^{-10}$  تا  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $29/622 \text{ KJ/kg.mol}$  و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $10^{-10}$  تا  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  بدست آمد.

### واژگان کلیدی: سینتیک خشک‌کردن، فندق، مدلسازی

### مقدمه

بسیار قدیم متداول بوده است به طوری که پیدایش آن را از نظر گیاهشناسی به عصر نئولیتیک زمین‌شناسی نسبت می‌دهند، ولی تاریخ دقیق آن مشخص نیست (الفتی ۱۳۷۴). تولید جهانی فندق در سال ۲۰۱۲، بالغ بر ۹۰۰ هزار تن بود که کشور ترکیه با تولید ۶۶۰ هزار تن،

فندق (*Corylus avellana*) درخت بومی اروپا، آسیای صغیر، قفقاز و ایران است که از زمان‌های بسیار قدیم در کوه‌های زاگرس به صورت خودرو و وحشی وجود داشته است. کشت درخت فندق در ایران، از زمان‌های

بیشترین میزان تولید را در بین کشورهای جهان در این سال داشت. سطح زیر کشت فندق در ایران در سال ۲۰۱۲، ۲۱۰۰۰ هکتار و متوسط تولید آن بین سالهای ۲۰۱۲-۲۰۰۸ نیز، ۲۰۸۳۲/۸ تن بود (فائو ۲۰۱۴).

برای حفظ کیفیت فندق، همانند سایر محصولات خشکبار، پس از برداشت باید فرآوری شود. به این ترتیب عمر انبارمانی مناسبی خواهد داشت. خشک کردن، یکی از مهمترین مراحل فرآوری فندق است. فندق با پوست در زمان برداشت دارای رطوبت ۲۵ تا ۳۵ درصد بر پایه وزن خشک می‌باشد که برای حفظ کیفیت و انبارمانی فندق، رطوبت آن باید به ۴ تا ۵ درصد بر پایه خشک برسد (لوپز و همکاران ۱۹۹۸). انرژی مورد نیاز برای خشک کردن فندق، در دماهای مختلف هوا متفاوت است. تعیین مناسب‌ترین دما، با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای خشک کردن و کیفیت محصول نهایی، موجب صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در انرژی مورد نیاز خواهد شد.

ضریب نفوذ رطوبت، یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و مقدار آن بستگی به شرایط داخل ماده دارد. نفوذ رطوبت موثر، همه مکانیزم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده، مانند نفوذ مایع، نفوذ بخار، نفوذ سطحی، جریان مویینیگی و جریان هیدرودینامیکی را توصیف می‌کند. حرکت رطوبت که شامل نفوذ رطوبت در ماده جامد می‌باشد، دارای پروسه پیچیده‌ای است. شناخت نفوذ رطوبت موثر برای طراحی و مدل سازی پروسه انتقال جرم، مثل آب‌زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، ضروری است (رفیعی ۲۰۰۸).

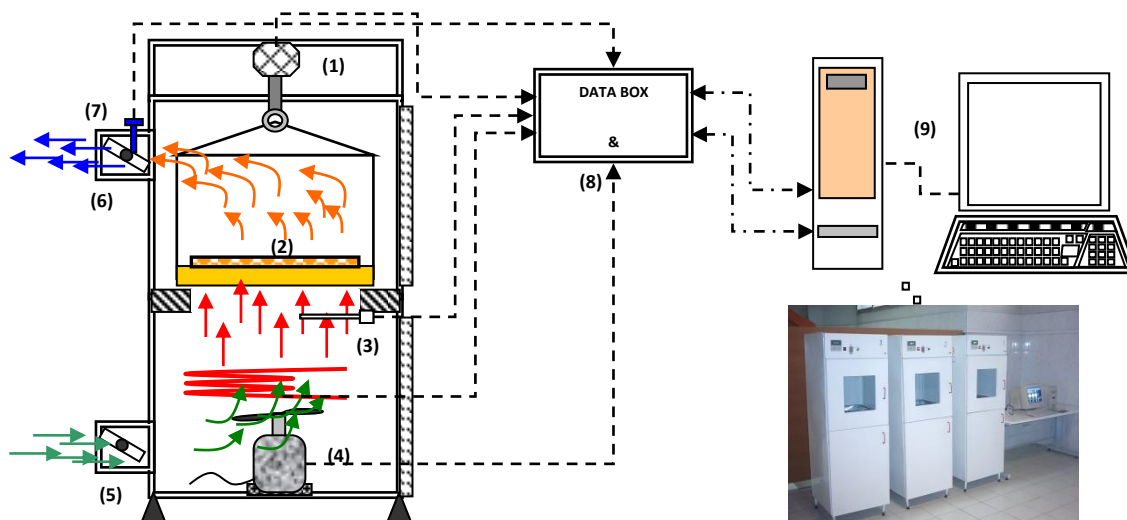
محمد پور کاریزکی و همکاران (۱۳۸۶)، برای تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت در پسته، از یک خشک‌کن بستر سیال ناپیوسته آزمایشگاهی استفاده کردند. در این تحقیق از چهار سطح دمای هوا ( $25^{\circ}\text{C}$ ،  $30^{\circ}\text{C}$ ،  $45^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$ ) و سه سطح سرعت هوای ورودی ( $6\text{ m/s}$ ،  $8\text{ m/s}$  و  $10\text{ m/s}$ ) استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که ضریب نفوذ

