

اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص های کیفی پسته دامغان (*Pistacia vera* L.) و تعیین ضرایب نفوذ موثر در شرایط بهینه این فرآیند

حمید توکلی پور^{1*}، احمد کلباسی اشتری²، علیرضا بصیری³

1- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار

2- دانشیار گروه صنایع غذایی دانشکده مهندسی بیوسستم دانشگاه تهران، کرج، پردیس دانشکده های کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

3- استادیار، پژوهشکده صنایع شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

چکیده

اثرات پارامترهای دما (40، 50، 60 و 70 درجه سانتیگراد) و سرعت جابجایی هوا (1 و 2 متر بر ثانیه) و همچنین ضخامت بستر [1] (تک لایه) 3 و 5 سانتی متر]] بر سرعت کاهش رطوبت و شاخص های کیفی فرآورده نهایی، شامل عدد پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد روغن پسته با استفاده از خشک کن های آزمایشگاهی با جریان متقاطع بررسی و شرایط بهینه خشک کردن تعیین گردید. با استفاده از نظریه انتشار و قانون دوم فیک، ضرایب نفوذ موثر تعیین و توسط رابطه آرنیوس، میانگین انرژی فعال سازی خشک کردن نیز محاسبه گردید.

کلید واژگان: پسته، خشک کردن، ضریب نفوذ موثر، پارامترهای کیفی، انرژی فعال سازی

1- مقدمه

سال 1380 خورشیدی حدود 380000 هکتار از زمین های کشاورزی با میانگین بازده 1150 کیلوگرم در هکتار به باغات پسته اختصاص داده شده است [4]. در حال حاضر ایران با صادرات بیش از 110000 تن پسته در سال، بزرگترین صادر کننده پسته جهان است [5]. تحقیقات انجام گرفته، نشان می دهند که کیفیت مطلوب پسته، هنگامی حاصل می شود که برداشت محصول حداکثر 2 تا 3 هفته پس از رسیدگی کامل انجام و در کوتاه ترین زمان ممکن پس از برداشت، خشک گردد. زمان مناسب برداشت، هنگامی است که 70 درصد پوسته نرم بیرونی از پوسته سخت آن به راحتی جدا گردد. بسته به واریته، فصل برداشت از

سرزمین ایران نه تنها منشا اصلی پسته به شمار می آید بلکه کشت پسته در آن از دیرباز رایج بوده است. در حال حاضر ایران بزرگترین تولید کننده و صادر کننده پسته در جهان است که حدود 56% از تولید جهانی و حدود 70% از صادرات جهانی پسته را به خود اختصاص داده است. گونه های خوراکی پسته (پیستاسیا ورا¹، خنجک² و بنه³)، در فلات ایران پراکنده اند. در بیش از 99 درصد از باغات پسته کشور از گونه پیستاسیا ورا به عنوان پایه استفاده می شود [3 و 2 و 1]. مقاومت درخت پسته نسبت به شرایط نامساعد محیطی و همچنین ارزش اقتصادی بالای آن، باعث گردیده که کشت و تولید آن در سالهای اخیر گسترش یابد به گونه ای که در

* مسئول مکاتبات: htavakoli@iaus.ac.ir

1. *Pistacia vera* L.
2. *Pistacia khinjuk*
3. *Pistacia mutica*

اواخر مرداد تا اواخر مهر ماه می باشد [6] .

رطوبت پسته در هنگام برداشت 35 تا 40 درصد (بر مبنای وزن تر) است که در طول فرآیند خشک کردن به سطح رطوبت ایمن¹ (4 تا 6 درصد)، کاهش می یابد. در رطوبت ایمن محصول پایدار است و فعالیت آبی آن کمتر از 0,6 است، بنابراین دچار آسیبهای میکروبی (باکتریها- مخمرها- قارچها و کپکها) نمی شود. بخش اعظم پسته برداشت شده در محیط آزاد و بصورت آفتابی خشک می شود و در کنار آن، بخشی نیز در پایانه های ضبط پسته فرآیند می گردد که این فرآوری، بدلیل عدم دسترسی به دانش فنی مورد نیاز اغلب به صورت تجربی انجام می گردد [7 و 2] . هر چند تحقیقات وسیعی برای خشک کردن فرآورده های کشاورزی و غذایی دانه ای مانند غلات و حبوبات انجام گرفته است، لیکن اطلاعات کافی در مورد خشک کردن پسته به خصوص واریته های بومی کشور وجود ندارد. گازر و همکاران [8] اثرات تغییرات دما در سه سطح، سرعت جابجایی هوای گرم در سه سطح، و ضخامت لایه پسته در دو سطح را بر روی زمان و آهنگ خشک شدن پسته رقم کله قوچی کرمان مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش دما تا 90 درجه سانتیگراد باعث بیش از 50 درصد افزایش زمان و افزایش آهنگ خشک کردن می شود. همچنین پیشنهاد کردند که از دمای 90 درجه سانتیگراد برای برشته گی و از دمای 75 درجه سانتی گراد برای خشک کردن پسته استفاده شود. غضنفری و همکاران [5] فرایند خشک کردن پسته را با سه روش خشک کردن آفتابی، خشک کن خورشیدی و خشک کن هوای داغ بررسی نموده و نتیجه گیری کردند که مدت زمان خشک کردن پسته در خشک کن خورشیدی طولانی تر از خشک کن هوای داغ و کوتاهتر از خشک کردن آفتابی است. همچنین کیفیت پسته خشک شده با خشک کن خورشیدی از دو روش دیگر بهتر بود. کاشانی نژاد و همکاران [9] اثر روشهای مختلف خشک کردن مانند خشک کردن آفتابی، سیلویی و غیره را بر روی کیفیت پسته بررسی نموده و نتیجه گرفتند که کیفیت پسته خشک شده در خشک کن سیلویی از نظر اندیس های شیمیایی و ارزیابی حسی از روشهای دیگر مطلوبتر بوده است. کاراتاس و باتالبی [10] میزان رطوبت واریته قاضی آنتپ² (بومی ترکیه) پس از آبیگری

