

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک کردن بادام زمینی در خشک کن هوای داغ

محمد غلامی پرشکوهی^{a*}، الیاس مرزانژاد^b، امیرحسین احمد بیگی^c، مهرداد سلیمی بنی^d

^aباشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشیار واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

^bکارشناس ارشد واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

^cباشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران

^dباشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۵

چکیده

مقدمه: هدف اصلی خشک کردن تولیدات کشاورزی، کاهش محتوای رطوبت به سطحی ایمن برای رسیدن به حداکثر ماندگاری می‌باشد. پارامترهای دما و سرعت جابجایی هوای عوامل اصلی مؤثر در فرآیند خشک شدن محسوب می‌شود. مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن برای طراحی، بهبود سیستم های خشک کن موجود و حتی کنترل فرآیند استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق تأثیر تغییرات دما (۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت هوا (۲ و ۳ متر بر ثانیه) بر زمان و آهنگ خشک شدن بادام زمینی با استفاده از خشک کن هوای داغ مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات رطوبت در حین فرآیند خشک شدن تحت شرایط مختلف با مدل‌های مختلف ریاضی شامل نیوتن، دوجمله‌ای، میدیلی، پیچ، پیچ اصلاح شده و لگاریتمی برازش داده شد.

یافته‌ها: پارامترهای دما و سرعت جابجایی هوا اثرات معنی‌داری بر روی زمان و آهنگ خشک شدن داشتند ($P < 0.01$).

نتیجه‌گیری: تأثیر دما بر فرآیند خشک کردن بسیار زیاد بود به طوری که افزایش آن از ۴۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش زمان تا ۶۷/۸ درصد و افزایش آهنگ خشک شدن تا ۱۰۹ درصد گردید. حداکثر تأثیر سرعت هوا برابر ۳۷/۳ درصد برای زمان خشک کردن و ۲۰/۹ درصد برای آهنگ خشک شدن بود. تغییرات رطوبت در حین فرآیند خشک شدن به خوبی با مدل دوجمله‌ای ($R=0.999$) مطابقت نمود.

واژه‌های کلیدی: بادام زمینی، دمای خشک کردن، زمان فرآیند، سرعت هوا، مدل ریاضی

مقدمه

سالانه ۲۵/۷ میلیون تن بادام زمینی در سطح جهان از ۲۱ میلیون هکتار زمین زراعی تولید می‌شود که آسیا با داشتن ۱۷/۹ میلیون تن بادام زمینی حدود ۷۰ درصد از تولید این محصول را به خود اختصاص داده است. آفریقا و آمریکا نیز به ترتیب با ۵/۲ و ۲/۵۷ میلیون تن، ۱۰ و ۲۰ درصد از تولید این محصول را به عهده دارند. از این مقدار ۷۰ درصد کل بادام زمینی روغن‌کشی شده و ۳۰ درصد باقیمانده بصورت مصارف آجیلی و یا در قنادی مصرف می‌شود (صفرزاده، ۱۳۷۸).

رشد سریع جمعیت در کشورها و نیاز روز افزون به مواد غذایی، ضرورت افزایش تولیدات و نگهداری محصولات کشاورزی را مشخص می‌سازد. خشک کردن مهم‌ترین روش نگهداری مواد کشاورزی بوده و یک عملیات حساس و با اهمیت در چرخه برداشت، نگهداری و حمل و نقل آنهاست. در این فرآیند آب موجود در ماده با استفاده از انرژی گرمایی فرآیند، تبخیر می‌گردد و به ماده‌ای جامد، نیمه جامد و مایع با میزان رطوبت کمتر تبدیل می‌شود. این فرآیند همراه با سازوکارهای پیچیده انتقال جرم و حرارت می‌باشد که اغلب باعث واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی می‌گردد (Eckhoff, 2004).

از پارامترهای بسیار مهم و موثر در فرآیند خشک کردن، تغییرات دما است. افزایش غیر معقول دما در فرآیند خشک کردن علاوه بر اتلاف انرژی، می‌تواند اثرات زیان باری بر ماده غذایی-دارویی بگذارد که در برخی موارد غیر قابل جبران است. به عنوان مثال با افزایش شدید دما در فرآیند خشک کردن، بافت‌های ماده آسیب دیده و علاوه بر تغییر رنگ، میزان چروکیدگی در سطح زیاد شده و منافذ سطحی بسته می‌شود. این مسئله علاوه بر سخت شدن لایه سطحی، باعث کندی سرعت خروج آب از ماده می‌شود (توکلی پور، ۱۳۸۰).