موثر رطوبت در پسته، با توجه به دما و سرعت هوای ورودی از  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $7.02 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  متغیر بود. لوپز و همکاران (۱۹۹۸)، فندق رقم نگرت را به صورت با پوست، در شش سطح دمای هوا ( $30^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $70^{\circ}\text{C}$  و  $80^{\circ}\text{C}$ )، بصورت لایه نازک خشک کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه‌های خشک شده، در محدوده دمای بین  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $80^{\circ}\text{C}$ ، از  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $1.48 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  تغییر می‌کند. همچنین انرژی فعال‌سازی،  $29/19\text{ KJ/mol}$  و ثابت ضریب نفوذ نیز  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  بدست آمد. توکلی پور و همکاران (۱۳۸۷)، ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی خشک کردن پسته رقم عباسعلی را در دماهای  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  و سرعت جابجایی هوا با  $1\text{ m/s}$  و ضخامت بستر تک‌لایه، تعیین کردند. بر اساس نتایج مطالعه مذکور، ضریب نفوذ موثر پسته، در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $70^{\circ}\text{C}$ ، از  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $7.06 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  متغیر بود. انرژی فعال‌سازی فرآیند خشک کردن نیز برابر با  $7/962\text{ KJ/mol}$  بدست آمد. کاراتاس و باتالبی (۱۹۹۱) ضریب نفوذ پسته رقم قاضی آنتب را در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$ ، از  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $3/15 \times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  بیان کردند. انرژی فعال‌سازی مغز پسته در این تحقیق،  $8/985\text{ kcal/mol}$  محاسبه شد. آغباشلو و همکاران (۱۳۸۷)، ویژگی‌های خشک شدن گردو را بر حسب تابعی از دما ( $32^{\circ}\text{C}$  و  $43^{\circ}\text{C}$ )، سرعت هوا ( $1\text{ m/s}$  و  $3\text{ m/s}$ ) و رقم (سر، پدرو،  $k82$  و  $z67$ ) تعیین کردند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که مدل  $\text{page}$ ، بهترین مدل برای نشان دادن منحنی خشک شدن گردو است. متغیرهای مورد مطالعه تاثیر معنی‌داری بر روی زمان خشک شدن و ثابت‌های مدل مذکور داشت و ضریب نفوذ موثر در محدوده دمایی  $32^{\circ}\text{C}$  و  $43^{\circ}\text{C}$ ، از  $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$  تا  $3/54 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$  تغییر کرد. استان گیلان با داشتن ۱۴۸۵۹ هکتار، بیشترین سطح زیر کشت فندق را در کشور دارد (بی نام ۱۳۹۲). رقم غالب فندق در این استان، گرد می‌باشد. تاکنون سینیتیک خشک شدن این رقم مطالعه نشده است.

هدف از انجام تحقیق مذکور، بررسی سینتیک خشک‌شدن فندق با پوست رقم گرد در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  بود که علاوه بر ارائه منحنی تغییرات رطوبت در دماهای مختلف و مدل سازی فرآیند خشک‌شدن، محاسبه ضریب نفوذ موثر، انرژی فعال‌سازی، انرژی کل و انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن فندق با پوست، بصورت تک‌لایه، ارائه شده است.

### مواد و روش‌ها آماده سازی نمونه‌ها

فندق رقم گرد از باغات منطقه اشگورات در مرداد ماه سال ۱۳۹۲، برداشت شد. میوه‌های پوک، ترک‌خورده و دارای نشانه‌های آفت و بیماری جدا شدند. سپس میوه‌ها در پلاستیک در بسته ریخته شد و در شرایط رطوبتی و دمایی کنترل‌شده، به محل آزمایشگاه منتقل گردید. رطوبت اولیه نمونه‌های آزمایش به وسیله آون در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶ ساعت اندازه‌گیری شد (بی نام ۱۹۸۹). برای هر نمونه آزمایشی حدود  $1500$  گرم فندق تازه در نظر گرفته‌شد. سپس نمونه‌ها بوسیله یک دستگاه خشک‌کن آزمایشگاهی و بصورت لایه‌نازک خشک‌شدند. این خشک‌کن دارای سه واحد می باشد که هر سه واحد بطور همزمان کار می‌کنند (شکل ۱).



(۱) لودسل، (۲) سینی حاوی نمونه، (۳) حسگر هوای ورودی به محصول، (۴) موتور DC، (۵) دریچه هوای ورودی، (۶) دریچه هوای خروجی، (۷) حسگر دمای هوای خروجی، (۸) کارت اخذ اطلاعات و کنترل کننده (۹) کامپیوتر

شکل ۱- شماتیک خشک‌کن مورد استفاده در تحقیق

K با دقت  $1^{\circ}\text{C}$  که در زیر محل قرارگیری محصول واقع شده‌بود، اندازه گیری گردید. دمای خروجی نیز بوسیله دماسنج pt100 که در محل هوای خروجی قرار داشت، با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$ ، اندازه‌گیری شد. همچنین تغییرات وزن با استفاده از ترازوی ۲۰ کیلوگرمی و با دقت ۱ گرم

دماهای خشک‌کردن فندق شامل  $40^{\circ}\text{C}$ ،  $50^{\circ}\text{C}$  و  $60^{\circ}\text{C}$  و سرعت جابجایی هوای گرم  $1\text{ m/s}$  در نظر گرفته شد. در خشک‌کن مورد استفاده در تحقیق دو دماسنج تغییرات دمای ورودی و خروجی را ثبت می‌کردند. دمای ورودی به وسیله دماسنج دیجیتال آتین مدل AT400-

انجام شده برای مدل‌سازی فرایند خشک‌شدن از معادله ۱ با عنوان نسبت رطوبت استفاده شد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad [1]$$

که در این رابطه:

MR = نسبت رطوبت ( بدون بعد)

Mt = رطوبت در لحظه t (kg/kg, d.b)

Me = رطوبت تعادلی (kg/kg, d.b)

Mo = رطوبت اولیه (kg/kg, d.b) می باشد (فد و ابو ۲۰۰۷؛ آکپیتار و همکاران ۲۰۰۳؛ دویماز ۲۰۰۷). بدلیل تغییرات موجود در رطوبت نسبی هوای داخل خشک‌کن مشابه با تحقیقات دیگر از مقدار Me در رابطه نسبت رطوبت صرف‌نظر می‌شود و معادله بصورت رابطه ۲ در نظر گرفته می‌شود (گویال و همکاران ۲۰۰۷ و دویماز ۲۰۰۷).

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad [2]$$

به منظور مدل‌سازی نسبت رطوبت (MR) فندق در فرایند خشک‌شدن بصورت تک‌لایه، از مدل‌های شناخته شده که کاربرد زیادی در خشک‌کردن محصولات مختلف کشاورزی دارند به شرح جدول ۱ استفاده شد (آکپینار و همکاران ۲۰۰۳؛ آکپینار و بیسار ۲۰۰۶؛ دویماز ۲۰۰۷).