مجدد یا بازآبوشی³ به 25-22 درصد افزایش و سپس محصول را با جریان هوای یکنواخت و رطوبت نسبی یکسان در دامنه دمایی 60-35 درجه سانتیگراد خشک نمودند. چن و سینگ رقم پسته کرمان (بومی ایالت کالیفرنیا آمریکا) را مورد مطالعه و مدل های ریاضی بر مبنای نظریه انتشار⁴ و معادلات انتقال گرما و جرم برای شبیه سازی فرآیند خشک کردن دو مرحله ای شامل خشک کردن بسترسیال و بستر ثابت ارائه نمودند [11]. در تحقیق مذکور، شبیه سازی کامپیوتری نیز برای روش های خشک کردن فوق الذکر انجام گرفت. همچنین کادر در گزارشی، انواع سیستم های مورد استفاده جهت خشک کردن دانه پسته را تشریح کرده است [6].

اهداف اصلی تحقیق حاضر عبارتند از: بررسی فرآیند خشک کردن پسته و ارائه منحنی های زمان و آهنگ خشک کردن، تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن و محاسبه ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی با استفاده از مدل سازی ریاضی بر مبنای نظریه انتشار.

2- مواد و روش ها

فرآیند خشک کردن دانه های پسته دامغان، رقم عباسعلی (از ارقام مهم دامغان)، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح های کاملاً تصادفی با چهار سطح از دما (40، 50، 60 و 70 درجه سانتیگراد)، دو سطح از سرعت هوا (2 متر بر ثانیه) و سه سطح از ضخامت بستر خشک کن (تک لایه، 3 و 5 سانتیمتر)، در خشک کن های آزمایشگاهی با جریان متقاطع و در چهار تکرار بررسی گردید. نمونه مورد آزمایش در محفظه استوانه ای با کف مشبک به قطر 12 و ارتفاع 10 سانتیمتر قرار گرفت. برای اندازه گیری سرعت جریان هوای گرم ورودی به بستر خشک کن، از دستگاه سرعت سنج هوا با دقت 0,1 متر در ثانیه، مدل AM-4201 شرکت لوترون ساخت تایوان استفاده شد. طول آزمایشات توسط دماسنج - رطوبت سنج مدل HT-3003 شرکت لوترون، تغییرات دمای آزمایشگاه 23 تا 30 درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی هوای محیط 20 تا 35% اندازه گیری شد. فرآیند خشک کردن تا رسیدن رطوبت نهایی نمونه ها به محدوده 4 تا 5 درصد، ادامه یافت. پس از پایان فرآیند، نمونه ها بسته بندی شده و در دمای کمتر از 10 درجه سانتیگراد جهت

3. Rehydration
4. Diffusion theory

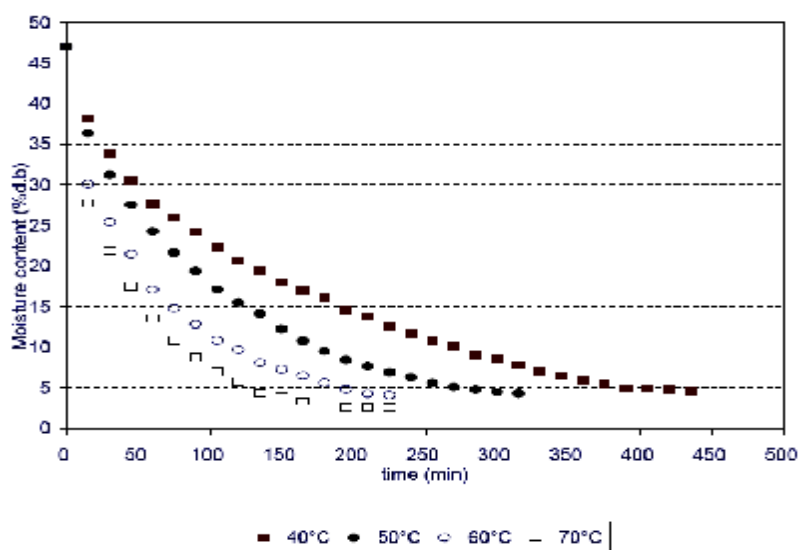
1. Safety moisture level
2. Gaziantep variety

[10 و 12]. طرح آماری به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و در چهار تکرار انجام و با استفاده از نرم افزار SAS داده های حاصله تجزیه و تحلیل گردید.

