



## بررسی سینتیک خشک شدن، ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی در فرآیند خشک کردن

### فندق

زهرا یوسفی<sup>۱\*</sup>، حمید رضا گازر<sup>۲</sup> و کبری تجدد طلب<sup>۳</sup>

۱- محقق مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان

۲- عضو هیات علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

۳- عضو هیات علمی موسسه تحقیقات برنج کشور

ایمیل مکاتبه کننده: Zahra.yousef@gmail.com

### چکیده

هدف از انجام تحقیق مذکور، بررسی سینتیک خشک شدن فندق با پوست در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  بود که علاوه بر ارائه منحنی تغییرات رطوبت در دماهای مختلف، ضریب نفوذ موثر، انرژی فعال سازی، انرژی کل و انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک کردن فندق با پوست، بصورت تک لایه، محاسبه شد. نتایج بررسی داده ها نشان داد که مدت زمان خشک شدن فندق در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ ، نسبت به دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب،  $52/5$  و  $25$  درصد بیشتر بود. همچنین مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده فندق در دماهای مختلف بین  $10^{-11} \times 1/26373$  تا  $10^{-11} \times 2/50064$  متر بر مجذور ثانیه تغییر می کند. انرژی فعال سازی برای فندق در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $29/622$  کیلو ژول بر کیلوگرم مول و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $10^{-5} \times 1/1$  متر بر مجذور ثانیه بدست آمد. واژه‌های کلیدی: فندق، سینتیک خشک کردن، ضریب نفوذ موثر

### مقدمه

فندق 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 بسیار قدیم متداول بوده است به طوری که پیدایش آن را از نظر گیاهشناسی به عصر نئولیتیک زمین شناسی نسبت می دهند، ولی تاریخ دقیق آن مشخص نیست (الفقی، ۱۳۷۴). تولید جهانی فندق در سال ۲۰۱۲، بالغ بر ۹۰۰ هزار تن بود که کشور ترکیه با تولید ۶۶۰ هزار تن، بیشترین میزان تولید را در بین کشور های جهان در این سال داشت. سطح زیر کشت فندق در ایران در سال ۲۰۱۲، ۲۱۰۰۰ هکتار و متوسط تولید آن بین سالهای ۲۰۰۸-۲۰۱۲ نیز،  $20832/8$  تن بود (فائو، ۲۰۱۴).

فندق همانند سایر محصولات خشکبار، پس از برداشت باید فرآوری گردد تا کیفیت آن حفظ شود و عمر انبار مانی مناسب را داشته باشد. 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 می باشد که برای حفظ کیفیت و انبار مانی 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 مناسب ترین دما، با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای خشک کردن و کیفیت محصول نهایی، موجب صرفه جویی قابل ملاحظه ای 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 مکانیزم های ممکن حرکت رطوبت در ماده، مانند نفوذ مایع، نفوذ بخار، نفوذ سطحی، جریان کاپیلاری و جریان هیدرودینامیکی را توصیف می کند. حرکت رطوبت که شامل نفوذ رطوبت در ماده جامد می باشد، دارای پروسه پیچیده ای است. دانستن درباره نفوذ رطوبت موثر برای طراحی و مدل سازی پروسه انتقال جرم، مثل آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، لازم می باشد (رفیعی، ۲۰۰۸). موسیگا و اولوال (۲۰۰۵)، برای تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت در برگ کلم، از معادله فیک استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه های خشک شده برگ کلم، در دماهای  $30^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  و سرعت هوای ۱ متر بر مجذور ثانیه، از  $10^{-10} \times 14/9$  تا  $10^{-10} \times 55/9$  متر بر مجذور ثانیه تغییر می کند که نشان دهنده تاثیر دمای هوای خشک کن بر روی ضریب نفوذ می باشد. این تاثیر در آزمایشات آغباشلو و همکاران (۲۰۰۸)، برای خشک کردن زرشک نیز مشخص بود. در آزمایشات اشاره شده که با سه دمای هوای  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  و چهار سرعت هوای  $0/5$ ،  $0/7$ ،  $1$  و  $2$  انجام شد، مقدار ضریب نفوذ موثر از  $10^{-10} \times 3/32$  تا  $10^{-10} \times 9 \times 10$  متر بر مجذور ثانیه متغیر بود. کویونکو و همکاران (۲۰۰۷)، ویژگیهای خشک شدن و انرژی حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن گیلان را در سه دمای  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  و سه سرعت  $0/3$ ،  $0/6$  و  $0/9$  m/s بررسی کردند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که توان ویژه مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم آلبالو از  $11/57$  تا  $39/55$  کیلو وات ساعت بر کیلوگرم تغییر می کند. این محققان برای کاهش مصرف انرژی در زمان خشک کردن، توصیه کردند که سرعت هوای خشک کردن نباید بیشتر از  $0/3$  m/s در دماهای مختلف باشد و بهترین دما برای این منظور،  $70^{\circ}\text{C}$  پیشنهاد شد.