اغلب محاسبات مربوط به طراحی و یا تجزیه و تحلیل خشک‌کن‌ها نیاز به تخمین زمان لازم برای خشک کردن یک ماده از رطوبت اولیه به رطوبت نهایی دارد. این مسئله در دو مقطع خشک شدن با آهنگ ثابت و خشک شدن با آهنگ نزولی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به شرایط

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک کردن بادام زمینی

محیط خشک کردن و نیز پیچیدگی سازوکار انتقال رطوبت در داخل مواد غذایی برای تخمین زمان خشک شدن یک محصول بایستی آزمایشات مناسبی انجام شوند (پهلوانزاده، ۱۳۷۷).

در تحقیقی خشک شدن ذرت در یک خشک‌کن هوای داغ در دماهای ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سه دبی جرمی هوا ۱، ۱/۴ و ۱/۸ کیلوگرم بر دقیقه به صورت لایه نازک و پیوسته بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر فاکتورهای دما و سرعت جابه جایی هوا بر فرآیند خشک شدن ذرت معنی‌دار بود. در تیمارهای تحقیق به طور متوسط افزایش دما از ۵۰ به ۷۰ درجه سانتی‌گراد ۳۱/۷ درصد و تغییر دبی از ۱ به ۱/۸، ۲۷ درصد زمان خشک شدن ذرت را کاهش داد. در مدل سازی فرآیند خشک شدن ذرت، مدل لگاریتمی هم‌خوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با سایر مدل‌ها داشت (عباسی و همکاران، ۱۳۹۳).

اثرات دما در ۴ سطح ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت جابجایی هوای گرم در ۳ سطح ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه و روش آماده‌سازی محصول در چهار سطح بدون آماده‌سازی، آماده سازی با آب داغ، آماده سازی با کربنات پتاسیم ۵٪ و ۴٪ روغن زیتون و آماده سازی با هیدروکسید سدیم ۵٪ بر روی زمان و آهنگ خشک شدن انگور مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات رطوبت انگور در حین فرآیند خشک شدن در شرایط مختلف با مدل‌های هندرسون و پاییس^۲، دو جمله‌ای^۱، لوییس^۳، پیچ^۴، پیچ اصلاح شده^۵ و تامسون^۶ برازش داده شد. مقادیر ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی نیز در تمامی تیمارهای آزمایش تعیین شد. براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایشات اندازه‌گیری زمان و متوسط آهنگ خشک کردن، در هر دو رقم انگور، پارامترهای دما، سرعت جابجایی هوا و آماده سازی محصول اثرات بسیار معنی‌داری بر زمان و متوسط آهنگ خشک شدن دارند. تأثیر روش آماده سازی بر فرآیند خشک شدن انگور بسیار زیاد می‌باشد و در برخی دماها، زمان خشک شدن را تا ۶۸٪ کاهش می‌دهد. افزایش دما نیز در برخی از روش‌های آماده‌سازی تا ۶۵٪ زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد. افزایش سرعت جابجایی هوای گرم نیز می‌تواند تا حدود ۹٪ زمان خشک شدن

² Henderson and Pabis

² Two-term

³ Lewis

⁴ Page

⁵ Modified page

⁶ Thompson

این خشک کن دارای یک صفحه مشبک بود که جریان هوا به صورت متقاطع به محصول در حال خشک شدن برخورد می کرد. قبل از انجام آزمایشات قسمت های مختلف دستگاه نظیر لودسل، ترمومتر و دمنده توسط دستگاه های مخصوص تنظیم شدند.

قبل از انجام آزمایش نمونه از یخچال خارج و به مدت ۲ ساعت در دمای محیط قرار دادند تا به حالت تعادل با محیط برسند. سپس حدود ۳۰۰ گرم از هر نمونه را بر روی سینی خشک کن به صورت تک لایه قرار داده شد. ۱۰ دقیقه پس از روشن کردن دستگاه و تنظیم دما و سرعت جریان هوا، نمونه در داخل دستگاه قرار داده شد. عملیات داده برداری (وزن نمونه) در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه انجام شد تا رطوبت به رطوبت خشک (۱۵ درصد خشک پایه) برسد. آزمایشات در سه تکرار (طرح آماری کامل تصادفی در قالب فاکتوریل) اجرا شد.

پس از پایان آزمایش خشک کردن برای هر تیمار در سه تکرار اقدام به نمونه گیری شده و نمونه ها توسط یک ترازو با دقت ± 0.01 گرم توزین شدند. سپس با استفاده از آن تحت خلا در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱۵۰ میلی بار به مدت ۸ ساعت قرار داده شدند (غلامی و همکاران، ۱۳۸۸b). پس از خشک شدن کامل نمونه ها مجدداً توزین شدند. سپس با استفاده از رابطه (۱) رطوبت تعادلی نمونه بر مبنای خشک تعیین گردید. با میانگین گیری از سه رطوبت بدست آمده، رطوبت تیمار آزمایش در پایان فرآیند آزمایش تعیین شد. پس از تعیین رطوبت تیمار در پایان آزمایش، وزن خشک تیمار از رابطه (۱) محاسبه گردید و سپس با استفاده از همان رابطه با در دست داشتن وزن تیمار آزمایش در فواصل زمانی ذکر شده مقدار رطوبت در زمان های بالا بدست آمد (Zielinska and Markowski, 2010).

$$W = \frac{M_w - M_d}{M_d} \quad (1)$$

که در آن:

W: مقدار رطوبت (خشک پایه)، M_w : وزن نمونه تر و M_d : وزن نمونه خشک بودند.