ثبت و بصورت خودکار، توسط سیستم جمع‌آوری داده‌ها، در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای از خشک‌کن به کامپیوتر منتقل می‌شد. ثبت وزن، تا وقتی که ادامه داشت که رقم ثبت شده، سه بار پی در پی ثابت شود. سرعت جابجایی هوای گرم در خروجی هوای خشک‌کن‌ها با استفاده از یک بادسنج سیم داغ، اندازه‌گیری و تنظیمات لازم به وسیله کاهنده دور فن اعمال شد. بادسنج مورد استفاده با مدل ۴۲۵، ساخت شرکت تستو آلمان و حساسیت به دمای  $0.1^\circ\text{C}$  بود. پس از خشک‌کردن فندق‌ها، نمونه‌های مربوط به هر کدام از دستگاه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی مخصوصی از جنس پلی اتیلن ریخته شد. برای جلوگیری از تبادل رطوبتی با محیط اطراف، درب کیسه‌ها با دستگاه دوخت مخصوصی، دوخته شد. رطوبت نهایی نمونه‌های فندق بوسیله دستگاه آون و به روشی که در بالا ذکر شد، اندازه‌گیری گردید.

#### مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن

در این تحقیق علاوه بر دستیابی به منحنی‌های تغییرات رطوبت و سینتیک خشک‌شدن، مدل‌سازی مربوطه برای فندق در دماهای مختلف خشک‌شدن و مدت زمان لازم برای رسیدن به رطوبت مورد نظر (محدوده ۵ تا ۶ درصد بر پایه خشک) بررسی شد (ترحان و همکاران ۲۰۰۶ و دویماز ۲۰۰۷). مشابه با بسیاری از تحقیقات

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده در خشک‌شدن لایه نازک فندق

| نام مدل                     | معادله *                              |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| Newton (NM)                 | $MR = \exp(-kt)$                      |
| Page (PM)                   | $MR = \exp(-ktn)$                     |
| Henderson and Pabis (HPM)   | $MR = a \exp(-kt)$                    |
| Two term exponential (TEM)  | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$ |
| Approximate Diffusion (ADM) | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$ |
| Logarithmic (LM)            | $MR = a \exp(-kt) + b$                |
| Midilli et al. (MDM)        | $MR = a \exp(-ktn) + bt$              |

\* MR: نسبت رطوبت، t: زمان (دقیقه)، a، b، n، و k ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند.

متوسط مربع خطای داده‌ها (RMSE) به شرح رابطه ۳ و ۴ برای سنجش بهترین مدل استفاده شد. برای ارزیابی مدل‌سازی، هرچه مقدار  $R^2$  بیشتر و شاخص‌های  $\chi^2$  و

مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی فرایند خشک‌شدن، براساس متغیر مستقل زمان، حل و از سه معیار ضریب تبیین  $R^2$ ، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه

در این رابطه:  $d_g$  = قطر میانگین فندق (m)  $a$  = قطر بزرگ فندق (m)  $b$  = قطر متوسط فندق (m)  $c$  = قطر کوچک فندق (m)

پس از محاسبه شعاع هندسی، ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق ( $D_{eff}$ ) از حل معادله فیک برای اجسام کروی شکل به شرح رابطه ۶ بدست آمد (فلد و ابو ۲۰۰۷؛ موجودمدار آرون ۲۰۰۰؛ دویماز ۲۰۰۷).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right] \quad [۶]$$

در این معادله:  $MR$  = نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  = رطوبت در لحظه  $t$  (kg/kg, d.b)،  $M_e$  = رطوبت تعادلی (kg/kg, d.b)،  $M_o$  = رطوبت اولیه (kg/kg, d.b)،  $D_{eff}$  = ضریب نفوذ موثر ( $m^2/s$ )  $t$  = زمان (s)،  $r$  = شعاع کره (m).

با استفاده از ضریب زاویه خط ترسیم شده داده‌های لگاریتم رطوبت نسبی بر حسب زمان (ثانیه) و شعاع میانگین هر میوه که در رابطه ۷ بیان شده است، ضریب نفوذ موثر ( $D_{eff}$ ) مربوطه بدست می‌آید.

$$\ln MR = \ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \ln \frac{6}{\pi^2} - \left[ \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \right] t \quad [۷]$$

با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی رطوبت از رابطه آرنیوس (رابطه ۸) استفاده شد (فلد و ابو ۲۰۰۷ و موجودمدار آرون ۲۰۰۰).

$$D_{eff} = D_o \exp \frac{-E_a}{RT} \quad [۸]$$

در این رابطه:  $D_{eff}$  = ضریب نفوذ موثر ( $m^2/s$ )،  $D_o$  = ضریب نفوذ در دمای مبنا ( $m^2/s$ )  $E_a$  = انرژی فعال سازی (kJ/kg.mol)،  $R$  = ثابت جهانی گازها (8.314 J/mol.K)،  $T$  = دما (K)

با استفاده از ضریب زاویه خط ترسیم شده داده‌های لگاریتم ضریب نفوذ موثر بر حسب  $T^{-1}$  (کلوین) که در

$RMSE$  کمتر باشند مدل مورد استفاده کارایی بهتری در تخمین فرایند دارد (آکپینار و بیسار ۲۰۰۶ و دویماز ۲۰۰۷).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad [۳]$$

[۴]

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2}$$

در معادلات بالا،  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت فندق مشاهده شده در  $i$  امین اندازه‌گیری،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت فندق پیش‌بینی شده از مدل در  $i$  امین اندازه‌گیری،  $n$  تعداد مشاهدات (داده‌ها) و  $N$  تعداد ثابتهای بکار رفته در معادله است.

مقدار ضرایب و ثابت‌های مدل‌های مورد آزمون در شرایط مختلف آزمایش به روش رگرسیون محاسبه گردید و برای هر مدل، با توجه به مقادیر مختلف ضرایب و ثابت‌ها، ضرایب و ثابت‌ها براساس متغیر مستقل دما بدست آمد در نهایت رگرسیون چندگانه برای هر مدل استخراج شده و براساس شاخص‌های ارزیابی، مدل مناسب معرفی شد (آکپینار و بیسار ۲۰۰۶).

