

مدل سازی خشک شدن لایه نازک خمیر خرماي مضافتي

نرجس محمدی^{۱*}، مهدی کاشانی نژاد^۲، علی اصغری^۳، محمد قربانی^۴

امان محمد ضیائی فر^۴ و حبیب اله میرزایی^۴

^۱دانش آموخته دکتری تکنولوژی مواد غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۲استاد، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳استادیار، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۴دانشیار، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۰۴

چکیده

سابقه و هدف: بر طبق آمار فائو، ایران در سال های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با تولید حدود ۱۰۲۳۱۳۰ تن خرما در سال ۲۰۱۰، سومین تولیدکننده جهان بعد از مصر و عربستان سعودی بوده است. با وجود آمار بالای تولید، حدود ۳۰ درصد خرماي تولیدی از بین می رود. با فراوری و تولید خمیر خرما به عنوان یک محصول جنبی می توان به کاهش ضایعات کمک نمود. در این خصوص کاهش رطوبت و میزان فعالیت آبی خرما و خمیر آن می تواند به افزایش بازده تولید کمک کند. پژوهش حاضر به بررسی تجربی ویژگی های خشک شدن لایه نازک خمیر خرما در شرایط متفاوت خشک شدن و تعیین تأثیر دو شاخص دما و ضخامت بر زمان و سرعت خشک شدن خمیر خرما و یافتن بهترین مدل تجربی می پردازد.

مواد و روش ها: خرماي رقم مضافتی پس از پوست گیری و هسته گیری تبدیل به خمیر شده و تا زمان انجام آزمایش ها در فریزر (دمای ۱۸- درجه سانتی گراد) نگهداری شد. ویژگی های خشک شدن لایه نازک خمیر خرماي مضافتی به صورت تجربی در خشک کن هوای داغ بررسی شد. دمای هوا با حس گرهای دمایی متصل به ترموکوپل کنترل شد. تغییرات وزن از طریق لودسل با دقت ± 0.1 گرم و در فاصله زمانی ده ثانیه در رایانه ثبت شد. نمونه های خمیر خرما در قالب طرح آزمایشی فاکتوریل در سه سطح دمایی (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی گراد) و دو سطح ضخامت (۳ و ۵ میلی متر) با سرعت ثابت جریان هوای داغ (۱/۵ متر بر ثانیه) و در سه تکرار خشک شدند. هشت مدل ریاضی (لوئیس، هندرسون و پابیس، پیچ، پیچ اصلاح شده، میدیلی، مدل خزایی، نفوذ و نمایی) برای توصیف رفتار خشک شدن خمیر خرما در خشک کن هوای داغ بررسی شدند.

یافته ها: نتایج آزمون های انجام شده با خشک کن هوای داغ بیان می کند دمای هوای خشک کن عامل اصلی و تعیین کننده بر سرعت خشک شدن است. افزایش دمای خشک شدن در هر دو ضخامت، نسبت رطوبت را به سرعت کاهش می دهد، در نتیجه سرعت خشک شدن افزایش و زمان خشک شدن کاهش می یابد. دو مدل پیچ و خزایی مناسب ترین مدل ها جهت توصیف رفتار خشک شدن خمیر خرما بودند. دمای هوای خشک کن بیشترین و ضخامت خمیر خرما کمترین تأثیر را بر سینتیک خشک شدن خمیر خرما داشت. نفوذ مؤثر آب در محدوده مورد بررسی 10^{-9} تا 10^{-10} مترمربع بر ثانیه تغییر نمود. انرژی

*مسئول مکاتبه: mohamadi.ut@gmail.com

فعال‌سازی ۱۳/۱۶۶ کیلوژول بر مول محاسبه گردید. وابستگی دمایی ضریب نفوذ به میزان رضایت‌بخشی توسط رابطه ساده شبه آرنیوسی توصیف شد.

نتیجه‌گیری: دمای خشک شدن و ضخامت دو عامل مهم در خشک شدن خمیر خرما هستند. تأثیر دما نسبت به ضخامت بسیار معنی‌دارتر است. افزایش دمای خشک‌کن، به میزان معنی‌داری بر رطوبت تعادلی و زمان خشک شدن تأثیر داشت. خشک شدن خمیر خرما در تمام دماهای آزمایشی در محدوده سرعت نزولی رخ داد.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، خشک‌کردن لایه‌نازک، خمیر خرما، نفوذ مؤثر

به این ترتیب، خطر آلودگی بافت توسط میکروارگانیسم‌ها به حداقل رسید و بافت میوه سفت‌تر شد. در پژوهش دیگری، فرحناکی و همکاران (۲۰۰۹) دمای ۷۶ درجه سانتی‌گراد را بهترین دما برای خشک شدن رطب رقم کبکاب توصیه کردند (۱۱). نتایج بررسی بافت طی خشک شدن نشان داد که در رطوبت بالای ۳۰ درصد (بر پایه خشک)، بافت محصول چندان تحت تأثیر تغییرات رطوبت قرار نمی‌گیرد؛ درحالی‌که در رطوبت‌های کمتر از حد مذکور، حتی با کاهش اندکی در مقدار رطوبت، سفتی نامطلوبی در محصول ایجاد می‌شود (۱۱).

مدل‌سازی و ترسیم منحنی‌های خشک شدن در شرایط متفاوت به کنترل بهتر فرایند خشک شدن و افزایش کیفیت نهایی محصول کمک می‌کند. اغلب مدل‌ها با بررسی متغیرهای فرایند به پیش‌گویی سینتیک خشک شدن محصول، بهبود شاخص‌ها و شرایط فراوری کمک می‌کنند (۱۵). پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده و مدل‌های متعدد ریاضی برای خشک شدن انواع محصولات کشاورزی مانند گردوی آمریکایی (۷)، زردآلو (۱)، دانه هندوانه (۲)، خرما (۱۳)، (۲۵)، خرفه (۱۶)، هویج (۸، ۲۰)، پسته (۱۷، ۱۸)، خردل (۳۷)، کنجد (۱۹)، کیوی (۲۴)، رطب (۱۱)، خمیر خرما (۳)، خرمالو (۹)، سویا (۲۷)، علف دریایی (۱۲) و موز (۳۶) پیشنهاد شده است.

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی ویژگی خشک شدن لایه‌نازک خمیر خرما در شرایط متفاوت خشک شدن، تعیین تأثیر دو شاخص دما و ضخامت بر زمان و سرعت خشک شدن خمیر خرما و برآزش داده‌های آزمایشی بر مدل‌های تجربی موجود در منابع بود. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در طراحی خشک‌کن مناسب بهره برد.

