

## سینتیک خشک شدن گردو (*Juglans regia. L*) در مدت زمان خشک شدن با هوای داغ (۱۵۰)

مرتضی آغباشلو<sup>۱</sup>، محمدحسین کیانمهر<sup>۲</sup>، اکبر محمد عرب حسینی<sup>۳</sup>، هادی صمیمی اخیجهانی<sup>۴</sup>، حامد رآور<sup>۵</sup>

### چکیده

ویژگی های خشک شدن گردو برحسب تابعی از دما، سرعت هوا و گونه ('Serr', 'Pedro', Z67, K82) تعیین شد. به منظور تخمین و انتخاب یک مدل مناسب، منحنی خشک شدن، پنج مدل نیمه تئوری و یا تجربی به داده های آزمایشگاهی برازش شده اند. آزمایشات در دو دمای ۳۲ و ۴۳ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۱ و ۳ متر بر ثانیه انجام گرفت. نهایتاً از مدل های انتخاب شده، مدل Page با توجه به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. متغیرهای مورد مطالعه تاثیر معنی داری روی زمان خشک شدن و ثابت های مدل Page داشتند. رابطه بین ثابت های خشک شدن  $k$  و  $n$  با شرایط هوای داغ و ویژگی های وارسته بوسیله مدل آرهینوس تعیین شد. ضریب پخش رطوبتی موثر از  $۱۰^{-۷}$  تا  $۳,۵۴۰ \cdot ۱۰^{-۷}$  مترمربع بر ثانیه متغیر بود. تاثیر متغیرها روی ضریب پخش رطوبتی بوسیله یک معادله آرهینوس بیان شد.

**کلیدواژه:** خشک شدن گردو، ضریب پخش رطوبتی، مدل Page، معادله آرهینوس

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران  
پست الکترونیک: maghbashlo@ut.ac.ir
- ۲- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
- ۳- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
- ۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

## مقدمه:

جنس *Juglans* شامل ۲۰ گونه با توزیع طبیعی در نیمکره شمالی و آمریکای جنوبی می‌شود. بسیاری از گونه‌ها به عنوان یک منبع گردوی خوراکی و چوب و یک گیاه زینتی از لحاظ تجاری مهم هستند. گردوی ایرانی (*Juglans regia L.*)، یک خوراکی قدیمی است. این محصول در مناطق مرطوب، گرم، جنگلهای برگ ریزان، شمال ترکیه، مناطق جنوبی دریایی خزر، قفقاز و آسیای مرکزی می‌روید. بر اساس آمار سازمان خواربار جهانی FAO [۱]، ایران ۱۵۰ میلیون تن گردو در سال ۲۰۰۶ تولید کرده است، که معادل ۱۰٪ تولید جهانی است. گردو یک میوه فوق العاده مغذی می‌باشد که سرشار از ترکیبات اسیدهای چرب غیراشباع است. دانه‌های گردو بسته به وارپته دارای ۴۰ تا ۶۰ درصد مغز می‌باشند. دانه‌ها دارای (۶۰-۷۵ درصد) چربی بوده، که عمدتاً از اسیدهای چرب غیراشباع می‌باشند. علاوه بر آن، گردو دارای مقدار زیادی پروتئین (تا ۱۵ درصد وزن گردو)، کربوهیدرات (۱۲-۱۶ درصد)، فیبر (۱،۲ درصد) و مواد معدنی (۱،۷-۲ درصد) می‌باشد [۲]. برداشت و اجرای عملیات بعد از برداشت مناسب یک بخش کلیدی برای بدست آوردن بیشترین کیفیت محصول که ضامن بازارپسندی و سود بالا است می‌باشد [۳]. خشک کردن یکی از فرآوردیهایی متداول در تولید گردو می‌باشد. خشک کردن سبب تثبیت وزن محصول، جلوگیری از کاهش کیفیت دانه، حفظ سفیدی مغز دانه و افزایش طول دوره انبارداری می‌شود [۱]. برای خشک کردن گردو هوای داغ در محدوده دمایی ۳۸-۳۲ درجه سانتیگراد از اطراف گردو عبور داده می‌شود تا رطوبت گردو به ۸ درصد (پایه خشک) برسد. ماکزیمم دمای مجاز برای خشک کردن گردو ۴۳ درجه سانتیگراد می‌باشد. تمام خشک کنه‌های هوای داغ گردو در دمای ۴۳ درجه سانتیگراد طراحی می‌شوند [۴ و ۱]. دمای بالای ۴۳ درجه سانتیگراد مغز گردو را سیاه کرده و عمر انبارداری گردها را کاهش میدهد. خشک شدن گردو از آزمایشات مزرعه‌ای و آزمایشگاهی به مدل‌های ریاضی جهت مدل‌سازی پروسه خشک کردن تبدیل می‌شوند [۱]. مدل‌های شبیه‌سازی شده کنترل راحت‌تر، مصرف انرژی کمتر و بهینه‌ترین شرایط را برای فرآیند خشک کردن مهیا می‌سازند. محققین زیادی سینتک خشک شدن میوه‌های آجیلی و محصولات کشاورزی مختلف را به منظور بدست آوردن بهترین مدل ریاضی برای تعیین ویژگی‌ها خشک شدن مورد بررسی قرار داده‌اند. از جمله می‌توان به پسته [۳]، فندق در مدت برشته کردن [۵]، تکه‌های کاسنی تلخ [۶]، گل جعفری [۷]، بلوط [۸] اشاره کرد. ما در حال حاضر اطلاعات کمی در مورد گردو موجود است. هدف از این تحقیق بررسی (۱) مطالعه تاثیر دما و سرعت و وارپته روی رفتار خشک شدن گردو، (۲) بررسی مدل مناسب برای خشک شدن لایه نازک گردو و (۳) محاسبه ثابت‌های خشک شدن است.