اندازه‌گیری ضریب نفوذ رطوبت در فندق و انرژی فعال سازی

با استفاده کولیس ورنیه با دقت ۰/۰۱ mm برای هر کدام از تیمارهای آزمایش در ۱۰ تکرار، سه بعد  $a$ ،  $b$ ،  $c$  میوه فندق در دو حالت تازه و خشک شده اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه ۵، متوسط قطر و شعاع میانگین فندق برای هر تیمار بدست آمد (محسنین ۱۹۷۰).

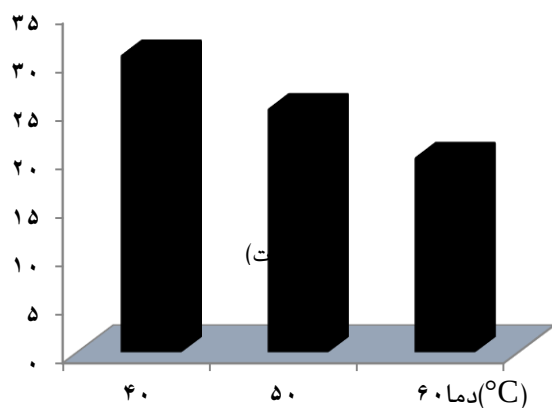
$$d_g = (a.b.c)^{\frac{1}{3}} \quad [۵]$$

باعث می‌شود رطوبت میان بافتی با آهنگ و سرعت بیشتری در زمان کمتری تبخیر شود.

جدول ۲- تجزیه واریانس زمان خشک‌شدن فندق

| منبع تغییرات | درجه آزادی | میانگین مربعات MS |
|--------------|------------|-------------------|
| دما          | ۲          | ۸۲/۷۵**           |
| خطا          | ۶          | ۱/۲۵              |
| CV%          |            | ۴/۴۴              |

\*\* نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۱ است.



شکل ۲- زمان خشک‌شدن فندق در دماهای مختلف

شکل ۳، تغییرات درصد رطوبت فندق بر اساس وزن خشک، در زمان را برای دماهای مختلف نشان می‌دهد. در فرآیند خشک‌شدن فندق، ابتدا رطوبت از پوست فندق جدا می‌شود که این مرحله سریع اتفاق می‌افتد و شیب نمودار درصد رطوبت برای هر سه دما در این مرحله زیاد است. در ۸ ساعت اول فرایند خشک‌شدن، نمونه‌هایی که در دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C خشک‌شدند، به ترتیب ۵۷، ۶۵ و ۷۷ درصد رطوبت خود را از دست دادند. در این مدت زمان، شیب نمودار درصد رطوبت، سرعت نزولی داشت. پس از گذشت مراحل اولیه فرایند و خشک‌شدن پوست، انتقال رطوبت از مغز فندق انجام می‌گیرد که این مرحله، بدلیل رطوبت پایین مغز و سخت بودن تبخیر آب از آن، به کندی انجام می‌شود و شیب

رابطه ۹ بیان شده است، انرژی فعالسازی مورد نظر بدست می‌آید.

$$\ln Deff = \ln D0 - \frac{Ea}{RT} \quad [9]$$

### انرژی فرایند خشک‌کردن

برای محاسبه انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن هر یک کیلوگرم فندق در هر تیمار، ابتدا با استفاده از یک آمپر متر مقدار جریان عبوری از سیستم را در زمان روشن بودن هیتر اندازه‌گیری شد و با در نظر گرفتن زمان‌های فعال بودن هیتر در محدوده زمانی خشک‌کردن، مقدار کار الکتریکی بر حسب کیلو وات ساعت از رابطه ۱۰ بدست آمد (بدیعی ۱۳۷۱).

$$W = V \times I \times h \quad [10]$$

در این رابطه:  $W$  = کار الکتریکی (KWh)،  $V$  = ولتاژ برق شهر (V)،  $I$  = شدت جریان الکتریکی (A)،  $h$  = زمان (h) برای اندازه‌گیری کار الکتریکی فن در خشک‌کن نیز از رابطه ۱۰ استفاده شد. ابتدا شدت جریان مصرفی اندازه‌گیری گردید. زمان در نظر گرفته شده در فرمول نیز مدت زمان روشن بودن فن (زمان خشک‌شدن هر تیمار) می‌باشد. کار الکتریکی برای هر تیمار از مجموع دو کار ذکر شده بدست آمد. پس از آن مقدار انرژی مصرفی برای هر کدام از تیمارها محاسبه شد. با توجه به مقدار وزن اولیه فندق و وزن آب تبخیر شده در هر تیمار، مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلو گرم فندق برحسب (KWh/KgH<sub>2</sub>O) بدست آمد (شارما و پراساد ۲۰۰۶).

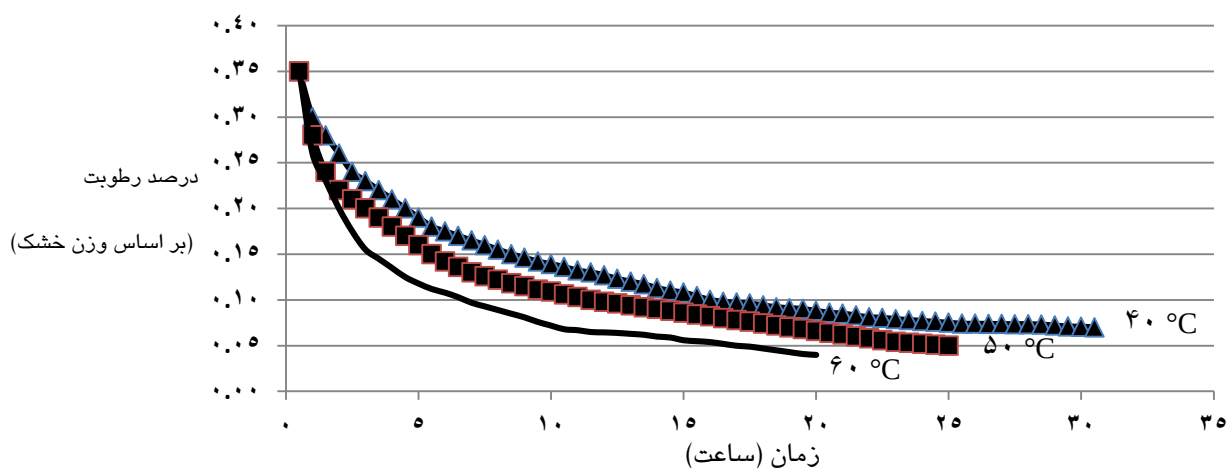
### نتایج و بحث

سینتیک خشک‌شدن فندق: مطابق جدول ۲، مقدار دما بر زمان خشک‌شدن فندق در سطح ۱ درصد تاثیر معنی‌داری داشت. مدت زمان خشک‌شدن در دمای ۶۰ °C نسبت به دمای ۴۰ و ۵۰ °C، به ترتیب، ۳۴/۴۲ و ۲۰ درصد کمتر بود (شکل ۲). با افزایش دمای هوای ورودی، انرژی گرمایی بیشتری به بافت فندق وارد می‌شود و

