

## تأثیر دما و سرعت جریان هوا بر سینتیک خشک شدن حین فرآیند برشته کردن پسته با جریان هوای داغ

علی دینی<sup>1</sup> - ناصر صداقت<sup>2\*</sup> - سید محمدعلی رضوی<sup>3</sup> - آرش کوچکی<sup>3</sup> - بیژن ملائکه نیکویی<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1395/01/25

تاریخ پذیرش: 1395/09/07

### چکیده

اطلاع از سینتیک کاهش رطوبت جهت پیش‌بینی رفتار مواد غذایی در طی فرآیند برشته کردن و طراحی برشته‌کن‌ها ضروری است. هدف اصلی در این پژوهش تعیین مدل مناسب تجربی و نیمه‌تجربی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت پسته در فرآیند برشته کردن، بررسی تأثیر دما و سرعت جریان هوا بر سینتیک کاهش رطوبت پسته حین برشته شدن واریته احمدآقایی و به‌دست آوردن ضریب انتشار مؤثر و انرژی فعال‌سازی در فرآیند کاهش رطوبت در حین برشته کردن پسته بوده است. پسته واریته احمد آقایی در آب‌نمک غلیظ غوطه‌ور شده و برشته کردن در دماهای 120، 130، 145، 160 و 170 درجه سلسیوس با سرعت جریان هوای 0/6، 0/88، 1/3، 1/72 و 2 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های آزمایشی با 7 مدل تجربی و نیمه‌تجربی با استفاده از تکنیک آنالیز غیرخطی رگرسیون برازش داده شدند. بیشترین ضریب تبیین، کمترین مربع کای کاهش‌یافته، مدول میانگین نسبی درصد انحراف نشان داد که مدل ویبال، مدل مناسبی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت پسته می‌باشد. همبستگی ثابت‌های مدل ویبال با دما و سرعت جریان هوا تعیین گردیده و ضریب انتشار مؤثر در پسته به‌وسیله قانون دوم فیک در محدوده دمایی 120 تا 170 درجه سلسیوس در محدوده  $4/418 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2/648 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  محاسبه گردید. میانگین انرژی فعال‌سازی کاهش رطوبت با استفاده از مدل آرنیوسی مقدار  $26/156 \text{ kJ mol}^{-1}$  تعیین گردید. ضریب انتشار مؤثر بخار آب در برشته کردن بیشتر از محدوده مشخص شده در خشک کردن در دمای پایین بوده و رابطه مستقیم با دما و سرعت جریان هوا داشت و انرژی فعال‌سازی واکنش، نزدیک به مقادیر گزارش شده برای اغلب فرآورده‌های کشاورزی است.

**واژه‌های کلیدی:** برشته کردن، پسته احمدآقایی، خشک کردن، سینتیک، ضریب نفوذ مؤثر

(Devres, 2000).

### مقدمه

از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی و شیمیایی ایجاد شده در فرآیند برشته کردن آبیگری و خشک شدن، ایجاد تغییرات بافتی در نتیجه اعمال حرارت و گسست اولئوزوم‌ها و واکنش‌های شیمیایی مانند مایلارد است که موجب افزایش رنگ‌دانه‌ها و پیگمان‌های قهوه‌ای و تولید ترکیبات فرار شیمیایی مانند پیرازین‌ها که ارتباط نزدیکی با رایحه و طعم برشته شده دارند را، می‌توان نام برد (Saklar *et al.*, 2001). اغلب تغییرات فیزیکی و شیمیایی در حین خشک شدن رخ داده و به‌نحوی تحت تأثیر میزان رطوبت و سرعت تغییرات این فاکتور در طی فرآیند قرار می‌گیرند (Vega-Gálvez *et al.*, 2009).

استفاده از هوای گرم در دماهای بالاتر از 100 درجه سلسیوس در مغزهای خوراکی و دماهای بالاتر از 150 درجه سلسیوس در محصولات چوبی چون لوبیای کاکائو از رایج‌ترین روش‌های برشته کردن به‌شمار می‌رود (Özdemir and Devres, 1999; ZaMan and Yang, 2013). در این روش ابتدا پسته در آب نمک قرار داده شده و سپس با استفاده از دمش هوای گرم با کاهش رطوبت و نفوذ گرما به داخل مغز خوراکی با انتقال هم‌زمان حرارت و جرم، تغییرات ذکر شده

ایران با تولید حدود 200 هزار تن پسته در سال‌های اخیر پس از ایالات متحده آمریکا به‌عنوان دومین تولیدکننده و صادرکننده پسته در جهان به‌شمار می‌رود که اغلب پسته ایران به‌صورت خام به بازارهای جهانی صادر گردیده و این محصول در کشورهای مختلف به‌صورت برشته شده در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد (IPA, 2015; FAO, 2015). برشته کردن از اولین فرآیندهای انجام شده درخصوص این محصول و مغزهای خوراکی در صنعت است که باعث بهبود خصوصیات حسی و بافتی و در نتیجه افزایش بازارپسندی و امکان عرضه فرآورده جهت مصرف در بازار می‌گردد (Özdemir and

1- دانش‌آموخته دکتری تکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

2 و 3- به‌ترتیب دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد

4- دانشیار، مرکز تحقیقات نانوفناوری دانشگاه علوم پزشکی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: Sedaghat@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v7i2.55115

ضخامت مؤثر بوده‌اند. همچنین ضریب انتقال جرم در محدوده  $7/061 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2/105 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  با میانگین انرژی فعال‌سازی  $33/3 \text{ kJ mol}^{-1}$  گزارش شد (Tavakolipour, 2011).

در تحقیقی که Ozdemir and Devres در سال 1999 انجام داده‌اند مدل‌های مختلف معرفی شده در خصوص خشک کردن را در مورد کاهش رطوبت در حین برشته کردن فندق در دمای 100-160 درجه سلسیوس و سرعت هوای ثابت  $0/8 \text{ m s}^{-1}$  مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش مدل دارای بهترین برازش، مدل Thompson تعیین شد و ضریب انتشار مؤثر در محدوده  $11/759 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2/301 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ارزیابی گردید که از محدوده ضریب انتشار رطوبت در مواد غذایی بالاتر بود (Özdemir and Devres, 1999).

بررسی سینتیک تغییرات رطوبت در مغزهای خوراکی تاکنون در دماهای پایین و در موارد اندکی در دماهای بالا و در سرعت جریان ثابت هوای گرم انجام گرفته است و تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی سینتیک تغییرات رطوبت در حین فرآیند برشته کردن پسته در دماهای بالا و سرعت‌های مختلف جریان هوای گرم انجام نشده است. لذا هدف این پژوهش بررسی سینتیک کاهش رطوبت پسته در فرآیند برشته کردن با هوای گرم در محدوده دمایی 120-170 درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای 0/6-2 متر بر ثانیه و تعیین بهترین مدل تجربی یا نیمه‌تجربی پیش‌بینی‌کننده نسبت رطوبت پسته واریته احمدآقایی در فرآیند برشته کردن است. همچنین در این تحقیق ضریب انتشار مؤثر، اثر آرنیوسی افزایش دما بر ضریب انتشار مؤثر و انرژی فعال‌سازی کاهش رطوبت در فرآیند برشته کردن نیز محاسبه و آنالیز شدند.

## مواد و روش‌ها

### آماده‌سازی

پسته واریته احمدآقایی از شرکت کاشفان کویر رفسنجان (دراچ) تهیه گردید. پسته تازه پس از طی مرحله نم‌گیری به میدان آفتابی منتقل شده و پس از خشک شدن تا رطوبت 4٪، تحت خلأ بسته‌بندی و تا زمان آزمایش در دمای 5 درجه سلسیوس نگهداری گردید. قبل از آماده‌سازی 24 ساعت در دمای آزمایشگاه قرار گرفته و پس از جداسازی دانه‌های ریز و درشت، دانه‌های پسته خام با اندازه  $24/5 \pm 0/5$  عدد در هر انس، با رطوبت اولیه 4٪ بر مبنای خشک ابتدا به مدت 8 دقیقه در آب نمک 17٪ قرار گرفته و به مدت 4 دقیقه آبگیری شد و سپس در رطوبت 19/5-18/5 بر مبنای ماده خشک به دستگاه برشته‌کن آزمایشگاهی منتقل گردید.