پس از اتمام عملیات خشک شدن (رسیدن به حدود رطوبت ۱۵ درصد خشک پایه در مراحل انتهایی فرایند)

محصول را کاهش می دهد. در مقایسه انجام شده در دمای دو مرحله ای نتیجه گیری شد که با تغییر دما در مرحله دوم به ۵۰ درجه سانتی گراد بطور متوسط بیش از ۵۰٪ زمان خشک شدن نسبت به دمای ۵۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد. تغییرات رطوبت در حین فرآیند خشک شدن به خوبی با مدل های دوجمله ای و پیچ اصلاح شده مطابقت می کنند. مقدار ضریب نفوذ با افزایش دما و سرعت هوا بیشتر می شود و به نوع آماده سازی نیز بستگی دارد (غلامی و همکاران، ۱۳۸۸a; غلامی و همکاران، ۱۳۹۰).

در پژوهشی مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک شلتوک رقم فجر انجام شد. نتایج نشان داد که مدل تقریب پخش در خشک کردن لایه نازک شلتوک رقم فجر نسبت به سایر مدل ها از دقت بالاتری برخوردار است ولی به دلیل دقت قابل قبول و سادگی معادله، مدل پیچ برای مدل سازی سینتیک خشک شدن توصیه شد (Omid et al., 2010).

بنابراین هدف از انجام این پژوهش ارزیابی پارامترهای موثر بر فرآیند خشک شدن بادام زمینی به ویژه دما و سرعت جابجایی هوا در قالب تاثیر تغییرات پارامترهای ذکر شده بر زمان و آهنگ خشک شدن می باشد. تغییرات رطوبت نیز در هنگام خشک شدن با مدل های مختلف ریاضی برازش گردید.

مواد و روش ها

- مواد

آزمایش ها بر روی بادام زمینی آستانه اشرفیه رقم NC2 انجام شد. بادام زمینی مورد نیاز از مزارع شهرستان آستانه اشرفیه استان گیلان تهیه گردید. رطوبت اولیه توسط دستگاه رطوبت سنج محصول و آزمایشگاه تعیین شد. بادام ها در یخچال و دمای حدود 1 ± 4 درجه سانتی گراد در مدت آزمایش (۳۵ روز) نگهداری شدند.

پارامترهای مورد تغییر شامل تغییرات دما در چهار سطح ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوا در دو سطح ۲ و ۳ متر بر ثانیه بود.

برای انجام این تحقیق از یک دستگاه خشک کن ساخته شده در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان استفاده شد. خشک کن از نوع جریان با جابجایی هوای داغ بوده و برای خشک کردن میوه ها و سبزیجات مناسب می باشد.

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک کردن بادام زمینی

خشک شدن در این تحقیق، زمان رسیدن رطوبت بادام زمینی به میزان حدوداً ۱۵ درصد خشک‌پایه بود. پس از انجام مرحله خشک‌کردن به منظور بررسی تغییرات رطوبت در زمان خشک‌کردن از مدل‌های نیمه‌تئوری مطابق با جدول (۱) برای برازش داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. برای برازش داده‌ها روش رگرسیون غیر خطی بکار گرفته شد و به کمک نرم افزارهای آماری استاتستیکا^۱ و اکسل^۲ مدل‌های مذکور با داده‌ها برازش داده شدند. برای تعیین مناسب بودن برازش علاوه بر ضریب تعیین (R^2) از دو شاخص دیگر، به شرح جدول (۲) استفاده گردید. سپس مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی توسط آزمون دانکن صورت پذیرفت.

یافته‌ها

از تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده نتیجه‌گیری شد که پارامترهای دما و سرعت جابجایی هوا اثرات بسیار معنی‌داری بر زمان و متوسط آهنگ خشک کردن در سطح احتمال یک درصد دارند. همچنین اثرات متقابل بین آن دو نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. با استفاده از روش آزمون چند دامنه دانکن، مقایسه میانگین‌ها انجام و نتایج آن در جدول ۳ آمده است.