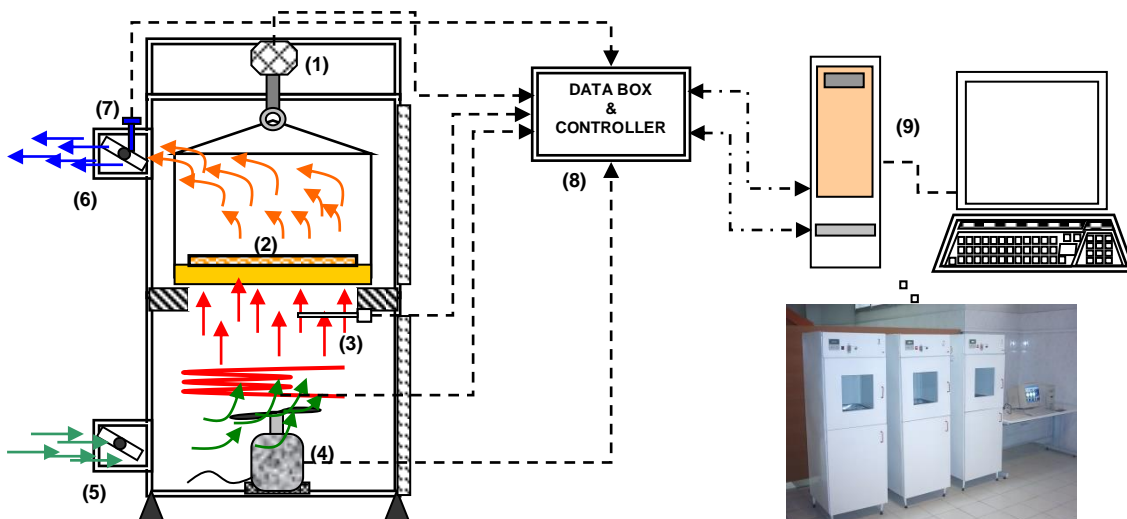
هدف از انجام تحقیق مذکور، بررسی سینتیک خشک شدن فندق با پوست در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$  بود که علاوه بر ارائه منحنی تغییرات رطوبت در دماهای مختلف و مدلسازی فرآیند خشک شدن، محاسبه ضریب نفوذ موثر، انرژی فعال سازی، انرژی کل و انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک کردن فندق با پوست، بصورت تک لایه، ارائه خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

فندق رقم گرد (رقم غالب در استان گیلان) از باغات منطقه اشگورات در مرداد ماه سال ۱۳۹۲، برداشت شد. میوه های پوک، ترک خورده و دارای نشانه های آفت و بیماری جدا شدند. سپس میوه ها در پلاستیک در بسته ریخته شد و به محل آزمایشگاه منتقل گردید. رطوبت اولیه نمونه های آزمایش به وسیله آون در دمای  $105^{\circ}\text{C}$  به مدت ۶ ساعت اندازه گیری شد (ASAE, 1989). برای هر نمونه آزمایشی حدود  $1500$  گرم فندق تازه در نظر گرفته شد. سپس نمونه ها بوسیله یک دستگاه خشک کن آزمایشگاهی و بصورت لایه نازک خشک شدند. این خشک کن دارای سه واحد می باشد که هر سه



