



استفاده از خشک کن بستر سیال با کمک مایکروویو در تعیین سینتیک خشک کردن و ضریب

پخش موثر بذر خربزه

ایمان گلیپور^{۱*}، معین زرین نژاد^۲، اسد مدرس مطلق^۳ و علی محمد نیکبخت^۳

- ۱- دانشجوی دکترای مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
- ۲- دانش آموخته مکانیک ماشین‌های کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینای همدان
- ۳- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*ایمیل مکاتبه کننده: Imangolpour@gmail.com

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی سینتیک خشک کردن بذر خربزه و محاسبه ضریب پخش موثر آن با استفاده از ترکیب خشک کن بستر سیال و مایکروویو می باشد. آزمایش خشک کردن تحت سه سطح دمای خشک کن ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ورودی ۰/۸، ۱/۲۱ و ۲/۲۸ متر بر ثانیه و سه سطح توان مایکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات انجام شد. برای توضیح انتقال رطوبت از لایه نازک بذر خربزه، مدل فیک پخش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بیشترین دماهای هوای ورودی (۷۰ درجه سلسیوس) و بیشترین توان مایکروویو (۶۳۰ وات) فرآیند خشک شدن در کمترین زمان صورت گرفت. مدل آغباشلو و همکاران نسبت به سایر مدل ها با بیشترین مقدار $R^2 = 0/9984$ و کمترین مقدار $\chi^2 = 0/0005$ و $RMSE = 0/1768$ مراحل خشک شدن بذر خربزه را بهتر ارزیابی می کند. ضریب پخش موثر رطوبت در نمونه های خشک شده از $10 \times 6/51$ تا $9 - 10 \times 6/59$ مجذور متر بر ثانیه متغیر بود و با افزایش دمای ورودی و توان مایکروویو افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: بذر خربزه، خشک کن بستر سیال- مایکروویو، ضریب پخش موثر

مقدمه

خربزه با نام علمی (*Colocynthis Citrullus L*) به طور وسیعی به عنوان محصولات دانه ای روغنی در کشور ما کشت و مصرف می شود. بذر خربزه شامل تقریباً ۵۳٪ روغن، ۲۸٪ پروتئین و مواد معدنی مهم دیگر می باشد که شامل ۲/۷ درصد فیبر و ۸/۲ درصد کربو هیدرات می باشد. بذر خربزه همچنین به عنوان یک منبع خوبی از اسیدآمینوهای مهم و ضروری می باشد. این بذر همچنین شامل مقدارزیادی از اسیدهای چرب اشباع نشده، اسید لینولئیک می باشد. این بذرها در مواد غذایی مثل سوپ و اسنک استفاده زیادی می شوند (آجیبولا و همکاران، ۱۹۹۰).



خشک کردن از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری و محصولات کشاورزی به شمار می‌رود. از آنجا که محتوای رطوبتی زیاد محصولات کشاورزی طول دوره انبارداری آنها را کاهش می‌دهد ضروری است با خشک شدن آنها به روش مصنوعی محتوای رطوبتی آنها را تا یک سطح مطمئن کاهش داد. بنابراین هدف از خشک کردن مواد غذایی ذخیره سازی طولانی مدت، کاهش قابل توجهی در هزینه‌های حمل و نقل، حداقل کردن نیازهای انبارداری و بسته بندی می‌باشد. در این روش انتقال جرم و حرارت صورت می‌گیرد و میتواند تغییرات معنی داری در ترکیبات شیمیایی، ساختار و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد غذایی و محصولات کشاورزی ایجاد کند (گلپور و همکاران، ۲۰۱۵). به دلیل امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی، اجرای صحیح عملیات خشک کردن اهمیت زیادی دارد. به همین دلیل نیاز است که جهت خشک کردن هر محصولی بهترین روش در حالت بهینه استفاده شود، تا کمترین افت کیفیت در محصول مورد نظر ایجاد شده و عملیات در کمترین زمان ممکن انجام شود (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷).