### مشخصات سامانه برشته‌کن

دستگاه برشته‌کن شامل دو دمنده هوا، سرعت‌سنج جهت

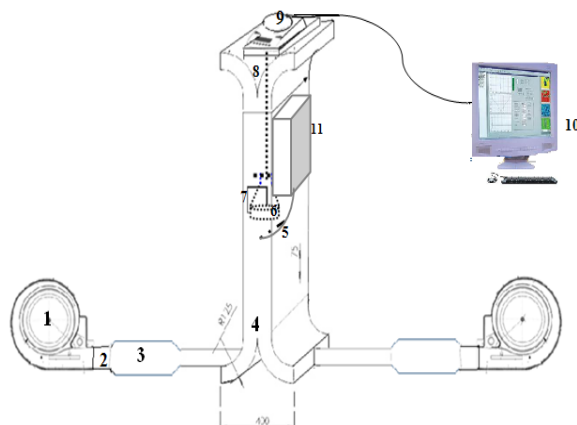
در برشته کردن ایجاد می‌گردد. جهت افزایش کیفیت محصول برشته شده، بررسی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و میکروبی در طی فرآیند مورد نیاز است. کاهش رطوبت یکی از مهم‌ترین و ملموس‌ترین فرآیندهایی است که در حین برشته شدن در دماهای بالاتر از 100 درجه سلسیوس اتفاق افتاده و ویژگی‌های بافتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Özdemir and Devres, 1999). کاهش رطوبت مواد غذایی به خصوصیات حرارتی و انتقال جرم ماده غذایی وابسته بوده و دانستن خصوصیات فیزیکی و حرارتی مانند انتقال جرم، ضریب انتشار، رسانایی حرارتی و گرمای ویژه در خصوص طراحی و آنالیز فرآیند، کنترل کیفیت و استفاده از روش مناسب نگهداری ضروری است.

مدل‌های ریاضی به نحو مناسبی فرآیند خشک شدن (کاهش رطوبت) را تبیین کرده و قادرند اطلاعاتی در خصوص دما و رطوبت را در دسترس ما قرار دهند. در میان مدل‌های ریاضی مدل خشک شدن تک‌لایه به دلیل سادگی در استفاده و عدم نیاز به داده‌های زیاد نسبت به مدل‌های پیچیده دیگر کاربرد وسیعی پیدا کرده است. مدل خشک شدن تک‌لایه در سه بخش مدل‌های تئوری (نظری)، مدل‌های نیمه‌تجربی و مدل‌های تجربی طبقه‌بندی می‌گردند. مدل‌های ریاضی مقاومت درونی ماده را در انتقال رطوبت در نظر گرفته و این در حالی است که مدل‌های دیگر مقاومت خارجی را در خصوص انتقال رطوبت بین ماده غذایی و هوا در نظر می‌گیرند (FortesOkos, 1981; Parti, 1993). مدل‌های نیمه‌تجربی از ساده کردن حل عمومی قانون دوم فیک و یا اصلاح مدل‌های ساده شده به دست آمده‌اند که تنها در شرایط رطوبتی، دما و سرعت جریان هوا و محتوای رطوبتی حاکم بر آزمون اعتبار دارند و با شبیه‌سازی فرآیند خشک کردن، رابطه رطوبت تعادلی با دما و سرعت جریان هوا را نشان می‌دهند (Akpınar, 2006).

مطالعات محدودی در خصوص بررسی سینتیک کاهش رطوبت پسته (در دماهای بالاتر از 100 درجه سلسیوس) انجام شده است. اغلب پژوهش‌ها در محدوده حرارتی کمتر از 100 درجه سلسیوس و سرعت ثابت هوای گرم انجام گرفته است به‌طور مثال در یک پژوهش روند تغییرات و ضریب انتشار در خشک شدن 5 واریته احمدآقایی، اکبری، بادامی، فندق و کله قوچی را در دماهای مختلف با سرعت ثابت جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته و تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان 95٪ در واریته‌های مختلف مشاهده نشد. محدوده ضریب انتشار رطوبت در این پژوهش مقداری بین  $1/4117 \times 10^{-7}$  تا  $6/6777 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  بوده که بستگی به دمای خشک کردن داشت (Kouchakzadeh, 2011). پژوهش مشابه دیگر سینتیک خشک شدن پسته واریته اباصلی را در محدوده دمایی 40 تا 70 درجه سلسیوس در دو سرعت 1 و 2 متر بر ثانیه و به صورت تک‌لایه و با ضخامت 3 و 5 سانتی‌متر مورد بررسی قرار داد نتایج حاکی از آن بود که سرعت جریان هوا تأثیری بر نرخ کاهش رطوبت نداشته ولی دما و

محیط 30% بود. برای انجام آزمایش‌ها، تیمارهایی شامل تغییر سرعت جریان هوا در 5 سطح  $0.6/0.88, 0.72/3, 1/1$  و 2 (در سطح مقطع  $15 \times 25$  سانتی‌متر) و دماهای 120، 145، 160 و 170 درجه سلسیوس استفاده شد و نمونه‌ها تا رسیدن به رطوبت تعادلی صفر مورد آزمون قرار گرفتند. تغییرات وزن توسط ترازوی حساس 0/01 گرم (GX2000, A&D co., Japan) به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری شد و توسط نرم‌افزار WINCT ثبت گردید.

اندازه‌گیری سرعت هوای گرم و بخش گرم‌کننده، کانال هدایت جریان هوای گرم به ابعاد  $15 \times 25$  سانتی‌متر و بخش اندازه‌گیری جرم بود (شکل 1). ظرف نمونه نیز شامل یک ظرف مشبک به قطر 10 سانتی‌متر بود که مقدار 40 گرم نمونه در آن قرار می‌گرفت. حسگر حرارتی مورد استفاده از نوع Pt100 با دقت 0/1 درجه سلسیوس و سرعت‌سنج (Testo, Model400, UK) در 5 سانتی‌متری از ظرف نمونه تعبیه شد. سرعت جریان هوا با استفاده از تنظیم دمپر و با استفاده از سرعت‌سنج کنترل می‌گردید. میانگین رطوبت هوای



**شکل 1-** طرح‌واره دستگاه برشته‌کن آزمایشگاهی و اجزای آن: (1) دمنده هوا، (2) دمپر و سرعت‌سنج هوا، (3) بخش گرمایشی و المنت‌های حرارتی، (4) کانال استیل، (5) سنسور حرارتی، (6) ظرف نمونه، (7) دریچه تغذیه، (8) آگزوز هوای گرم، (9) ترازوی حساس، (10) رایانه و کابل اتصال به رایانه RS232، (11) جعبه کنترل

**Fig. 1.** Schematic diagram of roaster and its details: (1) Blower, (2) Damper and anemometer, (3) Heating elements, (4) Stainless steel canal, (5) Temperature sensor (Pt100), (6) Sample tray, (7) Feeding gate, (8) Hot air exhaust pipe, (9) Sensitive balance, (10) Computer and RS232 computer interface cable, (11) Control Box

کاهش یافته  $(X^2)^2$ ، میانگین نسبی درصد انحراف  $(\%P)^3$  و ریشه میانگین مربع خطا  $(RMSE)^4$  به‌وسیله روابط (2) تا (5) جهت تعیین بهترین مدل برازش‌یافته، به کار گرفته شد.

به‌منظور مدل‌سازی ابتدا نسبت رطوبت در زمان محاسبه شد. نسبت رطوبت  $^5$  مقدار رطوبت پسته در هر زمان نسبت به رطوبت اولیه و نهایی را بیان می‌کند که مطابق رابطه (1) محاسبه گردید. پس از رسم نمودار نسبت رطوبت-زمان، مدل‌های نیمه‌تجربی و تجربی برازش داده شد و بهترین مدل بر اساس پارامترهای تعریف شده در روابط (2) تا (5) تعیین گردید.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

2- Reduced chi - square

3- Mean relative deviation modulus

4- Root mean square error

5- Moisture ratio

پس از روشن کردن دستگاه و ثابت شدن دمای هوای گرم به مدت 15 دقیقه، ابتدا در سرعت و دمای مناسب هر آزمون، ترازو صفر گردید و بلافاصله مقدار 40 گرم نمونه از دریچه تغذیه به سطح ظرف نمونه در کمتر از 4 ثانیه منتقل گردید. سپس درب بخش تغذیه بسته شد و تغییرات وزن در واحد زمان به‌صورت پیوسته توسط نرم‌افزار ثبت شد. هر آزمون در دو تکرار انجام گردید.