### مدل سازی فرایند خشک کردن

نتایج مدل سازی فرایند خشک کردن فندق و شاخص های ارزیابی مدل ها در دماهای مختلف، در جدول ۳ نشان داده شده است. بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) و حداقل مقادیر  $\chi^2$  و RMSE باشد. با توجه به جدول ارائه شده، مدل میدیلی و همکاران (MDM)، بهترین برازش را با داده های دماهای مختلف دارد. سپس مدل لگاریتمی (LM)، در سه دمای مختلف برازش مناسبی داشته و می تواند مدل دوم برای بررسی سینتیک خشک شدن فندق پیشنهاد شود. جدول ۴ ضرایب بدست آمده این دو مدل در دماهای آزمایش را نشان می دهد.

نمودارها برای هر سه دما کمتر است. رطوبت اولیه نمونه ها، ۳۵ درصد بر پایه وزن خشک بود که پس از خشک شدن، در دمای  $60^\circ\text{C}$  به ۴ درصد و در دماهای  $50^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$  به ترتیب به ۷ و ۵ درصد بر پایه وزن خشک رسید که رطوبت تعادلی آنها محسوب می شود. همانطور که در شکل شماره ۳ مشخص است، نمودار دماهای مختلف پس از رسیدن به درصد رطوبت های مذکور، تقریباً به حالت افقی در می آید.



شکل ۳- تغییرات درصد رطوبت فندق در دماهای مختلف خشک کردن

جدول ۳- نتایج آماری حاصل از برازش داده های آزمایشی با مدل های ریاضی

| $60^\circ\text{C}$ |          |        | $50^\circ\text{C}$ |          |        | $40^\circ\text{C}$ |          |        | نام مدل                     |
|--------------------|----------|--------|--------------------|----------|--------|--------------------|----------|--------|-----------------------------|
| RMSE               | $\chi^2$ | $R^2$  | RMSE               | $\chi^2$ | $R^2$  | RMSE               | $\chi^2$ | $R^2$  |                             |
| ۰/۰۰۶۰۹            | ۰/۰۱۴۲   | ۰/۸۹۱۹ | ۰/۰۰۴۸             | ۰/۰۱۰۶   | ۰/۹۳۴  | ۰/۰۰۲۹۵            | ۰/۰۰۷۷   | ۰/۹۳۴  | Newton (NM)                 |
| ۰/۰۰۶۴۱            | ۰/۰۱۲۸۲  | ۰/۹۰۱۲ | ۰/۰۰۰۵             | ۰/۰۰۹۲۲  | ۰/۹۶۶۹ | ۰/۰۰۳۵۴            | ۰/۰۰۶۳۲  | ۰/۴۶۶۹ | Page (PM)                   |
| ۰/۰۰۸۳۲            | ۰/۰۱۲۷۹  | ۰/۹۳۴۱ | ۰/۰۰۳۲             | ۰/۰۰۹۱۹  | ۰/۹۴۸  | ۰/۰۰۴۱۴            | ۰/۰۰۶۲۹  | ۰/۹۴۸  | Henderson and Pabis (HPM)   |
| ۰/۰۰۷۳             | ۰/۰۱۲۸۶  | ۰/۹۴۳۱ | ۰/۰۰۰۸             | ۰/۰۰۹۲۶  | ۰/۹۸۰۴ | ۰/۰۰۵۵۴            | ۰/۰۰۶۳۶  | ۰/۹۸۰۴ | Two term exponential (TEM)  |
| ۰/۰۰۶۴             | ۰/۰۱۲۶۶  | ۰/۹۶۱۸ | ۰/۰۰۳۴             | ۰/۰۰۹۰۶  | ۰/۹۸۱۷ | ۰/۰۰۲۳             | ۰/۰۰۶۱۶  | ۰/۹۸۱۷ | Approximate Diffusion (ADM) |
| ۰/۰۰۶۷             | ۰/۰۱۲۴۵  | ۰/۹۶۸۵ | ۰/۰۰۶۱             | ۰/۰۰۸۸۵  | ۰/۹۸۹  | ۰/۰۰۰۹             | ۰/۰۰۵۹۵  | ۰/۹۸۹  | Logarithmic (LM)            |
| ۰/۰۰۱۳             | ۰/۰۰۶۱۴  | ۰/۹۷۵  | ۰/۰۰۰۷             | ۰/۰۰۶۵۷  | ۰/۹۹۴  | ۰/۰۰۰۳             | ۰/۰۰۵۶۴  | ۰/۹۹۴  | Midili et al. (MDM)         |

جدول ۴- ضرایب مدل‌های میدیلی و همکاران و لگاریتمی در خشک‌کردن فندق

| دما<br>(°C) | مدل میدیلی و همکاران (MDM) |       |         |      | مدل لگاریتمی (LM) |        |        |
|-------------|----------------------------|-------|---------|------|-------------------|--------|--------|
|             | b                          | a     | n       | k    | b                 | a      | k      |
| ۴۰          | ۰/۰۲۳۲                     | ۰/۶۰۹ | -۰/۲۳۸۵ | ۷/۳۷ | ۰/۰۶۴۹            | -۱/۰۳  | ۰/۰۲۳۲ |
| ۵۰          | ۰/۰۴۳۱                     | ۱/۳۰۴ | -۱/۴۴۹  | ۱/۱۸ | ۰/۰۳۴۲            | -۰/۸۰۴ | ۰/۰۵۴۳ |
| ۶۰          | ۰/۰۱۸۱                     | ۱/۰۳۲ | -۱/۷۷۹  | ۱/۷۶ | ۰/۰۱۴۳            | -۱/۴۳۲ | ۰/۰۶۵۸ |