امروزه افزایش مصرف سبزیجات و دانه‌های خشک شده به صورت مجزا و یا در محصولاتی چون سوپهای آماده و غذاهای رژیمی، تقاضا جهت محصولات غذایی و کشاورزی دهیدراته شده را در صنایع غذایی افزایش داده است. خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات به مشخصات مربوط به انتقال جرم و حرارت در محصولی که خشک می‌شود، بستگی دارد. دانستن بخش رطوبت و دمای محصولات، برای طراحی پروسه، کنترل کیفی، انتخاب نوع انبار کردن مناسب و چگونگی جابجایی مناسب محصولات، لازم می‌باشد. ضریب پخش، یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و مقدار آن بستگی به شرایط داخل ماده، دارد. پخش رطوبت موثر، همه مکانیزم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده را توصیف می‌کند مثل: پخش مایع، پخش بخار، پخش سطحی، جریان کاپیلاری و جریان هیدرودینامیکی، حرکت رطوبت که شامل پخش رطوبت در ماده جامد می‌باشد، دارای پروسه‌ی پیچیده است. دانست درباره پخش رطوبت موثر برای طراحی و مدل سازی پروسه انتقال جرم، مثل آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری لازم می‌باشد (رفیعی و همکاران، ۲۰۱۰). موسیگا و اولوال در سال ۲۰۰۵ برای توضیح انتقال رطوبت برگ کلم، مدل پخش فیک را مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد مقدار ضریب پخش موثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای بین ۳۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای یک متر بر ثانیه، $10 \times 14/9$ تا $10 \times 55/9$ متر بر مجذور ثانیه تغییر میکند که نشان دهنده اثر دمای هوای خشک کن، روی پدیده پخش می‌باشد. هر محصول به دلیل ترکیبات و ساختمان متفاوت آن که انتقال رطوبت و جرم را در داخل آن تحت تاثیر قرار می‌دهند دارای یک سینتیک خشک شدن مخصوص به خود است.

استفاده از شناور سازی ذرات جامد یکی از موفق‌ترین روشهای خشک کردن در صنعت و به ویژه صنایع غذایی می‌باشد. این روش خشک کن ستون بستر سیال نامیده می‌شود. در این روش جریانی از هوای گرم که در آن سطح تماس ذرات با جریان هوای گرم در حد گسترده انجام می‌پذیرد، باعث خشک کردن یکنواخت و افزایش سرعت خشک شدن گشته و از لحاظ دما قابل کنترل می‌باشد (نازقلیچی و همکاران، ۲۰۰۸). در سال‌های اخیر به انرژی مایکروویو توجه زیادی شده است. استفاده از مایکروویو برای فرآیند خشک کردن، سرعت خشک کردن را کاهش و کیفیت محصول را حفظ می‌کند به همین دلیل مایکروویو به منبع جذب کننده انرژی حرارتی تبدیل شده است. اشعه مایکروویو خیلی سریع و موثر در ماده‌ی گیاهی پخش می‌شود (مایور و سرنو، ۲۰۰۴). تحقیقات زیادی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی انجام گرفته



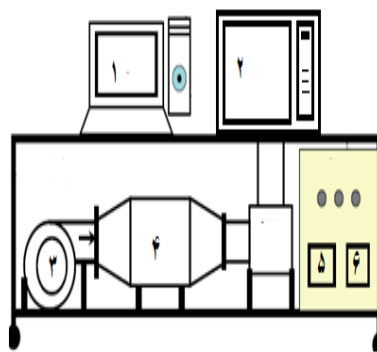
است. وانگ و همکاران مدل سازی ریاضی برای خشک کردن سیب با خشک کن میکروویو با و بدون پیش خشک کردن با جریان هوای داغ بدست آوردند (مایور و سرنو، ۲۰۰۴). ده بوره و اسماعیلی (۱۳۸۸) تأثیر فرایند خشک کردن نهایی با میکروویو و هوای داغ را بر پارامترهای خشک کردن انگور مورد مطالعه قرار دادند. بوندراک و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر شرایط خشک کردن بر روی کیفیت سیب زمینی خشک شده با میکروویو خلأ را مورد بررسی قرار دادند.