عملیات خشک کردن خاتمه یافته و با استفاده از آزمایشات فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، تاثیر آن بر شاخص‌هایی نظیر متوسط زمان و آهنگ خشک‌شدن بررسی شد. همچنین نحوه تغییرات رطوبت محصول در واحد زمان و تغییرات آهنگ خشک‌شدن نیز برای هر تیمار بدست آمد. آهنگ خشک شدن در هر زمان از فرآیند از رابطه ۲ محاسبه گردید (Canovas and Mercado, 1996).

$$D.R_i = \frac{W_{i-1} - W_i}{W_d * (t_{i-1} - t_i)} \quad (2)$$

که در آن:

$D.R_i$: آهنگ خشک‌شدن ($\frac{kgH_2O}{kgDM.h}$), W_i : جرم نمونه

در زمان i (کیلوگرم), W_{i-1} : جرم نمونه در زمان $i-1$ (کیلوگرم), W_d : جرم ماده خشک (کیلوگرم), مقدار رطوبت (خشک پایه), t_i : زمان i (ساعت), t_{i-1} : زمان $i-1$ (ساعت) بودند.

با میانگین‌گیری از مجموع اعداد بدست آمده در زمان‌های مختلف فرآیند، متوسط آهنگ خشک شدن برای هر تیمار حاصل شد که برای تجزیه و تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار گرفت. مبنای محاسبات و متوسط آهنگ

جدول ۱- مدل‌های مورد استفاده در تحقیق برای خشک کردن داده‌ها

مرجع	معادله	نام مدل
Yaldiz et al., 2001	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن (Newton)
Yaldiz et al., 2001	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	دوجمله‌ای (The two-term)
Yaldiz et al., 2001	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی (Midili)
Doymaz, 2004	$MR = \exp(-kt^n)$	پیج (Page)
Doymaz, 2004	$MR = \exp(-kt)^n$	پیج اصلاح شده (Modified Page)
Sayad, 2005	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی (Logarithmic)

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های بکار برده شده در تحقیق^۱

رابطه	نام شاخص
$P = \frac{100}{N} \sum \left \frac{X_e - X_o}{X_o} \right $	مقدار P (P value)
$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_e - X_o)^2}$	ریشه میانگین مربعات خطا (Root mean square error)

¹ Statistica 10

² Excel 2007

اسماعیلی ادبی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که مدل میدیلی مناسبترین مدل در خشک کردن آلوئه‌ورا بود. عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی مشابه نشان دادند که مدل میدیلی، مدل پیچ، مدل لگاریتمی و مدل دوجمله‌ای، فرآیند خشک شدن دانه‌های ذرت را مناسب‌تر پیش‌بینی می‌کنند. غلامی و همکاران (۱۳۹۰) نیز در خشک کردن انگور نشان دادند که دو مدل دو جمله‌ای و پیچ اصلاح شده، برازش قابل قبولی با مقدار رطوبت در حین فرآیند خشک شدن در تیمارهای مختلف آزمایش دارند.

نتایج بدست آمده از برازش مدل‌های مورد آزمون در تمامی تیمارهای آزمایش نشان می‌دهد که مدل دو جمله‌ای و مدل لگاریتمی، برازش قابل قبولی با مقدار رطوبت در حین فرآیند خشک شدن در تیمارهای مختلف آزمایش دارند (جدول ۴). مدل پیچ اصلاح شده چون نتایج قابل قبولی نداشت، نتایج آن در جدول درج نگردید. با توجه به جدول ۴ مدل دو جمله‌ای برازش مناسبتری به دلیل بالا بودن ضریب همبستگی، کم بودن مقدار P^1 و میانگین مربعات خطا با داده‌های آزمایش دارند. شکل‌های ۱ و ۲ این برازش را نشان می‌دهند و برای نمونه ارائه گردید.

جدول ۳- آزمون مقایسه میانگین زمان خشک کردن و آهنگ خشک کردن بادام زمینی (دانکن ۵٪)

دما (درجه سانتی‌گراد)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	زمان خشک شدن (دقیقه)	آهنگ خشک شدن ($kgH_2O/kgDM.h$)
۷۰	۳	۱۱۶ ^a	۰/۰۴۹۸ ^a
	۲	۱۸۵ ^a	۰/۰۴۲۹ ^b
۶۰	۳	۳۶۰ ^b	۰/۰۲۳۹ ^c
	۲	۴۱۷ ^{b,c}	۰/۰۲۰۵ ^e
۵۰	۳	۴۱۰ ^{b,c}	۰/۰۲۰۶ ^d
	۲	۴۶۰ ^c	۰/۰۱۸۸ ^f
۴۰	۳	۸۴۰ ^d	۰/۰۱۳۳ ^g
	۲	۱۰۸۰ ^e	۰/۰۱۱۰ ^h