## تعیین ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی

شعاع میانگین فندق، برای هر کدام از تیمارهای آزمایش، قبل و بعد از خشک‌شدن، محاسبه شد. نسبت رطوبت (MR) نیز در طول خشک شده تیمارها، با استفاده از وزن‌های ثبت شده دستگاه خشک‌کن بدست آمد. ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق، از شیب نمودار  $(T - \ln(MR))$ ، که در شکل ۴ نشان داده شده است، بر اساس معادله ۲ محاسبه شد. مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای مختلف بین  $10^{-10}$  تا  $10^{-11}$   $m^2/s$  تغییر کرد (جدول ۵). با افزایش دما، ضریب نفوذ موثر نیز افزایش می‌یابد (طاهری گراوند ۱۳۸۹؛ گازر و همکاران ۱۳۹۲؛ موسیگا و اولوال ۲۰۰۵؛ آغباشلو و همکاران ۲۰۰۸؛ لویز همکاران ۱۹۹۸). مقدار ضریب نفوذ مربوط به دمای  $^{\circ}C$  ۶۰، ۲۳ درصد بیشتر از دمای  $^{\circ}C$  ۵۰ و ضریب نفوذ دمای  $^{\circ}C$  ۵۰، ۳۳ درصد بیشتر از دمای  $^{\circ}C$  ۴۰ بود. بطور کلی، میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت برای مواد غذایی در محدوده  $10^{-9}$  تا  $10^{-11}$  تغییر می‌کند. دانستن ضریب نفوذ رطوبت برای طراحی فرآیند، کنترل کیفی، مسائل مربوط به انبار کردن و چگونگی جابجایی مناسب محصولات لازم می‌باشد (آغباشلو و همکاران ۲۰۰۸).

جدول ۵- ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق

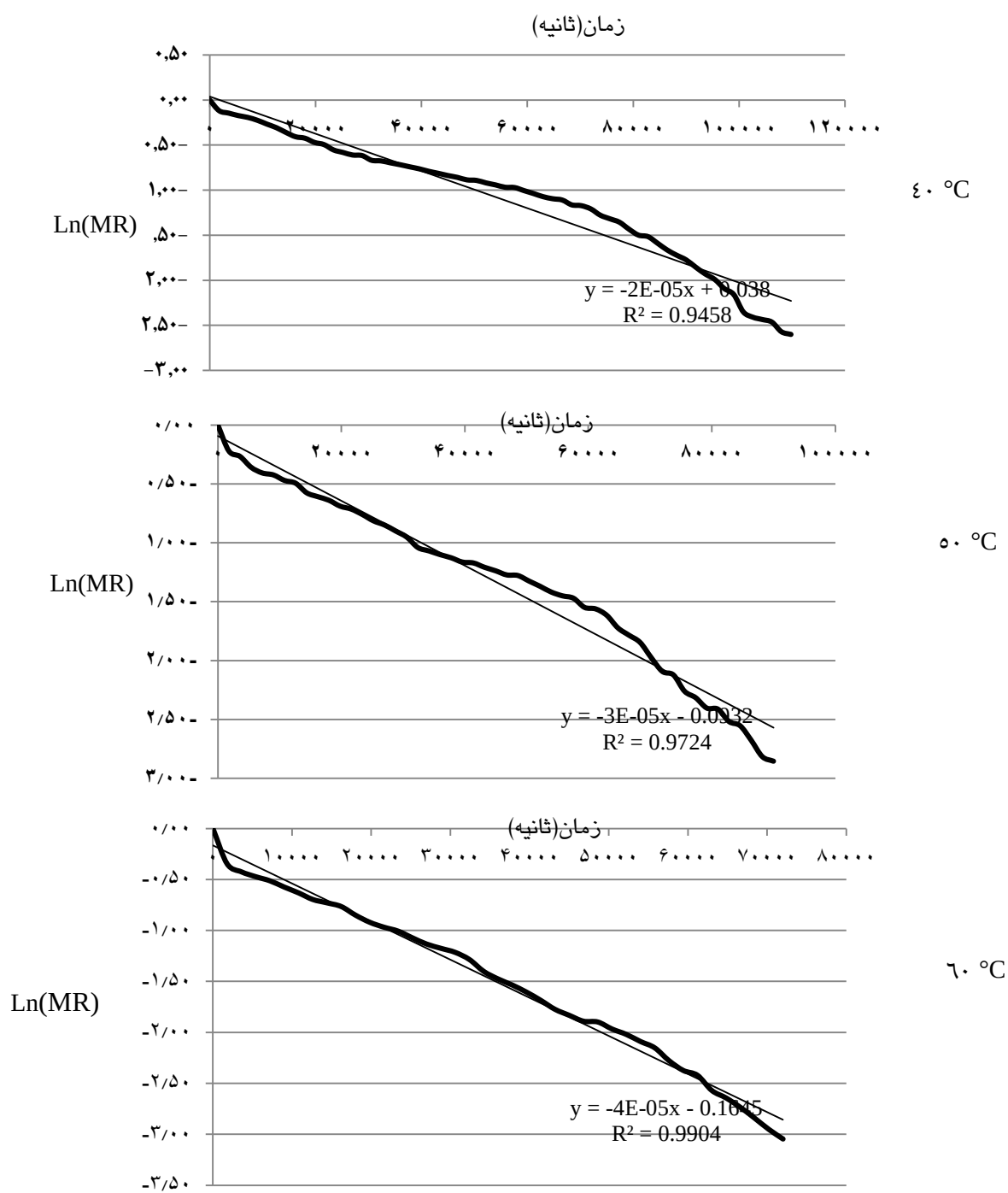
| دما ( $^{\circ}C$ ) | ضریب نفوذ موثر (متر بر مجذور ثانیه) |
|---------------------|-------------------------------------|
| ۴۰                  | $10^{-10} \times 1/26373$           |
| ۵۰                  | $10^{-10} \times 1/9057$            |
| ۶۰                  | $10^{-10} \times 2/50064$           |