3- نتایج و بحث

منحنی های زمان و آهنگ خشک کردن

اثرات دما، سرعت هوا و ضخامت بستر بر تغییرات درصد رطوبت (بر مبنای وزن خشک) دانه های پسته و در جریان گذشت زمان در شکلهای 1 تا 3 و اثر کاهش رطوبت مغز پسته بر آهنگ خشک شدن محصول در شکل 4 نشان داده شده است.



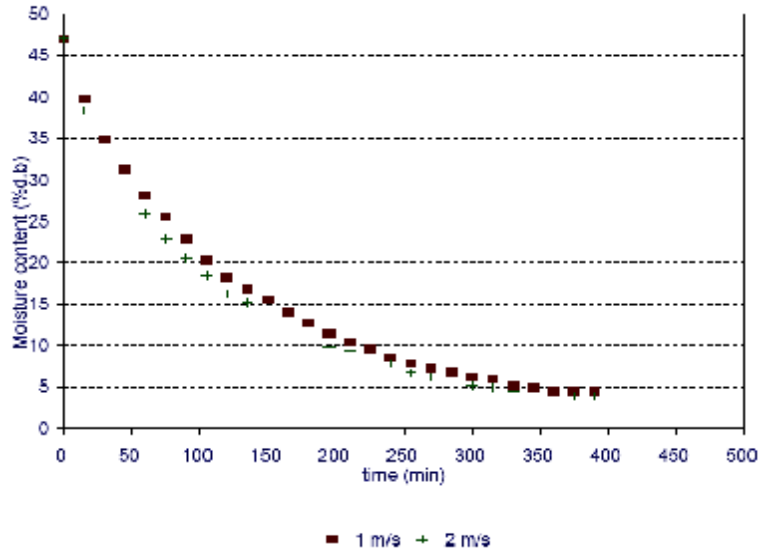
شکل 1 اثر تغییرات دمای هوا بر کاهش درصد رطوبت پسته بر حسب زمان خشک کردن (سرعت جابجایی هوا 2 متر بر ثانیه و ضخامت بستر 3 سانتیمتر)

مدل سازی فرآیند خشک کردن

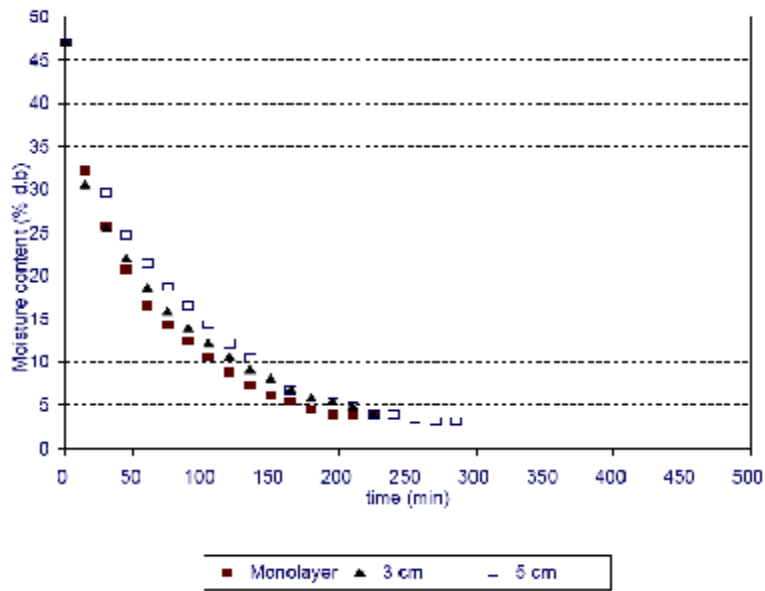
با توجه به قرار گرفتن منحنی آهنگ خشک کردن پسته در مرحله سرعت نزولی، امکان به کارگیری مدل انتشار، برای تجزیه و تحلیل فرآیند میسر می شود [14 و 15 و 16].