#### مدل‌سازی و آنالیز آماری

با استفاده از نرم‌افزار Curve expert 2.2، 5 مدل نیمه‌تجربی ویبال، پیچ اصلاح شده، هندرسون و پاییس، لويس، مدل دوجمله‌ای و دو مدل تجربی تامپسون و مدل ونگ و سینگ به داده‌های آزمایشگاهی برازش شد (جدول 1). ضریب تبیین  $(R^2)^1$ ، مربع کای

1- Coefficient of determination

**جدول 1- مدل‌های نیمه‌تجربی و تجربی استفاده شده در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن تک لایه پسته**

**Table 1- Semi-theoretical and empirical models used for modeling of thin layer drying of pistachio nuts**

رابطه Equation	مدل Model	رفرنس Reference
Fick,s second law (in spherical coordinates)	$\frac{\partial M}{\partial t} = 1/r \frac{\partial}{\partial r} (D_{eff} r \frac{\partial M}{\partial r})$	(Tavakolipour, 2011)
weibull model	MR=exp(-(t/a) b)	(Aghbashlo <i>et al.</i> , 2010)
Henderson_&_pabis model	MR=b.exp(-k.t)	(HendersonPabis, 1961)
two-term model	MR= aexp(-k1.t)+b.exp(-k2.t)	(Henderson, 1974)
Lewis model or Newton model	MR=exp(-k.t)	(Bruce, 1985; O'callaghan <i>et al.</i> , 1971)
modified_page model	MR=exp(-k.t) n	(Overhults <i>et al.</i> , 1973)
thompson model	t=a.lnMR+b.lnMR2	(Thompson <i>et al.</i> , 1968)
wang_&_signh model	MR=1+a t+b t2	(WangSingh, 1978)

سرعت جریان هوا باعث کاهش معنی‌دار زمان خشک شدن شده، در نتیجه با افزایش دما و سرعت جریان هوای گرم، زمان برشته کردن تا رسیدن به رطوبت تعادلی کاهش یافت (شکل 2).

تغییرات محتوی رطوبتی در زمان، برای دماهای 120، 145 و 170 درجه سلسیوس و سرعت جریان 1/3 متر بر ثانیه، در شکل 3 نشان داده شده است. در مدت 10 دقیقه و با سرعت جریان ثابت 1/3 متر بر ثانیه در دماهای 120، 130، 145، 160 و 170 درجه سلسیوس به ترتیب مقدار 64/5، 70/3، 77/1، 83/5 و 89/7 درصد از رطوبت پسته تبخیر می‌گردد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دمای برشته کردن، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل 3 با افزایش سرعت جریان هوا نیز زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه در دمای ثابت 170 درجه سلسیوس در زمان 10 دقیقه به ترتیب کاهش رطوبت به میزان 78/2، 80/8، 89/7 و 97 و 98 درصد در سرعت جریان هوای گرم 0/6، 0/88، 1/3، 1/72 و 2 (متر بر ثانیه) ارزیابی شد.

کاهش رطوبت در فرآیند برشته کردن تحت تأثیر دمای برشته کردن و سرعت جریان هوای گرم قرار می‌گیرد. در شکل 4 و 5 تغییرات سرعت کاهش رطوبت در نسبت‌های رطوبتی مختلف آورده شده که نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه دمای برشته کردن و سرعت جریان هوای گرم بر نرخ خشک شدن است. سرعت کاهش رطوبت با گذشت زمان و کاهش نسبت رطوبتی، کاهش می‌یابد. در این نمودارها نرخ ثابتی از کاهش رطوبت مشاهده نشد و کلیه فرآیند خشک شدن در مرحله سرعت نزولی رخ داده است که نشان‌دهنده مقاومت درونی در خروج رطوبت از پسته می‌باشد. پژوهش‌های اخیر نیز نتایج به‌دست‌آمده را تأیید می‌کنند (Rafiee *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2010). به‌طور مثال Zhu and Shen (2010) نتایج مشابهی را در خصوص خشک کردن هلو در دماهای پایین گزارش نموده‌اند (Zhu and Shen, 2014).

کاهش رطوبت در فرآیند برشته کردن پسته دارای یک مرحله با

$$R^2 = \frac{\sum_i^N (MR_{exp,i} - MR_{pre})^2 - \sum_i^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_i^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (2)$$

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

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N |MR_{pre,i} - MR_{exp,i}| \quad (5)$$

در روابط (1) تا (5)،  $M_t$  رطوبت بر مبنای خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) در زمان  $t$ ،  $M_e$  رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)،  $M_0$  رطوبت اولیه (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)،  $MR_{pre}$  نسبت رطوبت پیش‌بینی شده،  $MR_{exp}$  نسبت رطوبت آزمایشی،  $N$  تعداد نقاط آزمایش و  $n$  تعداد ضرایب ثابت مدل می‌باشد. آنالیز واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها جهت تعیین تأثیر فاکتورهای دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک شدن و ثابت‌های مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی‌کننده سینتیک خشک شدن پسته، با نرم‌افزار 17 MINITAB انجام شد و کلیه نمودارها با نرم‌افزار Excell 2013 رسم شد.

## نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر فاکتورهای دما و سرعت جریان هوا بر زمان و آهنگ کاهش رطوبت معنی‌دار بود (جدول 2) و با توجه به معنی‌دار شدن اثرات دوگانه، مقایسه میانگین این اثرات انجام شد (شکل 2). بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر دما و سرعت جریان هوای گرم بر زمان کاهش رطوبت نمونه‌های پسته در سطح 1٪ معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل فاکتورها نیز معنی‌دار شده است.

بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که افزایش دما و

کردن ماکادامیا، به تأثیر دما به‌عنوان تنها عامل تأثیرگذار و به‌سرعت نزولی در خشک شدن اشاره نموده‌اند ( Özdemir and Devres, 1999; Palipane and Driscoll, 1994).

سرعت نزولی است. پژوهش‌های گذشته دما را به‌عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر سرعت خشک شدن گزارش نموده‌اند. به‌طور مثال Özdemir and Devres در سال 1999 در فرآیند برشته کردن فندق، Palipane and Driscoll در سال 1994 در خصوص خشک

**جدول 2- آنالیز واریانس دمای برشته کردن و سرعت جریان هوای گرم بر زمان و آهنگ کاهش رطوبت و پارامترهای ثابت ویبال**  
**Table 2- Variance analysis of roasting temperature and hot air velocity on time and rate of moisture loss and Weibull constant parameters**

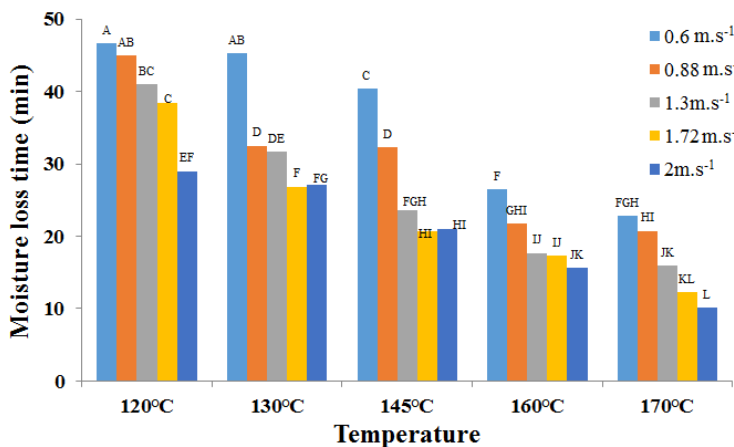
منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares			
		ثابت a constant a	ثابت b constant b	زمان کاهش رطوبت Moisture loss time (min)	آهنگ کاهش رطوبت Moisture loss rate (kg min <sup>-1</sup> )
دما برشته کردن Temperature (A)	4	35.3784**	0.1483**	880.63**	0.000064**
سرعت جریان هوا Air Velocity (B)	4	24.7097**	0.03922**	395.497**	0.000028**
اثر متقابل Interaction (AB)	16	0.8577**	0.00893*	23.199**	0.000003**
Error (E)	25	0.1478	0.00437	4.942	0.000000

