



بررسی ضریب پخش موثر رطوبت و چروکیدگی مغز گردو، در خشک‌کن میکروویو - پیوسته نیمه صنعتی

محمدجعفری فرا*، رضا امیری چایجان ۲

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان

ایمیل مکاتبه کننده: m.jafarifar92@basu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش خواص خشک شدن مغزگردو بارطوبت اولیه ۴۸٪ برپایه خشک (d.b.) در یک خشک‌کن میکروویو-پیوسته نیمه صنعتی بررسی شد. که سه سطح دمای هوای خشک‌کن (۴۵، ۶۰ و ۷۵°C) و دو سطح توان میکروویو (۲۷۰ و ۶۳۰W) و دو سرعت تسمه (۲/۵ و ۱۰/۵ mm/s) و سرعت هوای ثابت ۱/۵ m/s در محفظه خشک‌کن اعمال شد. هدف، تعیین ضریب پخش موثر و چروکیدگی گردو بود. که با افزایش دما، ضریب پخش موثر، افزایش یافت. افزایش توان میکروویو و سرعت تسمه خشک‌کن بر افزایش ضریب پخش، موثر بود. بیشترین ضریب پخش موثر در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰W و سرعت تسمه ۱۰/۵ mm/s و کمترین آن در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰W و سرعت تسمه ۲/۵ mm/s بدست آمد. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰W و سرعت تسمه ۲/۵ mm/s و کمترین مقدار چروکیدگی در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰W و سرعت تسمه ۱۰/۵ mm/s بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: مغز گردو، خشک کردن، ضریب پخش موثر، چروکیدگی.

مقدمه

بر اساس آمار سازمان خوارو بار جهانی (FAO) در سال ۲۰۱۲، ایران با تولید ۴۵۰۰۰۰ تن گردو در جایگاه دوم جهان قرار دارد. با توجه به آمارهای ارائه شده در سالهای قبل، ایران همواره در زمره‌ی پنج کشور عمده تولید کننده گردوی جهان بوده است. با عنایت به سند چشم انداز ۲۰ ساله کشور که در آن توجه ویژه‌ای به صادرات غیر نفتی از جمله محصولات کشاورزی شده‌است، انجام مطالعه در این زمینه حائز اهمیت می‌باشد. گردو یا جوز (فارسی دری: چهارمغز، نام علمی: Juglans regia) میوه‌ای گرد، با دو پوسته، یکی نرم و سبز رنگ که به تدریج خشک می‌شود و از بین می‌رود و دیگری سخت و چوبی است. مغز آن خوراکی است و روغن فراوان دارد. گردو، میوه مغزدار باارزشی است که انواع مختلفی دارد. گردو منبع عالی پروتئین، فیبر، ویتامین‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها و مواد معدنی است. این میوه مغزدار یکی از بهترین منابع اسیدهای چرب امگا ۳ است (محمدی قرمزگلی و همکاران، ۱۳۹۳).



یکی از مهمترین و حساس‌ترین مراحل پس از برداشت گردو خشک‌کردن مغز آن می‌باشد. خشک‌کردن، فرآیند گرفتن رطوبت به کمک انتقال حرارت و رطوبت است (کاگوس، ۱۹۹۴). خشک‌کردن محصولات کشاورزی تا محتوای رطوبتی مناسب، مانع از رشد موجودات زنده‌ای نظیر مخمرها، کپک‌ها و باکتری‌ها در طی مدت انبارداری آن‌ها می‌شود. استفاده از روش‌های سستی باعث افزایش ضایعات، افت کیفیت و فسادزود هنگام محصول تولیدی می‌شود. در حالی که با استفاده از روش‌های مدرن خشک‌کردن می‌توان علاوه بر سرعت بخشیدن به عملیات خشک‌کردن، تلفات ناشی از روش‌های نامناسب خشک‌کردن را به مقدار قابل توجهی کاهش داد (مهاجران و همکاران، ۱۳۸۵). خشک‌کردن، موضوع بسیار گسترده و یکی از فرآیندهای با مصرف انرژی زیاد است (عباسی سورکی و مولا، ۲۰۰۸). یکی از مهمترین تغییرات فیزیکی که در زمان خشک‌کردن مواد غذایی همراه با نفوذ رطوبت به خارج از ماده رخ می‌دهد، کاهش حجم پوسته خارجی یا چروکیدگی می‌باشد. پدیده چروکیدگی تأثیرات فراوانی بر روی نرخ خشک‌شدن و همچنین ضریب نفوذ مواد، که یکی از پارامترهای اساسی در فرآیند خشک‌کردن قلمداد می‌گردد، می‌گذارد (لیما و همکاران، ۲۰۰۲).