تعیین شاخص های کیفی نگهداری گردیدند. با استفاده از روشهای حجمی و وزنی شعاع میانگین دانه پسته با پیش فرض فرض کروی بودن، اندازه گیری گردید. میزان رطوبت نمونه ها، با خشک کردن آنها در اتاقک خلا در دمای 70 درجه سانتیگراد و فشار منفی 900 میلی بار تا دستیابی به وزن ثابت اندازه گیری شد [12]. استخراج روغن نمونه ها توسط حلالهای کلروفرم/متانول (2:1 حجمی حجمی) در دمای پایین و محیط تاریک انجام گرفت. سپس حلالهای مورد استفاده تحت خلاء و در دمای 30 درجه سانتیگراد تبخیر و از روغن جدا شدند [10 و 13]. عدد پر اکسید روغن پسته به روش تیتراسیون یدومتری و درصد اسیدهای چرب آزاد آن به روش تیتراسیون و بر مبنای اسید اولئیک اندازه گیری شدند

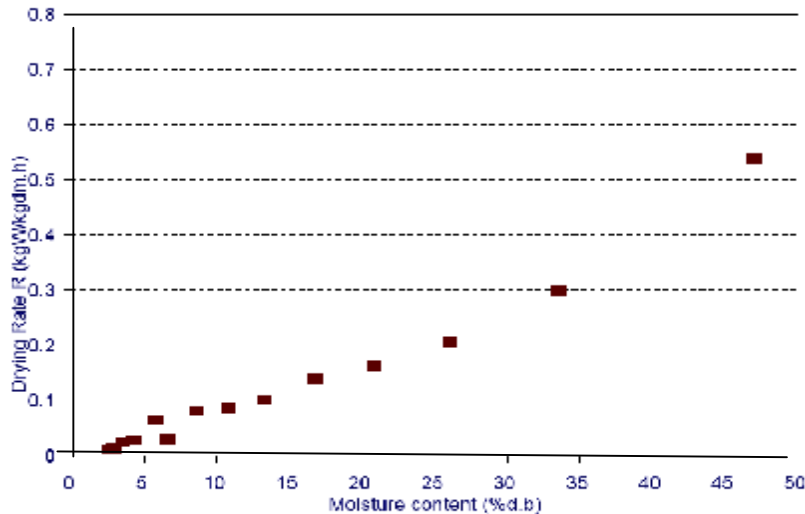
بررسی این منحنی ها و به خصوص شکل شماره 4 نشان می دهد که در تمامی شرایط تحت بررسی، آهنگ خشک شدن تمامی نمونه های پسته در مرحله آهنگ نزولی قرار داشته و این نتایج با یافته های محققین در مورد ارقام دیگر پسته مطابقت دارد [10 و 11].



شکل 2 اثر تغییرات سرعت هوا بر کاهش درصد رطوبت پسته بر حسب زمان خشک کردن (دما 50 درجه سانتیگراد و ضخامت بستر 5 سانتیمتر)



شکل 3 اثر تغییرات ضخامت بستر بر کاهش درصد رطوبت پسته بر حسب زمان خشک کردن (دما 60 درجه سانتیگراد و سرعت جابجایی هوا 1 متر بر ثانیه)



شکل 4 اثر تغییرات درصد رطوبت بر شدت خشک شدن پسته در دمای 70 درجه سانتیگراد، سرعت جابجایی هوای 2 متر بر ثانیه و ضخامت بستر 5 سانتیمتر

نظر به اینکه مقدار حاصل به یک نزدیک بود، لذا کروی فرض کردن پسته خطای آزمون کم و قابل اغماصی بود.

ب: در شرایط مورد مطالعه برای خشک کردن پسته D_{eff} یا ضریب نفوذ موثر مستقل از رطوبت محصول بوده و تابعیت دمایی آن از طریق رابطه آرنیوس بیان گردید.

پ: دما، رطوبت و فشارها در طول فرآیند خشک شدن برای همه دانه های محصول یکنواخت فرض شد.

ت: شرایط مرزی معادله (1) عبارتند از:

$$X(r, t) = X(r, 0) = X_i$$

$$X(r, \infty) = X_e$$

ج: انتقال رطوبت از مرکز به سطح دانه های پسته در فاز نزولی آهنگ خشک کردن بوده و عمدتاً از طریق انتشار مولکولی صورت گرفت.

با توجه به فرض ها و شرایط مرزی فوق، حل معادله (1) به صورت صورت معادله (2) ارائه شد:

(2)

$$MR = \frac{\bar{X} - X_e}{X_i - X_e} = \frac{6}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 p^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

که در آن \bar{X} میانگین رطوبت، X_e رطوبت تعادلی، X_i رطوبت اولیه پسته در فاز نزولی و یا رطوبت بحرانی (همگی بر پایه وزن خشک) و MR (نسبت رطوبت)، n تعداد بی نهایت تغییرات رطوبت در طی خشک کردن محصول و t زمان این فرآیند بود. با دقت خوبی تنها جمله اول رشته زمانی فوق

مدل سازی فرآیند خشک کردن

با توجه به قرار گرفتن منحنی آهنگ خشک کردن پسته در مرحله سرعت نزولی، امکان به کارگیری مدل انتشار، برای تجزیه و تحلیل فرآیند میسر می شود [14 و 15 و 16]. بنابراین با استفاده از قانون دوم فیک¹ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (1)$$

که در آن X ، میزان رطوبت پسته بر مبنای خشک، r شعاع دانه پسته و D_{eff} ، ضریب نفوذ موثر می باشد.