\*\*Significant at 1% of probability level

\*Significant at 5% of probability level

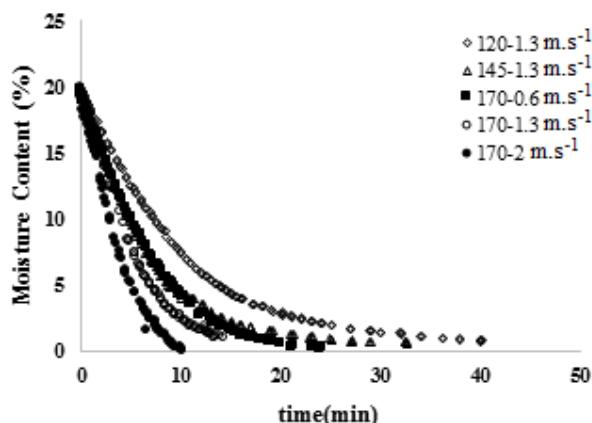
\*\* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال 1٪ می‌باشد.

\* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال 5٪ می‌باشد.



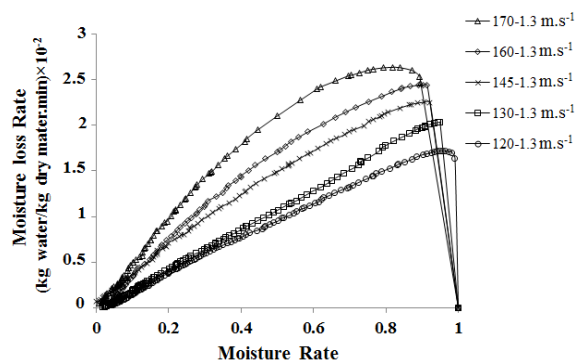
**شکل 2- زمان رسیدن به رطوبت تعادلی (صفر) در فرآیند برشته کردن پسته در تیمارهای مختلف**  
 (حروف متفاوت در یک ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح 5٪ می‌باشد)

**Fig. 2. Drying time of pistachio nuts to reach equilibrium moisture content at different treatments**  
 (Different letters within the same column indicate significant difference (P < 0.05))



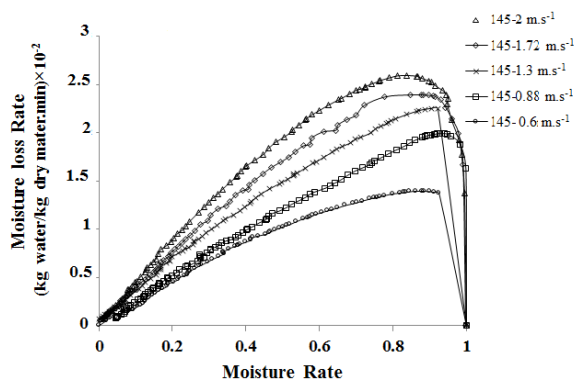
شکل 3- نمودار محتوی رطوبتی بر زمان برشته کردن پسته

Fig. 3. Moisture content versus roasting time of Pistachio nuts



شکل 4- نمودار سرعت خشک شدن در مقابل نسبت رطوبت برای دماهای مورد مطالعه وقتی سرعت جریان هوا 1/3 متر بر ثانیه است

Fig. 4. Drying rate curves versus moisture ratio for different temperature when air velocity is  $1.3 \text{ m s}^{-1}$



شکل 5- نمودار سرعت خشک شدن در مقابل نسبت رطوبت برای سرعت جریان هوای مختلف و دمای 145 درجه سلسیوس

Fig. 5. Drying rate curves versus moisture ratio for different air velocity when temperature is  $145^\circ\text{C}$

در انتشار رطوبت قرار می‌گیرد. در پژوهش‌های گذشته سرعت جریان هوا به‌عنوان عاملی کم اثر و یا بدون تأثیر اشاره شده است (Palipane and Driscoll, 1994; Madamba *et al.*, 1996; Tavakolipour, 2011) که بالاتر از حد بحرانی تأثیری بر فرآیند

در خصوص دانه‌ها و مغزهای خوراکی نیز خشک شدن در مرحله نزولی<sup>1</sup> گزارش شده است که تحت تأثیر مقاومت درونی ماده غذایی

1- Falling rate period

**جدول 3- معیارهای برازش مدل‌های خشک‌شدن لایه نازک در برشته کردن پسته و ضرایب ثابت مدل‌ها**

**Table 3- Curve fitting criteria of the thin layer drying models for the roasting of pistachio and Constant coefficients of models**

مدل MODEL x=time(min)	متغیرهای برشته کردن Roasting parameters			R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	%P	k		k1	k2
	دما Temperature	سرعت جریان هوا Air velocity						a(min)	b		
Weibull MR=exp(-(x/a)^b)	120	0.6		0.997	0.000	0.060	1.263	12.358	1.072		
	120	1.3		0.992	0.001	0.048	2.255	9.659	1.044		
	120	2		0.992	0.001	0.122	2.011	8.379	1.229		
	145	0.6		0.998	0.000	0.052	1.091	11.628	1.169		
	145	1.3		0.995	0.000	0.034	1.816	6.536	1.089		
	145	2		0.997	0.000	0.017	1.323	6.882	1.235		
	170	0.6		0.999	0.000	0.051	0.586	6.992	1.179		
	170	1.3		0.996	0.000	0.023	1.371	5.303	1.295		
	170	2		0.994	0.001	0.069	1.951	4.053	1.520		
	170	0.6		0.996	0.329	0.419	49.925	-11.304	0.703		
Thompson t=a.lnMR+b.lnMR <sup>2</sup>	120	1.3		0.948	5.074	0.307	156.008	-8.879	0.434		
	120	2		0.998	0.088	0.253	22.284	-9.273	-0.871		
	145	0.6		0.995	0.348	0.401	48.534	-12.016	-0.452		
	145	1.3		0.897	6.415	0.361	140.778	-7.348	-0.261		
	145	2		0.995	0.212	0.328	39.216	-7.277	-0.525		
	170	0.6		0.997	0.161	0.289	31.135	-7.287	-0.481		
	170	1.3		0.987	0.339	0.263	44.294	-5.572	-0.427		
	170	2		0.955	33.175	2.235	499.426	-4.186	-0.468		
	120	0.6		0.998	0.000	0.027	1.198	1.032	0.0014		
	120	1.3		0.992	0.001	0.032	2.297	1.017	0.00176		
Henderson&pabis MR=b.exp(-k.x)	120	2		0.986	0.002	0.135	3.329	1.054	0.00216		
	145	0.6		0.995	0.000	0.040	1.609	1.049	0.00149		
	145	1.3		0.995	0.001	0.039	1.991	1.031	0.00265		
	145	2		0.992	0.001	0.073	2.433	1.074	0.00263		
	170	0.6		0.994	0.001	0.079	2.062	1.047	0.00253		
	170	1.3		0.987	0.001	0.082	2.575	1.101	0.00357		
	170	2		0.965	0.003	0.112	4.671	1.164	0.00498		
	120	0.6		0.996	0.000	0.019	1.450	-0.067	0.001		
	120	1.3		0.962	0.003	0.118	4.618	-0.073	0.001		
	120	2		0.961	0.004	0.126	5.629	-0.075	0.001		
Wang_ & Signh MR=1+a x+b x <sup>2</sup>	145	0.6		0.997	0.000	0.057	1.476	-0.070	0.001		
	145	1.3		0.939	0.006	0.144	6.725	-0.098	0.002		
	145	2		0.989	0.001	0.047	2.492	-0.107	0.003		
	170	0.6		0.992	0.001	0.079	2.430	-0.105	0.003		
	170	1.3		0.989	0.001	0.002	2.482	-0.140	0.005		
	170	2		0.989	0.001	0.077	2.669	-0.185	0.008		
	120	0.6		0.998	0.000	0.019	0.990	0.000	1.035	-0.190	0.085
	120	1.3		0.992	0.001	0.032	2.297	0.507	0.510	0.106	0.106
Two-term MR= a.exp(-k <sub>1</sub> .x)+b.exp(-k <sub>2</sub> .x)	120	2		0.986	0.002	0.135	3.329	0.526	0.528	0.130	0.130
	145	0.6		0.995	0.000	0.040	1.612	0.524	0.525	0.090	0.090
	145	1.3		0.995	0.001	0.039	1.991	0.516	0.515	0.159	0.159
	145	2		0.992	0.001	0.073	2.433	0.531	0.543	0.158	0.158
	170	0.6		0.994	0.001	0.079	2.062	0.518	0.529	0.152	0.152
	170	1.3		0.987	0.001	0.082	2.575	0.543	0.558	0.214	0.214
	170	2		0.965	0.003	0.112	4.671	0.581	0.597	0.301	0.301
	120	0.6		0.996	0.000	0.069	1.647	0.080			
Lewis MR=exp(-k.x)	120	1.3		0.992	0.001	0.047	2.254	0.104			
	120	2		0.983	0.002	0.118	3.773	0.123			
	145	0.6		0.991	0.001	0.075	2.429	0.084			
	145	1.3		0.994	0.001	0.028	2.166	0.153			
	145	2		0.985	0.001	0.033	3.388	0.145			
	170	0.6		0.992	0.001	0.054	2.481	0.145			
	170	1.3		0.977	0.002	0.034	3.625	0.195			
	170	2		0.939	0.006	0.048	6.580	0.257			
Modified_page MR=exp(-k.x)^n	120	0.6		0.996	0.000	0.069	1.647	0.348	0.230		
	120	1.3		0.992	0.001	0.047	2.254	0.252	0.412		
	120	2		0.983	0.002	0.118	3.773	0.330	0.373		
	145	0.6		0.991	0.001	0.075	2.429	0.357	0.237		
	145	1.3		0.994	0.001	0.028	2.166	0.365	0.420		
	145	2		0.985	0.002	0.033	3.388	0.461	0.315		
	170	0.6		0.992	0.001	0.054	2.481	0.404	0.359		
	170	1.3		0.977	0.002	0.038	3.633	0.512	0.381		
170	2		0.939	0.006	0.048	6.580	0.399	0.644			