حروف متفاوت نشانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد

جدول ۴- تحلیل رگرسیونی مدل‌های به کار گرفته در تحقیق^۱

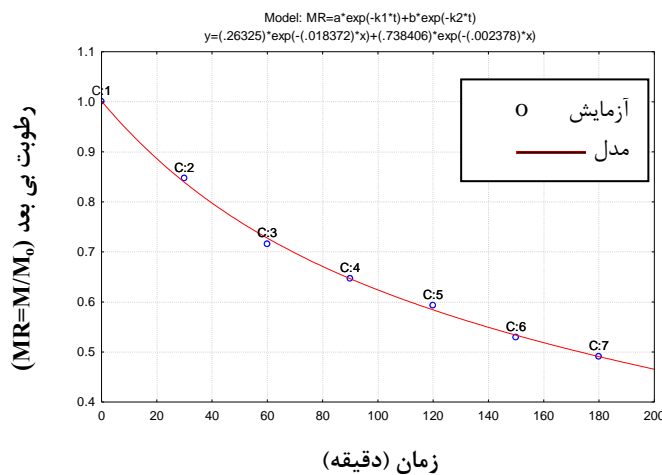
مدل					شاخص	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دما (درجه سانتی‌گراد)
بیچ	میدلی	دو جمله‌ای	لگاریتمی	نیوتن			
۰/۹۹۸۵	۰/۵۲۶۳	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۸۹	۰/۹۸۵۳	R	۳	۷۰
۱/۰۹	۱۵/۸	۰/۷۴	۰/۹۴	۳/۶۸	P(%)		
۹/۰۹	۱۴۳	۶/۵۳	۷/۷۲	۲۸/۷	$R_{MSE} \times 10^3$		
۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸۱	۰/۹۳۷۹	R	۲	۶۰
۱/۰۷	۰/۸	۰/۳۳	۱/۴۵	۷/۶۸	P(%)		
۸/۵۱	۵/۴	۲/۲	۹/۹	۵۵/۶	$R_{MSE} \times 10^3$		
۰/۹۹۴۸	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۳	۰/۹۴۹۴	R	۳	۵۰
۱/۸	۰/۸۷	۰/۵۱	۰/۷۳	۶/۳۴	P(%)		
۱۵/۱	۷	۴/۵	۵/۶	۴۶/۳	$R_{MSE} \times 10^3$		
۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۴	۰/۹۴۵۹	R	۲	۴۰
۲/۵۹	۰/۷۱	۰/۵۳	۰/۵۳	۶/۷۹	P(%)		
۱۹/۵	۵/۶۶	۴/۷۶	۴/۹۵	۴۸/۵	$R_{MSE} \times 10^3$		
۰/۹۹۳۳	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۵	۰/۹۵۸۰	R ²	۳	۵۰
۲/۲۷	۰/۶۶	۰/۵	۰/۴۹	۵/۹۴	P(%)		
۱۷/۵	۵/۳۷	۴/۷۲	۴/۷۹	۴۳/۴	$R_{MSE} \times 10^3$		

¹ P value

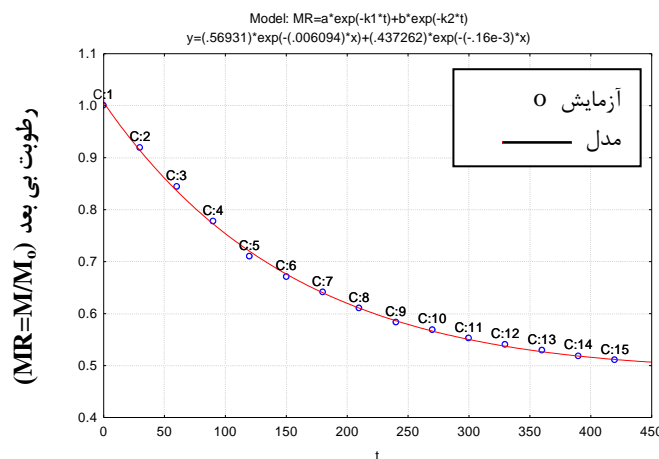
تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک کردن بادام زمینی

مدل		شاخص			سرعت هوا	دما
پیچ	میدلی	دو جمله‌ای	لگاریتمی	نیوتن	(متر بر ثانیه)	(درجه سانتی‌گراد)
۰/۹۹۱۱	۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۵	۰/۹۳۸۰	R	
۲/۵	۰/۸	۰/۶۴	۰/۵	۶/۹۶	P(%)	۲
۱۹/۴	۶/۴	۵/۱	۴/۵	۵۰/۷	$R_{MSE} \times 10^3$	
۰/۹۹۱۲	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۸	۰/۸۹۰۳	R	
۲/۴۶	۰/۴۱	۰/۲	۰/۳۳	۸/۸۵	P(%)	۳
۱۸/۸	۳/۳	۱/۸۳	۲/۷۵	۶۴/۶	$R_{MSE} \times 10^3$	۴۰
۰/۹۸۷۷	۰/۹۸۸۰	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۸۵	۰/۸۱۰۷	R	
۲/۳۳	۱/۸۸	۰/۲۷	۰/۸۹	۹/۷۲	P(%)	۲
۱۹/۶	۷/۲۵	۲/۵۷	۶/۷۸	۷۳/۳	$R_{MSE} \times 10^3$	