با استفاده از رابطه آرنیوس که در معادله ۳ آمده است، انرژی فعال‌سازی و ثابت ضریب نفوذ موثر از شیب نمودار  $(\ln(D_{eff}) - 1/T)$  که در شکل ۵ نشان داده شده است، محاسبه شد. انرژی فعال‌سازی برای فندق در محدوده دمایی  $^{\circ}C$  ۴۰ تا  $^{\circ}C$  ۶۰،  $29/622$   $KJ/kg.mol$  و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $10^{-10}$  تا  $10^{-11}$   $m^2/s$  بدست آمد. لویز و همکاران (۱۹۹۸) نیز انرژی فعال‌سازی و ثابت ضریب نفوذ موثر فندق را به ترتیب،  $29/19$   $KJ/kg.mol$  و  $10^{-10}$  تا  $10^{-11}$   $m^2/s$  بدست آورده بودند. بنابراین رابطه آرنیوس برای فندق با پوست رقم گرد بصورت زیر تعریف می‌شود:

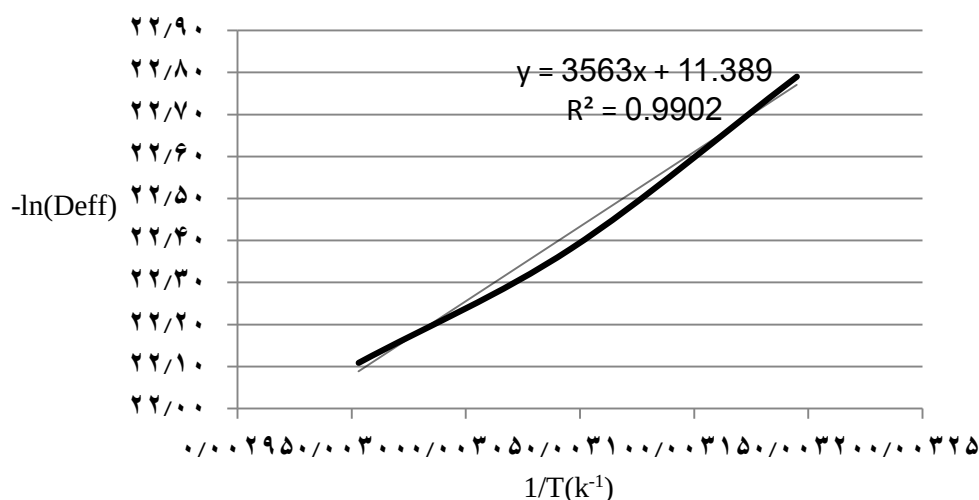
$$D_{eff} = 1.1 \times 10^{-5} \exp \frac{29.622}{RT}$$

مقدار انرژی کل مورد نیاز برای خشک‌کردن فندق و مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلو گرم فندق در دماهای مختلف، در جدول ۶ آمده است. با توجه به اینکه زمان مورد نیاز برای خشک‌کردن با افزایش دما کاهش می‌یابد، انرژی کل مورد نیاز برای خشک‌کردن در دمای  $^{\circ}C$  ۶۰،  $14/23$  درصد کمتر از  $^{\circ}C$  ۵۰ و در دمای  $^{\circ}C$  ۵۰،  $13/26$  درصد کمتر از  $^{\circ}C$  ۴۰ بود. مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلوگرم فندق نیز در دمای  $^{\circ}C$  ۶۰،  $6/11$  درصد کمتر از دمای  $^{\circ}C$  ۵۰ و در دمای  $^{\circ}C$  ۵۰،  $21/52$  درصد کمتر از  $^{\circ}C$  ۴۰ بود.





شکل ۴- ارتباط بین زمان و  $\ln(MR)$  در سه دمای مختلف



شکل ۵- ارتباط بین دما و  $-\ln(Deff)$

مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه‌های خشک شده فندق در دماهای مختلف بین  $10^{-10}$  تا  $10^{-11} \times 26373 \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $10^{-10} \times 250064$  تغییر می‌کند.

انرژی فعال‌سازی برای فندق در محدوده دمایی  $40^\circ\text{C}$  تا  $60^\circ\text{C}$ ،  $29/622 \text{ KJ/kg.mol}$  و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $10^{-10} \times 1/1$  بدست آمد.

انرژی کل مورد نیاز برای خشک‌کردن در دمای  $60^\circ\text{C}$ ،  $14/23$  درصد کمتر از  $50^\circ\text{C}$  و در دمای  $50^\circ\text{C}$ ،  $13/26$  درصد کمتر از  $40^\circ\text{C}$  بود.

مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک‌کردن یک کیلوگرم فندق نیز در دمای  $60^\circ\text{C}$ ،  $6/11$  درصد کمتر از دمای  $50^\circ\text{C}$  و در دمای  $50^\circ\text{C}$ ،  $21/52$  درصد کمتر از  $40^\circ\text{C}$  بود.

با توجه به نتایج حاصل شده، دمای  $60^\circ\text{C}$  برای خشک‌کردن فندق با پوست رقم گرد پیشنهاد می‌شود.

انجام تحقیق مشابهی در خصوص فرایند خشک‌کردن فندق بدون پوست نیز ضروری است. پیشنهاد می‌شود، فرایند خشک‌کردن فندق با پوست رقم گرد، در دماهای  $70^\circ\text{C}$  تا  $90^\circ\text{C}$  در تحقیق دیگری بررسی شود.

جدول ۶- مقدار انرژی کل برای خشک‌کردن فندق و مقدار انرژی ویژه برای خشک‌کردن یک کیلوگرم فندق در دماهای مختلف

| دما ( $^\circ\text{C}$ ) | مقدار انرژی کل (کیلو ژول بر کیلوگرم) | مقدار انرژی ویژه (کیلو ژول بر کیلوگرم) |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| ۴۰                       | ۱۰۵۴۳۹/۹۹                            | ۹۲۰۴۷/۱۳                               |
| ۵۰                       | ۹۱۴۴۹/۸۵                             | ۷۲۲۳۵/۲۷                               |
| ۶۰                       | ۷۸۴۳۴/۷۶                             | ۶۷۸۲۰/۸۱                               |

### نتیجه‌گیری

مدت زمان خشک‌شدن در دمای  $60^\circ\text{C}$ ، نسبت به دمای  $40^\circ\text{C}$  و  $50^\circ\text{C}$ ، به ترتیب،  $34/42$  و  $20$  درصد کمتر بود. در مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن فندق، مدل میدیلی و همکاران با دارا بودن ضریب تبیین ( $R^2$ ) بسیار مناسب و کمترین مقادیر  $\chi^2$  و RMSE در سه دمای خشک‌کردن، نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی، بهترین برازش را با داده‌های آزمایش داشت. پس از این مدل، مدل لگاریتمی می‌تواند بعنوان مدل دوم برای بررسی سینتیک خشک‌کردن فندق پیشنهاد شود.