رطوبت اولیه برای گردو حدود ۰.۵۰d.b٪ می‌باشد که رطوبت نهایی آن در هنگام خشک‌کردن به حدود ۰.۵d.b٪ می‌رسد (فیگیل و کیتا، ۲۰۰۸). برای محافظت، نگهداری و جلوگیری از فساد گردو باید رطوبت نهایی آن تقریباً ۰.۵d.b٪ باشد. این کار فرآیند خشک‌کردن را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

در خشک‌کردن با کاهش حجم و وزن مواد غذایی، بسته‌بندی، حمل و نقل و انبارداری محصولات آسان می‌شود. این فرآیند باید به طریقی انجام شود که نه تنها مواد غذایی را در مقابل فساد حفظ کند، بلکه به شاخص‌های کیفی محصول، مثل رنگ، عطر، طعم، ارزش غذایی و بافت این مواد کمترین خسارت ممکن وارد شود. پخش رطوبت جزء یکی از مهمترین مشخصه‌های انتقال رطوبت می‌باشد که برای محاسبات مدل سازی سینتیک خشک‌کردن مواد غذایی، جذب و دفع رطوبت در طول انبارداری و آبیگری مجدد بکار می‌رود. ضریب پخش موثر یک تابع پیچیده است. در توصیف این پدیده می‌توان گفت ضریب پخش بیانگر تمامی مکانیزم‌های محرک انتقال رطوبت، مانند جریان موئینه‌ای (پخش در فاز مایع)، مهاجرت رطوبت از لایه سطحی، چگالش بخار و پخش واقعی بخار در هوا می‌باشد. ضریب پخش به دمای فرآیند، رطوبت و اندازه روزنه منافذ و ساختار و توزیع رطوبت در ماده مورد فرآوری وابسته است. با افزایش تخلخل ماده و دمای فرآیند، این پارامتر افزایش می‌یابد. در طول فرآیند خشک‌کردن با کاهش رطوبت محصول، نرخ خشک‌کردن و پخش موثر کاهش می‌یابد. بنابراین، در اکثر موارد، میانگین ضریب پخش موثر در نظر گرفته می‌شود (صفری و امیری چایجان، ۱۳۹۲ الف).

در طی فرآیند خشک‌کردن در شکل و اندازه محصولات کشاورزی و میوه‌ها تغییرات محسوسی ایجاد می‌شود. تأثیر در خواص فیزیکی آن‌ها به نوبه خود باعث تغییر بافت محصول نهایی (چروکیدگی) و خواص حمل و نقل محصولات خشک می‌شود. چروکیدگی زمانی اتفاق می‌افتد که آب از سلول خارج شده و هوا جای آن را می‌گیرد. چروکیدگی به صورت حجم نهایی به حجم اولیه محصول خشک شده تعریف می‌شود. حرارت و از دست دادن آب باعث ایجاد تنش در ساختار سلولی مواد غذایی شده و منجر به تغییر شکل و کاهش ابعاد آن می‌شود (مایور و سرنو، ۲۰۰۴).



مزایای خشک‌کن میکروویو- پیوسته نیمه صنعتی عبارتند از دامنه گرمایی و انتقال جرم بالا بین ذرات و هوای واسطه و همچنین کنترل مناسب شرایط خشک شدن و ظرفیت بالا. رادیوسکی و همکاران (۱۹۹۸)، دانه گندم را در خشک کن جریان پیوسته مکمل با سیستم حرارتی میکروویو خشک کردند. بیشترین صرفه جویی هزینه هنگامی بدست آمد که دمای هوای ورودی ۷۵ درجه سلسیوس بود و رطوبت دانه از ۱۸٪ به ۱۲٪ رسانده شد.