R: ضریب تعیین، P: مقدار P و R_{MSE} : ریشه میانگین مربعات خطا



شکل ۱- برازش مدل دو جمله‌ای با داده‌های آزمایش در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جابجایی هوا ۳ متر بر ثانیه



شکل ۲- برازش مدل دو جمله‌ای با داده‌های آزمایش در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت جابجایی هوا ۲ متر بر ثانیه

آهنگ و کاهش زمان خشک کردن بادام زمینی گردید (شکل‌های ۳ و ۴). سرعت جابجایی هوا در تمامی دماها نیز موجب تسریع معنی‌دار آهنگ و کاهش زمان خشک شدن

بحث

با توجه به مقایسه میانگین‌ها ملاحظه شد که افزایش دما در کلیه سطوح سرعت جابجایی هوا موجب تسریع

شدن سریع تر محصول و تبخیر بهتر آب از آن می شود و در نهایت باعث کاهش زمان خشک شدن می گردد. افزایش سرعت هوا از ۲ به ۳ متر بر ثانیه باعث کاهش زمان خشک کردن و افزایش آهنگ خشک شدن گردید که مقدار آن به ترتیب در دماهای ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درجه سانتی گراد برابر ۳۷/۳، ۱۳/۷، ۱۰/۹ و ۲۲/۲ درصد برای زمان خشک کردن و ۱۶/۱، ۱۶/۶، ۹/۶ و ۲۰/۹ درصد برای آهنگ خشک شدن بود. با افزایش سرعت جریان هوا به دلیل افزایش حجم هوای عبوری از روی محصول، فشار بخار محیط کاهش می یابد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه خواهد بود و با سرعت بیشتری از آن خارج می گردد. به عبارت دیگر ظرفیت هوا برای جذب رطوبت بیشتر شده و زمان خشک شدن کاهش می یابد. محققان دیگر نتایج مشابهی گزارش نمودند (اسماعیلی ادبی و همکاران، ۱۳۹۵؛ غلامی و همکاران، ۱۳۸۸).

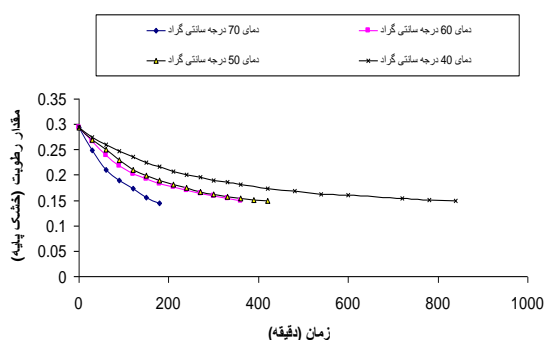
نتیجه گیری

تاثیر دما بر فرآیند خشک کردن بسیار زیاد بود و افزایش آن موجب کاهش زمان و افزایش آهنگ خشک شدن می شود. با تغییرات دمای خشک کردن می توان زمان خشک کردن را تا ۶۷/۸ درصد کاهش داد. افزایش سرعت هوا نیز باعث کاهش این زمان تا ۳۷/۳ درصد گردید. نتایج بدست آمده از برآزش مدل های مورد آزمون در تمامی تیمارهای آزمایش نشان می دهد که مدل دوجمله ای، برآزش قابل قبولی با مقدار رطوبت در حین فرآیند خشک شدن در تیمارهای مختلف آزمایش دارند.

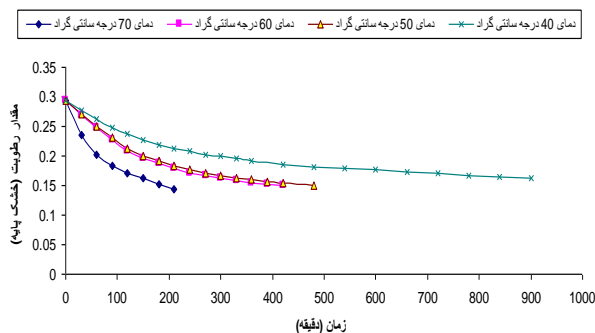
گردید (شکل ۵). نتایج نشان می دهد که افزایش دمای خشک کن در مقایسه با سرعت جابجایی هوا تاثیر بیشتری بر کاهش زمان و تسریع آهنگ خشک شدن دارد. با توجه به شکل ۳ در ابتدای فرایند خشک کردن محتوای رطوبت به سرعت کاهش می یابد، ولی در مراحل بعدی کاهش محتوای رطوبت به آهستگی صورت می گیرد. علت این امر به دلیل زیاد بودن محتوای رطوبت در ابتدای فرایند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح است. همچنین خشک شدن سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول شده که این امر باعث کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی خشک کردن می شود. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر گزارش نمودند (Kashaninejad et al., 2007; Shen et al., 2011; غلامی و همکاران، ۱۳۸۸).