## ۲- مواد روشها

### ۲-۱- تهیه نمونه‌ها

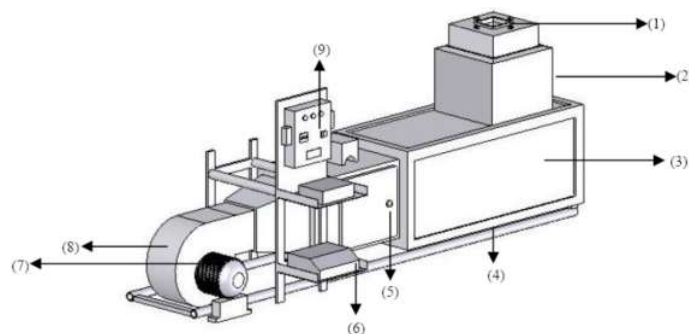
گردوهای تازه برداشت شده با پوست سبز از موسسه تحقیقاتی اصلاح بذر ونهال کرج، ایران (SPII) تهیه شده و در یخچال در دمای ۵+ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. نمونه‌های انتخاب شده برای آزمایش کاملاً یکنواخت بودند. قبل از انجام آزمایشات پوست سبز گردها بطور دستی جدا شدند. محتوی اولیه رطوبت بوسیله روش آون تعیین گردید. بخش خوراکی و چوبی هر وارپته در دمایی  $10.5 \pm 2$  درجه سانتیگراد برای مدت ۲۴ ساعت و در ۵ تکرار خشک شدند. قبل از انجام آزمایشات ابعاد خطی هر وارپته از گردها- طول، عرض، وضخامت- توسط یک میکرومتر با دقت ۰،۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

### ۲-۲- شرایط خشک کردن و انجام آزمایشات

یک خشک کن هوای داغ آزمایشگاهی با محفظه ثابت (آزمایشگاه گروه ماشین‌های کشاورزی پردیس ابوریحان-دانشگاه تهران) برای آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). بخش‌های اصلی سیستم خشک کن عبارتند از یک دمنده گریز از مرکز، محفظه گرم کننده هوا (۴،۵ کیلو وات)، محفظه خشک کن، سیستم کنترل، اینورتر<sup>۱</sup> و سبد خشک کردن. آزمایشات در دو دمای ۳۳ و ۴۳ درجه سانتیگراد و در دو سرعت هوای ۱ و ۳ متر بر ثانیه انجام شد. مقدار رطوبت نسبی محیط در زمان آزمایش ۴۰-۳۵٪ و دمای محیط ۲۶-۱۸ درجه سانتیگراد بود. برای کاهش تاثیرات نامطلوب دما و رطوبت محیط روی آزمایشات، محفظه خشک کن و طول تونل

۱-Lenze,8300, Germany

خشک کن با پشم شیشه و چوب عایق بندی شده بود. سبد خشک کن با یک استوانه شیشه ای عایق شده بود و هوای داغ از بالایی سیلندر شیشه ای خارج می شد. دمای هوا توسط کنترل کننده اتوماتیک با دقت ۰,۱ کنترل می شد. سرعت هوا در مقادیر ذکر شده (۱ و ۳ متر بر ثانیه) با دقت ۰,۰۵ متر بر ثانیه با استفاده از یک سرعت سنج<sup>۱</sup> کنترل می شد. برای ثابت نگهداشتن سرعت هوا از یک اینورتور که روی موتور دمنده عمل می کرد (۱,۵ کیلووات) استفاده می شد. جهت هوا روی نمونه ها عمودی بوده و نمونه های خشک شده هر یک ساعت بوسیله یک ترازوی دقیق<sup>۲</sup> با دقت ۰,۰۱ گرم وزن می شد. وزن نمونه های مورد استفاده در آزمایشات ۱۰۰ گرم انتخاب شدند. آزمایشات تا موقعی که رطوبت گردوها به ۸٪ پایه تر برسد ادامه یافتند. یک کنترل کننده دما، دمایی هوا در محفظه خشک کن را با دقت ۱ درجه سانتی گراد کنترل می کرد. قبل از انجام آزمایشات، برای رسیدن به شرایط پایدار خشک کن نیم ساعت روشن می شد.