برای حل معادله 1 فرضهای ساده کننده زیر در نظر گرفته شد:

الف: دانه های پسته کروی بوده و شعاع میانگین آنها با استفاده از اندازه گیرهای وزنی و حجمی بدست آمد. دلیل بکارگیری فرض کروی پسته داده های پیرسون و همکاران [17] است که مقادیر میانگین نیم قطر بزرگ (a) نیم قطر متوسط (b) و نیم قطر کوچک (c) برای پسته را به ترتیب 9,925، 7,53 و 6,75 میلی متر ارائه نمودند. با توجه به فرمول محسنین [18] ضریب کروی طبق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$f = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} = \frac{(9.925 \times 7.53 \times 6.75)^{\frac{1}{3}}}{9.925} = 0.8$$

1. Ficks second law

با گرفتن لگاریتم از این معادله، معادله (5) حاصل شد:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

پروتئین و چربی

تغییرات معنی داری در میزان پروتئین و چربی در نمونه‌های خشک شده پسته و در دامنه دمایی تحت بررسی مشاهده نگردید و این نتایج با داده‌های گازر و همکاران در همین زمینه همخوانی داشت [8].

یا موقعی که $n=1$ در نظر گرفته شد و با گرفتن لگاریتم از معادله (21)، معادله (31) بدست آمد:

$$\ln MR = \ln \frac{\bar{X} - X_e}{X_i - X_e} = \ln \frac{6}{p^2} - \frac{p^2 D_{eff}}{r^2} t \quad (3)$$

با توجه به فرضهای ذکر شده تابعیت ضریب نفوذ موثر بر حسب دما، توسط رابطه آرنیوس یا معادله (41) بیان گردید:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

که در آن D_0 ضریب نفوذ مؤثر در دمای مبنا، E_a انرژی فعال سازی، R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق هر فرایند بود.

جدول 1 امتیازبندی تیمارهای مختلف برای خشک کردن پسته

تیمار	زمان خشک کردن (min)	آهنگ خشک کردن (kgW/kgDM.h)	عدد پراکسید (meq/kg)	درصد اسیدهای چرب آزاد (برحسب اسید اولئیک)	جمع امتیاز
a ₁ b ₁ c ₁	---	---	*	*	**
a ₁ b ₁ c ₂	---	---	*	*	**
a ₁ b ₁ c ₃	---	---	---	*	*
a ₁ b ₂ c ₁	---	---	*	*	**
a ₁ b ₂ c ₂	---	---	---	*	*
a ₁ b ₂ c ₃	---	---	---	*	*
a ₂ b ₁ c ₁	*	*	*	*	****
a ₂ b ₁ c ₂	*	*	---	*	****
a ₂ b ₁ c ₃	*	*	---	---	**
a ₂ b ₂ c ₁	*	*	*	*	****
a ₂ b ₂ c ₂	*	*	---	*	****
a ₂ b ₂ c ₃	*	*	---	*	****
a ₃ b ₁ c ₁	*	*	*	*	****
a ₃ b ₁ c ₂	*	*	---	*	****
a ₃ b ₁ c ₃	*	*	---	*	****
a ₃ b ₂ c ₁	*	*	---	*	****
a ₃ b ₂ c ₂	*	*	---	*	****
a ₃ b ₂ c ₃	*	*	---	*	****
a ₄ b ₁ c ₁	*	*	*	*	****
a ₄ b ₁ c ₂	*	*	*	*	****
a ₄ b ₁ c ₃	*	*	*	*	****
a ₄ b ₂ c ₁	*	*	*	*	****
a ₄ b ₂ c ₂	*	*	---	*	****
a ₄ b ₂ c ₃	---	*	---	*	**

a: a₁=40°C, a₂=50°C, a₃=60°C, a₄=70°C

b: b₁=1m/s, b₂=2m/s

c: c₁= monolayer, c₂=3cm, c₃=5cm

تعیین شرایط بهینه فرآیند خشک کردن پسته

پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد روغن پسته مورد بررسی قرار گرفت. برای پارامترهای زمان و آهنگ خشک

برای تعیین شرایط بهینه خشک کردن پسته، پارامترهای زمان و شدت خشک کردن و همچنین شاخص‌های کیفی شامل عدد

محاسبه ضرایب نفوذ مؤثر و انرژی فعال

سازی

ضرایب نفوذ در دامنه دمایی 40 - 70 درجه سانتیگراد، سرعت جابجایی هوا با 1 متر بر ثانیه و ضخامت بسترتک لایه تعیین گردید. شرایط مذکور بخشی از شرایط بهینه تعیین شده در قسمت قبلی است. با رسم منحنی $\ln MR$ بر حسب زمان خشک کردن (شکل 5) و داشتن شعاع میانگین محصول، ضرایب نفوذ مؤثر (D_{eff}) مربوط به درجه حرارت‌های مختلف خشک کردن از طریق برآورد از ضریب زاویه بخش خطی هر نمودار و استفاده از معادله (3) تعیین گردید.