با توجه به تحقیقات اخیر، تا کنون پژوهشی در مورد خشک کردن بذر خربزه در خشک کن میکروویو-بسترسیال انجام نشده است و با وجود اینکه ضریب نفوذ موثر و سنتیک خشک کردن بذر خربزه از اهمیت بالایی در فرآیند خشک کردن برخوردار می باشند، لذا هدف از این تحقیق بررسی سینتیک خشک کردن این محصول و محاسبه فاکتور ضریب پخش موثر آن با بکارگیری از ترکیب خشک کن بستر سیال و میکروویو می باشد.

مواد و روش ها

در ابتدا خربزه تازه از بازارمیوه تره بار همدان تهیه شد و قبل از انجام آزمایش‌ها در یخچال با دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. سپس بذرهای سالم خربزه از آن تفکیک شد و مورد استفاده برای آزمایش قرار گرفت. رطوبت اولیه بذر خربزه با استفاده از آون بدست آمد. نمونه‌های ۱۵ گرمی در سه تکرار در دمای 103 ± 1 به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار داده شد (۱۹۸۰، AOAC) مقدار رطوبت اولیه بذر خربزه $0/671$ بر مبنای وزن خشک بدست آمد.

برای انجام آزمایش‌ها از یک خشک کن آزمایشگاهی میکروویو بسترسیال ساخته شده در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا استفاده شد (شکل ۱). خشک کن شامل یک دمنده سانتریفیوژ، موتور الکتریکی، المنت گرم کننده هوا (۹ المنت)، لوله‌های رابط برای جریان و انتقال هوا، محفظه استوانه‌ای خشک کن، میکروویو، اینورتر برای تنظیم سرعت چرخش دمنده و سیستم تنظیم دمای هوای ورودی بود. با تنظیم هر یک از متغیرهای ورودی، آزمایش‌ها در سطوح دمایی، سرعت هوای دمنده و توان‌های میکروویو مورد نظر انجام شد (شکل ۱).



شکل ۱ - شکل شماتیک خشک کن میکروویو بسترسیال (۱- رایانه، ۲- میکروویو، ۳- دمنده سانتریفیوژ، ۴- محفظه المنت‌ها، ۵- اینورتر و ۶- ترموستات)

توزین نمونه‌ها در حین مراحل خشک کردن توسط یک ترازوی دیجیتال AND GF-6000، ساخت ژاپن با درجه تفکیک $0/001$ گرم صورت گرفت. برای تنظیم دمای هوای ورودی از یک ترموستات آتین ساخت ایران که با ترموکوپل نوع K



کار می‌کرد استفاده شد. ترموکوپل در انتهای کانال هوا و ابتدای محفظه‌ی خشک‌کن قرار داده شد. برای انجام آزمایش‌ها از مایکروویو شارپ مدل R-I96ts با حداکثر توان ۹۰۰ وات استفاده شد. این دستگاه قابلیت تنظیم توان مایکروویو بین درصد توان‌های ۱۰٪ (۹۰ وات) تا ۱۰۰٪ (۹۰۰ وات) می‌باشد. برای تنظیم مدت زمان روشن بودن مایکروویو برای انجام آزمایش‌ها دستگاه قابلیت تنظیم زمان با درجه تفکیک ثانیه را داشت (شماره ۲ در شکل ۲). در این تحقیق از سه سطح توان مایکروویو (۲۷۰، ۴۵۰، ۶۳۰ وات) و سه سطح دما (۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلیسیوس) و سه سطح سرعت هوا (۰/۸، ۱/۲۱ و ۲/۲۸ متر بر ثانیه) استفاده شد. در نهایت آزمایشات با رسیدن به رطوبت ۰/۵٪ به پایان رسید.

تعیین رطوبت

نسبت رطوبت (MR) بذر خربزه در طول فرآیند خشک کردن با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (دویماز، ۲۰۰۷)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_b - M_e} \quad (1)$$

که در آن MR نسبت رطوبت و بدون بعد، M رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی نمونه‌ها بر پایه خشک، M_b رطوبت اولیه نمونه‌ها بر پایه خشک می‌باشد.