واحد بطور همزمان کار می‌کنند (شکل ۱). دماهای خشک کردن فندق شامل ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C و سرعت جابجایی هوای گرم ۱ m/s در نظر گرفته شد. در خشک کن مورد استفاده در تحقیق تغییرات دمای ورودی به وسیله دما سنج دیجیتال آتین مدل K400AT- با دقت ۱°C تنظیم و ثبت می‌گردد. همچنین تغییرات وزن با دقت ۱ گرم و دمای خروجی با دقت ۰/۱ بصورت خودکار توسط سیستم جمع آوری داده‌ها، در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای از خشک کن به کامپیوتر منتقل می‌شود. ثبت وزن، تا وقتی که ادامه خواهد داشت که رقم ثبت شده، سه بار پی در پی ثابت شود. سرعت جابجایی هوای گرم در خروجی هوای خشک کن‌ها با استفاده از یک باد سنج سیم داغ ساخت شرکت TESTO آلمان، اندازه‌گیری و تنظیمات لازم به وسیله کاهنده دور فن اعمال شد. پس از خشک کردن 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.



شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده در تحقیق (۱) لود سل، (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 خشک کن مورد استفاده در تحقیق

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 را در دو حالت تازه و خشک شده اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه (۱)، متوسط قطر و شعاع میانگین فندق برای هر تیمار بدست آمد (محسنین، ۱۹۷۰).



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

(۱)

در این رابطه:  $d_g(m)$  = قطر میانگین فندق (m)  $a$  = قطر بزرگ فندق (m)  $b$  = قطر متوسط فندق (m)  $c$  = قطر کوچک فندق پس از محاسبه شعاع هندسی، ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق ( $D_{eff}$ ) از حل معادله فیک برای اجسام کروی شکل به شرح رابطه (۲) بدست آمد (Doymaz, 2007; Falade & Abbo, 2007; Mujumdar, 2000).

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

(۲)

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

$$\ln \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

(۳)

با استفاده از ضریب زاویه خط ترسیم شده داده های بر حسب زمان (ثانیه) و شعاع میانگین هر میوه، ضریب نفوذ موثر ( $D_{eff}$ ) مربوطه بدست می آید. با توجه به تابعیت ضریب نفوذ با دما، برای تعیین انرژی فعال سازی رطوبت از رابطه آرنیوس (۳) استفاده شد (Falade & Abbo, 2007, Mujumdar, 2000).

$$D_{eff} = D_o \exp \frac{-E_a}{RT}$$

(۴)

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)



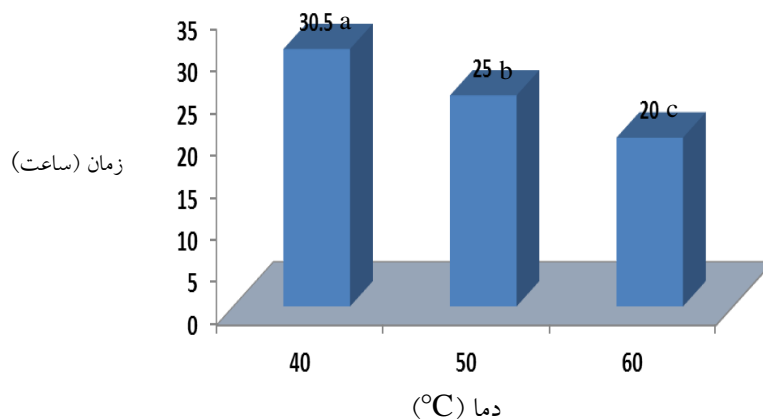
## نتایج و بحث

مطابق جدول ۱، مقدار دما بر زمان خشک شدن فندق در سطح ۱ درصد تاثیر معنی داری داشت. مدت زمان خشک شدن در دمای ۴۰ و ۵۰ °C، نسبت به دمای ۶۰ °C، به ترتیب، ۵۲/۵ و ۲۵ درصد بیشتر بود (شکل ۲). با افزایش دمای هوای ورودی، انرژی گرمایی بیشتری به بافت فندق وارد می شود و باعث می شود رطوبت میان بافتی با آهنگ و سرعت بیشتری در زمان کمتری تبخیر شود.