کمترین مقدار مربع کای کاهش یافته، مدول میانگین نسبی درصد انحراف و ریشه میانگین مربع خطا بود. مدل ویبال دارای دو ثابت  $a$  و  $b$  است که نشان‌دهنده تأثیر متغیرهای برشته کردن به‌ویژه دما و سرعت جریان هوا بر سینتیک کاهش رطوبت می‌باشد. ثابت  $a$  بر حسب زمان بوده و نشان‌دهنده زمان کاهش تقریبی 63٪ از محتوی رطوبتی می‌باشد و ثابت  $b$  با سرعت انتقال جرم در آغاز فرآیند ارتباط دارد. پایین‌تر بودن ثابت  $b$  نشان‌دهنده بالاتر بودن سرعت خشک شدن در آغاز فرآیند است (Corzo *et al.*, 2008; Aghbashlo *et al.*, 2010)

آنالیز واریانس نشان داد که دما و سرعت جریان هوای گرم تأثیر معنی‌داری بر ثابت‌های مدل ویبال داشته و در نتیجه تأثیر معنی‌داری بر سینتیک کاهش رطوبت داشت (جدول 2). با افزایش دما و سرعت جریان هوا میزان ثابت  $a$  در محدوده 12/358 - 4/053 دقیقه کاهش و ثابت  $b$  در محدوده 1/539 - 0/984 افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم هر دو فاکتور دما و سرعت جریان هوا بر سینتیک کاهش رطوبت می‌باشد. به‌طور کلی با افزایش دما و سرعت جریان هوای گرم به‌ترتیب ثابت  $a$  و  $b$  کاهش و افزایش می‌یابند که نتایج مشابه پژوهش‌های گذشته است (Corzo *et al.*, 2010).

تأثیر شرایط دما و سرعت جریان هوا در آزمون‌ها بر ضرایب مدل ویبال با استفاده از رگرسیون چندگانه تعیین شد. به‌طور کلی می‌توان سینتیک کاهش رطوبت پسته را در فرآیند برشته کردن در دماهای 170-120 درجه سلسیوس با استفاده از مدل ویبال به‌صورت رابطه (6) بیان نمود.

$$MR = \exp\left(-\left(\frac{3.738 - 0.03767T - 0.6505V + 0.000138T^2 + 0.1323V^2 + 0.00281TV}{1817.8 - 6.3506T - 669.799V - 0.0006T^2 + 139.576V^2 + 0.96497TV}\right)\right) \quad (6)$$

$$a = 1817.8 - 6.3506T - 669.799V - 0.0006T^2 + 139.576V^2 + 0.96497TV \quad R^2 = 0.95 \quad (7)$$

$$b = 3.738 - 0.03767T - 0.6505V + 0.000138T^2 + 0.1323V^2 + 0.00281TV \quad R^2 = 0.85 \quad (8)$$

(2007). پسته کامل را می‌توان کروی و یا استوانه در نظر گرفت. به‌دلیل هتروژن بودن پسته در شکل ظاهری، در 100 عدد پسته احمدآقایی میزان کرویت در رطوبت 4 درصد در محدوده 0/74-0/66 تعیین گردید که مشابه محدوده مشخص شده در پژوهش گذشته است (Razavi *et al.*, 2007). لذا با فرض یکسان بودن شکل و عدم تغییر خصوصیات فیزیکی، فرض کروی بودن، خروج رطوبت تنها از طریق پدیده انتشار و خشک شدن در ناحیه سرعت نزولی، عدم وابستگی ضریب انتشار نزولی به محتوی رطوبتی، یکسان بودن شرایط محیطی از جمله رطوبت و دمای محیط و تبعیت تأثیر افزایش دما از رابطه آرنیوس، با استفاده از رابطه (9)، شعاع هندسی کره  $5/74 \times 10^{-3}$  (m) در نظر گرفته شد و مدل‌سازی ریاضی با

سرعت بحرانی مقدار  $0/102 \text{ m s}^{-1}$  در خصوص دانه‌های خوراکی و حبوبات (Henderson and Pabis, 1962)،  $0/14 \text{ m s}^{-1}$  برای لوبیای سویا و لوبیای سفید (Hutchinson and Otten, 1983) گزارش شده است. این در حالی است که نتایج حاکی از آن است که سرعت هوای گرم به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر سینتیک کاهش رطوبت در پسته می‌باشد (شکل 3) و دلیل آن را می‌توان جذب رطوبت سطحی در پوست پسته، عدم انتشار رطوبت به داخل مغز پسته در مرحله آماده‌سازی و وجود دو عامل مقاومت خارجی و مقاومت درونی به‌طور هم‌زمان در انتقال رطوبت در فرآیند برشته کردن دانست. به‌علاوه وجود فضای آزاد بین مغز و پوست استخوانی دلیل دیگری است که افزایش سرعت جریان هوا بیشتر از سرعت بحرانی ذکر شده باعث کاهش لایه مرزی گردیده و موجب تأثیر قابل توجه سرعت جریان هوا بر کاهش رطوبت می‌گردد. محمد پور و همکاران در خصوص خشک کردن پسته با استفاده از خشک‌کن بستر سیال نتیجه مشابه مبنی بر تأثیر سرعت جریان هوا را گزارش نموده‌اند که مشابه نتایج به‌دست‌آمده می‌باشد (Mohammadpour *et al.*, 2007).

#### برازش مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی

در این مطالعه 5 مدل نیمه‌تجربی و دو مدل تجربی با داده‌های آزمایش برازش داده شدند که همه مدل‌ها دارای ضریب تبیین مناسب بودند (>90٪). همان‌گونه که در جدول 3 مشخص شده است مدل ویبال بهترین مدل با بیشترین مقدار ضریب تبیین (>99/2٪)،

#### مدل‌سازی کاهش رطوبت در برشته کردن تک لایه پسته

کاهش رطوبت در برشته کردن پسته در منطقه سرعت نزولی مشاهده شد و به‌واسطه انتشار رطوبت از سطح و مرکز پسته در شرایطی غیر پایا فرآیند خشک شدن را کنترل می‌کند. از رابطه دوم فیک جهت تشریح و توصیف نحوه کاهش رطوبت استفاده شد.