مقایسه میانگین زمان و آهنگ خشک کردن (جدول ۴) نشان می دهد که در اثر افزایش دما از ۴۰ به ۵۰ درجه سانتی گراد، ۵۰ به ۶۰ درجه سانتی گراد و ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی گراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه به ترتیب ۵۷/۴، ۹/۳ و ۵۵/۶ درصد زمان خشک شدن کاهش و ۷۰/۹، ۹/۱ و ۱۰۹/۳ درصد آهنگ آن افزایش یافت. در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه به ترتیب ۵۱/۲، ۱۲/۲ و ۶۷/۸ درصد زمان خشک شدن کاهش و ۵۴/۹، ۱۶/۱ و ۱۰۸/۴ درصد آهنگ آن افزایش یافت. دلیل کاهش زمان یا افزایش آهنگ خشک شدن اینست که افزایش دما از یک طرف باعث افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول شده و از طرف دیگر باعث گرم

۱۱۳



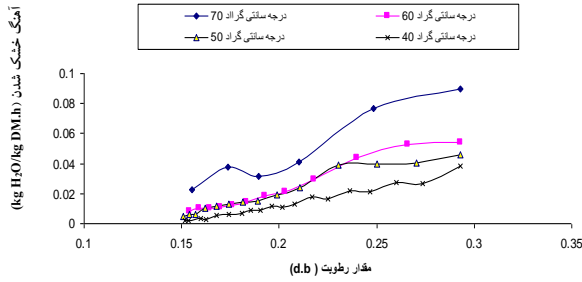
ب: سرعت جابجایی هوای ۳ متر بر ثانیه



الف: سرعت جابجایی هوای ۲ متر بر ثانیه

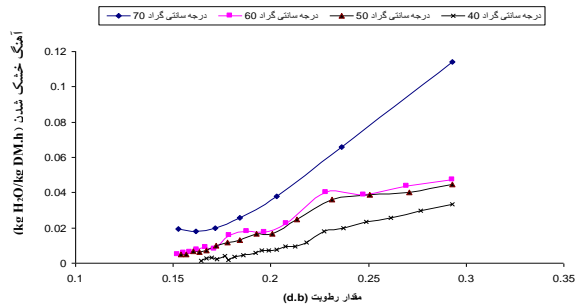
شکل ۳- روند تغییرات رطوبت در سرعت جابجایی هوای متفاوت

تأثیر تغییرات دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک کردن بادام زمینی

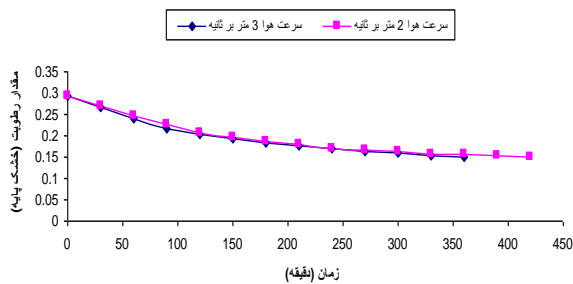


ب: سرعت جابجایی هوای ۳ متر بر ثانیه

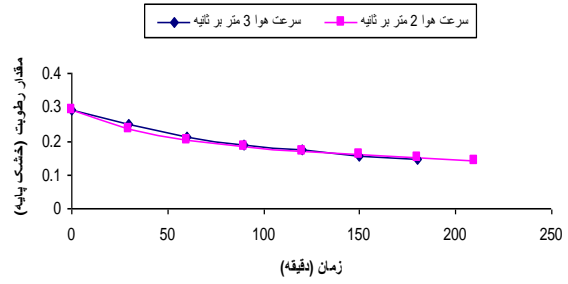
شکل ۴- روند تغییرات آهنگ خشک شدن در سرعت جابجایی هوای متفاوت