میوه خرما با نام علمی فونئیکس *داکتیلایفرا*^۱ نقش مهمی در زندگی انسان طی ۷۰۰۰ سال گذشته داشته است. ایران با تولید حدود ۱۰۲۳۱۳۰ تن خرما در سال ۲۰۱۰، سومین تولیدکننده جهان بعد از مصر و عربستان سعودی بوده است. ایران در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ با افزایش سطح زیر کشت و تولید بیشتر، دومین تولیدکننده خرما در دنیا پس از مصر شد (۱۰). طبق گزارش مدیرعامل اتحادیه نخل‌کاران ایران در سال ۱۳۸۹، ۳۰۰ تا ۴۰۰ هزار تن خرما برداشت شده در کشور، از چرخه مصرف خارج و به مصرف خوراک دام رسیده است (۴).

خرما دارای پنج مرحله رویش (حبابوک، کیمری، خلال، رطب و تمر) است (۲۵). مطلوب‌ترین شکل مصرف خرما، مرحله رطب است. در این مرحله میوه نرم بوده، قسمتی از آن به‌طور کامل قهوه‌ای می‌شود و مقدار آب آن به ۳۰-۴۵ درصد می‌رسد (۳۲). میوه در مرحله رطب به علت داشتن درصد رطوبت و قند بالا و برخوردار از بافت نرم، عمر نگهداری کوتاهی دارد، شکل خود را از دست می‌دهد و خیلی سریع توسط مخمرها یا کپک‌ها آلوده می‌گردد (۲۵). خمیر خرما یکی از محصولات جنبی است که می‌تواند در این مرحله از خرما تولید شود. یکی از راه‌های افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی، خشک شدن و کاهش فعالیت آبی در آن‌ها است. بازارپسندی محصول با طولانی شدن زمان خشک شدن در دماهای پایین کاهش و احتمال تخمیر، ترش و فاسدشدن رطب نیز افزایش می‌یابد (۳۳). مرتضوی و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر مدت‌زمان ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت خشک‌کردن را در دماهای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی کردند (۲۵). خشک‌کردن در دماهای فوق، رطوبت میوه را به کمتر از ۲۷ درصد کاهش داد.

1. *Phoenix dactylifera* L.

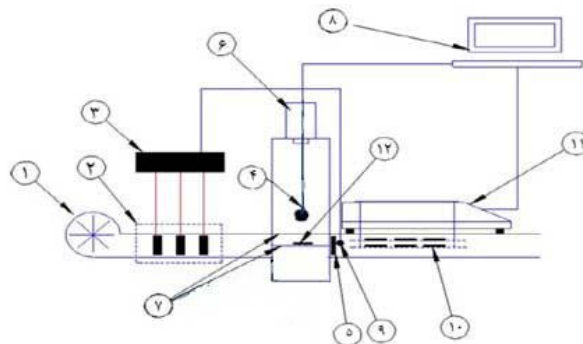
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه: خرماي رقم مضافتي كاملاً رسیده و له از بازار محلی شهر گرگان (استان گلستان) تهیه شد. بلافاصله پس از خرید، خرماها پوست‌گیری، هسته‌گیری و خمیر شد. خمیر حاصل تا شروع آزمایش‌ها، در فریزر درون کیسه‌های دولایه از جنس پلی‌اتیلن نگهداری شد.

خشک‌کن هوای داغ: فرایند خشک شدن با استفاده از خشک‌کن هوای داغ (شکل ۱) مستقر در سوله گروه مکانیک و ماشین‌آلات، پردیس علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. دمای هوای درون خشک‌کن با چهار المنت الکتریکی ۵۰۰ وات تأمین و با حس‌گرهای دمایی متصل به ترموکوپل کنترل شد. سرعت هوای درون خشک‌کن ثابت و به میزان ۱/۵

متر بر ثانیه تنظیم شد. تغییرات وزن از طریق لودسل با دقت ± 0.1 گرم و در فاصله زمانی ده ثانیه در رایانه ثبت شد.

تیمار خشک‌کردن بر مبنای طرح آماری فاکتوریل در سه سطح دمایی (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و دو ضخامت خمیر خرما (۳ و ۵ میلی‌متر) و در سه تکرار انجام شد. یک ساعت قبل از شروع فرایند، خمیر خرما (به اندازه مورد نیاز روزانه) از فریزر خارج می‌شد تا با دمای محیط به تعادل برسد. شش قرص خمیر خرما با ضخامت مشخص و به قطر ۲۷ میلی‌متر در هر تیمار آزمایشی استفاده شد. نمونه‌ها تا رطوبت ۱۰ درصد بر اساس وزن مرطوب خشک شدند. دو قرص در دمای 103 ± 2 درجه سانتی‌گراد برای تعیین محتوای رطوبت واقعی آون‌گذاری شد (۱۸).



شکل ۱- خشک‌کن هوای داغ مورد استفاده در این پژوهش: ۱- فن، ۲- المنت‌های حرارتی، ۳- ترموستات، ۴- دوربین دیجیتالی، ۵- حس‌گر اندازه‌گیری سرعت هوا، ۶- لامپ فلورسنت، ۷- محفظه پردازش تصویر، ۸- کامپیوتر، ۹- حس‌گر اندازه‌گیری دما، ۱۰- سینی و محصول (بررسی تغییرات وزن)، ۱۱- لودسل، ۱۲- محصول (بررسی تغییرات رنگ).

Figure 1- Hot air dryer used in this study: 1- Fan, 2- Heater element, 3- Thermostat, 4- Digital camera, 5- Air velocity sensor, 6-Flourscent lamp, 7- Image processing chamber, 9- Temperature sensor, 10- Tray and product (to determine weight changes), 11- Load cell, 12- Product (to determine color changes).

$$MC (\%wb) = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$MC (\%db) = \frac{MC (\%wb) \times 100}{100 - MC (\%wb)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که M_0 وزن اولیه، M وزن نهایی، $MC (\%wb)$ مقدار رطوبت بر اساس وزن مرطوب و $MC (\%db)$ میزان رطوبت بر اساس وزن خشک است.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی^۱ (EMC): رطوبت ماده اولیه بر اساس وزن مرطوب و خشک (رابطه ۱ و ۲) محاسبه شد. به این ترتیب که شش قرص خمیر خرما تهیه و درون آون خلأ تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد.

1. Equilibrium moisture content

Table 1- Experimental models applied to describe drying kinetics

منبع Reference	رابطه تجربی Experimental equation	نام Name	مدل Model
2	(-a.t) MR = exp	لوئیس (Lewis)	1
14	(-a.t) MR = a.exp	هندرسون و پابیس (Henderson and Pabis)	2
28	(-a.t ^b) MR = exp	پیچ (Page)	3
41,42	(-a.t) ^b MR = exp	پیچ اصلاح شده (Modified Page)	4
23	(-b.t ^c)+d.t MR = a.exp	میدیلی (Midilli)	5
19	(-c.t)-d.t MR = a+b.exp	مدل خزایی (Khazaei)	6
13	(-b.t) MR = a.exp	نفوذ (Diffusion)	7
21	(-a.t) MR = exp	نمایی (Exponential)	8

نسبت رطوبت بیانگر نسبت بدون بعدی از رطوبت است (رابطه ۳). سرعت خشک شدن نیز با رابطه ۴ محاسبه شد.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$DR = \frac{M_t - M_{t+dt}}{dt} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که به ترتیب M و M₀ مقدار رطوبت در زمان داده شده و زمان اولیه (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_e مقدار رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_t و M_{t+dt} مقدار رطوبت در زمان t و t+dt (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) و t زمان خشک شدن است.