شکل ۱. دیاگرام شماتیک خشک کن آزمایشگاهی: (۱) سبد (۲) محل سنسورها (۳) محفظه خشک کن عایق بندی شده (۴) پایه خشک کن (۵) مبدل گرما (۶) ورتور (۷) الکتروموتور (۸) فن (۹) کنترل کننده اتوماتیک

### ۲-۳- طرح آزمایشات

تمام آزمایشات در این تحقیق در سه تکرار برای سه سطح دما (۳۲ و ۴۳ درجه سانتی گراد) و دو سطح سرعت (۱ و ۳ متر بر ثانیه) تک ار شده اند. تاثیر منحصربفرد و ترکیبی اثرات متغیرها (واریته، دما و سرعت هوا) روی زمان خشک شدن و ثابتهای مدل Page برای خشک شدن گردو براساس یک طرح کاملاً تصادفی (۳ ۲۰ ۴۰) با استفاده روش از تجزیه واریانس (ANOVA) و با استفاده نرم افزار کامپیوتری MATLAB مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳- ملاحظات تئوری

منحنی خشک شدن با استفاده از پنج مدل رطوبت نسبی مختلف لوئیس، هندرسون و پاییس، مدل پیچ، مدل دیفیوژن تقریبی و معادله فیک ساده شده برازش شد.

رطوبت نسبی گردوها موقع خشک شدن بوسیله رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

که MR رطوبت نسبی (بی بعد)،  $M_t$  محتوی رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)،  $M_e$  محتوی رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک) و  $M_o$  محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک).

مقدار  $M_e$  در مقایسه  $M_o$  و  $M_t$  نسبتاً کوچک بوده در نتیجه خطای ناشی از آن ساده سازی آن ناچیز است [۹].

مدل لوئیس که اولین بار برای توصیف فرآیند خشک شدن جو استفاده شد بصورت زیر است [۱۰]:

$$MR = \exp(-kt) \quad (2)$$

۲- PROVA AVM-07

۳- AND, Japan

مدل هندرسون و پاییس ترم اول حل سری حاصل از قانون دوم فیک می باشد. مدل هندرسون و پاییس نیز که برای مدل کردن فرآیند خشک شدن ذرت استفاده شد [۱۱] به قرار زیر است:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (3)$$

پیچ یک معادله همگن برای خشک شدن لایه نازک غلات بصورت زیر معرفی کرد [۱۲]:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (4)$$

به همین ترتیب مدل دیفیوژن تقریبی برای خشک شدن انگور استفاده شد [۱۳]:

$$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (5)$$

مدل دیفیوژن فیک ساده شده که اولین بار برای مدل کردن خشک شدن تکه های سیب زمینی شیرین استفاده شد [۹]:

$$MR = a \exp(-kt/t^2) \quad (6)$$

سه معیار برای تعیین بهترین برازش استفاده شد، ضریب همبستگی  $R^2$ ، چی دو کاهش  $\chi^2$  و RMSE.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (7)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

که  $MR_{exp,i}$  رطوبت نسبی آزمایشگاهی نمونه  $i$ ام،  $MR_{pre,i}$  رطوبت نسبی پیشگوئی شده نمونه  $i$ ام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابتهای خشک شدن می باشد. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن گردو را توصیف کند با توجه به ضریب همبستگی  $R^2$  بالا، چی دو کاهش  $\chi^2$  و RMSE پایین انتخاب شد.

حل تحلیلی قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار در اشکال کروی توسط کرنک [۱۴] می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی پروسه خشک کردن را توصیف کند. با فرض اینکه در پروسه خشک کردن پخش رطوبتی موثر، ثابت و شعاعی است می توان مقدار آن را با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (9)$$

که در آن  $n$  تعداد ترمهای در نظر گرفته شده از معادله،  $t$  زمان خشک شدن،  $D_{eff}$  ضریب پخش موثر، شعاع کره که در پروسه خشک شدن ثابت فرض شده است.  $z$  نی که  $t$  افزایش می یابد، تمام ترمهای به غیر از ترم اول، صفر می شوند. با صرف نظر کردن از ترمهای بالا داریم:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (10)$$

معادله (۱۰) توسط محققین زیادی برای توصیف دیفیوژن استفاده شده است [۱۷ و ۱۶ و ۱۵]. در این پروسه، شعاع  $r_o$  ثابت در نظر گرفته می شود. می توان معادله (۱۰) را بصورت خطی نیز نوشت. برای این کار داریم:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (11)$$

با رسم داده های آزمایشگاهی در مقابل زمان ضریب دیفیوژن بدست می آید. از رسم معادله (۱۱)، در مقابل زمان خط راستی با شیب  $k_1$  بدست می آید:

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_g^2} \quad (12)$$

میایگین قطر هندسی گردوها نیز می تواند از معادله زیر محاسبه شود [۱۸]:

$$D_g = (L \cdot W \cdot T)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

تأثیر دمای هوا، سرعت و ویژگیهای وارپته های مختلف روی ضریب پخش حرارتی می تواند با استفاده از یک معادله آرهینوس بیان شود. رابطه بین ضریب پخش، دمای هوا، سرعت و ویژگیهای وارپته برای گردو عبارت است:

$$D_{eff} = f(V, W_o, WR, T) = \alpha_o V^{\alpha_1} W_o^{\alpha_2} WR^{\alpha_3} \exp\left(-\frac{\alpha_4}{T_{abs}}\right) \quad (14)$$

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- بعضی از ویژگیها گردوها

محتوی رطوبت اولیه (پایه تر) (w.b.%)، نسبت چوب به وزن کل (WR%) و قطر میانگین هر وارپته از گردو در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. بعضی از ویژگیهای گردوهای تازه