جدول ۱- تجزیه واریانس زمان خشک شدن فندق در دماهای مختلف

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

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

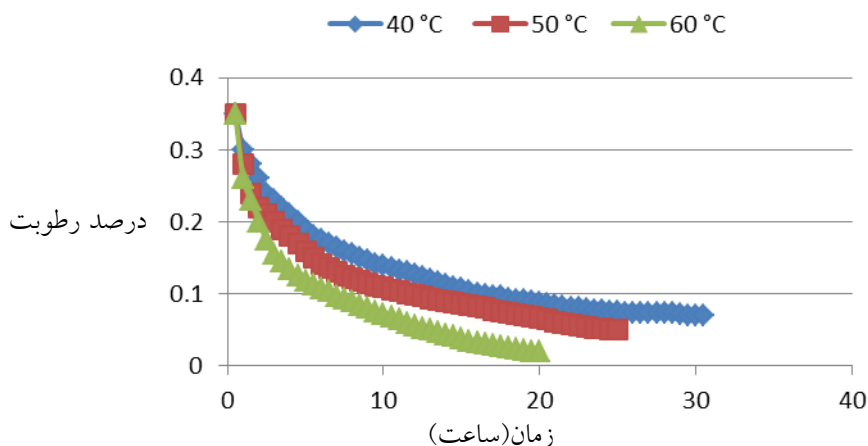


شکل ۲- زمان خشک شدن فندق در دماهای مختلف

شکل (۳)، تغییرات درصد رطوبت فندق در زمان را برای دماهای مختلف نشان می دهد. در فرآیند خشک شدن فندق، ابتدا رطوبت از پوست فندق جدا می شود که این مرحله سریع اتفاق می افتد و شیب نمودار درصد رطوبت برای هر سه دما در این مرحله زیاد است. نمودار مربوط به دمای ۶۰ °C، دارای شیب بیشتری نسبت به دو دمای دیگر است. پس از گذشت مراحل اولیه فرآیند و خشک شدن پوست، انتقال رطوبت از مغز فندق انجام می گیرد که این مرحله، بدلیل رطوبت پایین مغز و سخت بودن تبخیر آب از آن، به کندی انجام می شود و شیب 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 °C ۶۰ به ۲ درصد و در دماهای ۴۰ و °C ۵۰، به ترتیب به ۷ و ۵ درصد بر پایه وزن خشک رسید. 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

شعاع میانگین فندق، برای هر کدام از تیمارهای آزمایش، قبل و بعد از خشک شدن، محاسبه شد. جدول شماره ۲، مقادیر این شعاع ها را نشان می دهد. نسبت رطوبت (MR) نیز در طول خشک شده تیمار ها، با استفاده از وزن های ثبت شده دستگاه خشک کن بدست آمد. ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق، از شیب نمودار  $(T - \ln(MR))$  بر اساس معادله شماره ۲ محاسبه شد. مقدار ضریب نفوذ موثر در نمونه های خشک شده در دماهای مختلف بین  $1/26373 \times 10^{-11}$  تا  $2/50064 \times 10^{-10}$  متر بر مجذور ثانیه تغییر می کند (جدول شماره ۳). با افزایش دما، ضریب نفوذ موثر نیز افزایش می یابد (طاهری گراوند، گازر و همکاران، ۱۳۸۹، موسیگا و اولوال، ۲۰۰۵، آغباشلو و همکاران، ۲۰۰۸، لویز همکاران، ۱۹۹۸). کمترین مقدار ضریب نفوذ مربوط به دمای °C ۴۰ و بیشترین مقدار ضریب نفوذ مربوط به °C ۶۰ است. بطور کلی، میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت برای مواد غذایی در محدوده  $10^{-9}$  تا  $10^{-11}$  تغییر می کند. دانستن ضریب نفوذ رطوبت برای طراحی فرآیند، کنترل کیفی، مسائل مربوط به انبار کردن و چگونگی جابجایی مناسب محصولات لازم می باشد (آغباشلو و همکاران، ۲۰۰۸).