با توجه به اینکه در مورد خشک کردن گردو در خشک‌کن پیوسته اطلاعات بسیار کمی در دست است، بنابراین انجام تحقیق حاضر ضرورت دارد. هدف از تحقیق حاضر، تعیین ضریب نفوذ موثر و میزان چروکیدگی گردو در خشک‌کن میکروویو- پیوسته نیمه صنعتی می باشد.

مواد و روش‌ها

گردوی تازه رقم کاغذی تویسرکانی در فصل برداشت (اواخر شهریورماه) از باغ های گردوی شهرستان تویسرکان واقع در استان همدان تهیه شد و بلافاصله پس از برداشت به آزمایشگاه مهندسی پس از برداشت دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینای همدان آورده برای انجام آزمایشها در نایلون‌های مخصوص و درحالت بی هوا بسته بندی شد و در یخچال در دمای $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ نگهداری شد. محتوای رطوبت اولیه گردو، به روش خشک کردن در آون بدست آمد. به این ترتیب که نمونه های ۲۵ گرمی با سه تکرار در آون در دمای 105°C به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و محتوای رطوبتی گردو تازه در حدود ۴۸٪ بر مبنای وزن خشک بدست آمد.

برای انجام آزمایشها از خشک‌کن ترکیبی میکروویو- پیوسته نیمه صنعتی آزمایشگاهی استفاده شد. این خشک کن دارای سیستم کنترل دمای خودکار می باشد که دما را در محدوده ی $1^{\circ}\text{C} \pm$ ثابت نگه می دارد. نمونه های وزن شده به مدت ۲۰ ثانیه در میکروویو قرار داده می شدند و پس از خارج کردن نمونه ها از میکروویو توسط یک دستگاه ترازوی دیجیتال AND (مدل GF-600، ژاپن) با دقت 0.001 گرم وزن می شدند و پس از آن در خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی قرار داده می شدند. در طول آزمایش رطوبت نسبی و دمای محیط و همچنین دمای خشک کن ثبت می شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه ی آزمایشها ۴۰ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می شد. سپس ظرف حاوی نمونه‌ها (حاوی ۳۵ گرم نمونه) در محفظه ی خشک‌کن قرار داده می شد. تمامی نمونه‌ها، مغز گردوی سالم و کروی شکل بود که با مهارت خاصی از داخل پوسته سبز و چوبی بدون آسیب دیدگی، خارج شد. بخشهای اصلی سیستم خشک‌کن همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است عبارتند از میکروویو، خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی، تسمه ها و دریچه های جریان هوای ورودی به خشک کن پیوسته نیمه صنعتی.

آزمایشها در سه سطح دمایی ۴۵، ۶۰ و 75°C و در دوتوان میکروویو ۲۷۰ و 630W و دو سرعت تسمه $2/5$ و $10/5\text{ mm/s}$ و با سرعت هوای ثابت $1/5\text{ m/s}$ در محفظه خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی انجام شد. دمای محیط در طول آزمایشها بین ۲۶ تا 30°C درجه سلسیوس و میزان رطوبت نسبی محیط ۲۱ تا ۲۵ درصد بود.