ویژگی	“پدرو”	“سر”	“Z67”	“K83”
محتوی رطوبت اولیه (پایه تر)	۳۴,۰۳	۳۲,۰۱	۳۰,۲۵	۲۸,
درصد چوب به کل وزن گردو (WR%)	۵۹,۹۲	۵۲,۲۸	۵۰,۶	۴۷,۲۷
میانگین قطر هندسی (میلی متر)	۳۵,۶۵	۳۳,۴۱	۳۳,۴۶	۳۶,۷۳

##### ۴-۲- اثر متغیرها روی زمان خشک شدن

جدول ۲ تجزیه واریانس برای متغیرهای مورد مطالعه شده را نشان می دهد. تجزیه واریانس (ANOVA) نشان داد که وارپته، دمای خشک شدن و سرعت هوا تأثیر معنی داری روی زمان خشک شدن دارد (<0,000). نتایج مشابه توسط محققین دیگر نیز نشان داده که دما فاکتور مهمی بر روی زمان خشک شدن می باشد [۱۹ و ۲۰ و ۲۱].

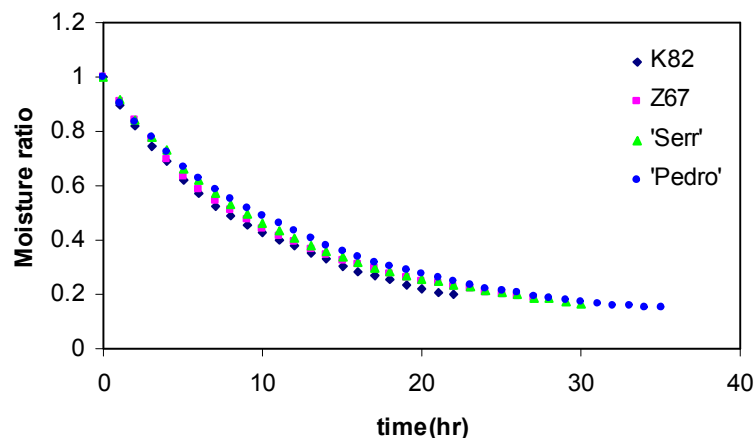
جدول ۲. تجزیه واریانس (ANOVA) برای تأثیر وارپته، دمای هوا و سرعت روی زمان خشک شدن گردو

منبع	درجه آزادی	MSE	F	P>F
دما	۱	۴۰۸,۳۳۳	۲۵۷,۱۲***	۰,۰۰۰
وارپته	۳	۳۳,۰۸۳	۲۱۰,۳۷***	۰,۰۰۰
سرعت	۱	۸۵,۳۳۳	۵۳,۷۳***	۰,۰۰۰
دما × وارپته	۳	۳,۲۲۲	n.s.۲,۰۳	۰,۱۲۷
دما × سرعت	۱	۴,۰۸۳	n.s.۲,۰۵۷	۰,۱۱۷
سرعت × وارپته	۳	۶,۲۲۲	۳,۹۲**	۰,۰۱۶
خطا	۳۵	۱,۰۸۸		
کل	۴۷			

\*\*\* و \*\* معنی دار در سطح ۱ درصد، ۵ درصد P.S. بی معنی.

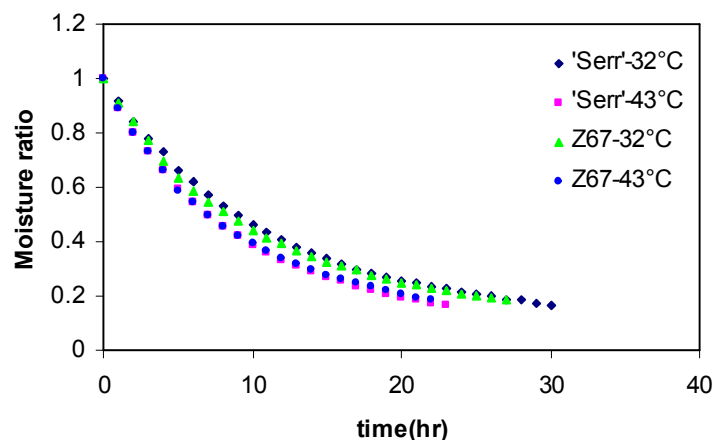
##### ۴-۳- منحنی های خشک شدن

شکل ۲ اثر وارپته روی رطوبت نسبی گردو در سرعت ۱ متر بر ثانیه و دمای ۳۲ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. بقیه نمودارها شکلی شبیه به این منحنی دارند. واضح است که وارپته تأثیر مهمی روی منحنی خشک شدن دارد. وارپته پُر رو میزان  $W_0$  و  $WR$  بیشتری نسبت به بقیه وارپته ها دارد، بنابر این منحنی خشک شدن این وارپته بالایی منحنی بقیه وارپته ها قرار می گیرد،