تعیین ضریب پخش موثر رطوبت

قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات دایره ای شکل ارائه شد با فرض ناچیز بودن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار میتواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی موثر، ثابت و شعاعی است میتوان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود [آغباشلو همکاران، ۲۰۰۸]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{L^2}\right) \quad (2)$$

که در آن n تعداد جملات خشک شدن (۱، ۲، ۳...)، t زمان خشک شدن بذر خربزه (ثانیه)، L شعاع هندسی تخم خربزه (m)، و D_{eff} ضریب پخش موثر (m^2/s) است. وقتی t افزایش می‌آید تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می‌شوند. در نتیجه خواهیم داشت (دویماز، ۲۰۰۷):

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (3)$$

بعد از ساده شدن معادله بالا را می‌توان به صورت خطی نوشت. با لگاریتم گیری از طرفین معادله می‌توان آن را به صورت خطی زیر نوشت:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2}{L^2}\right) t \quad (4)$$



مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M و M_b بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان کسر $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}$ را ساده کرد و معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت زیر نوشت:

$$MR = \frac{M}{M_b} \quad (5)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نیست. برخی از مدل‌های استاندارد خشک کردن لایه نازک برای بذر خربزه در جدول ۱ آمده است. نسبت‌های رطوبت طی آزمایشات مختلف با مدل‌های ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert (Ver 1.4) برازش داده شد و برای محاسبه مقادیر ضریب تعیین (R^2)، مربع کای (X^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. که برای ارزیابی مدل‌های استفاده شده از معادلات زیر استفاده شد (امیری چایجان و همکاران، ۲۰۱۳):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [MR_{exp,i} - MR_{pre,i}]^2}{\sum_{K=1}^N \left[\frac{\sum_{K=1}^n MR_{pre,i}}{N} - MR_{pre,i} \right]^2} \quad (6)$$

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

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

که در این رابطه‌ها، $MR_{exp,i}$ ، i امین نسبت رطوبت آزمایشی، $MR_{pre,i}$ i امین نسبت رطوبت پیش‌بینی شده، N تعداد مشاهدات و Z تعداد ثابت‌های خشک کردن می‌باشد.

جدول ۱- مدل‌های لایه نازک خشک کردن

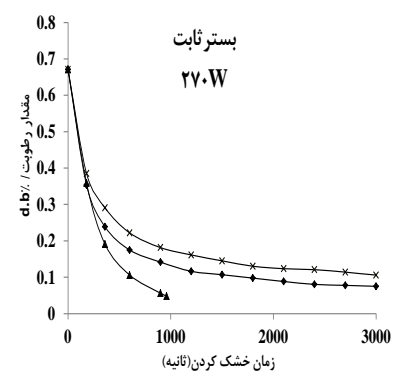
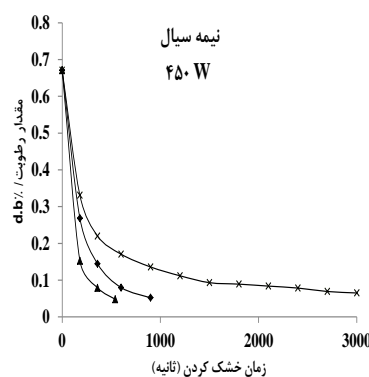
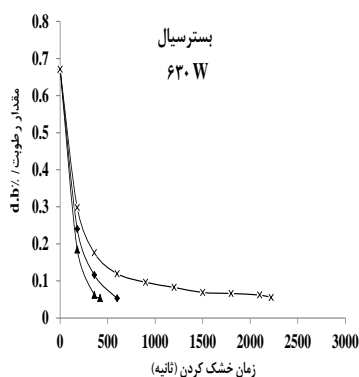
ردیف	نام مدل	رابطه مدل	منابع
۱	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	[۹]
۲	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	[۱۰]
۳	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[۱۱]
۴	لوجستیک	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	[۱۲]
۵	آغباشلو و همکاران	$MR = \exp(-at / (1 + bt))$	[۱۳]



