

بررسی فرآیند خشک کردن توت سفید به وسیله آون میکروویو

محسن آزادبخت^{۱*}، عباس رضایی اصل^۲، علی اصغری^۳ و ابوالفضل قلیخانی^۴

چکیده

توت از خانواده Moraceae، جنس Morus و جزء میوه‌های نرم است. این میوه نسبت به کپک، مخمر و ضربه حساس است. خشک کردن توت از قدیمی‌ترین روش‌های محافظت این محصول است. میکروویو، یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است که انرژی آن، قابل مقایسه با روش خشک کردن با هوای گرم است. سیستم‌های خشک کردن میکروویو، زمان خشک کردن را بدون اینکه اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند، به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. بر اساس نتایج به دست آمده زمان خشک شدن برای نمونه‌های توت تا ۳۰/۷۲٪ کاهش یافت. مقدار ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر برای نمونه‌های توت سفید از $3/19 \times 10^{-8}$ تا $11/91 \times 10^{-8}$ m²/s تغییر یافت. همچنین مقدار انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ رطوبتی برای نمونه‌های توت ۱۰/۸- و 3×10^{-8} (W/g) به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، توت سفید، ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر، میکروویو.

ارجاع: آزادبخت م. رضایی اصل ع. اصغری ع. و قلیخانی ا. ۱۳۹۱. بررسی فرآیند خشک کردن توت سفید به وسیله آون میکروویو. مجله پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱(۱): ۱۵-۱۱.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده آب، خاک و ماشین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده آب، خاک و ماشین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده آب، خاک و ماشین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۴- دانش آموخته کارشناسی گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده آب، خاک و ماشین، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

* نویسنده مسئول: azadbakht@gau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۰۵

مقدمه

خشک کردن از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری غذا است (مسکان، ۲۰۰۰). کم بودن کارایی انرژی و طولانی بودن زمان خشک کردن طی دوره سرعت نزولی از معایب مهم خشک کردن با جریان هوای داغ (روش جابجایی) است. به دلیل کاهش ضریب هدایت حرارتی مواد غذایی در دوره سرعت نزولی فرآیند خشک کردن با روش جابجایی، سرعت انتقال حرارت به قسمت‌های درونی ماده غذایی کاهش می‌یابد (ادو و اتن، ۱۹۹۶ و فنگ و تانگ، ۱۹۹۸). همچنین در خشک‌کن‌ها با هوای گرم به دلیل این که هدایت حرارتی پایین است و انتقال حرارت به قسمت‌های داخلی ماده غذایی محدود شده است، راندمان انرژی پایین آمده و مدت زمان طولانی‌تری برای خشک کردن لازم است (زیرجانی، ۱۳۸۷). برای رفع این مشکل و جلوگیری از کاهش کیفیت و دستیابی به یک فرآیند حرارتی مؤثر، از مایکروویو برای خشک کردن مواد غذایی استفاده شده است. بر خلاف سیستم‌های گرمایشی متداول، به دلیل نفوذ امواج مایکروویو به داخل ماده غذایی، حرارت در سرتاسر ماده غذایی انتشار می‌یابد. به همین دلیل در روش مایکروویو سرعت انتقال گرما سریع‌تر از سایر روش‌های حرارتی است (عباسی و رحیمی، ۲۰۰۷ و مرتنز و نور، ۱۹۹۲). مثال‌های متعددی از کاربردهای خشک کردن با مایکروویو وجود دارد. کاربرد مایکروویو در خشک کردن، گستره‌ی وسیعی از صنایع شامل صنایع غذایی، صنایع شیمیایی، اتومبیل‌سازی و غیره را در برمی‌گیرد. در هر مورد سیستم‌های خشک کردن مایکروویو، زمان خشک کردن را به طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این که اثر منفی بر روی کیفیت محصول داشته باشند. در روش خشک کردن با مایکروویو، گرمای حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب است و فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه‌تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش می‌دهد (توکلی‌پور، ۱۳۸۶). مایکروویو، یک روش سریع خشک کردن مواد غذایی است که انرژی آن، قابل مقایسه با روش خشک کردن با هوای گرم است. در خشک کردن با مایکروویو خروج رطوبت سریع‌تر است

و به دلیل تمرکز انرژی سیستم مایکروویو فقط ۲۰ تا ۳۵٪ نسبت به سایر روش‌های خشک کردن، نیاز به فضا دارد (کرانک، ۱۹۷۵).

هدف از این پژوهش، بررسی سینتیک خشک شدن توت بر مدت زمان خشک شدن و نفوذ رطوبتی مؤثر در یک خشک‌کن مایکروویو در سطوح مختلف توانی است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه

توت سفید از بازار محلی شهر گرگان تهیه و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای 4°C نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون به دست آمد. نمونه‌های 40 گرمی در آون در دمای $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ قرار گرفته و خشک شد. به طوری که تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در ۳ تکرار انجام شد. درصد رطوبت بر پایه تر برای توت سفید 80% به دست آمد.