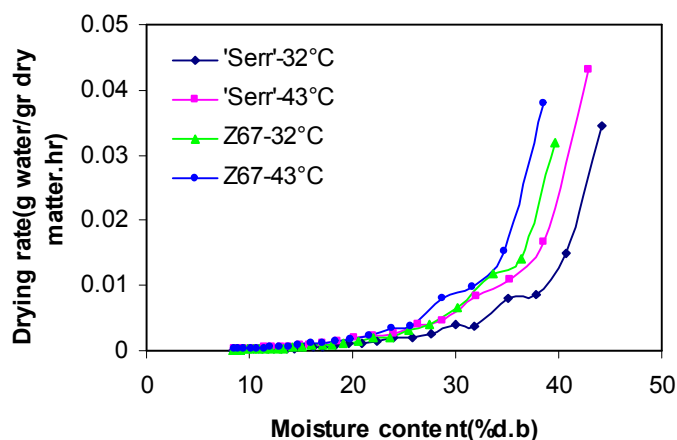
شکل ۲. تاثیر وارپته روی رطوبت نسبی گردوها در دمای ۳۲ درجه سانتیگراد و سرعت ۱ متر برثانیه

شکل ۳ تاثیر دما بر روی رطوبت نسبی دو رقم 'سر' و 'Z67' گردو در سرعت ۱ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. افزایش در دمای هوای عبوری، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا دمای هوای بالاتر باعث کاهش بیشتر محتوی رطوبت می‌شود یا به عبارتی دماهای بالاتر باعث انتقال جرم و حرارت بالاتری شده و کاهش رطوبت شدیدتر است.



شکل ۳. تاثیر دما روی رطوبت نسبی گردوها در سرعت ۱ متر برثانیه روی وارپته 'سر' و 'Z67'

شکل ۴ تاثیر منحنی نرخ تبخیر در مقابل محتوی رطوبت در سرعت ۱ متر بر ثانیه بر روی رقم 'سر' و 'Z67' را نشان می‌دهد. مشخص است که نرخ تبخیر از صفر در محتوی رطوبت اولیه شروع شده و پس از مدت کوتاهی به مقدار ماکزیمم خود رسیده و دوباره با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در انتهای خشک شدن با کاهش محتوی رطوبتی به صفر نزدیک می‌شود. در یک دمای یکسان وارپته 'سر' مقدار نرخ تبخیر بالاتری نسبت به بقیه وارپته‌ها دارد. در یک وارپته مشخص ('سر' یا 'Z67') دمای بالاتر نرخ تبخیر بالاتری را منجر می‌شود.



شکل ۴. تاثیر دما روی تبخیر گردوها در سرعت ۱ متر بر ثانیه روی وارپته "سر" و "Z67"

نتایج سرعت هوا روی رطوبت نسبی در شکل ۵ برای دمای ۳۲ درجه سانتیگراد روی وارپته 'پدرو' و 'سر' نشان داده شده است. نتایج مشابهی برای دیگر شرایط مشاهده شد. از اینرو سرعت هوا تاثیر معنی داری روی منحنی تبخیر در لحظات اولیه خشک شدن گردو دارد، با پیشرفت زمان، تاثیر سرعت روی نرخ تبخیر کاهش می یابد.

#### ۴-۴- نتایج برازش منحنی ها

تحلیل رگرسیون چند متغیره در نرم افزار کامپیوتری *MATLAB* انجام شد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن گردو را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار میانگین  $R^2$  و کمترین مقادیر میانگین  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. جدول ۳ نتایج برازش (میانگین ضریب همبستگی،  $\chi^2$  و RMSE و ثابتها) را برای مدل Page که بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن گردو با استفاده از داده های آزمایشگاهی انتخاب شده را نشان می دهد. در تمام آزمایشات، مدل Page همخوانی خوبی برای خشک شدن تک لایه گردو داشت. کلاً "مقدار میانگین  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE برای مدل Page به ترتیب به صورت ۰/۹۹۸۱ -، ۰/۹۹۲۱ و  $10^{-8}$  و  $10^{-4}$  و  $2/527 \times 10^{-4}$  و  $0/21854 - 0/02603$  بدست آمد.