بحث و نتایج

سینتیک خشک کردن

مدت زمان لازم برای خشک کردن بذر خربزه از مقدار رطوبت اولیه ۶۷٪ در مبنای خشک تا مقدار نهایی ۵٪ در مبنای خشک برای دماهای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۰/۸، ۱/۲۱ و ۲/۲۸ متر بر ثانیه و سه سطح توان مایکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات در شکل ۲ نشان داده شده است. چنانچه در شکل دیده می‌شود در ابتدای فرآیند، رطوبت اولیه بذر خربزه زیاد بوده و سرعت خشک شدن نمونه افزایش می‌یابد، بتدریج با گذشت زمان میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و کاهش رطوبت به طور طبیعی کاهش می‌یابد. کاهش در زمان خشک کردن با افزایش درجه حرارت خشک کردن ممکن است منجر به افزایش در فشار بخار آب داخل تخم خربزه شود که باعث کاهش رطوبت می‌شود. نتایج مشابهی نیز برای ورقه‌های گوجه فرنگی (خزایی و همکاران ۲۰۰۸)، برای خشک کردن سیب (وانگ و همکاران، ۲۰۰۱) و برای لویا سبز (عباسی شکوهی و مولا، ۲۰۰۸ b) گزارش شد. بنابراین درجه حرارت بالاتر منجر به کاهش سریع رطوبت می‌شود به گونه‌ای که فرآیند خشک کردن کوتاهتر می‌شود. درحالی که افزایش سطح توان مایکروویو از ۲۷۰ به ۶۳۰ وات در سیستم بستر سیال به کمک مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل ملاحظه‌ای را کاهش می‌دهد. در این مرحله انرژی مایکروویو باعث گرم شدن نمونه می‌شود. افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می‌دهد، زیرا اینگونه به نظر می‌رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت بذر می‌شود. به عبارتی دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. نتایج بدست آمده با نتایج (عباسی شکوهی و مولا، ۲۰۰۸ b، مومن زاده و همکاران، ۲۰۱۲) مشابهت دارد.



شکل ۲- سینتیک خشک کردن بذر خربزه (۷۰°C ▲ و ۵۵°C ■ و ۴۰°C ×)

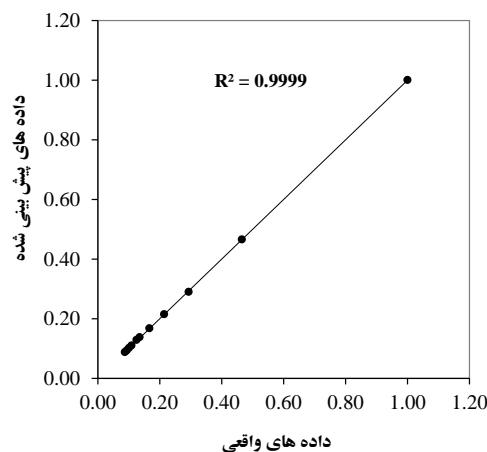
انتخاب مدل مناسب برای سینتیک خشک کردن بذر خربزه

رطوبت نمونه‌های بذر خربزه در شروع آزمایش ۶۷٪ بر پایه وزن خشک بود. پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دما، سرعت و سطح توان‌های مختلف، پنج مدل موجود در جدول ۱، برای منحنی خشک شدن حاصل از داده‌های



آزمایش برازش داده شدند. سپس مدل‌های خشک شدن لایه نازک مختلف بر اساس بالاترین مقادیر R^2 و کمترین مقادیر X^2 و RMSE انتخاب شدند. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با بعضی از مدل‌های ارائه شده در جدول ۲ داده شده است. با مقایسه مقادیر به ترتیب میزان برازش، مدل آغباشلو و همکاران براساس میانگین این مقادیر در تمامی سطوح به عنوان مدلی که بالاترین برازش را با داده‌های خشک کن میکروویو-بستر سیال داشت با داشتن بیشترین مقدار $R^2 = 0.9984$ و کمترین مقادیر مربع کای ($\chi^2 = 0.0005$) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 0.1768$) به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب و معرفی شد.