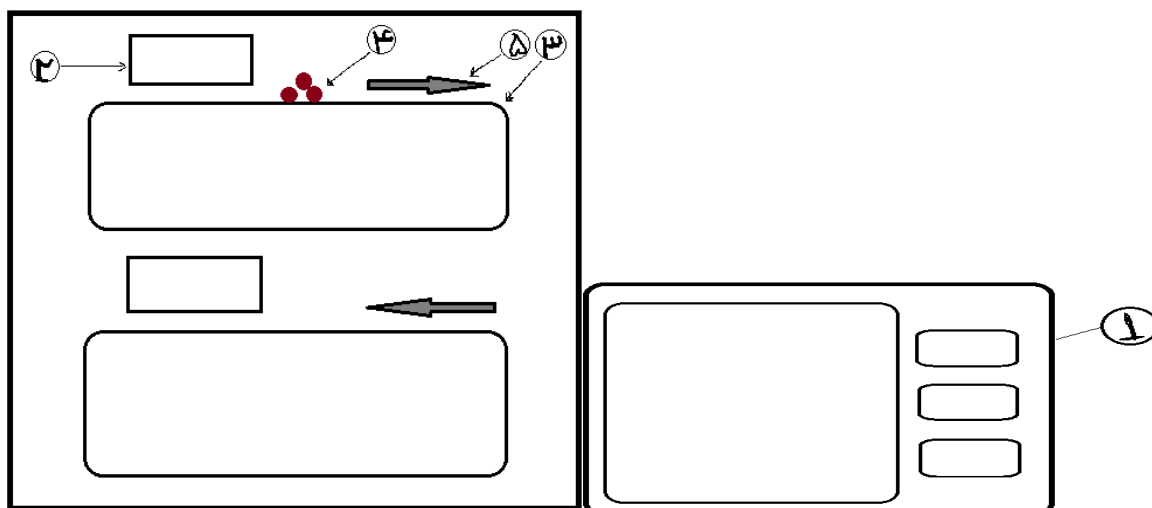
ضریب پخش موثر



برای تعیین ضریب پخش موثر از قانون دوم فیک طبق معادله (۱) استفاده شده است.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (1)$$

که در آن D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر $(\frac{m^2}{s})$ ، M محتوی رطوبت $(kg\ w/kg\ ds^t)$ و t زمان (s) می باشد. D_{eff} نشان دهنده قسمت هدایت در تمام مکانیزم های انتقال رطوبت است. این پارامتر معمولاً از منحنی های خشک کردن آزمایشگاهی تعیین می شود.



شکل ۱. نمای شماتیک خشک کن میکروویو-پیوسته نیمه صنعتی (۱- میکروویو، ۲- دریچه جریان هوای ورودی به خشک کن، ۳- تسمه، ۴- محصول (مغز گردو)، ۵- جهت حرکت محصول بر روی تسمه).

قانون دوم فیک می تواند با نادیده گرفتن تاثیر دما و مجموع گرادیان فشار، انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن پخش رطوبت موثر، ثابت و شعاعی است، می توان مقدار آن را با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمود:

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

۲- Water

۳- Dry Solid



که در آن n تعداد ترم های خشک شدن (۱ و ۲ و ۳...) در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن (s)، MR نسبت رطوبت، M_t رطوبت در یک زمان مشخص (d.b.)، M_o مقدار رطوبت اولیه (d.b.)، M_e مقدار رطوبت تعادلی (d.b.) و r_0 شعاع کره (m) می باشد که در فرآیند خشک شدن ثابت فرض شده است. برای دوره های طولانی آزدایی، زمانی که t افزایش می یابد، جمله های دیگر به غیر از جمله اول ناچیز در نظر گرفته می شوند و معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می توان به صورت خطی نوشت. با لگاریتم گیری از طرفین معادله بالا، معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_o - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2}{r_0^2}\right) t \quad (4)$$

با رسم نمودار نسبت به زمان، خطی با شیب بدست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (۴)، ضریب پخش موثر را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_g^2} \quad (5)$$

که در آن r_g بیانگر شعاع میانگین هندسی گردو است.

چروکیدگی

در طی فرآیند خشک کردن، شکل و اندازه محصولات تغییر محسوسی می کند. تاثیر در خواص فیزیکی آنها به نوبه خود باعث تغییر بافت محصول نهایی (چروکیدگی) و خواص حمل و نقل محصولات خشک می شود. چروکیدگی زمانی اتفاق می افتد که آب از فضای سلولی حذف شده و هوا جای آن را می گیرد. برای اندازه گیری میزان چروکیدگی محصول، درابتدا انتهای هر آزمایش توسط یک کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی متر، سه بعد عمود بر هم، سه نمونه شماره گذاری شده اندازه گیری و یادداشت شد و سپس با استفاده از معادله (۶) قطر میانگین هندسی نمونه ها در ابتدا و انتهای هر آزمایش بدست آورده شد. سپس حجم اولیه و ثانویه نمونه ها با استفاده از معادله زیر بدست آمد (صادقی و همکاران، ۲۰۱۰).