جدول ۳. نتایج برازش و ثابتهای مربوط به مدل Page

واریته	دما	سرعت	$R^2$	RMSE	$\chi^2$	k	n
"پدرو"	۴۳	۱	۰,۹۹۶۲	۰,۰۱۴۰۳۱	$۳,۹۶۴ \times 10^{-۵}$	۰,۱۵۶۱	۰,۷۳۵۳
	۴۳	۳	۰,۹۹۵۳	۰,۰۱۶۲۷۸	$۴,۷۵۳ \times 10^{-۵}$	۰,۱۷۴۰	۰,۷۳۰۸
	۳۲	۱	۰,۹۹۲۱	۰,۰۲۱۰۱۹	$۲,۵۲۷ \times 10^{-۴}$	۰,۱۳۹۸	۰,۷۲۹۶
	۳۲	۳	۰,۹۹۷۶	۰,۰۱۰۹۷۴	$۱,۶۷۴ \times 10^{-۵}$	۰,۱۴۶۵	۰,۷۲۷۸
"سر"	۴۳	۱	۰,۹۹۸۱	۰,۰۱۰۳۸۱	$۶,۶۹۸ \times 10^{-۴}$	۰,۱۴۰۸	۰,۸۱۸۸
	۴۳	۳	۰,۹۹۲۱	۰,۰۲۱۸۵۴	$۲,۵۲۲ \times 10^{-۶}$	۰,۱۴۷۴	۰,۸۰۶۸
	۳۲	۱	۰,۹۹۵۹	۰,۰۱۵۱۷۳	$۵,۰۹۸ \times 10^{-۵}$	۰,۱۲۰۹	۰,۷۹۹۴
	۳۲	۳	۰,۹۹۵۵	۰,۰۱۵۳۱۷	$۴,۶۲۳ \times 10^{-۵}$	۰,۱۵۳۸	۰,۷۳۷۹
"Z۶۷"	۴۳	۱	۰,۹۹۸۴	۰,۰۰۹۶۳۸	$۴,۱۶۸ \times 10^{-۴}$	۰,۱۳۴۹	۰,۸۲۹۲
	۴۳	۳	۰,۹۹۸۳	۰,۰۰۹۸۶۰	$۳,۷۹۰ \times 10^{-۶}$	۰,۱۴۹۹	۰,۸۲۵۰
	۳۲	۱	۰,۹۹۷۱	۰,۰۱۲۷۰۵	$۱,۸۹۶ \times 10^{-۵}$	۰,۱۱۹۰	۰,۸۲۱۴
	۳۲	۳	۰,۹۹۷۴	۰,۰۱۱۶۸۸	$۱,۲۵۹ \times 10^{-۵}$	۰,۱۴۱۸	۰,۷۷۱۰
"K۸۱"	۴۳	۱	۰,۹۹۹۶	۰,۰۰۴۷۱۸	$۱,۲۶۳ \times 10^{-۷}$	۰,۱۲۸۷	۰,۹۱۰۶
	۴۳	۳	۰,۹۹۹۸	۰,۰۰۲۶۰۳	$۱,۰۲۹ \times 10^{-۸}$	۰,۱۴۷۷	۰,۸۸۰۸
	۳۲	۱	۰,۹۹۹۲	۰,۰۰۶۴۰۲	$۸,۱۱۵ \times 10^{-۷}$	۰,۱۱۹۷	۰,۸۴۷۵
	۳۲	۳	۰,۹۹۸۵	۰,۰۰۸۹۲۲	$۲,۵۴۱ \times 10^{-۶}$	۰,۱۴۵۲	۰,۸۱۸۵

#### ۴-۵- تاثیر متغیرها روی ثابتهای مدل Page

نتایج تجزیه واریانس همچنین نشان داد که ثابتهای مدل Page به طور معنی داری ( $P < 0.0000$ ) از دما، واریته و سرعت هوا تاثیر می پذیرد (جدول ۴ و ۵). نتایج بدست آمده با یافته های آبالونه و همکاران [۲۲] همخوانی دارد.

جدول ۲. تجزیه واریانس (ANOVA) برای تاثیر واریته، دمای هوا و سرعت روی k (ثابت مدل Page)

منبع	درجه آزادی	MSE	F	P>F
دما	۱	۰,۰۰۱۵۶	۶۹,۴۸***	۰,۰۰۰
واریته	۳	۰,۰۰۰۹۲	۴۱,۰۴***	۰,۰۰۰
سرعت	۱	۰,۰۰۴۱۲	۱۸۳,۸***	۰,۰۰۰
دما × واریته	۳	۰,۰۰۰۱۹	۸,۲۷***	۰,۰۰۰
دما × سرعت	۱	۰,۰۰۰۲۸	۱۲,۶۳***	۰,۰۰۱
سرعت × واریته	۳	۰,۰۰۰۰۵	n.s. ۲,۳۸	۰,۰۸۶
خطا	۳۵	۰,۰۰۰۰۲		
کل	۴۷			



جدول ۳. تجزیه واریانس (ANOVA) برای تاثیر وارپته، دمای ه ا و سرعت روی n (ثابت مدل Page)

منبع	درجه آزادی	MSE	F	P>F
دما	۱	۰,۰۰۱۵۸	۲۰۷,۵۴***	۰,۰۰۰
وارپته	۳	۰,۰۳۶۵۰	۴۷۷,۳۶***	۰,۰۰۰
سرعت	۱	۰,۰۰۰۶۶	۸۶,۲۲۲***	۰,۰۰۰
دما × وارپته	۳	۰,۰۰۱۷۴	۲۲,۶۸***	۰,۰۰۰
دما × سرعت	۱	۰,۰۰۲۰۸	۲۷,۱۹***	۰,۰۰۰
سرعت × وارپته	۳	۰,۰۰۰۷۶	۹,۸۸***	۰,۰۰۰
خطا	۳۵	۰,۰۰۰۰۸		
کل	۴۷			

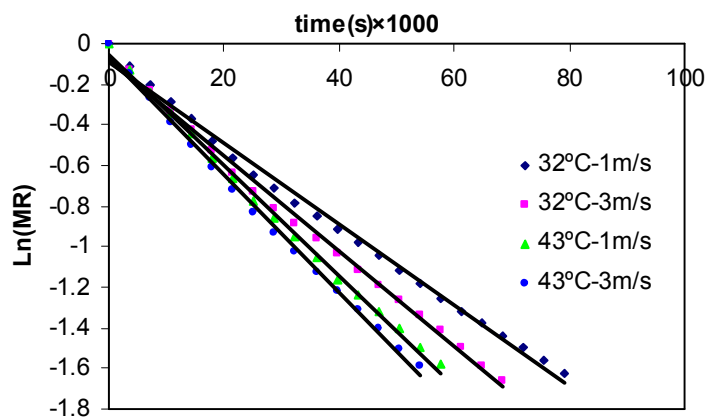
برای محاسبه اثر متغیرهای خشک شدن روی ثابتهای مدل Page، ثابتها در مقابل دمای هوا، سرعت، محتوی رطوبت اولیه ( $W_0$ ) و نسبت وزن چوب به وزن کل (WR) با استفاده از رگرسیون چند متغیره تحلیل شد. تمام ترکیبات ممکن از متغیرهای مختلف خشک شدن مورد تحلیل رگرسیونی قرار گرفتند.