براساس نتایج بدست آمده مدل آغباشلو و همکاران به عنوان یک مدل مناسب برای توصیف رفتار خشک کردن لایه نازک بذر خربزه در خشک کن میکروویو انتخاب شد. به گونه‌ای که این مدل یک برازش خوبی با داده‌های آزمایش در خشک کردن بذر خربزه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد و سرعت ۱/۲۱ متر بر ثانیه و سطح توانی میکروویو ۶۳۰ وات با بیشترین مقدار $R^2 = 0.9999$ داشت. شکل ۳ نشان دهنده دقت پیشبینی این مدل برای شرایط خشک کردن بذر خربزه می‌باشد که از رسم مقادیر پیشبینی شده در مقابل مقادیر واقعی بدست آمد (شکل ۳).



شکل ۳- رابطه خطی بین داده‌های محتوای رطوبتی واقعی و پیش‌بینی شده برای مدل آغباشلو و همکاران برای خشک کردن لایه نازک بذر خربزه در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۲۱ متر بر ثانیه و توان ۶۳۰ وات



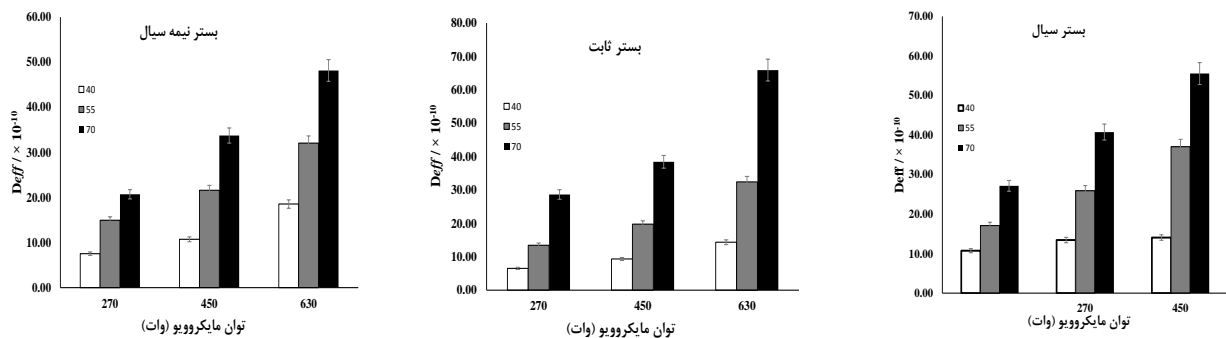
جدول ۲- مقادیر R^2 , X^2 , RMSE برای توان ۶۳۰ وات برای نمونه‌های بذر خربزه

RMSE			χ^2			R^2			دمای هوا (°C)	توان مایکروویو (وات)	مدل
۲/۲۸ m/s	۱/۲۱ m/s	۰/۸ m/s	۲/۲۸ m/s	۱/۲۱ m/s	۰/۸ m/s	۲/۲۸ m/s	۱/۲۱ m/s	۰/۸ m/s			
۰/۹۸۷۶	۱/۰۸۸۲	۰/۹۸۰۴	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹۴۷	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۵۲	۴۰	۲۷۰	
۰/۳۵۸۱	۰/۳۲۹۶	۰/۴۰۰۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۲	۵۵	۴۵۰	بیج
۰/۱۳۲۴	۰/۱۸۳۴	۰/۱۳۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۶	۷۰	۶۳۰	
۰/۵۸۰۰	۰/۱۹۶۷	۰/۵۹۳۸	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹۷۹	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۵۹	۴۰	۲۷۰	
۰/۴۹۰۴	۰/۲۹۷۷	۰/۳۸۱۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۸۴	۵۵	۴۵۰	نیوتن
۰/۲۸۹۱	۰/۲۱۳۲	۰/۱۴۵۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۶	۷۰	۶۳۰	
۰/۲۱۸۴	۰/۱۶۴۳	۰/۲۳۹۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۳	۴۰	۲۷۰	
۰/۱۷۱۶	۰/۲۰۴۵	۰/۲۵۸۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۸۹	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۲	۵۵	۴۵۰	میدیلی و همکاران
۰/۱۱۵۱	۰/۱۶۹۰	۰/۱۰۶۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۳	۷۰	۶۳۰	
۰/۴۹۵۱	۰/۳۳۷۵	۰/۶۴۷۳	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۵۱	۴۰	۲۷۰	
۰/۱۲۶۰	۰/۱۸۹۲	۰/۲۲۳۸	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۹۴	۵۵	۴۵۰	لوجستیک
۰/۰۹۳۲	۰/۱۶۲۶	۰/۳۹۲۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۹۸	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۷۶	۷۰	۶۳۰	
۰/۱۰۳۹	۰/۱۷۹۲	۰/۱۳۲۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹۹۲	۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۸۹	۴۰	۲۷۰	
۰/۲/۱۷۴	۰/۲/۴۹۳	۰/۱/۳۵۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۹۷	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۹۲	۵۵	۴۵۰	آغباشلو و همکاران
۰/۱۰۶۸	۰/۱/۲۱۹	۰/۱/۱۶۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۵	۷۰	۶۳۰	