تخمین شاخص مدل‌های تجربی از رگرسیون غیرخطی روی تمام تیمارهای آزمایشی خشک شدن با نرم افزار متلب ۲۰۱۱ انجام شد. ضریب همبستگی^۲ (R²) (رابطه ۵)، ضریب همبستگی متعادل شده^۳ (Adj-R²) (رابطه ۶)، ریشه متوسط مربع خطای داده‌ها^۴ (RMSE) (رابطه ۷) و متوسط انحراف نسبی مدل (P) (رابطه ۸) برای ارزیابی برازش مدل‌های تجربی استفاده شدند (۲۲، ۲۹).

رطوبت تعادلی خمیر خرماي مضافتی در دماهای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت‌های ۳ و ۵ میلی‌متر مشابه با تیمارهای آزمایشی با روش دینامیکی محاسبه شد. بدین ترتیب که شش قرص خمیر خرما درون خشک‌کن هوای داغ تا رسیدن به وزن ثابت خشک‌شدند و تغییرات وزن با لودسل در هر ۱۰ ثانیه ثبت شد. سپس، محتوای رطوبت نمونه‌ها (بیانگر میزان رطوبت تعادلی) توسط آون اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری رطوبت تعادلی (بر اساس وزن خشک) جهت محاسبه نسبت رطوبت^۱ (MR) و برازش مدل‌های تجربی مختلف با داده‌های آزمایشی لازم است.

مدل‌سازی رفتار خشک شدن خمیر خرما: معمولاً رفتار افت رطوبت در طی زمان در فرایند خشک شدن با معادلات نمایی به خوبی توصیف می‌شود. مدل‌های متفاوتی برای بیان سرعت افت رطوبت در خشک شدن لایه نازک مواد زیستی پیشنهاد شده است (۲۴، ۳۶). تعدادی از این مدل‌ها برای بررسی روند خشک شدن لایه نازک خمیر خرما انتخاب و استفاده شدند (جدول ۱).

2. Coefficient of determination
3. Adjusted R-Squared
3. The root mean square error (RMSE)

1. Moisture Ratio

$$R^2 = \frac{SS_{res}/n}{SS_{total}/n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که SS_{res} باقیمانده مجموع مربعات خطا و SS_{total} باقیمانده مجموع مربعات کل و n تعداد آزمایش‌ها است.

$$AdjR^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-m-1} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که n تعداد داده‌ها و m تعداد متغیرهای مستقل است.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_1 - X_2)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که X_1 و X_2 دو متغیر مورد آزمون و n تعداد داده‌ها است.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|MR_{actual} - MR_{predicted}|}{MR_{actual}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که P متوسط انحراف نسبی مدل، MR_{actual} نسبت رطوبت داده‌های آزمایشی و $MR_{predicted}$ نسبت رطوبت پیش‌گویی شده توسط مدل تجربی است.

آنالیز داده‌ها و مدل‌های خشک شدن: تأثیر دو شاخص دمای هوا و ضخامت بر رفتار خشک شدن خمیر خرما با طرح فاکتوریل و تجزیه واریانس تعیین شد. رطوبت تعادلی، زمان نیم پاسخ و زمان کل خشک شدن به‌عنوان متغیر وابسته تجزیه و تحلیل شدند. زمان نیم پاسخ، زمان موردنیاز برای حذف نصف رطوبت آزاد اولیه یا $1/2(M_0 - M_e)$ است و در نتیجه زمان مورد نیاز فرایند خشک شدن لایه‌نازک خمیر خرما برای رسیدن به نسبت رطوبت معادل $0/5$ است (۲۶، ۳۸).

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل متغیرهای مؤثر بر خشک شدن خمیر خرما: جدول ۲ میزان رطوبت تعادلی، میانگین زمان‌های خشک شدن و زمان نیم پاسخ را در شرایط متفاوت خشک شدن نشان می‌دهد. جدول تجزیه

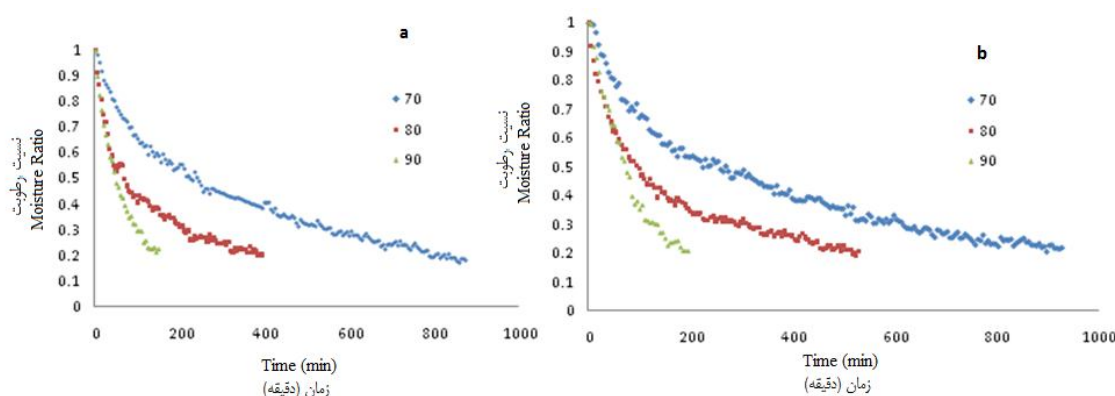
واریانس رطوبت تعادلی نشان می‌دهد که دمای خشک شدن بر رطوبت تعادلی تأثیر معنی‌دار دارد ($p < 0/01$) ولی ضخامت نمونه بر آن تأثیر معنی‌دار ندارد ($p > 0/05$). بر اساس تجزیه و تحلیل چند دامنه‌ای دانکن دو سطح دمایی ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در دودسته جداگانه قرار می‌گیرند. تجزیه واریانس زمان نیم‌پاسخ بیانگر تأثیر معنی‌دار دمای خشک‌کن ($p < 0/01$) و ضخامت نمونه ($p < 0/01$) بر آن است. نتایج تجزیه و تحلیل چند دامنه‌ای دانکن نیز بیانگر قرارگیری هر یک از دماهای آزمایشی در دسته‌ای جداگانه می‌باشد. این نتیجه در مورد ضخامت نیز مشاهده شد و از نظر ضخامت نیز نمونه‌ها در دو دسته جداگانه قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس زمان کل خشک شدن نیز مشابه زمان نیم‌پاسخ بود؛ با این تفاوت که اثر متقابل دو عامل دما و ضخامت ($p < 0/01$) نیز معنی‌دار بود. نتایج این آزمون‌ها با سایر نتایج آزمون‌های انجام شده با خشک‌کن هوای داغ هم‌خوانی دارد و بیان می‌کند که عامل اصلی و تعیین‌کننده بر سرعت خشک شدن، دمای هوای خشک‌کن است (۱۶، ۲۲، ۳۵، ۳۸، ۴۱).