میانگین قطر هندسی گردو (D_g) از معادله زیر محاسبه می شود (غلامی و همکاران، ۲۰۱۲).

$$D_g = (A \times B \times C)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

که در آن D_g قطر میانگین هندسی و A ، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، متوسط و کوچک و همگی بر حسب متر می باشند. حجم مغز گردو از رابطه زیر به دست آمد:

$$V_o = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (7)$$

که در آن V_o بیانگر حجم اولیه مغز گردو خواهد بود. در انتها با استفاده از معادله زیر میزان چروکیدگی محصول بدست آمد.



$$S_b = \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \times 100$$

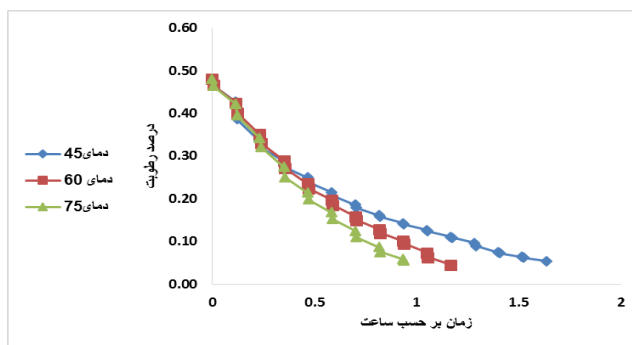
(۸)

که در آن V_0 حجم اولیه یا حجم قبل از خشک کردن، V حجم ثانویه یا بعد از خشک کردن و S_b درصد چروکیدگی می باشد.

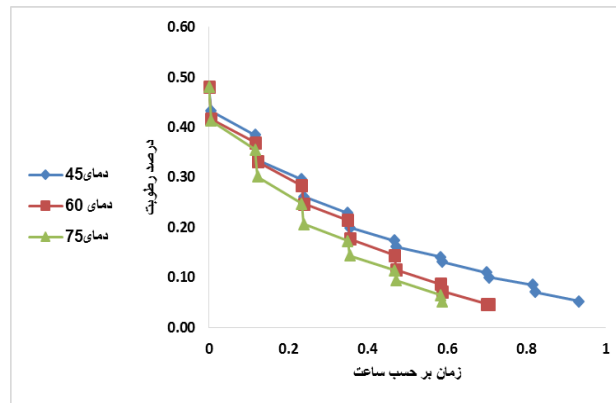
نتایج و بحث

ضریب پخش مؤثر

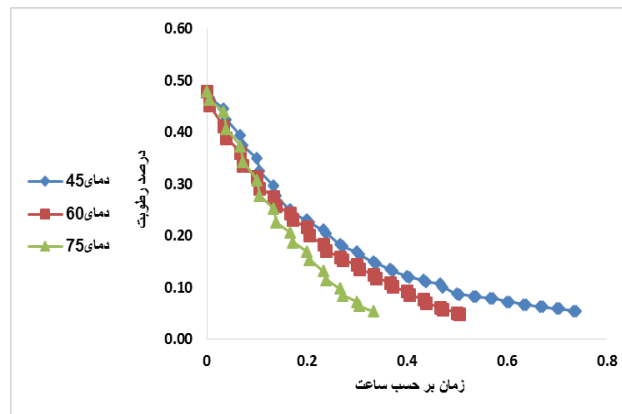
شکل های ۲، ۳، ۴ و ۵ نمودارهای سینتیک محتوای رطوبت می باشند که نرخ کاهش رطوبت را در مقابل زمان در سرعت هوای ثابت و دماها و توان میکروویو و سرعت تسمه های متفاوت نشان می دهد. با افزایش دمای هوای خشک‌کن و توان میکروویو، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می یابد. افزایش دمای هوای خشک‌کن و توان میکروویو باعث انتقال جرم و حرارت بالاتری می شود و در نتیجه کاهش رطوبت بیشتر است. طبق محاسبات انجام شده و با توجه به شکل های ۲ تا ۵ با افزایش دمای هوای خشک‌کن و توان میکروویو، ضریب پخش مؤثر افزایش می یابد. در نتیجه کمترین دما و توان میکروویو باعث کمترین ضریب پخش مؤثر و بیشترین دما و توان میکروویو باعث بیشترین ضریب پخش مؤثر خواهد شد. صفری و امیری چایجان (۱۳۹۲ الف) در خشک‌کردن بادام با خشک‌کن میکروویو-پیوسته نیمه صنعتی به نتایج مشابه رسیده‌اند. مقادیر بیشینه و کمینه ضریب پخش مؤثر در جدول (۱) آمده است. محدوده ضریب پخش مؤثر برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی از 10^{-12} تا 10^{-7} مترمربع بر ثانیه تغییر می‌کند (توکلی پور، ۱۳۸۸). که مقادیر بدست آمده از آزمایشها در این بازه قرار دارد.