ضریب پخش موثر رطوبت

مقدار تعیین پخش موثر رطوبت (D_{eff}) برای تمام سطوح درجه حرارت هوا، سرعت و توان مایکروویو در شکل ۴ نشان داده شد. مشاهده می شود که مقدار D_{eff} بذر خربزه به تدریج برای شرایط دمایی یکسان افزایش یافته است زمانی که توان مایکروویو اعمال شده افزایش یافته بود. این ممکن است توسط مصرف انرژی و حرارت افزایش یافته توصیف شود، به طوری که می تواند فعالیت مولکول های آب را افزایش دهد که این منجر به نفوذ بیشتر رطوبت شود هنگامی که نمونه ها در توان مایکروویو بالاتر خشک می شوند. این اثر در سطح درجه حرارت بالاتر محسوس تر است. این پدیده در مطالعات بسیاری از محققان، از جمله (کینگسلی و همکاران، ۲۰۰۷) برای هلو و (گویال و همکاران، ۲۰۰۷) برای آلو گزارش شده است. علاوه بر این، محدوده ی مقادیر D_{eff} این پژوهش بین 10^{-10} تا 9×10^{-9} به دست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده حداکثر مقدار D_{eff} در حداکثر دمای هوا ($70^{\circ}C$) و سطح توان حداکثر (۶۳۰ وات) 9×10^{-9} بود (شکل ۴).



شکل ۴- D_{eff} در برابر سطوح توان مایکروویو و دمای هوای ورودی برای خشک کردن بذر خربزه

نتیجه گیری

با مطالعه سینتیک خشک شدن بذر خربزه در دماها، سرعتها و توان های مختلف دیده شد که زمان خشک شدن با افزایش دما و افزایش توان مایکروویو کاهش یافت. همچنین تحقیق نشان داد که در میان پنج مدل مورد مطالعه، مدل آغباشلو و همکاران به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. علاوه بر این، ضریب نفوذ برای خشک شدن لایه نازک بذر خربزه از 10^{-10} تا 9×10^{-9} متر مربع بر ثانیه متغیر بود و با افزایش دما و توان این ضریب افزایش یافت.

مراجع

1. Abbasi Souraki, B. and Mowla, D. 2008b Axial and radial moisture diffusivity in bed dryer with energy carrier: modeling with and without shrinkage. J. Food Eng, Vol. 88, pp. 9-19.
2. Abbasi Souraki, B. and Mowla D. 2008c. Simulation of drying Behavior of a small spherical foodstuff in a microwave assisted fluidized bed of inert Particles. Food Res. Int., Vol. 41 No. 3, pp. 255-265.