شکل ۲ تأثیر دما بر نسبت رطوبت خمیر خرما را در دو ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. افزایش دمای خشک شدن در هر دو ضخامت، به‌سرعت نسبت رطوبت را کاهش می‌دهد، در نتیجه سرعت خشک شدن افزایش و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. سرعت خشک شدن خمیر خرما در ضخامت‌ها و دماهای متفاوت در برابر محتوای رطوبت (بر مبنای درصد وزن خشک) در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- رطوبت تعادلی خمیر خرما در شرایط متفاوت خشک شدن، زمان نیم پاسخ و کل زمان خشک شدن

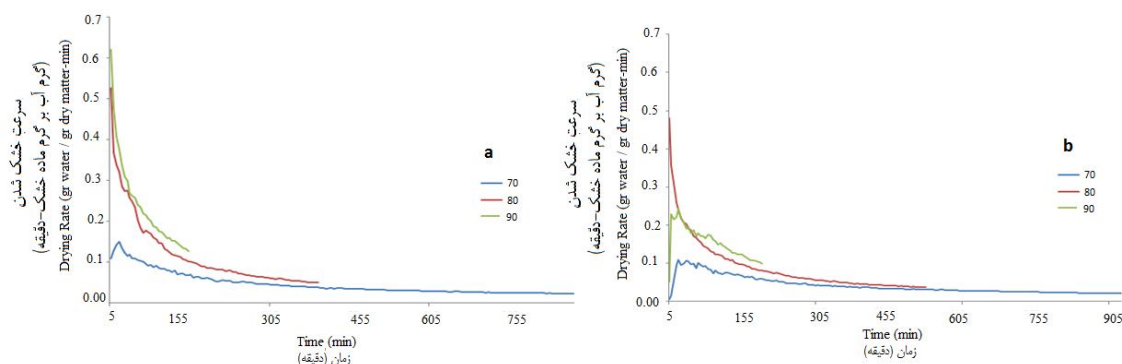
Table 2- Equilibrium moisture contents of date paste under different drying condition, half time of response and total time of drying

زمان خشک شدن (دقیقه)	زمان نیم پاسخ (دقیقه)	رطوبت تعادلی (درصد وزن خشک)	ضخامت (میلی متر)	دما (درجه سانتی گراد)
Time of Drying (min)	Half time of Response (min)	Equilibrium moisture (d.b.%)	Thickness (mm)	Temperature (°C)
930±8.02 ^a	270±5.29 ^{ab}	2.52±0.07 ^a	5	70
875±5.57 ^b	225±7.21 ^b	2.51±0.09 ^a	3	
530± 10.78 ^c	95±6.56 ^{cd}	2.47± 0.05 ^a	5	80
395± 6.43 ^d	70±7.21 ^d	2.45±0.05 ^a	3	
195±7.21 ^e	65± 4.24 ^{ef}	2.27±0.04 ^b	5	90
150±4.73 ^f	45± 6.8 ^f	2.25±0.05 ^b	3	



شکل ۲- اثر دما بر نسبت رطوبت خمیر خرما مضافتی تا محتوای رطوبت ۱۰ درصد (سرعت یک متر بر ثانیه) ضخامت (a) ۳ میلی متر و (b) ۵ میلی متر

Figure 2- Effect of temperature on moisture ratio (MR) of date paste until moisture content reached 10% (1 m/s velocity), a- 3mm and b- 5mm thickness



شکل ۳- اثر دما بر سرعت خشک شدن خمیر خرما مضافتی تا محتوای رطوبت ۱۰٪ (سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه) (a) ضخامت ۳ میلی متر و (b) ضخامت ۵ میلی متر

Figure 3- Effect of temperature on drying rate of date paste until moisture content reached 10% (1 m/s velocity), a- 3mm and b- 5mm thickness

داشتن درصد بالای قند (۷۰ درصد) باعث ایجاد پوسته سختی روی سطح آن می شود و پدیده‌ای تحت

منحنی‌های سرعت خشک شدن دو مرحله متمایز را نشان می‌دهند. حرارت دادن خمیر خرما با توجه به

لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در برابر زمان (شکل ۴)، محاسبه شد.

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4l^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\text{Slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4l^2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

عموماً، نفوذ مؤثر به دلیل وجود اطلاعات محدود در زمینه مکانیسم حرکت رطوبت در طی خشک شدن و پیچیدگی این فرایند استفاده می‌شود. نفوذ مؤثر در خشک شدن خمیر خرما بین 1.55×10^{-9} تا 2.18×10^{-10} مترمربع بر ثانیه در دامنه دمایی ۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود (جدول ۳). این مقادیر در دامنه عمومی سایر مواد غذایی (10^{-11} - 10^{-9} مترمربع بر ثانیه) برای مثال چای سیاه (1.1×10^{-11} - 2.985×10^{-11})، زردآلو (3×10^{-11} - 1)، پسته ($5/42 - 92/9 \times 10^{-11}$) و کنجد ($3/1 \times 10^{-11}$) ۱/۱ (۱۹) مترمربع بر ثانیه قرار دارد.

میزان حرارت جذب‌شده، شاخص مؤثر دیگری بر نفوذ مؤثر است که با حرکت رطوبت درون ماده غذایی متناسب است (۲۲). تأثیر دما بر نفوذ مؤثر معمولاً با رابطه شبه آرنیوس توصیف می‌شود که بهترین هم‌خوانی را با منحنی پیش‌گویی شده حاصل از داده‌های تجربی دارد. وابستگی دمایی انتشار رطوبت با رابطه شبه آرنیوس به‌ترتیب زیر به دست می‌آید (رابطه ۱۲):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که D_0 ثابت نفوذ معادل نفوذ در دماهای بسیار بالا (مترمربع بر ثانیه)، E_a انرژی فعال‌سازی انتشار رطوبت (کیلوژول بر مول)، T دمای مطلق هوا (کلوین) و R ثابت جهانی گازها (8.3143 کیلوژول بر کیلومول کلوین) می‌باشد.