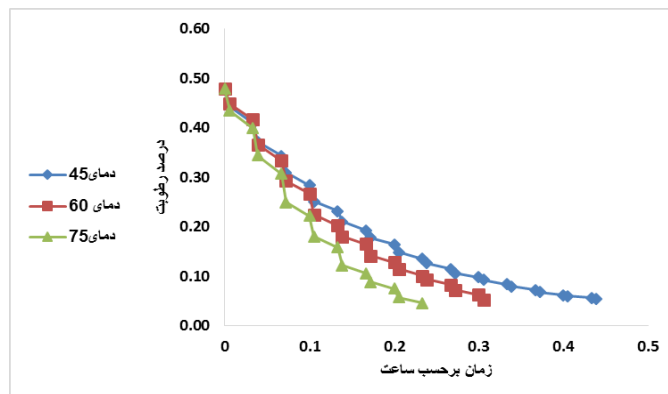
شکل ۲. نمودار سینتیک خشک کردن (کاهش رطوبت در مقابل زمان)، در توان میکروویو $270W$ و سرعت تسمه $2/5 \text{ mm/s}$ و سرعت هوای ثابت $1/5 \text{ m/s}$.



شکل ۳. نمودار سینتیک خشک کردن (کاهش رطوبت در مقابل زمان)، در توان میکروویو 630 W و سرعت تسمه $2/5\text{ mm/s}$ و سرعت هوای ثابت $1/5\text{ m/s}$.



شکل ۴. نمودار سینتیک خشک کردن (کاهش رطوبت در مقابل زمان)، در توان میکروویو 270 W و سرعت تسمه $10/5\text{ mm/s}$ و سرعت هوای ثابت $1/5\text{ m/s}$.



شکل ۵. نمودار سینتیک خشک کردن (کاهش رطوبت در مقابل زمان)، در توان میکروویو 630 W و سرعت تسمه $10/5\text{ mm/s}$ و سرعت هوای ثابت $1/5\text{ m/s}$.



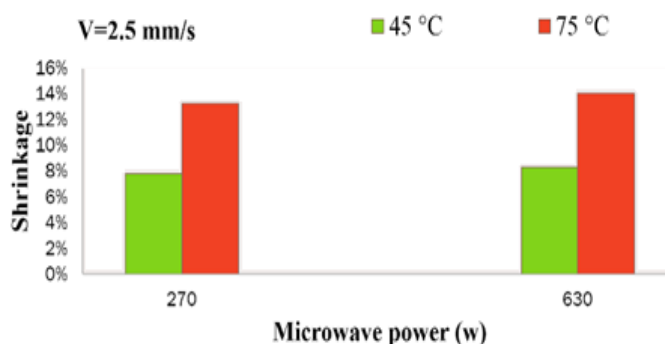
جدول ۱. بیشینه و کمینه مقدارهای ضریب پخش موثر رطوبت

دما (°C)	توان (W)	سرعت تسمه (mm/s)	ضریب پخش موثر (m ² /s)	R ²
۴۵	۲۷۰	۲/۵	$4/51 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۰۲
۷۵	۶۳۰	۱۰/۵	$4/78 \times 10^{-9}$	۰/۹۹۳۷