3. Aghbashlo, M. Kianmehr, M. and Samimi-Akhijahani H. 2008. "Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin layer drying of barberries fruit (Berberidaceae)" *Energy Conversion and Management* Vol. 49, pp. 2865-2871.
4. Ajibola, O.O. Eniyemo, S.E. Fasina, O.O. and Adeeko, K.A. 1990. Mechanical expression of oil from melon seeds *J. Agric. Engr. Res.* Vol. 45, 45-53.
5. Amiri chayjan, R. Kaveh, M. and Khayati, S. 2013. Modeling drying characteristics of hawthorn fruit under microwave-convective conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, doi: 10.1111/jfpp.12226.
6. AOAC, 1980. Official method of analysis. 13rd edn. Association of Official Analytical Chemists, ashington, DC.
7. Cihan, A. Kahveci, K. and Hacıhafizoglu, O. 2007. Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. *J Food Eng.*, Vol. 79, pp. 293-298.
8. Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *J. Food Eng.* Vol.78, pp. 1291-1297.
9. Feng, H. Tang, J. and Cavalieri, R. P. 2001. Dielectric Properties of Dehydrated Apples as Affected by Moisture and Temperature. *Transaction of ASAE*, Vol. 45 No. 1, pp. 129 – 135.
10. Golpour, I. Amiri Chayjan, R. Amiri Parian, J. and Khazaei, J. 2015. Prediction of Paddy Moisture Content during Thin Layer Drying Using Machine Vision and Artificial Neural Networks. *J. Agr. Sci. Tech.*, Vol. 17, pp. 287-298.
11. Goyal, R.K. Kingsly, A.R.P. Manikantan, M. R. and Ilyas, S. M. 2007. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *J. Food Eng*, 79, pp.176-180.
12. Henderson, S.M. 1974. Progress in Developing the Thin-layer Drying Equation. *Trans. ASAE.*, Vol. 17, pp. 1167-1168,.
13. Kingsly, A.R.P. Goyal, R.K. Manikantan, M.R. and Ilyas, S.M. 2007 Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International Journal of Food Science and Technology*, Vol. 42, pp. 65-69.
14. M. Aghabashlo, M.H. Kianmehr, and A. Arabhosseini "Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer" *J. Food Eng*, Vol. 91, pp. 99-108, 2009.
15. Mayor, L. and Sereno, A. M. 2004. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, Vol. 61, pp. 373–386.
16. Momenzadeh, L. Zomorodian, A. and Mowla, D. 2012. Applying Artificial Neural Network for Drying Time Prediction of Green Pea in a Microwave Assisted Fluidized Bed Dryer. *J. Agr. Sci. Tech.*, Vol. 14, pp. 513-522.
17. Nazghelichi, T. Kianmehr, M. H. and Aghbashlo, M. 2008. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes" *Energy* Vol. 35, pp. 4679-4684.
18. Rafiee, S. Keyhani, A. and Jafari, A. 2010. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying" *International Journal of Food Properties*, Vol. 11, pp. 1–10.
19. Sacilik, k. Keskin, R. and Elicin A.K. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *J. Food Eng.* Vol. 73, pp. 231-238.
20. Wang, Z. Sun, J. Chen, F. Liao, X. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Food Engineering* Vol. 80, pp. 536-544.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Using fluid bed dryer assisted microwave in determination of drying kinetics and the effective diffusion coefficient of melon seed

Abstract

The aim of this study was to investigate the kinetics of drying the melon seed and its effective diffusion coefficient using a combination of fluid bed dryer and microwaves. The experimental of drying of the dryer was done under five levels of the dryer temperature of 40, 55 and 70, three levels of air velocity of 0.8, 1.21 and 2.28 m/s and three microwave power levels of 270, 450 and 630 W. To explain moisture transfer of a melon seed thin layer, Fick diffusion model was used. The results showed that drying process was done in less time was carried out at the maximum inlet air temperatures (70 ° C) and maximum microwave power (630 W). Aghbashloo et al. model respect to other models with maximum $R^2 = 0.9984$ and minimum $\chi^2 = 0.0005$ and RMSE = 0.1768 better assess the melon seed drying stems. The effective diffusion coefficient of moisture content in dried samples from 6.51×10^{-10} to 6.59×10^{-9} m²/s was variable and it increased by increasing of inlet temperature and microwave power.

Keywords: Melon seed, Fluid bed-microwave dryer, diffusivity