عنوان سخت شدن سطحی^۱ در آن رخ می‌دهد. این پوسته سخت مانعی در برابر خروج رطوبت از بافت ایجاد می‌کند. هر چه دما بالاتر باشد این پوسته سخت سریع‌تر تشکیل و باعث افت سرعت خشک شدن می‌شود. منحنی سرعت خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در هر دو ضخامت نشان می‌دهد که سرعت خشک شدن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این پدیده بیان می‌کند که سرعت تشکیل پوسته سخت در مراحل اولیه خشک شدن کند است و با افزایش دمای محصول، سرعت خشک شدن و خروج رطوبت افزایش پیدا می‌کند. دلیل دیگر کاهش سرعت خشک شدن این است که باگذشت زمان، آبی که تبخیر می‌شود باید از درون سلول‌های داخلی‌تر به سطح حرکت نماید. منطقه سرعت نزولی بیانگر افزایش مقاومت سلول‌های داخلی در برابر انتقال حرارت و جرم می‌باشد.

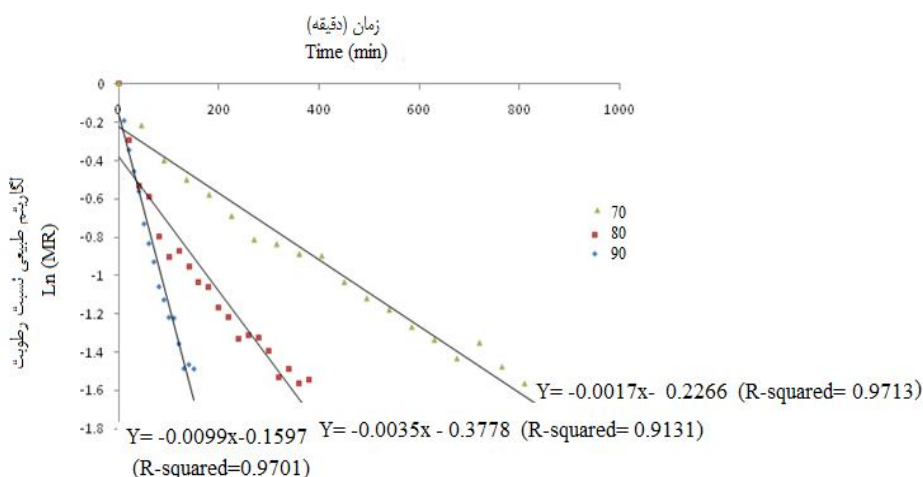
محاسبه ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال‌سازی:

خشک شدن خمیر خرما در فاز سرعت نزولی رخ می‌دهد و انتشار آب، فرایند را کنترل می‌کند؛ بنابراین، می‌توان از قانون دوم فیک برای توصیف خشک شدن خمیر خرما برای تیغه نامحدود (رابطه ۹) استفاده کرد:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{(n\pi)^2 D_{eff} t}{4l^2}\right) \quad \text{رابطه (۹)}$$

که MR نسبت رطوبت، D_{eff} (مترمربع بر ثانیه) انتشار مؤثر رطوبت، l (متر) نصف ضخامت تیغه و t (ثانیه) زمان خشک شدن است. رابطه ۱۰ با گرفتن لگاریتم طبیعی از دو طرف رابطه ۹ به دست آمده است. ضریب انتشار مؤثر رطوبت با ترسیم لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت به‌عنوان تابعی از زمان از فرم انتگرالی قانون فیک به دست آمد. ضریب انتشار مؤثر با محاسبه شیب‌خط حاصل (رابطه ۱۱) از ترسیم

1. Case hardening



شکل ۴- نسبت رطوبت لگاریتمی تجربی به پیش‌گویی شده در دماهای مختلف خشک شدن با ضخامت ۳ میلی‌متر

Figure 4- The ratio of experimental to predicted logarithm moisture in different drying temperature with 3mm thickness

جدول ۳- میزان نفوذ مؤثر خمیر خرما در طی خشک شدن

Table 3- Efficient diffusion of date paste during drying process

نفوذ مؤثر (D_{eff}) (متر مربع بر ثانیه)			ضخامت (میلی‌متر) Thickness (mm)
Efficient Diffusion (m^2/s)			
90 °C	80 °C	70 °C	
9.03688×10^{-9}	3.19486×10^{-9}	1.55179×10^{-9}	3
2.180620×10^{-10}	6.33900×10^{-9}	4.05696×10^{-9}	5

استفاده از دماهای بالا منجر به افزایش سرعت خشک شدن با افزایش نفوذ رطوبت می‌شود (۶)، ولی انتخاب دمای بهینه برای حفظ کیفیت محصول امری منطقی می‌باشد (۱۷).

ثابت نفوذ (D_0) با جایگذاری انرژی فعال‌سازی و نفوذ مؤثر در رابطه ۱۲ به دست آمد. نتایج محاسبه ثابت نفوذ برای ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر به ترتیب در رابطه ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.

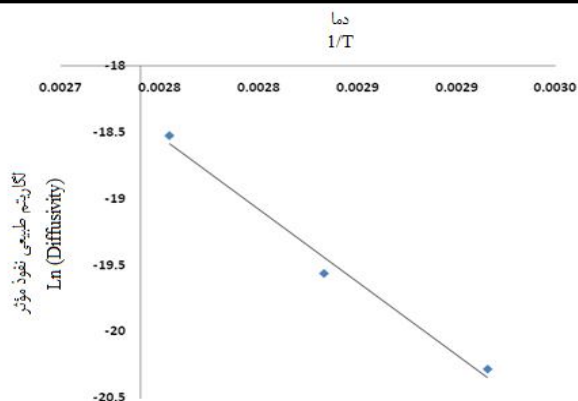
$$D_{eff} = \frac{1}{0.6} \times 10^5 \times \exp\left(-\frac{10947}{T_a}\right) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$D_{eff} = 5/65 \times 10^4 \times \exp\left(-\frac{10421}{T_a}\right) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

لگاریتم طبیعی نفوذ مؤثر ($\ln D_{eff}$) به‌عنوان تابعی از معکوس دمای مطلق ($1/T_a$) ترسیم شد (شکل ۵). شیب خط صاف حاصل بیانگر نسبت ($-E_a/R$) است (رابطه ۱۳). به این ترتیب می‌توان E_a را محاسبه کرد (جدول ۴).

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

انرژی فعال‌سازی محاسبه شده با داده‌های ارائه شده توسط سایر محققان برای مثال سیب‌زمینی ۲۰ کیلوژول بر مول (۵)، ذرت ۲۷/۶۱ کیلوژول بر مول (۴۰)، هویج ۲۸/۳۶ کیلوژول بر مول (۸)، آلو ۵۷ کیلوژول بر مول (۳۴)، نعنا ۸۲/۹۳ کیلوژول بر مول (۳۱) هم‌خوانی دارد. فعال شدن پدیده نفوذ رطوبت ناشی از غلبه بر سد انرژی فعال‌سازی است. هرچند



شکل ۵- ارتباط آرنیوسی میان نفوذ مؤثر و دما در ضخامت ۳ میلی‌متر

Figure 5- Arrhenius relationship between efficient diffusion and temperature in 3mm thickness

عموماً دو مدل پیچ و خزایی توصیف بهتری را از رفتار خشک شدن از خود نشان دادند (جدول ۵).