پسته و مغز پسته دارای شکل ناهمگون و نامنظم هستند. در پژوهش پیشین محدوده ضریب کرویت 0/743-0/674 در خصوص 5 نوع پسته کشیده<sup>1</sup> و گرد<sup>2</sup> گزارش شده است (Razavi *et al.*, )

- 1- Long pistachio
- 2- Round pistachio



سرعت جریان هوای  $0/6 \text{ m s}^{-1}$  و بیشترین ضریب انتشار مؤثر  $(2/648 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  در دمای  $170^\circ\text{C}$  و سرعت جریان هوای  $2 \text{ m s}^{-1}$  محاسبه گردید. همان گونه که در جدول 4 نشان داده شده است با افزایش دما و سرعت جریان هوا، ضریب انتشار مؤثر افزایش یافت. افزایش دما در سرعت ثابت جریان هوا، باعث تغییر در شیب منحنی و در نتیجه در ضریب نفوذ مؤثر گردید (شکل 6D). ضرایب انتشار محاسبه شده بیش از محدوده ضریب انتشار مؤثر  $(10^{-9}$  تا  $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  در فرآیند خشک شدن مواد غذایی ارزیابی گردید.

توکلی پور در سال 2011 ضریب نفوذ رطوبت در پسته در دمای  $40-70$  درجه سلسیوس را در محدوده  $7/061 \times 10^{-10}$  تا  $2/105 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  در وارپته اباضی تعیین نموده است. در حالی که کاشانی نژاد و همکاران ضریب نفوذ رطوبت در وارپته اوحدی در دمای  $25-70^\circ\text{C}$  را در محدوده  $5/42 \times 10^{-11}$  تا  $9/29 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  گزارش کردند (Kashaninejad et al., 2007; Tavakolipour, 2011). نتایج این گزارشها با تحقیقات بر روی وارپته‌های پسته کشور ترکیه در محدوده دمایی  $40-60^\circ\text{C}$   $(3/15 \times 10^{-10}$  تا  $6/26 \times 10^{-10})$  مطابقت دارند (Karatas and Battalbey, 1991). همان گونه که در جدول 4 مشخص شده نتایج حاصل از این پژوهش به واسطه استفاده از دماهای بالاتر در فرآیند برشته کردن با نتایج تحقیقات گذشته در خصوص خشک کردن پسته در دماهای کمتر از  $100^\circ\text{C}$  متفاوت است. نتیجه مشابه در تحقیقات Ozdemir and Devres مشاهده شد. این محققین ضرایب نفوذ بخار آب در فرآیند برشته کردن فندق در دمای  $100-160$  درجه سلسیوس را بیش از محدوده تعیین شده برای خشک کردن مواد غذایی گزارش نموده‌اند.

دما نیز مانند ترکیب ماده غذایی و وارپته بر میزان ضریب انتشار بخار آب تأثیر می‌گذارد (Rizvi, 1986). با افزایش دما انتقال حرارت افزایش و به واسطه آن میزان انتقال بخار آب به واسطه افزایش فشار جزئی، افزایش می‌یابد.

تأثیر افزایش دما بر ضریب انتشار عموماً با رابطه آرنیوسی محاسبه می‌گردد و این رابطه جهت پیش‌بینی ضریب انتشار در دماهای مختلف به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. همان گونه که در شکل 7 مشخص شده با رسم نمودار  $\ln D_{\text{eff}}$  در مقابل عکس دما ( $1/^\circ\text{K}$ ) در سرعت جریان،  $0/6-2 \text{ ms}^{-1}$  و محاسبه شیب خط، انرژی فعال‌سازی برای سرعت جریان هوای گرم  $0/6$ ،  $1/3$ ،  $1/72$  و  $2$  متر بر ثانیه به ترتیب مقدار  $24/53 \text{ kJ mol}^{-1}$ ،  $27/94 \text{ kJ mol}^{-1}$ ،  $28/52 \text{ kJ mol}^{-1}$  و  $24/77 \text{ kJ mol}^{-1}$  محاسبه شد.

استفاده از رابطه (10) و (11) انجام گرفت.

$$Dg = (LWT)^{1/3} \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ D_{\text{eff}} r \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (10)$$

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left( -\frac{n^2 D \pi^2}{r^2} t \right) \quad (11)$$

در رابطه‌های (9) تا (11)،  $Dg$  قطر هندسی،  $L$  طول پسته ( $m$ )،  $W$  شعاع پسته ( $m$ )،  $T$  ضخامت پسته ( $m$ )،  $D$  ضریب انتشار مؤثر  $(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$  شعاع پسته ( $m$ ) می‌باشد. با استفاده از رسم نمودار  $\ln(MR)$  بر زمان ( $t$ ) شیب این منحنی به دست آمده که برابر با رابطه (12) است.

$$k = \frac{D_{\text{eff}} \cdot \pi^2}{r^2} \quad (12)$$

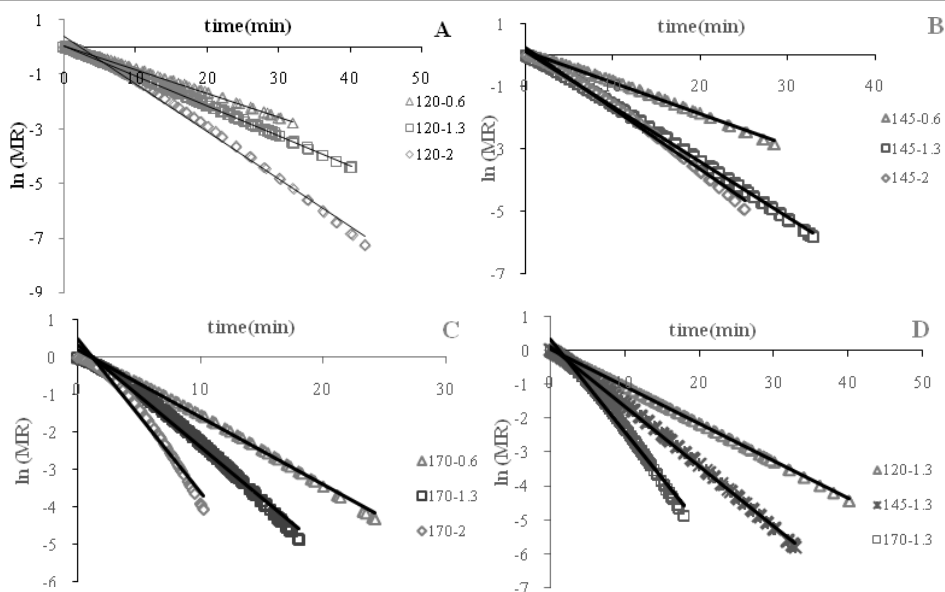
مدل هندرسون و پاییس حل مرتبه اول از رابطه (11) است. با توجه به اینکه ضریب تبیین در برازش این مدل با داده‌های تجربی  $>96\%$  می‌باشد. این مدل نیز مانند مدل ویبال دارای برازش مناسبی بود. از این رو با استفاده از حل این رابطه می‌توان به شکل حل ریشه اول رابطه فیک رسید. در این مدل همچنان که در جدول 3 مشخص شده میانگین عرض از مبدأ برابر است با  $1/052$  که با حل ریاضیاتی آن  $\left(\frac{6}{\pi^2}\right)$  متفاوت است. دلیل آن کم بودن زمان فرآیند به دلیل بالا بودن دمای فرآیند است در صورتی که عموماً مدل هندرسون و پاییس جهت زمان‌های بالای خشک شدن به دست آمده و پیشنهاد می‌گردد. نتیجه مشابه در برشته کردن فندق در دمای بالای  $100$  درجه سلسیوس نیز گزارش شده است (Ozdemir and Onur Devres, 1999). با توجه به اینکه ضریب انتشار تحت تأثیر دما و سرعت جریان هوا قرار می‌گیرد، لذا جهت حل رابطه به شکل ریاضی رابطه دما و سرعت جریان هوا (به عنوان متغیر مستقل) بر ضریب  $k$  در مدل هندرسون با استفاده از رگرسیون چندگانه با ضریب تبیین  $0/95$  بود و حل ریاضی سینتیک کاهش رطوبت به صورت رابطه 13 محاسبه شد.