نتایج این برآوردها که در جدول 3 ارائه شده بیانگر تابعیت ضریب نفوذ مؤثر نسبت به دما می باشد. با رسم $\ln D_{eff}$ بر حسب T^{-1} (شکل 6) و با استفاده از معادله (4) و ضریب زاویه خط بدست آمده، میانگین انرژی فعال سازی نیز محاسبه گردید. طبق محاسبات انجام شده، انرژی فعال سازی فرآیند خشک کردن در سیستم یکای CGS برابر $kcal/mol$ $E_a = 7/962$ و در سیستم یکای SI برابر $E_a = 33/33 kJ/mol$ گردید.

جدول 3 ضرایب نفوذ مؤثر برای خشک کردن پسته کامل

در شرایط بهینه		
ضریب نفوذ مؤثر	شعاع	دما (°C)
(m ² /s)	(cm)	
$7/061 \times 10^{-10}$	0/63	40
$9/736 \times 10^{-10}$	0/63	50
$1/548 \times 10^{-9}$	0/63	60
$2/105 \times 10^{-9}$	0/63	70

مقایسه با داده های ارائه شده توسط محققین دیگر

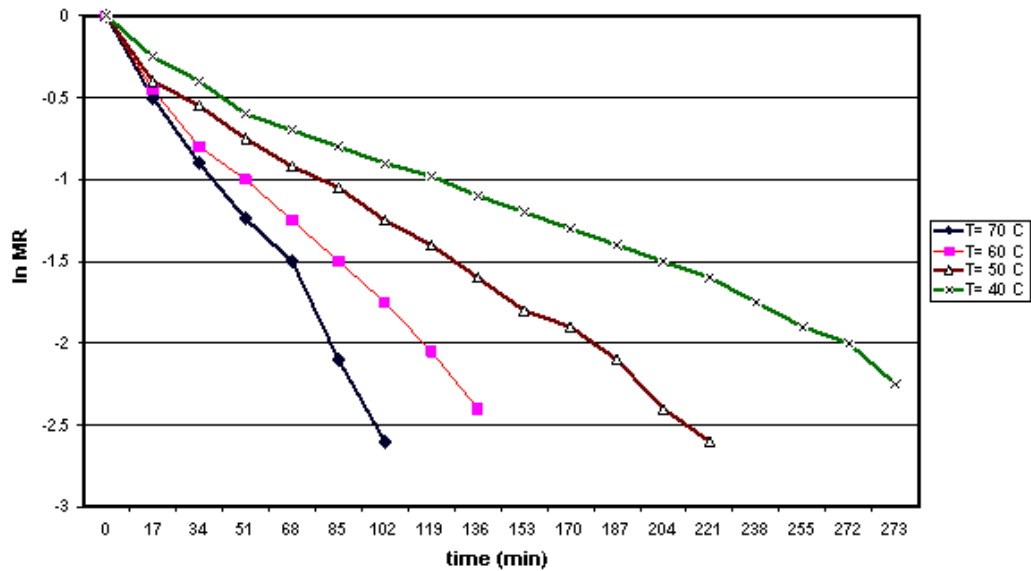
مقایسه داده های ضریب نفوذ مؤثر بدست آمده در این پژوهش (جدول 2) با نتایج تحقیقات کاراتاس و باتالی، علی رغم متفاوت بودن ارقام و شرایط آزمون، نشان دهنده نزدیکی نتایج دو تحقیق به یکدیگر است [6]. در تحقیق مذکور ضریب نفوذ پسته رقم قاضی آنتب در اولین دوره آهنگ نزولی از 10^{-10} تا $3/15 \times 10^{-10}$ در دمای 40 درجه سانتیگراد تا $6/26 \times 10^{-10}$ مترمربع در ثانیه در دمای 60 درجه سانتیگراد تغییر می کند.