مدل انحراف نسبی میانگین کمتر از ۱۰ درصد در انتخاب مدل مؤثر است (۱۷) و تمام مدل‌های مورد استفاده جهت برازش دارای این شرط بودند. مقادیر مدل انحراف نسبی میانگین در دو مدل خزایی و پیچ نسبت به سایر مدل‌ها کمتر بود؛ بنابراین دو مدل یاد شده پیش‌گویی بهتری از داده‌های آزمایشی نسبت به سایر مدل‌ها دارند و به‌خوبی ویژگی‌های خشک شدن لایه‌نازک را در خمیر خرما توصیف می‌کنند (شکل ۶). حسن و هوبانی (۲۰۰۰) رابطه پیچ را به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن خرما معرفی نمودند. اشرف و همکاران (۲۰۱۲) با خشک کردن خمیر خرما در خلأ بیان کردند که مدل پیچ برازش خوبی را نشان داد؛ با این وجود دو مدل هندرسون و پایس اصلاح شده و ورما و جنا-داس برازش بهتری داشتند. ضرایب دو مدل پیچ و خزایی برای هر تیمار خشک شدن محاسبه (جدول ۶) و آنالیز بعدی به‌منظور عمومی کردن ثابت‌های خشک شدن برای مدل پیچ به‌عنوان تابعی از شرایط خشک شدن (دما و ضخامت) انجام شد. معادلات متعددی در روش رگرسیون گام‌به‌گام برای تعمیم k و N آزمون شدند. معادلات ۱۶ و ۱۷ بهترین نتایج را ارائه دادند. نسبت رطوبت پیش‌گویی شده توسط دو مدل پیچ و

جدول ۴- انرژی فعال‌سازی ضخامت‌های ۳ و ۵ میلی‌متر خمیر خرما خشک شده

Table 4- Activation energy for dried date paste with 3 and 5 mm thickness

ضخامت ۵ میلی‌متر 5 mm Thickness	ضخامت ۳ میلی‌متر 3 mm Thickness	انرژی فعال‌سازی Activation energy
5.2455	5.5093	کیلوکالری بر مول (Kcal/mol)
1.2534	1.3166	کیلوژول بر مول (KJ/mol)

مدل‌سازی خصوصیات خشک شدن لایه‌نازک:

نسبت رطوبت برای توصیف مدل‌های خشک شدن در آنالیز داده‌های آزمایشی ضروری است. متغیرهای مورد استفاده در این شاخص بدون بعد شامل مقدار رطوبت اولیه (بر مبنای درصد وزن خشک)، مقدار رطوبت تعادلی (بر مبنای درصد وزن خشک) هر یک از تیمارهای خشک کردن و میانگین مقدار رطوبت (بر مبنای درصد وزن خشک) نمونه در فاصله‌های زمانی ثبت شده است (رابطه ۳). نسبت رطوبت با مدل‌های متفاوت خشک شدن لایه‌نازک (جدول ۲) برازش شد. بهترین مدل توصیف‌کننده روند خشک شدن لایه‌نازک خمیر خرما با بیشترین ضریب همبستگی، بیشترین ضریب همبستگی متعادل شده، کمترین مربع میانگین خطا و کمترین مدل انحراف نسبی میانگین انتخاب شد (۳۹). جزئیات آنالیز آماری این هشت مدل در جدول ۵ نشان داده شده است.

داده‌های مشاهده شده نسبت رطوبت را در تمام تیمارهای آزمایشی پوشش می‌دهند.

خزایی در برابر نسبت رطوبت مشاهده شده در دماهای متفاوت خشک شدن در شکل ۶ نشان داده شده است. این نتایج بیان می‌دارد که این دو مدل به خوبی

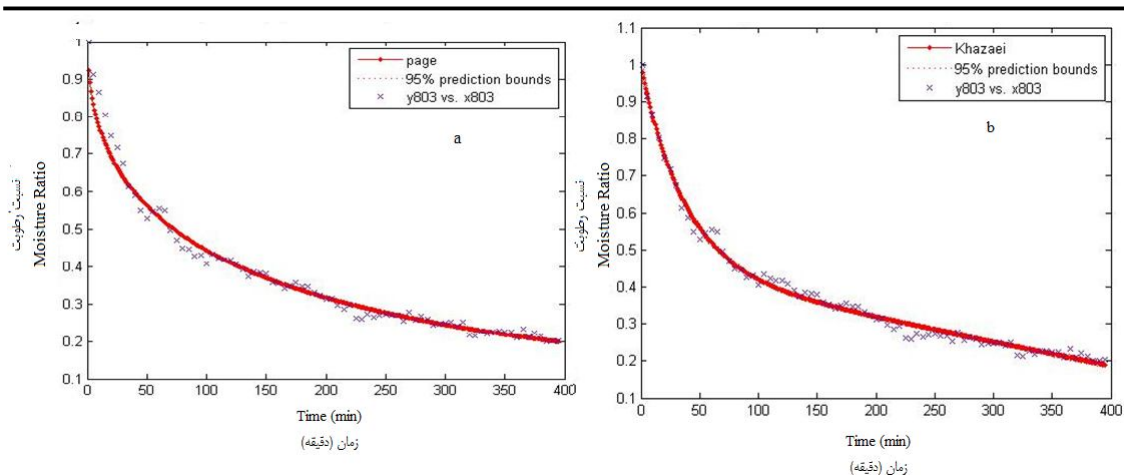
$a=+0.038-0.017 \times T+0.033 \times T^2$ 0.8079Adj-R² (۱۶) رابطه

$b=+0.67-0.038 \times T-0.16 \times T^2$ 0.8450Adj-R² (۱۷) رابطه

جدول ۵- نتایج تجزیه و تحلیل آماری و برازش مدل‌های تجربی بر داده‌های خشک کردن آزمایش