$$n = 1.29V^{-0.0273}W_o^{-0.2274}WR^{-0.4821} \exp\left(-\frac{310.54}{T_{abs}}\right) \quad R=0,9607$$

$$k = 1.397V^{0.1198}W_o^{-0.19}WR^{0.7239} \exp\left(-\frac{592.3}{T_{abs}}\right) \quad R=0,9213$$

#### ۴-۶- محاسبه پخش رطوبتی موثر

در طول پروسه خشک کردن، آزمایشات تا موقعی که گردوها به رطوبت ۸ درصد پایه تر (w.b.%) برسد، ادامه می یافت، رطوبت نسبی (MR) با استفاده از رابطه (۱) بدست آمد. شکل ۶ نمودار Ln(MR) در مقابل زمان (ثانیه)، در شرایط مختلف هوا برای وارپته K۸۲ را نشان می دهد. مقدار  $D_{eff}$  با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می شود. مقادیر  $D_{eff}$  برای آزمایشات در جدول ۶ گزارش شده است. کمترین مقدار پخش رطوبتی برای وارپته 'پ رو' موقعی که سرعت هوا ۱ متر بر ثانیه و دمای هوا ۳۲ درجه سانتیگراد است،  $3/54 \times 10^{-7}$  می باشد. همچنین بیشترین مقدار پخش رطوبتی برای وارپته K۸۲ وقتی سرعت ۳ متر بر ثانیه و دمای هوا ۴۳ درجه سانتیگراد است،  $9/92 \times 10^{-7}$  می باشد. ضریب پخش رطوبتی برای فندق در مدت برشته کردن در محدوده دمایی ۱۰۰-۱۶۰ درجه سانتیگراد بین  $11/759 \times 10^{-7}$  -  $2/301 \times 10^{-7}$  متر مربع بر ثانیه گزارش شده است [۵].



شکل ۶. Ln(MR) در مقابل زمان (ثانیه) برای وارپته K۸۲.

جدول ۶. ضریب پخش موثر برای هر آزمایش

وارپته	دما (°C)	سرعت	$D_{eff}$	$R^2$
”پدرو”	۴۳	۱	$۴,۹۶ \times 10^{-۷}$	۰,۹۶۹۰
	۴۳	۳	$۶,۵۴ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۸۶
	۳۲	۱	$۳,۵۴ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۷۹
	۳۲	۳	$۴,۸۷ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۵۵
”سر”	۴۳	۱	$۶,۰۶ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۹۷
	۴۳	۳	$۶,۹۱ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۵۹
	۳۲	۱	$۴,۵۳ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۴۹
	۳۲	۳	$۴,۵۶ \times 10^{-۷}$	۰,۹۶۷۲
”Z۶۷”	۴۳	۱	$۵,۹۰ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۷۸
	۴۳	۳	$۶,۹۳ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۲۷
	۳۲	۱	$۴,۸۵ \times 10^{-۷}$	۰,۹۸۴۷
	۳۲	۳	$۴,۸۸ \times 10^{-۷}$	۰,۹۷۹۷
”K۸۲”	۴۳	۱	$۹,۳۰ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۷۲
	۴۳	۳	$۹,۹۲ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۶۷
	۳۲	۱	$۶,۸۴ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۴۱
	۳۲	۳	$۸,۰۴ \times 10^{-۷}$	۰,۹۹۵۵

ریضوی [۲۳] بیان کرد که ضریب پخش موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. تاثیر متغیرها (شرایط هوا و ویژگیهای وارپته ها) روی پخش رطوبتی موثر به وسیله یک معادله آرهینوس توصیف می شود. معادله زیر تاثیر متغیرها روی پخش رطوبتی موثر در طول دوره خشک شدن گردو را نشان می دهد.

$$D_{eff} = 1.01 \cdot 10^{-4} V^{0.1275} W_o^{-2.8614} WR^{0.0859} \exp\left(-\frac{2633.6}{T_{abs}}\right) \quad R=0,9193$$

#### ۴-۷- پیشگونی زمان خشک شدن گردوها

زمان (t) خشک شدن گردوها به ویژگیهای وارپته ها و شرایط هوای داغ بستگی دارد. آنالیز رگرسیون چند متغیره برای پیشگونی زمان (t) خشک شدن با متغیرهای وابسته از جمله محتوی رطوبت اولیه ( $W_0$ ), وزن چوب به وزن کل (WR), دماهای هوا ( $T_{abs}$ ) و سرعت هوا (V) انجام شد. متغیرها در آنالیزهای انجام شده  $WR$ ,  $W_0$ ,  $T_{abs}$  و V می باشند. نتایج رگرسیون به صورت معادله زیر حاصل می شود:

$$t = 0.2855V^{-0.0939}W_o^{1.825}WR^{0.8641}\exp\left(\frac{2224.38}{T_{abs}}\right) \quad R=0.9756$$