کردن با توجه به تحلیل های آماری به ترتیب مقادیر 300 دقیقه و $0/0709 kgW/(kgDM.h)$ انتخاب گردید و جهت عدد پراکسید و درصد اسیدهای چرب آزاد با ملاحظه استاندارد روغن ها و چربی ها به ترتیب حد بالای $10 meq/kg$ و 1 درصد (بر حسب اسید اولئیک) در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط ذکر شده، امتیازات اکتسابی تیمارها در جدول 1 ارائه گردید. در این جدول a بیانگر تیمار دمای هوا (در چهار سطح) b، تیمار سرعت جابجایی هوا (در دو سطح) و c تیمار ضخامت بستر (در سه سطح) و هر امتیاز در این جدول با یک ستاره مشخص شد. همانطور که در جدول 1 مشاهده می شود از میان 24 تیمار تحت بررسی شرایط بهینه جهت خشک کردن پسته با هوای داغ، متعلق به 7 تیماری است که مشخصات آنها در جدول 2 ارائه شده و بیشترین امتیاز را کسب کردند. از آنجایی که حجم زیادی از محصول پسته با توجه به فساد پذیری سریع آن باید در مدت زمان کوتاهی خشک گردد و از طرفی طراحی خشک کن بایستی طوری باشد که مصرف انرژی در آن از نظر توان و سرغت هوادهی بادبزن و همچنین گرمایش (دمای هوا) به حداقل برسد و با عنایت به اینکه ضخامت بیشتر محصول ظرفیت خشک کردن را افزایش می دهد، لذا از میان هفت گزینه پیشنهادی دمای $70^\circ C$ ، سرعت خشک کردن $1 m/s$ و ضخامت $5 cm$ به عنوان گزینه مطلوب پیشنهاد می گردد، چون انتخاب دماهای پائینتر و یا ضخامت های کمتر باعث طولانی شدن فرایند و کاهش ظرفیت خشک کن می گردد.

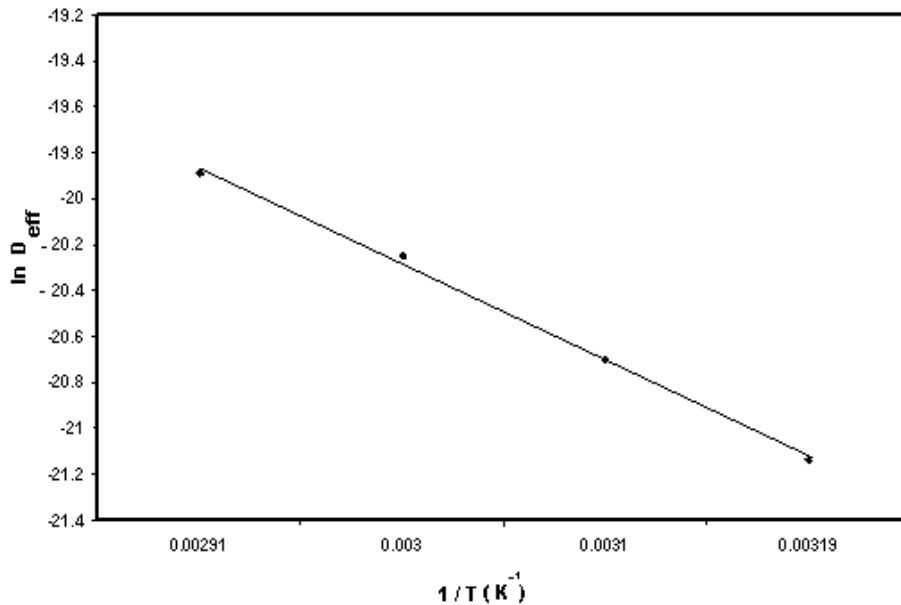
جدول 2 مشخصات تیمارهایی که بیشترین امتیاز را کسب کرده اند

درجه حرارت (°C)	سرعت (m/s)	ضخامت (cm)	زمان خشک کردن (min)
50	1	تک لایه	275
50	2	تک لایه	250
60	1	تک لایه	170
70	1	تک لایه	130
70	1	3	140
70	1	5	150
70	2	تک لایه	120

• تک لایه یا حدود 1 سانتیمتر



شکل 5 نمودار لگاریتم نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک کردن

شکل 6 نمودار لگاریتم ضریب نفوذ رطوبت بر حسب $\frac{1}{T}$

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر برای دانه غلات در دامنه دمایی 40 تا 70 درجه سانتیگراد از $1/1 \times 10^{-10}$ تا $0/3 \times 10^{-10}$ مترمربع در ثانیه، برای دانه سویا و در دامنه دمایی 50 تا 65 درجه سانتیگراد در محدوده $1,9 \times 10^{-10}$ تا 1×10^{-10} مترمربع در ثانیه، برای ورقه نازک گلایی و در دمای 66 درجه سانتیگراد،

شکل 6 نمودار لگاریتم ضریب نفوذ رطوبت بر حسب $\frac{1}{T}$

$9/63 \times 10^{-10}$ مترمربع در ثانیه و برای برگه سیر در دمای 61 درجه سانتیگراد $1/06 \times 10^{-10}$ مترمربع در ثانیه توسط محققین مختلف گزارش شده است [10 و 14 و 19].