Table 5- Statistical analysis and fitness of experimental models on drying data

نمونه	خزایی	لوئیس	هندرسون و پابیس	پیج	میدیلی	اصلاح شده	نفوذ	نمایی
Sample	Khazei	Lewis	Henderson and Pabis	Page	Midilli	Modified page	Diffusion	Exponential
70 °C and 5mm	SSE	0.0176	0.0210	0.0222	0.1116	0.0478	0.0729	0.0176
	R ²	0.9894	0.9969	0.9967	0.9843	0.9929	0.9892	0.9974
	Adj-R ²	0.9893	0.9969	0.9967	0.9831	0.9928	0.9891	0.9974
	RMSE	0.0197	0.0106	0.0109	0.0246	0.0160	0.0198	0.0097
	P (%)	1.3568	2.6361	1.2943	1.3671	5.8341	2.7711	5.8341
70 °C and 3mm	SSE	0.0273	0.005	0.0320	0.0313	0.8450	0.005	0.8450
	R ²	0.9957	0.9992	0.9949	0.9950	0.8655	0.9992	0.8655
	Adj-R ²	0.9956	0.9952	0.9949	0.9950	0.8647	0.9992	0.8655
	RMSE	0.0126	0.0053	0.0136	0.0153	0.0697	0.0053	0.0695
	P (%)	0.9328	5.7193	1.021	1.9914	5.5006	2.1518	5.5006
80 °C and 5mm	SSE	0.0015	0.0132	0.0509	0.0244	1.066	0.0132	1.1370
	R ²	0.9995	0.9958	0.9838	0.9922	0.6608	0.9958	0.6381
	Adj-R ²	0.9995	0.9958	0.9836	0.9921	0.6576	0.9958	0.6381
	RMSE	0.0038	0.0112	0.0220	0.0153	0.1008	0.0112	0.1038
	P (%)	0.8268	3.95	1.7689	1.2613	8.9131	3.9500	8.7707
80 °C and 3mm	SSE	0.0222	0.0129	0.0021	0.0321	0.8008	0.0129	0.8008
	R ²	0.9909	0.9947	0.9992	0.9867	0.6723	0.9947	0.6723
	Adj-R ²	0.9906	0.9946	0.9991	0.9864	0.6681	0.9946	0.6723
	RMSE	0.0171	0.0129	0.0052	0.0206	0.1013	0.0129	0.1007
	P (%)	1.3254	3.6048	1.6510	1.4912	8.0519	0.6048	8.0519
90 °C and 5mm	SSE	0.0140	0.0271	0.0236	0.0165	0.0272	0.0271	0.0272
	R ²	0.9939	0.9881	0.9897	0.9928	0.9881	0.9881	0.9881
	Adj-R ²	0.9935	0.9878	0.9894	0.9926	0.9878	0.9878	0.9881
	RMSE	0.0194	0.0267	0.0249	0.0208	0.0267	0.0267	0.0264
	P (%)	1.4823	1.9952	1.9556	1.6546	1.9921	1.9952	1.9921
90 °C and 3mm	SSE	0.0047	0.0031	0.0054	0.0034	0.0535	0.0031	0.0535
	R ²	0.9967	0.9979	0.9963	0.9977	0.9629	0.9979	0.9629
	Adj-R ²	0.9964	0.9978	0.9961	0.9975	0.9617	0.9978	0.9629
	RMSE	0.0132	0.0104	0.0137	0.0110	0.0430	0.0104	0.0423
	P (%)	0.9865	3.2594	1.0535	0.9699	2.2594	2.1447	3.2594



شکل ۶- مقایسه نسبت رطوبت مشاهده شده و پیش‌گویی شده خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۳ میلی‌متر

(a) مدل پیج، (b) مدل خزایی با نرم‌افزار متلب ۲۰۱۱

Figure 6- Comparison of experimental and predicted moisture ratios of drying in 70 °C and 3mm thickness a- Page model, b- Khazaei model with Matlab software 2011

جدول ۶- شاخص‌های دو مدل پیج و خزایی در شرایط متفاوت خشک شدن

Table 6- Page and Khazaei coefficients in different drying conditions

مدل پیج Page model	مدل خزایی Khazaei model	شاخص‌های مدل Coefficients	تیمار Treatment
0.0222	0.5004	a	70 °C and 5mm
0.6217	0.472	b	
	0.0075	c	
	0.0003	d	
0.0198	0.5476	a	70 °C and 3mm
0.65	0.425	b	
	0.0096	c	
	0.0004	d	
0.0603	0.4067	a	80 °C and 5mm
0.5276	0.5446	b	
	0.0156	c	
	0.0003	d	
0.0821	0.4459	a	80 °C and 3mm
0.4984	0.5479	b	
	0.0264	c	
	0.006	d	
0.0116	0.1118	a	90 °C and 5mm
0.9534	0.9115	b	
	0.0123	c	
	0	d	
0.0313	0.3544	a	90 °C and 3mm
0.7927	0.6182	b	
	0.0236	c	
	0.0011	d	

نتیجه‌گیری کلی

کیلوژول بر مول به‌دست آمد. مدل پیچ و خزایی به‌خوبی خصوصیات خشک شدن لایه‌نازک خمیر خرما را برازش می‌نماید.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد دمای خشک شدن و ضخامت عوامل مهمی در خشک شدن خمیر خرما می‌باشند. تأثیر دما نسبت به ضخامت بسیار معنی‌دارتر می‌باشد. افزایش دمای خشک‌کن، به میزان معنی‌داری بر رطوبت تعادلی و زمان خشک شدن تأثیر می‌گذارد. خشک شدن خمیر خرما در بیشتر دماهای آزمایشی در محدوده سرعت نزولی رخ می‌دهد. نفوذ مؤثر طی خشک شدن خمیر خرما بین $10^{-9} \times 1/55$ تا $10^{-9} \times 21/80$ مترمربع بر ثانیه در دامنه دمایی ۹۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. انرژی فعال‌سازی نفوذ رطوبت بین ۱۳۱۶۶-۱۲۵۳۴

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از اعضای گروه صنایع غذایی و مکانیک ماشین‌آلات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به‌ویژه آقایان دکتر اسماعیل زاده، دکتر رضایی اصل و مهندس نورقلی‌پور به دلیل همراهی در کلیه مراحل پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

1. Abdelhag, E.H., and Labuza, T.P. 1987. Air drying characteristics of apricots. *Journal of Food Science*. 52: 342-345.
2. Ajibola, O.O. 1989. Thin layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*. 9 (4): 305-320.
3. Ashrafi, Z. Hamidi-Esfahani, Z. and Sahari, M.A. 2012. Evaluation and characterization of vacuum drying of date paste. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 14: 565-575.
4. Beeria, S., and Jabal-Ameli, F. 2006. The effective factors in exporting pistachio, saffron and dates in Iran's non-oil export commodities basket (1991-2001). *Journal of Agricultural and Development Economics*. 14: 54. 85-102. (In Persian)
5. Bon, J., Simal, S., Rossell, O.C., and Mulet, A. 1997. Drying characteristics of hemispherical solids. *Journal of Food Engineering*. 34: 109-122.
6. Carbonell, J.V., Pinaga, F., Yusa, V., and Pena, J.L. 1986. Dehydration of paprika and kinetics of color degradation. *Journal of Food Engineering*. 5: 3.179-193.
7. Chinnan, M.S. 1984. Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*. 27: 2. 610-615.
8. Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*. 61: 359-364.
9. Doymaz, İ. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*). *Energy Conversion and Management*. 56: 199-205.
10. FAO Statistics. 2012. www.fao.org.
11. Farahanaki, A., Mesbahi, GH., and Askari, H. 2009. Thin layer drying of Routab (*var. Kabkaab*) to Tamar and monitoring its quality parameters. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*. 12: 46.205-218.
12. Fudholi, A., Ruslan, M.H., Haw, L.C., Mat, S., Othman, M.Y., Zaharim, A., and Sopian, K. 2012. Mathematical modeling of brown seaweed drying curves. In *WSEAS Int. Conf. on Applied Mathematics in Electrical and Computer Engineering, USA* (pp. 207-211).
13. Hassan, B.H. and Hobani, A.I. 2000. Thin-layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering*. 23: 177-189.
14. Henderson, S.M., and Pabis, S. 1969. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6: 3.169-174.