$$MR = 1.052 \exp(-kt) \quad (13)$$

$$k = 0.31 - 0.011167T - 0.07921T^2 + 0.0003997T^3 - 0.019371T^4 + 0.0013187T^5$$

#### محاسبه ضریب انتشار و انرژی فعال‌سازی

همان گونه که در شکل 6 نشان داده شده است جهت محاسبه ضریب انتشار مؤثر منحنی  $\ln(MR)$  نسبت به زمان رسم شد و از ضرب شیب منحنی در  $\frac{r^2}{\pi^2}$  ضریب انتشار مؤثر در دما و سرعت جریان هوای گرم محاسبه گردید. کمترین ضریب انتشار مؤثر  $(4/418 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$  مربوط به نمونه برشته شده در دمای  $120^\circ\text{C}$ ،



شکل 6- نمودار  $\ln MR$  نسبت به زمان برشته کردن پسته در دمای ثابت و سرعت‌های هوای متفاوت (A-C) و سرعت ثابت و دماهای متفاوت (D)

Fig. 6.  $\ln MR$  versus roasting time of Pistachios at different hot air velocity and constant temperature.(A-C), and different hot air temperature and constant air velocity (D)

**جدول 4- ضریب انتشار مؤثر بخار آب در فرآیند برشته کردن پسته در شرایط مختلف**

**Table 4:** Effective diffusivity coefficient for drying of pistachio nuts at different conditions

دما برشته کردن Roasting temperature (°C)	سرعت جریان هوای گرم Hot air velocity (m s <sup>-1</sup> )	ضریب انتشار مؤثر Effective diffusion coefficient D <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
120	0.6	4.418×10 <sup>-9</sup>
120	0.88	4.159×10 <sup>-9</sup>
120	1.3	5.238×10 <sup>-9</sup>
120	1.72	7.323×10 <sup>-9</sup>
120	2	9.088×10 <sup>-9</sup>
130	0.6	4.925×10 <sup>-9</sup>
130	0.88	6.152×10 <sup>-9</sup>
130	1.3	6.597×10 <sup>-9</sup>
130	1.72	8.022×10 <sup>-9</sup>
130	2	9.176×10 <sup>-9</sup>
145	0.6	5.176×10 <sup>-9</sup>
145	0.88	6.074×10 <sup>-9</sup>
145	1.3	7.61×10 <sup>-9</sup>
145	1.72	1.103×10 <sup>-8</sup>
145	2	1.120×10 <sup>-8</sup>
160	0.6	7.827×10 <sup>-9</sup>
160	0.88	8.695×10 <sup>-9</sup>
160	1.3	1.029×10 <sup>-8</sup>
160	1.72	1.061×10 <sup>-8</sup>
160	2	1.348×10 <sup>-8</sup>
170	0.6	1.072×10 <sup>-8</sup>
170	0.88	1.300×10 <sup>-8</sup>
170	1.3	1.500×10 <sup>-8</sup>
170	1.72	2.000×10 <sup>-8</sup>
170	2	2.648×10 <sup>-8</sup>

محدوده دمای استفاده شده تأثیر چشم‌گیر و معنی‌داری بر انرژی فعال‌سازی نداشت. توکلی پور (2011) انرژی فعال‌سازی را مقدار

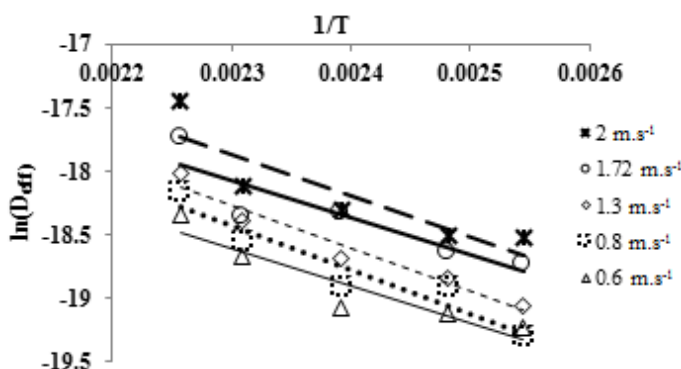
نتایج نشان داد افزایش سرعت جریان هوای گرم اثر معنی‌داری بر انرژی فعال‌سازی (شیب نمودار) نداشته و سرعت جریان هوا در

افزایش یافته و ثابت a در مدل ویبال از مقدار 12/358 دقیقه در دمای 120 درجه سلسیوس و سرعت جریان 0/6 متر بر ثانیه به 4/053 دقیقه در دمای 170 درجه سلسیوس و سرعت جریان 2 متر بر ثانیه کاهش و ثابت b از مقدار 0/984 به 1/539 افزایش یافت. همچنین افزایش دما و سرعت جریان هوا در محدوده شرایط آزمایش باعث افزایش 5 برابری ضریب نفوذ مؤثر (از  $4/418 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  تا  $2/648 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) گردید. به دلیل استفاده از دماهای بالا در فرآیند برشته کردن، ضریب انتشار در محدوده  $10^{-9}$  تا  $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ارزیابی گردید که بیش از محدوده تعریف شده برای مواد غذایی و ضریب انتشار بخار آب در خشک کردن پسته در دماهای پایین بود. میانگین انرژی فعال سازی  $26/615 \text{ kJmol}^{-1}$  محاسبه شد. سرعت جریان هوا در محدوده دمای استفاده شده تأثیر قابل توجه و معنی داری بر انرژی فعال سازی نداشت.

$33/3 \text{ kJmol}^{-1}$  در سال 1991 Karatas and Batalbey این فاکتور را در پسته غازی تپه  $37/55 \text{ kJmol}^{-1}$  و کاشانی نژاد و همکاران در سال 2007 در پسته وارپته فندق  $30/79 \text{ kJmol}^{-1}$  تخمین زده‌اند (Tavakolipour, 2011; Kashaninejad *et al.*, 2007; ) (Batalbey and Karatas, 1991).

### نتیجه گیری

مدل ویبال بهترین مدل با بیشترین ضریب تبیین و کمترین مربع کای کاهش یافته، مدول میانگین نسبی درصد انحراف و ریشه میانگین مربع خطا جهت پیش بینی نسبت رطوبت پسته در فرآیند برشته کردن در دماهای بالا است. سینتیک تغییرات رطوبت در زمان برای فرآیند برشته کردن پسته با هوای گرم در دماهای بالا، تحت تأثیر هر دو فاکتور سرعت جریان هوا و دما قرار گرفت. با افزایش دو فاکتور مؤثر دما و سرعت جریان هوای گرم، سرعت کاهش رطوبت



شکل 7- رابطه آرنیوسی بین ضریب نفوذ و دما در سرعت جریان هوای گرم متفاوت

Fig. 7. Arrhenius type relationship between effective diffusivity coefficient and temperature at different hot air velocity

### References

1. Aghbashlo, M., M. H. Kianmehr, and S. R. Hassan-Beygi. 2010. Drying and rehydration characteristics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.). Journal of food processing and preservation 34: 351-365.
2. Akpinar, E. K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. Journal of food engineering 73: 75-84.
3. Bruce, D. 1985. Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 C. Journal of Agricultural Engineering Research 32: 337-348.
4. Corzo, O., N. Bracho, and C. Alvarez. 2010. Weibull Model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages. Journal of food processing and preservation 34: 993-1008.
5. Corzo, O., N. Bracho, A. Pereira, and A. Vásquez. 2008. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. LWT-Food Science and Technology 41: 2023-2028.
6. FAO. Food and Agriculture organization. 2014. Available at: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>
7. Fortes, M., and M. R. Okos. 1981. Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer

- in corn kernels. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers] 24: 761-0769.
8. Henderson, S. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation [for maize]. Transactions of the ASAE 17:1167-1168.
  9. Henderson, S., and S. Pabis. 1961. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research 6: 169-174.
  10. Henderson, S., and S. Pabis. 1962. Grain drying theory: IV. The effect of air flow rate on the drying index. Journal of Agricultural Engineering Research 7: 85-89.
  11. Hutchinson, D., and L. Otten. 1983. Thin-layer air drying of soybeans and white beans. International Journal of Food Science & Technology 18: 507-522.
  12. IPA (Iranian Pistachio Association website). 2015. Iran and US annual pistachio production comparison. Available at: <http://iranpistachio.org/en/statistical-archive>.
  13. Karatas, S., and F. Battalbey. 1991. Determination of moisture diffusivity of pistachio nut meat during drying. Lebensmittel-Wissenschaft Technologie 24: 484-487.
  14. Kashaninejad, M., A. Mortazavi, A. Safekordi, and L. Tabil. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering 78: 98-108.
  15. Kouchakzadeh, A. 2011. Moisture diffusivity of five major varieties of Iranian pistachios. American Journal of Food Technology 6: 253-259.
  16. Madamba, P. S., R. H. Driscoll, and K. A. Buckle. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of food engineering 29: 75-97.
  17. Mohammadpour, V., M. H. Mosavian, and A. Etemadi. 2007. Determination of effective diffusivity coefficient and activation energy of shelled pistachio by using fluidized bed dryer. Archive of SID.
  18. O'callaghan, J., D. Menzies, and P. Bailey. 1971. Digital simulation of agricultural drier performance. Journal of Agricultural Engineering Research 16: 223-244.
  19. Overhults, D., G. White, H. Hamilton, and I. Ross. 1973. Drying soybeans with heated air. Transactions of the ASAE 16: 112-0113.
  20. Özdemir, M., and Y. Onur Devres. 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. Journal of Food Engineering 42: 225-233.
  21. Özdemir, M., and O. Devres. 2000. Analysis of color development during roasting of hazelnuts using response surface methodology. Journal of Food Engineering 45: 17-24.
  22. Palipane, K. B., and R. H. Driscoll. 1994. The thin-layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. Journal of food engineering 23: 129-144.
  23. Parti, M. 1993. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. Journal of Agricultural Engineering Research 54: 339-352.
  24. Rafiee, S., M. Sharifi, A. Keyhani, M. Omid, A. Jafari, S. S. Mohtasebi, and H. Mobli. 2010. Modeling effective moisture diffusivity of orange slice (Thompson Cv.). International Journal of Food Properties 13: 32-40.
  25. Razavi, S. M., B. Emadzadeh, A. Rafe, and A. M. Amini. 2007. The physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. Journal of Food Engineering 81: 209-217.
  26. Rizvi, S. S. 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. Engineering properties of foods 2:223-309.
  27. Saklar, S., S. Katnas, and S. Urgan. 2001. Determination of optimum hazelnut roasting conditions. International Journal of Food Science & Technology 36: 271-281.
  28. Tavakolipour, H. 2011. Drying kinetics of pistachio nuts (*Pistacia vera* L.). World Appl Sci J 12: 1639-

- 1646.
29. Thompson, T., R. Peart, and G. Foster. 1968. Matllematical Simulation of Corn Drying A New Model. Transaction of the ASAE 11: 582-586.
  30. Vega-Gálvez, A., K. Di Scala, K. Rodríguez, R. Lemus-Mondaca, M. Miranda, J. López, and M. Perez-Won. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum* L. var. Hungarian). Food Chemistry 117: 647-653.
  31. Wang, C., and R. Singh. 1978. Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying. Transactions of American Society of Agricultural Engineers 11: 668-672.
  32. Xiao, H. W., C. L. Pang, L. H. Wang, J. W. Bai, W. X. Yang, and Z. J. Gao. 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. Biosystems Engineering 105: 233-240.
  33. ZaMan, W. Z., and T. A. Yang. 2013. Effect of Superheated Steam and Convection Roasting on Changes in Physical Properties of Cocoa Bean (*Theobroma cacao*). Food Science Technology Research 19 (2): 181-186.
  34. Zhu, A., and X. Shen. 2014. The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. International Journal of Heat and Mass Transfer 72: 345-351.

## The Effect of Temperature and Air Velocity on Drying Kinetics of Pistachio Nuts during Roasting by using Hot Air Flow

A. Dini<sup>1</sup> - N. Sedaghat<sup>2\*</sup> - S. M. A Razavi<sup>3</sup> - A. Koocheki<sup>3</sup> - B. Malaekheh-Nikouei<sup>4</sup>

Received: 13-04-2016

Accepted: 27-11-2016

### Introduction

Pistachio nut is one of the most delicious and nutritious nuts in the world and it is being used as a salted and roasted product or as an ingredient in snacks, ice cream, desserts, etc. The purpose of roasting is to promote flavour and texture changes in nuts that ultimately increase the overall palatability of the product. Roasting involves a number of physico-chemical changes, including heat exchange, chemical reactions and drying. Knowledge of desorption kinetics is essential to predict the behavior of the material during roasting process and to design roaster equipment. The main aim of this research was to evaluate suitable models for predicting moisture ratio, the effect of air temperature and velocity on the drying kinetics of pistachio nuts and obtain the effective diffusivity coefficient and activation energy in the drying process during the roasting of pistachio nuts.

### Materials and Methods

Dried Ahmadaghaei pistachio nuts were supplied from Kashefan Kavir company (Doraj co.) in Rafsanjan. Pistachio nuts were soaked in 17% salt solution for 8 minute and roasting was investigated at air temperatures of 120, 130, 145, 160 and 170 °C and air velocities of 0.6, 0.88, 1.3, 1.72 and 2 ms<sup>-1</sup>. Five semi-theoretical and two empirical kinetic models were fitted to drying experimental data using nonlinear regression analysis techniques in the Curve Expert 2.2 computer program.

### Results and Discussion

Tow-way ANOVA indicated that temperature and hot air velocity significantly affected the drying process during roasting of shelled pistachio nuts. The higher roasting temperatures and air velocities resulted in the higher drying rates. During first 10 min of roasting at constant air velocity of 1.3 ms<sup>-1</sup>, 64.5%, 70.3%, 77.1%, 83.5%, 89.7% of the moisture were removed at roasting air temperatures of 120 °C, 130 °C, 145 °C, 160 °C, 170 °C, respectively. The high regression coefficients ( $R^2 > 0.996$ ) and low reduced chi-square ( $\chi^2$ ), mean relative deviation modulus P (%) and Root Mean Square Error (RMSE) indicated that the Weibull models are suitable for predicting moisture ratio. Correlations of the Weibull model constants with the variables of temperature and velocity were determined. Additionally, effective diffusivity ( $D_{\text{eff}}$ ) determined by using Fick's second law was varied from  $4.418 \times 10^{-09}$  to  $2.648 \times 10^{-08}$  m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> over the temperature and air velocity ranges. The lowest and highest  $D_{\text{eff}}$  values were found for samples roasted at temperature of 120°C with air velocity of 0.6 m s<sup>-1</sup> and temperature of 170°C with air velocity of 2 ms<sup>-1</sup>, respectively. Temperature dependence of the diffusivity coefficient was described by Arrhenius-type relationship. Also average activation energy was obtained 26.615 kJ mol<sup>-1</sup>.

### Conclusions

The results of this study showed that temperature and hot air velocity significantly affect the drying kinetics during roasting of pistachio nuts. The effective diffusion coefficient determined in this study was more than the limits specified in food products drying at lower temperatures and there was direct relationship between temperature and hot air velocity with effective diffusion. Activation energy was obtained close to some agricultural products.

**Keywords:** Ahmadaghaei pistachio nuts, Drying, Effective diffusion, Kinetics, Roasting

1- Ph.D Student of Food Science and Technology, Department of Food science, engineering and Technology, Faculty of Agricultural, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

2- Associate Professor, Department of Food science, engineering and Technology, Faculty of Agricultural, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

3- Professor, Department of Food science, engineering and Technology, Faculty of Agricultural, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran

4- Nanotechnology Research Center, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran

(\* - Corresponding Author Email: sedaghat@um.ac.ir)