جدول شماره ۲: مشخصات هندسی فندق با پوست بر حسب میلیمتر

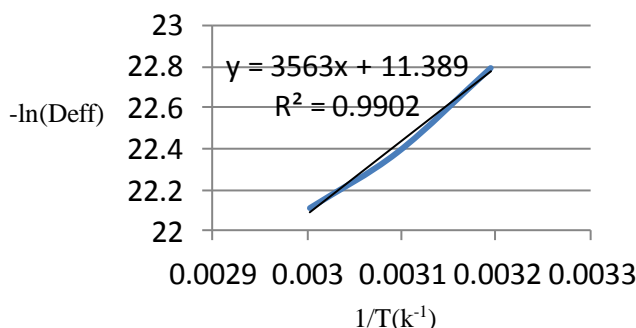
| دما (°C) | قطر بزرگ | قطر کوچک | قطر متوسط | میانگین قطر |
|----------|----------|----------|-----------|-------------|
| ۴۰       | ۱۷/۲۰    | ۱۴/۵۴    | ۱۵/۷۶     | ۱۵/۸۰       |
| ۵۰       | ۱۷/۲۵    | ۱۴/۴۶    | ۱۵/۹۰     | ۱۵/۸۳       |
| ۶۰       | ۱۷/۰۷    | ۱۴/۳۴    | ۱۵/۸۲     | ۱۵/۷۱       |

جدول شماره ۳: ضریب نفوذ موثر رطوبت در فندق در دماهای مختلف

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

با استفاده از رابطه آرنیوس که در معادله شماره ۳ آمده است، انرژی فعال سازی و ثابت ضریب نفوذ موثر از شیب نمودار  $(-\ln(D_{eff})-1/T)$  محاسبه شد (شکل شماره ۳). انرژی فعال سازی برای فندق در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $29/622$  کیلو ژول بر کیلوگرم مول و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $1/1 \times 10^{-5}$  متر بر مجذور ثانیه بدست آمد. لویز و همکاران (۱۹۹۸) نیز انرژی فعال سازی و ثابت ضریب نفوذ موثر فندق را به ترتیب،  $29/19$  کیلوژول بر کیلوگرم مول و  $16 \times 10^{-5}$  متر بر مجذور ثانیه بدست آورده بودند. بنابراین رابطه آرنیوس برای فندق با پوست رقم گرد بصورت زیر تعریف می شود:

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



شکل شماره ۳: ارتباط بین ضریب نفوذ موثر و دما



مقدار انرژی کل مورد نیاز برای خشک کردن فندق و مقدار انرژی ویژه مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلو گرم فندق در دماهای مختلف، در جدول شماره ۲ آمده است. با توجه به اینکه زمان مورد نیاز برای خشک کردن با افزایش دما کاهش می‌یابد، انرژی کل مورد نیاز برای خشک کردن 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 خشک کردن 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.

جدول شماره ۲: مقدار انرژی کل برای خشک کردن فندق و مقدار انرژی ویژه برای خشک کردن یک کیلوگرم فندق در دماهای مختلف

| دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) | مقدار انرژی کل (کیلو ژول) | 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 خشک شدن فندق در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ ، نسبت به دمای  $60^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب،  $5/52$  و  $25$  درصد بیشتر بود. مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده فندق در دماهای مختلف بین  $10^{-10} \times 1/2633$  تا  $10^{-10} \times 2/5006$  متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌کند. انرژی فعال سازی برای فندق در محدوده دمایی  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $60^{\circ}\text{C}$ ،  $29/622$  کیلو ژول بر کیلوگرم مول و ثابت ضریب نفوذ موثر نیز  $10^{-5} \times 1/1$  متر بر مجذور ثانیه بدست آمد. انرژی کل مورد نیاز برای خشک کردن 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 خشک کردن 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.