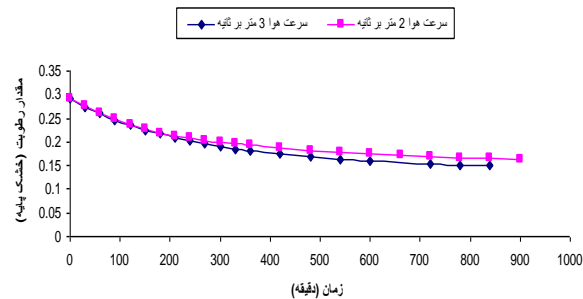
الف: سرعت جابجایی هوای ۲ متر بر ثانیه



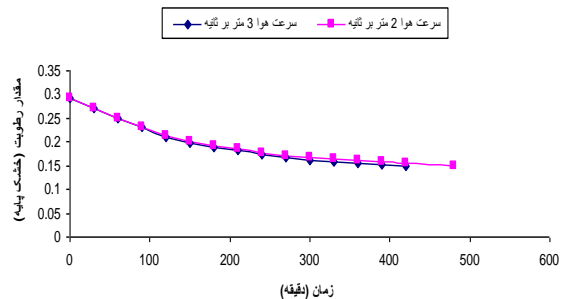
ب- دمای ۶۰ درجه سانتی گراد



الف: دمای ۷۰ درجه سانتی گراد



د- دمای ۴۰ درجه سانتی گراد



ج: دمای ۵۰ درجه سانتی گراد

شکل ۵- روند تغییرات رطوبت در دمای مختلف

پهلوانزاده، ج. (۱۳۷۷). خشک کردن، اصول، کاربرد و طراحی. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. تهران. صفحات ۸۹-۲۰

عباسی، س.، مینایی، س. و خوش تقاضا، م. (۱۳۹۳). بررسی سینتیک خشک شدن و انرژی مصرفی لایه نازک ذرت. نشریه ماشین های کشاورزی. جلد چهارم. شماره ۱. صفحات ۹۸-۱۰۷.

غلامی، م. و رشیدی، م. (۱۳۸۸a). تأثیر دما، سرعت جابجایی هوا و روش آماده سازی در فرآیند خشک شدن

منابع

اسماعیلی ادبی، م.، موسوی سیدی، ر.، کلانتری، د. و قوامی عدل، ب. (۱۳۹۵). بررسی مدل سازی ریاضی، سینتیک و انرژی مصرفی خشک کردن ژل آلونته‌ورا در خشک کن هوای گرم با قابلیت باز گردش هوای خروجی. فصلنامه علوم و صنایع غذایی. شماره ۵۴، دوره ۱۳، صفحات ۷۳-۸۳.

توکلی پور، ج. (۱۳۸۰). خشک کردن مواد غذایی، اصول و روش‌ها. انتشارات آبیژ. تهران. صفحات ۴۱-۱۰.

Eckhoff, S. R. (2004). Wet milling. In: Wrigley, C., Walker, C.E. (Eds.), *Encyclopedia of Grain Science*. Elsevier Ltd: 30-46.

Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. & Tabil, L.G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *J Food Eng*, 78 (1): 98-108.

Omid, M., Yadollahinia, A. R. & Rafiee, S. (2010). Development of a kinetic model for thin layer drying of Paddy, Fajr variety. *Biosystem Engineering (University of Tehran)* 41, 153-160.

Shen, F., Peng, L., Zhang, Y., Wu, J., Zhang, X., Yang, G., Peng, H., Qi, H. & Deng, S. (2011). Thin-layer drying kinetics and quality changes of sweet sorghum stalk for ethanol production as affected by drying temperature. *Ind. Crops Products*, 34 (3), 1588-1594.

Vagenas, G. K. & Marinos-Kouris, D. (1999). The design and optimization of an industrial dryer for Sultana raisin. *Drying Technology*. 9: 434-461.

Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.

Zielinska, M. & Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 212-218.

انگور بیدانه قرمز. مجله علمی پژوهشی علوم و صنایع غذایی ایران. شماره ۲. صفحات ۲۱-۱۳.

غلامی، م.، رشیدی، م. و بهشتی، ب. (۱۳۸۸b). تاثیر دمای دومرحله‌ای و روش آماده‌سازی در فرایند خشک شدن انگور بیدانه سفید. مجله علمی پژوهشی گیاه و زیست بوم. شماره ۲۰. صفحات ۷۱-۵۵.

غلامی، م.، رشیدی، م.، بهشتی، ب. و عباسی، س. (۱۳۸۸c). بررسی مدل‌های ریاضی خشک‌شدن انگور بیدانه قرمز. مجله علمی پژوهشی گیاه و زیست بوم. شماره ۱۹. صفحات ۸۴-۷۱.

غلامی، م.، رشیدی، م. و عباسی، س. (۱۳۸۸d). شبیه سازی فرایند خشک شدن انگور بیدانه سفید با الگوهای ریاضی. فصلنامه علمی پژوهشی در علوم مهندسی مکانیک کاربردی. جلد دوم شماره ۱. صفحات ۴۳-۳۵.

غلامی، م.، رشیدی، م.، رنجبر، ا. و عباسی، س. (۱۳۹۰). تاثیر روش‌های آماده‌سازی و آبگیری بر سرعت و زمان خشک شدن انگور بیدانه قرمز. مجله علمی پژوهشی علوم و صنایع غذایی ایران. دوره ۸ شماره ۱. صفحات ۴۷-۳۹.

Canovas, V. G. & Mercado, H. V. (1996). *Dehydration of Food*. Chapman & Hall publishers. New York, U.S.A

Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristic of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359-364.