انرژی فعال سازی بدست آمده در این پژوهش همخوانی خوبی با داده های حاصل از تحقیقات کاراتاس و باتالی [13]

- velocity and Bed Thickness Changes in Kale Ghouchi Pistachio Dehydration Process. *Journal of Agricultural Science and Research*, 9(1).
- [9] Kashani-Nejad, M. et al. 2003. Effect of Drying Methods on Quality of Pistachio Nuts. *Drying Technology*, Vol. 21, No. 5, 821-838.
- [10] Karatas, S. and Battalbey, M.F. 1991. Determination of Moisture Diffusivity of Pistachio Nut Meat During Drying. *Lebensm-wiss. u. technol*, 24: 484-487.
- [11] Chen, H. and Singh, R.P. 1990. Modeling of Two Stage Drying of Pistachios. ASAE paper No. 906526.
- [12] AOAC. 1990. Official Methods of Analysis (15th edn.). Association of Official Analytical Chemists.
- [13] Clarke, J. A. et al. 1976. Fatty Acid, Carbohydrate and Amino Acid Composition of Pistachio (*Pistacia vera*) Kernels. *Qual. Plant. , Plant Foods, Human Nutr.* 25: 219-225.
- [14] Tavakolipour, H. 2007. Drying Principles of Food Materials and Agricultural Products. Aeezh Publishers, Tehran.
- [15] Pabis, S. et al. 1998. Grain Drying. John Wiley & Sons.
- [16] Vega - Mercado, H. and Barbosa-Canovas, V. 1996. Dehydration of Foods. Chapman & Hall.
- [17] Pearson, T.C.; Slaughter, D.C. and Studer, M.E. 1994. Physical Properties of Pistachio Nuts. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 37(3): 913-918.
- [18] Mohsenin, N.N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publishers.
- [19] Rahman, S. 1995. Food Properties Handbook, CRC Press.
- را نشان می دهد. در پژوهش مذکور میانگین انرژی فعالسازی برای مغزپسته 8/985 kcal/mol بدست آمده است. با مراجعه به منابع، دیده می شود که انرژی فعال سازی به دست آمده جهت نفوذپذیری آب در پسته نزدیک به برخی از مواد غذایی مانند نشاسته سیب زمینی ($E_a=33/9$ kJ/mol)، پاپریکا ($E_a=31/4$ mol/kJ) و سورگوم ($E_a=36/6$ kJ/mol) است. [19]

4- منابع

- [1] Abrishami, M.H. 1994. Persian Pistachio, A Historical Approach. University Press Center, Tehran.
- [2] Anonymous, A Short Glance to Iran Pistachio. 1998. Ministry of Agriculture, Horticultural Division, Tehran, Iran.
- [3] Anonymous. 1998. Iran Dried Nuts, Views and Statistics. Information and Statistical Bureau. Ministry of Agriculture, Tehran, Iran.
- [4] Sheibani, A. 1998. Study on Industrial Problems of Iranian Pistachio Nuts. *Journal of Water, Soil and Machine*, 38(5): 35-37.
- [5] Ghazanfari, A. et al. 2003. Evaluating a Solar Dryer for In-Shell Drying of Split Pistachio Nuts. *Drying Technology*, Vol. 21, No. 7, 1357-1368.
- [6] Kader, A.A. 1992. Post-harvest Handling Systems: Tree Nuts. In "Postharvest Technology of Horticultural Crops". (A.A. Kader, Ed.), Pub. 3311. University of California, CA, USA.
- [7] Sheibani, A. 1995. Pistachio and its Production in Iran. Scientific Information and Documents Center. Ministry of Agriculture, Tehran, Iran.
- [8] Gazor, H.R.; Minaei, S. and Bassiri, A.R. 2003. Effects of Temperature, Air

Effect of drying parameters on quality indicators of Damghan pistachio nuts (*Pistacia vera* L.) and determining effective diffusion coefficient in optimum conditions

Tavakolipour, H. ¹ *, Kalbasi Ashtari, A. ² , Bassiri, A. R. ³

1-PhD, Assistant Professor, Food science and Technology Department, Islamic Azad University, Sabzevar,
2- Ph.D, Associate Professor, Food Science and Technology Department, College of Biosystem Engineering,
University of Tehran, Karaj
3-PhD, Assistant Professor, Institute of chemical technologies, Iranian Research organization of science and
technology

The effects of air temperature (40, 50, 60 and 70 °C), air velocity (1 and 2m/s) and bed depth [1(monolayer), 3 and 5cm] on drying time, drying rate and quality indicators of Pistachio-nuts such as peroxide value and free fatty acids was determined in an experimental air cross flow drier and optimum conditions for pistachio-nuts drying was obtained. Also effective diffusion coefficient (Deff)and activation energy were determined by using Ficks second law (between 40 to 70°C) and Arrhenius model, respectively.

Keywords: Pistachio Nut, Dehydration Process, Diffusion Coefficient, Quality Indicators, and Activation Energy

*Corresponding author E-mail address: htavakoli@iaus.ac.ir