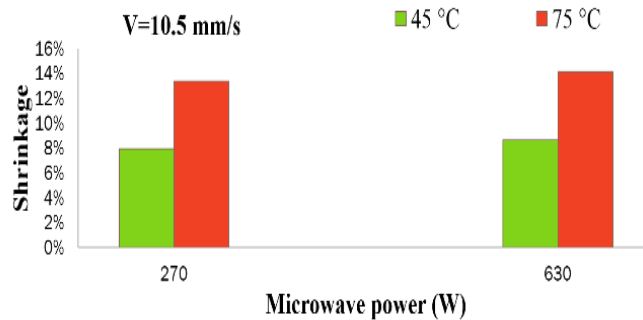
نتایج نشان داد که با افزایش دما در توان های ثابت میکروویو و سرعت تسمه های ثابت خشک کن پیوسته نیمه صنعتی، ضریب پخش موثر، افزایش می یابد. مقادیر بدست آمده بیانگر این واقعیت است که افزایش توان میکروویو و سرعت تسمه خشک کن پیوسته نیمه صنعتی، تاثیر معنی داری بر روی افزایش ضریب پخش موثر داشته است.

چروکیدگی

شکل ۶ و ۷ رابطه بین دمای هوای، سرعت تسمه و توان میکروویو در خشک کن میکروویو-پیوسته نیمه صنعتی را با چروکیدگی نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش دما، چروکیدگی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. زرین نژاد و همکاران (۱۳۹۲) در خشک کردن پسته با خشک کن بسترسیال مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو به نتایج مشابه رسیده اند. با افزایش توان میکروویو، چروکیدگی به مقدار کمتری افزایش می یابد. مشاهده شد که تاثیر دما بر روی چروکیدگی، بیشتر از توان میکروویو است. صفری و امیری چایجان (۱۳۹۲ ب) در خشک کردن بادام با خشک کن میکروویو-خلاتی به نتایج مشابه دست یافتند. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰W و سرعت تسمه ۲/۵mm/s به مقدار ۱۴/۱۳۶ درصد و کمترین مقدار آن در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰W و سرعت تسمه ۲/۵mm/s به مقدار ۸/۰۳ درصد بدست آمد.



شکل ۶. نمودار مقایسه میزان چروکیدگی در دماها و توان های متفاوت در سرعت تسمه ۲/۵ mm/s.



شکل ۶. نمودار مقایسه میزان چروکیدگی در دماها و توان‌های متفاوت در سرعت تسمه ۱۰/۵ mm/s.

نتیجه‌گیری

رفتار خشک شدن گردو در خشک‌کن میکروویو- پیوسته نیمه صنعتی در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. دمای هوای خشک‌کن، توان میکروویو و سرعت تسمه خشک‌کن عوامل مهم و تاثیرگذاری در زمان خشک شدن، میزان ضریب پخش موثر و چروکیدگی بودند که در این میان دمای هوای خشک‌کن دارای بیشترین تاثیر بود. بیشترین ضریب پخش موثر در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰W و سرعت تسمه ۱۰/۵ mm/s با مقدار $4/78 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین مقدار ضریب پخش موثر در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰W و سرعت تسمه ۲/۵ mm/s با مقدار $4/51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد. بیشترین مقدار چروکیدگی در دمای ۷۵°C، توان میکروویو ۶۳۰W و سرعت تسمه ۲/۵ mm/s به مقدار ۱۴/۱۳۶ درصد و کمترین مقدار آن در دمای ۴۵°C، توان میکروویو ۲۷۰W و سرعت تسمه ۱۰/۵ mm/s به مقدار ۸/۰۳ درصد بدست آمد. که نشان دهنده این است که چروکیدگی و ضریب پخش موثر با افزایش دما و توان میکروویو، افزایش می‌یابند.