## منابع مورد استفاده

- آغباشلو م، کیانمهر م، ح، محمد عرب حسینی ا، صمیمی اخیحجانی ه و مهرآور ح، ۱۳۸۷، سینتیک خشک‌شدن گردو در مدت زمان خشک‌شدن با هوای داغ، پنجمین کنگره ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، مشهد.
- الفتی ه، ۱۳۷۴، تاریخ کشاورزی و دامپروری در ایران، انتشارات امیر کبیر.
- بدیعی م، ۱۳۷۱، فرمول‌ها، آحاد و ارقام در علوم مهندسی، ترجمه، انتشارات جعفری، کرج.
- بی نام ۱۳۹۲، آمارنامه محصولات باغی، وزارت جهاد کشاورزی.
- توکل پور ح، کلباسی اشتری ا و بصیری ع، ۱۳۸۷، اثر پارامترهای خشک‌کردن بر شاخص‌های کیفی پسته دامغان (*Pistacia vera L.*) و تعیین ضرایب نفوذ موثر در شرایط بهینه این فرآیند، مجله علوم و صنایع غذایی، شماره ۴، صفحه ۵۶-۴۷.
- طاهری گراوند ا، رفیعی ش، کیهانی ع و جعفری م، ۱۳۸۹، ضریب پخش موثر و انرژی فعال‌سازی ریحان در خشک‌کردن لایه نازک با هوای داغ، مجله علوم و فناوری غذایی، شماره ۳، صفحه ۱۷-۹.
- گازر ح، معدنی ص، شرافتی ک و بهمدی ه، ۱۳۹۲، بررسی تاثیر روش‌های مختلف آماده‌سازی بر فرآیند خشک‌شدن، ویژگی‌های کیفی و قابلیت انبار مانی آلبالوی خشک، گزارش نهایی طرح پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- محمد پور کاریزکی و، حامد موسویان م، ت و اعتمادی ا، ۱۳۸۶، تعیین ضریب نفوذ موثر و انرژی فعالیت پسته طی فرآیند خشک‌کردن بستر سیال، پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، شماره ۲، صفحه ۱۲-۱.
- Aghbashlo M, Kianmehr M and Samimi-Akhijahani H, 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of beriberi fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management* 49: 2865–2871.
- Akpınar E, Midilli A and Bicer Y, 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. *Energy Conversion and Management*, 44: 1689-1705.
- Akpınar E K and Bicer Y, 2006. Mathematical Modeling and Experimental Study on Thin Layer Drying of Strawberry. *International Journal of Food Engineering* Vol. 2, Iss. 1, Art 5.
- Anonymous, 1989. ASAE. Standards (36th edn). ASAE, St Joseph, MI, USA, S352.2.
- Doymaz I, 2007. Influence of pretreatment solution on drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering* 78(2): 591-596.
- Falade K O and Abbo E, 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. *Journal of Food Engineering* 79: 724–730.
- Food and Agricultural Organization (FAO), 2014. Web page: <http://www.fao.org>.
- Goyal R K, Kingsly A R P, Manikantan M R and Ilyas S M, 2007. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering* 79(1): 176-180.
- Karatas S and Battalbey M.F, 1991. Determination of Moisture Diffusivity of Pistachio Nut Meat During Drying. *Lebensm-wiss. u. technol* 24: 484- 487.
- Lopez A, Pique M T, Boatella J and Ferran A, 1998. Drying characteristics of the hazelnut. *Drying technology* 16(3-5): 627-649
- Mohsenin Nuri N, 1970. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Pub. New York, USA.
- Mujumdar Arun S, 2000. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Science publisher, Inc. Enfield (NH), USA.

- Mwithiga G and Olwal J O, 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering* 71:373-378.
- Rafiee Sh, Keyhani A and jafari A, 2008. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. *International Journal of Food Properties* 11: 1-10.
- Sharma G P and Prasad S, 2006. Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy* 31(12): 1921-1926.
- Tarhan S, Ergunes G and Taser O F, 2006. Selection of chemical and thermal pretreatment combination to reduce the dehydration time of sour cherry (*Prunus cerasus L.*). *Journal of Food Process Engineering* 29(6): 651-663.

## Investigation drying kinetic, effective diffusivity coefficient and activation energy in shelled hazelnut drying process

Z Yousefi<sup>1\*</sup>, H R Gazor<sup>2</sup>, K Tajadodtalab<sup>3</sup>, A Vahedi<sup>4</sup> and M H Ansari<sup>5</sup>

Received: April 17, 2015

Accepted: June 14, 2016

<sup>1</sup>Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Group, Gilan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Rasht, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

<sup>5</sup>Assistant Professor, Department of Agronomy and plant Breeding, Faculty of agriculture, Islamic azad university, Rasht Branch, Rasht, Iran

\*Corresponding author: Email: Zahra.yousef@gmail.com

### Abstract

The goal of this research was studying kinetic of shelled hazelnut (*corylus avellana*) at temperature range of 40-60 °C that beside drawing curve of moisture changes at different temperature and modeling drying process, effective diffusivity coefficient, activation energy, total energy, specific energy required for drying shelled hazelnut was calculated in single-layer form. Result of consideration showed that the duration of drying at 60 °C was 34.42 and 20 percent less than 40 and 50 °C. In modeling the process of drying hazelnut Midilli et al in 3 temperatures of drying has had the most suitable fitting with data of experiment comparing to other models. Also effective distribution coefficient in dried hazelnut samples at different temperature changes between  $1.26373 \times 10^{-10}$  and  $1.50064 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Activation energy for hazelnut at temperature range of 40-60 °C 29.622 KJ/kg. and effective penetration constant was obtained  $1.1 \times 10^{-5}$ .

**Key words:** Drying kinetic, Hazelnut, Modeling