15. Karathanos, V.T., and Belessiotis, V.G. 1999. Application of a thin layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 74: 355–361.
16. Kashaninejad, M., and Tabil, L.G. 2004. Drying characteristics of purslane (*Portulaca oleraceae* L.). *Drying Technology*. 2: 9.2183–2200.
17. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and Tabil, L.G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*. 78: 98–108.
18. Kashaninejad, M., Tabil, L.G., Mortazavi, A., and Safekordi, A. 2003. Effect of drying methods on quality of pistachio nuts. *Drying Technology*. 21: 5.821–838.
19. Khzaei, J. 2008. Natural drying characteristics of sesame seeds. *Cercetări Agronomice în Moldova*. 41: 3.135.
20. Kumar, N., Sarkar, B.C., and Sharma, H. K. 2012. Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of science and technology*. 49: 1.33-41.
21. Lewis, W.K. 1921. The rate of drying of solid materials, *Journal of Indian Engineering Chemists*. 13 (5): 427-432.
22. 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.
23. Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*. 20: 1503–1513.
24. Mohammadi, A. Rafiee, Sh. Keyhani, A.R. and Emam-Djomeh, Z. 2009. Moisture content modeling of sliced kiwifruit (cv. *Hayward*) during drying. *Pakistan. Journal of Nutrition*. 8: 1.78-82.
25. Mortazavi, S.M.H., Arzani, K. and Barzegar, M. 2009. Effect of dehydration time and temperature on the quality characteristics of Barhee date in Rutab stage. *Pajouhesh and Sazandegi*. 79: 186-193. (In Persian)
26. Muhidong, J., Chen, L.H., and Smith, D.B. 1992. Thin-layer drying of kenaf. *Transactions of the ASAE*. 35: 6.1941–1944.
27. Niamnuy, C., Nachaisin, M., Poomsa-ad, N., and Devahastin, S. 2012. Kinetic modelling of drying and conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. *Food Chemistry*. 133: 3.946-952.
28. Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying of shelled corn in thin layers. Unpublished MS Thesis, Purdue University, Lafayette IN.
29. Palipane, K.B., and Driscoll, R.H. 1994. The thin layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering*. 23: 129–144.
30. Panchariya, P.C., Popovic, D., and Sharma, A.L. 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*. 52: 349–357.
31. Park, K.J., Vohnikova, Z., and Brod, F.P.R. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*. 51: 193–199.
32. Pejman, H. 2001. Dates Guide: planting and harvesting. *Dissemination of Agricultural Education*. 266p.
33. Rajabalipour, A.A., and Foladi, M.H. 2010. Effect of open sun drying on the Mazafati Rotab (date) quality. *Journal of Food Research (Agricultural Science)*. 20: 1.135-146.
34. Sabarez, H.T., and Price, W.E. 1999. A diffusion model for prune dehydration. *Journal of Food Engineering*. 42: 3.167–172.
35. Sharaf-Elden, Y.L., Blaisdell, J.L., and Hamdy, M.Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*. 23: 5.1261–1271.
36. Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Gama, F.J.A. and Gomes J.P. 2014. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 13: 67–74.
37. Srinivasakannan, C. 2008. Modeling drying kinetics of mustard in fluidized bed. *International Journal of Food Engineering*. 4: 3.

38. Syarief, A.M., Morey, R.V., and Gustafson, R.J. 1984. Thin layer drying rated for sunflower seeds. *Transactions of the ASAE*. 27: 1.195–200.
39. Togrul, I.T., and Pehlivan, D. 2002. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. 55: 3.209–216.
40. Tolaba, M., and Suarez, C. 1988. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. *LWT- Food Science and Technology*. 21: 83–86.
41. White, G.M., Ross, I.J., and Poneleit, C.G. 1981. Fully exposed drying of popcorn. *Transactions of the ASAE*. 24: 2. 466–468.
42. Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26: 457–465.

Modeling the Thin Layer Drying of Mozafati Date paste

N. Mohamadi^{1*}, M. Kashaninejad², A. Asghari³, M. Ghorbani⁴,
A.M. Ziaifar⁴ and H. Mirzaei⁴

¹Ph.D graduate of Food Technology, Faculty of Food Science, Gorgan University of
Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

²Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources,
Gorgan, Iran

³Assistant Professor, Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural
Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

⁴Associate Professor, Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science
and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 2014/10/06 ; Accepted: 2015/01/24

Abstract

Background and objectives: According to FAO statistics, Iran with production more than one million tons date in 2010, is the third largest producer in the world after Egypt and Saudi Arabia. However, 30 percent of produced date is discarded. Processing and production of date paste as a by-product can reduce waste amount. Reducing the moisture content and water activity (a_w) of date and date paste can improve the production efficiency. This research deals with experimental investigation of thin layer drying of date paste under different drying conditions and evaluates the effects of temperature and thickness on drying time and rate to find the best experimental model.

Materials and methods: Date of Mozafati variety was peeled, de-stoned and then converted to paste. The prepared date paste was kept in freezer ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) until the experiments. Thin layer drying characteristics of date paste were investigated in a hot air dryer. Air temperature was controlled with sensors connected to thermocouple. Weight changes with ± 0.1 accuracy was recorded within 10 seconds intervals. Drying was performed in factorial design experiments using three air temperature levels (70, 80 and $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) and two levels of thickness (3 and 5 mm) with constant hot air velocity (1.5 m/s) in three replications. Eight mathematical models (Lewis, Henderson and Pabis, Page, Modified Page, midilli, Khazaei, Diffusion and Exponential) were evaluated for describing the hot air-drying behavior of date paste.

Results: According to the results, dryer space temperature was the main and determining factor for drying rate. By increasing the temperature in each thickness, moisture ratio (MR) would decrease instantly, so the drying rate increases and subsequently, drying time decreases. Page and Khazaei models were found to be the most suitable models for describing the drying behavior of the date paste. The dryer air temperature and thickness had the greatest and smallest effects on drying kinetics of date paste, respectively. Effective diffusion of water varied from 1.5517×10^{-9} to 2.1806×10^{-10} m^2/s . The activation energy during the studied temperature range was calculated as 13.166 KJ/mol. The temperature dependence of diffusivity coefficient was described satisfactorily by a simple Arrhenius-type relationship.

Conclusion: Temperature and thickness are two important factors in date paste drying. The effect of temperature is more significant than that of thickness. Dryer temperature increment showed great impact on the equilibrium moisture content (Me) and drying time in the tested range.

Keywords: Date paste, Thin layer drying, Activation energy, Effective diffusivity

*Corresponding author; mohamadi.ut@gmail.com