منابع و مآخذ

۱. توکلی پور، ح. ۱۳۸۸. اصول خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی. چاپ دوم. انتشارات آیش. صفحه ۳۲۸.
۲. زرین نژاد، م. احمدی، م. امیری چایجان، ر. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی چروکیدگی پسته در خشک‌کن بستر سیال مادون قرمز با پیش تیمار میکروویو با روش سطح پاسخ. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون. دوره ۸. ۲۷۶۴-۲۷۷۵.
۳. صفری، م. و امیری چایجان، ر. ۱۳۹۲. خشک‌کردن بادام در خشک‌کن میکروویو- پیوسته نیمه صنعتی. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون. دوره ۸. ۲۲۷۹-۲۲۸۹.
۴. صفری، م. و امیری چایجان، ر. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن بادام به روش سطح پاسخ در خشک‌کن میکروویو- خلائی. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون. دوره ۸. ۲۲۷۰-۲۲۷۸.



۵. محمدی قرمز گلی، خ. قاسم زاده، ح.ر. نوید، ح. مقدم، م. و غفاری، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی کیفیت (خردشدگی) مغز حاصل از شکستن گردو تحت بار ضربه‌ای. نشریه ماشین‌های کشاورزی. جلد ۴. شماره ۱. ۲۰-۱۱.
۶. مهاجران، س.ح. خوش تقاضا، م.ه. و معظمی گودرزی، ع. ۱۳۸۵. بررسی اثر دمای شلتوک و سرعت جریان هوا بر میزان ترک‌خوردگی دانه در طی خشک شدن به روش تابش مادون قرمز. فصلنامه علوم و صنایع غذایی ایران. دوره ۳. شماره ۲. ۵۷-۶۵.

7. Abbasi Souraki, B. & Mowla, D. 2008. Experimental and theoretical investigation of drying behavior of garlic in an inert medium fluidized bed assisted by microwave. *Journal of Food Engineering*. Vol 88, 438-449.
8. Cögüs, F. 1994. The effect of movement of solutes on maillard reaction during drying. PhD. Thesis. Leeds University, Leeds, UK.
9. FAO. 2012. Major Food and Agricultural Commodities and Producers. Available at: <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=339&lang=en&country=102>
10. Figiel, A. & Kita, A. 2008. Drying kinetics, water activity, shrinkage and texture of walnut kernels. *Journal of Acta Agrophysica*, Vol 11(1), 71-80.
11. Gholami, R., Lorestani, A. L. & Jaliliantabar, F. 2012. Determination of physical and mechanical properties of Zucchini (summer squash). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Vol 14(1):136-140.
12. Lima, A. G. B., Nebra, S. A. & Queiroz, M. R. 2002. Simultaneous moisture transport and shrinkage, during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chemical Engineering Journal*. Vol 86(1-2), 85-93.
13. Mayor, L. & Sereno, A. M. 2004. Modeling shrinkage during convective drying of food material: a review. *Journal of Food Engineering*. Vol 61(3), 373-386.
14. Radajewski, W., Jolly, P. & Abawi, G. Y. 1998. Grain drying in a continuous flow drier. *Journal of Agricultural Engineering Research*. Supple mented with a microwave heating system. Vol 41, 211-225.
15. Sadeghi, M., Ashtiani Araghi, H. & Hemmat, A. 2010. Physico-mechanical properties of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain as affected by variety and moisture content. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Vol 12(3), 129- 136.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



Study on effective moisture diffusivity and shrinkage of walnut kernels in microwave-semi-industrial continuous dryer

Abstract

In this study, the drying properties of walnut kernels with moisture content of 48% (d.b.) in a microwave-continuous semi industry dryer were investigated. Three drying air temperatures (45, 60, 75°C), two microwave powers (270 and 630W) and two belt speeds (2.5 and 10.5 mm/s) were applies under constant air velocity of 1.5 m/s. The aim was to determine the effective diffusivity and shrinkage of walnut kernels. When temperature, microwave power and belt speed were increased, the effective diffusivity was increased. The highest value of effective moisture diffusivity was achieved at 75°C, microwave power 630W and belt speed 10.5 mm/s and the lowest was calculated at 45°C, microwave power 270W and belt speed 2.5 mm/s. The highest shrinkage at 75 °C, microwave power of 630 W and belt speed 2.5 mm/s, was obtained. The lowest shrinkage at 45 °C, microwave power 270 W and belt speed 10.5 mm/s, was occurred.

Keywords: Walnut kernels, Drying, Diffusivity, Shrinkage.