### منابع و مآخذ

۱. طاهری گراوند، ا. رفیعی، ش. کیهانی، ع.ر. جعفری، م. ۱۳۸۹. ضریب پخش موثر و انرژی فعال سازی ریحان در خشک کردن لایه نازک با هوای داغ. مجله علوم و فناوری غذایی. شماره ۳. ۱۷-۹.
۲. گازر، ح.ر. معدنی، ص. شرافتی ک. هما بهمدی، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر روش های مختلف آماده سازی بر فرآیند خشک شدن، ویژگی های کیفی و قابلیت انبار مانی آلبالوی خشک. گزارش نهایی طرح پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.





۳. بدیعی، م. ۱۳۷۱. فرمول‌ها، آحاد و ارقام در علوم مهندسی. ترجمه. انتشارات جعفری. کرج.
۴. محمدپور کاریزکی، و. حامد موسویان. م.ت. اعتمادی، ا. ۱۳۸۶. تعیین ضریب نفوذ موثر و انژی فعالیت پسته طی فرآیند خشک کردن بستر سیال. مجموعه مقالات اولین همایش ملی فرآوری و بسته بندی پسته.
۵. الفتی، ه. ۱۳۷۴. تاریخ کشاورزی و دامپروری در ایران. انتشارات امیر کبیر.
6. Lopez, M. T. Pique, J. Boatella, and A. Ferran. 1998. Drying characteristics of the hazelnut. Drying technology. Vol 16(3-5), 627-649.
- ASAE. 1989. Standards (36th edn). ASAE. St Joseph. MI. USA.S352.2.
7. Food and Agricultural Organization (FAO). 2014. Web page: <http://www.fao.org>.
8. G. Mwithiga, and J. O. Olwal. 2005. The drying kinetics of kale (Brassica oleracea) in a convective hot air dryer” Journal of Food Engineering. Vol 71, 373-378.
9. Doymaz. 2007. Influence of pretreatment solution on drying of sour cherry. Journal of Food Engineering. Vol 78(2), 591-596.
10. O. Falade, and E. Abbo. 2007. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (Phoenix dactylifera L.) fruits. Journal of Food Engineering. Vol 79, 724-730.
11. M. Aghbashlo, M. Kianmehr, and H. Samimi-Akhijahani. 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. Vol 49, 2865-2871.
12. N. Mohsenin Nuri. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Pub, New York, USA.
13. S. Mujumdar, Arun. 2000. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Science publisher, Inc, Enfield (NH), USA.
14. Sh. Rafiee, A. Keyhani, and A. jafari. 2008. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. International Journal of Food Properties. Vol 11, 1-10.
15. T. Koyuncu, I. Tosun, and Y. Pinar. 2007. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (Cornus mas L.). Journal of Food Engineering. Vol 78(2), 735-739.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



## Study the drying kinetic, effective moisture diffusivity and activation energy for hazelnut drying process of hazelnut

### Abstract

The goal of this research was study the Drying kinetic of shelled hazelnut at temperatures 40, 50 and 60 °C that Effective moisture diffusivity, Activation energy, Total energy consumption and Specific energy consumption were determined for drying shelled hazelnut in addition to the drying curves in different temperature. Results showed that drying time at 40 and 50 °C 52.5 and 25% was more than that of 60 °C. Effective moisture diffusivity of dried samples in different temperature changes between  $1.26373 \times 10^{-10}$  and  $1.50064 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Activation energy for hazelnut in temperature range 40 to 60 °C, was 29.622 KJ/kg.mol and effective moisture constant was  $1.1 \times 10^{-5}$ .

**Keywords:** hazelnut, drying kinetic and effective moisture diffusivity