## ۵- نتایج

- نتایج زیر از این تحقیق می تواند بدست آید:
- (۱) خشک شدن گردو در مرحله نزولی اتفاق می افتد.
  - (۲) واریته، دمای هوای خشک کردن و سرعت هوا فاکتورهای مهمی در زمان خشک شدن گردو و ثابتهای مدل Page می باشند.
  - (۳) دمای هوا فاکتور مهمی در خشک شدن گردوها می باشد. دمای هوای بالا باعث کوتاه شدن زمان خشک شدن می گردد.
  - (۴) مدل Page بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن گردوها می باشد.
  - (۵) ثابتهای مدل Page رابطه خوبی با متغیرهای آزمایش با استفاده از معادله آرهینوس داشت.
  - (۶) پخش موثر از داده های آزمایشگاهی بین  $10^{-7} \times 9/92$  تا  $3/54 \times 10^{-7}$  متر مربع بر ثانیه قرار داشت و وابستگی متغیرها با یک رابطه آرهینوس قابل توصیف است.
  - (۷) زمان خشک شدن براساس ویژگیهای واریته ها و شرایط هوا با یک معادله آرهینوس بیان می شود.

## منابع

- [۱] FAO (2006). Statistical Database. Available from: <http://www.fao.org/>.
- [۲] Mitra, S. K., Rathore, D. S., and Bose, T. K. (1991). *Temperature fruit*. Horticulture and Allied Publishers, Chakraberia Lane, Calcutta, India.
- [۳] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi. A., and Tabil, L.G. (2007). Thin-drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering* 78, 98–108.
- [۴] Fallahi, E. (1998). *Walnut production Manual*. University of California.
- [۵] Ozdemir, M., and Onur Devres, Y. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering* 42, 225±233.
- [۶] Lee, G., Kang, W. S., and Hsieh, F. (2004). Thin-layer drying characteristics of chicory root slices. *Transactions of the ASAE* 47(5), 1619–1624.
- [۷] Buser, M. D., Stone, M. L., Bruswitz, G. H., Maness, N. O., and Whitelock D. P. (1999). Thin-layer drying of marigold flowers and flower components for petal removal. *Transactions of the ASAE* 42(5), 1367–1374.
- [۸] Friant, N. R., Marks B. P., and Bakker Arkema, F. W. (2004). Drying rate of ear corn. *Transactions of the ASAE* 47(5): 1605-1610.
- [۹] Diamante, L. M., and Munro, P. A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51(4), 271–276.
- [۱۰] Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of soild materials. *Industrial Engineering Chemistery* 13, 427–432.
- [۱۱] Henderson, S. M., and Pabis, S. (1961). Grain drying theory. 1. temperature affection drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6, 169–170.
- [۱۲] Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. Sc. Thesis, Purdue University.
- [۱۳] Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy* 26, 457–465.



- [۱۴] Crank, J. (1975). *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- [۱۵] Babalis, S. J., and Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering* 65,449–458.
- [۱۶] Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering* 78, 591–596.
- [۱۷] Pahlavanzadeh, H., Basiri, A., and Zarrabi, M. (2001). Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying. *Drying Technology* 19(1), 217–226.
- [۱۸] Mohsenin, N. N. (1996). *Physical characteristics: physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science publisher.
- [۱۹] Kashaninejad, M., and Tabil, L. G. (2004). Drying characteristics of purslane (*Portulaca oleraceae* L.). *Drying Technology* 2(9), 2183–2200.
- [۲۰] Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 61, 359–364.
- [۲۱] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., and Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristic of garlic slices. *Journal of Food Engineering* 29, 75–97.
- [۲۲] Abalone, R., Gaston, A., Cassinera, A., and Lara, M. A. (2006). Thin Layer Drying of Amaranth Seeds. *Biosystems Engineering* 93 (2), 179–188.
- [۲۳] Rizvi, S. S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of foods*. NY: Marcel Dekker Inc.



## Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during hot air drying

M. Aghbashlo, M. H. Kianmehr, A. Arabhosseini, H. Mehravar, H. Samimi

*Department of Agricultural Technical Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Aboreyhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.*

*Tel: +98 292 302345/23249 fax: +98 292 3020340*

### Abstract

Drying characteristics of walnut were determined experimentally as a function of temperature, air velocity and variety ('Serr', 'Pedro', Z67, K82). In order to estimate and select a suitable form of the drying curve, five different semi-theoretical and/or empirical models were fitted to the experimental data. Experiments were performed at temperatures of the air of 32 and 43°C. At each temperature two air velocity values were adjusted: 1 and 3m/s. Consequently, of all drying models, Page model was selected as the best mathematical model accordingly  $R^2$ ,  $\chi^2$  and RMSE. Drying time and Page model constants were found to be significant dependent of the variables studied. Correlations of drying constant  $k$  and  $n$  with drying air condition and varieties properties were determined in terms of Arrhenius type model. The effective moisture diffusivity of walnuts varied from a minimum of  $3.54 \times 10^{-7}$  to a maximum of  $9.92 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. The variables effect on effective moisture diffusivity represented by an Arrhenius-type relationship.