خشک‌کن مایکروویو

نمونه‌های توت در آون مایکروویو (M945-Sumsung) در چهار سطح توانی 200 ، 300 ، 400 و 500 W خشک شدند. وزن نمونه‌ها هر ۳۰ ثانیه تا رسیدن به رطوبت نهایی با ترازوی دیجیتال (GF600-Japan) با دقت 0.1 گرم اندازه‌گیری شد. نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در داخل آون مایکروویو بسیار مهم است چون حداکثر انرژی مایکروویو در مرکز آون جذب می‌شود. به همین دلیل، نمونه‌ها نسبت به مرکز آون به صورت متقارن چیده شده و بعد از هر بار وزن کردن، نمونه‌ها مجدداً در مکان سابق خود قرار داده می‌شدند تا زاویه تابش ثابت بماند.

محاسبه ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن با معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در آن، MR نسبت رطوبت، M_t رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی، و M_0 رطوبت اولیه توده محصول است. طرف چپ معادله نسبت رطوبت را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است، نشان می‌دهد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، در محصولاتی که رطوبت زیادی دارند معادله ۱ به صورت معادله ۲ ساده می‌شوند (دیامانته و مونرو، ۱۹۹۱).

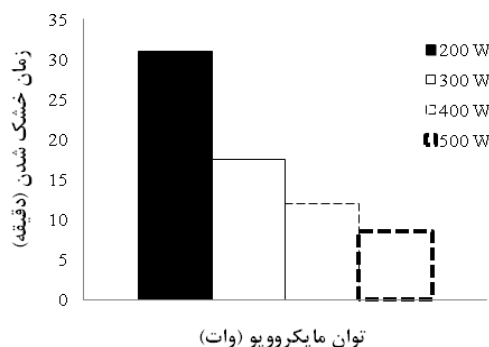
ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه استفاده کرد:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{E_a m}{P}\right) \quad (7)$$

که در آن، P توان مایکروویو (W)، m جرم نمونه (g)، E_a انرژی فعال‌سازی (W/g) و D_0 ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر است. (m^2/s)

نتایج و بحث

شکل ۱ زمان کلی خشک شدن در مقابل توان خروجی مایکروویو برای نمونه‌های توت سفید را نشان می‌دهد. در توان پایین‌تر مدت زمان خشک شدن زیاد است. با افزایش توان از ۲۰۰ به ۵۰۰ W، زمان خشک شدن نمونه‌های توت سفید تا ۳۰/۷۲٪ کاهش یافت.



شکل ۱- تغییرات زمان خشک شدن در سطوح مختلف توان مایکروویو

شکل ۲، منحنی روند خشک شدن توت سفید را نشان می‌دهد. 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 نمونه می‌شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر می‌شود. کاربرد مایکروویو سرعت باز، جذب آب را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد که علت آن افزایش خلل و فرج در طول مرحله انرژی‌دهی مایکروویو در خشک کردن است (عسکری و همکاران، ۲۰۰۶). بخش‌های میانی نمونه‌ها به سرعت حرارت را جذب کرده و این خود باعث ایجاد یک فشار درونی می‌شود که به طور عمده‌ای بر روی میوه اثر می‌گذارد و در نهایت باعث ایجاد بافت پف کرده سلولی در هنگام خشک شدن

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. مدل انتشار، برای تجزیه و تحلیل فرآیند خشک شدن با نرخ نزولی استفاده شد. پس با استفاده از قانون دوم فیک خواهیم داشت (کرانک، ۱۹۵۷).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla^2 (D_{eff} M) \quad (3)$$

برای حل معادله ۳ فرض‌های ساده کننده زیر در نظر گرفته شد:

الف- در شرایط مورد مطالعه برای خشک کردن لایه‌های توت، ضریب نفوذ مؤثر مستقل از رطوبت محصول بوده و تابعیت دمایی آن از طریق رابطه آرنیوس بیان می‌شود.

ب- رطوبت و فشار هوا در طول فرآیند خشک شدن برای همه لایه‌های محصول یکنواخت فرض می‌شود.

ج- انتقال رطوبت از مرکز به سطح لایه‌های محصول در فاز نزولی آهنگ خشک کردن بوده و عمدتاً از طریق انتشار مولکولی صورت می‌گیرد.

با توجه به فرض‌ها، حل معادله ۳ به صورت معادله ۴ ارایه شد:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 (2n+1)^2}{4} \frac{D_{eff} t}{a^2}\right] \quad (4)$$

که در آن، D_{eff} نفوذ رطوبت مؤثر (m^2/s) و t زمان خشک شدن (s) و a نصف ضخامت لایه توت (m) است.

برای زمان طولانی جمله اول معادله ۴ در نظر گرفته می‌شود. شکل لگاریتمی این معادله را می‌توان به فرم معادله ۵ نوشت.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4a^2}\right] \quad (5)$$

نمودار $\ln MR$ بر حسب زمان خشک شدن یک خط راست با شیب (K) است که بر اساس آن مقدار نفوذ رطوبتی مؤثر محاسبه می‌شود:

$$\text{slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4a^2} \quad (6)$$

محاسبه انرژی فعال‌سازی

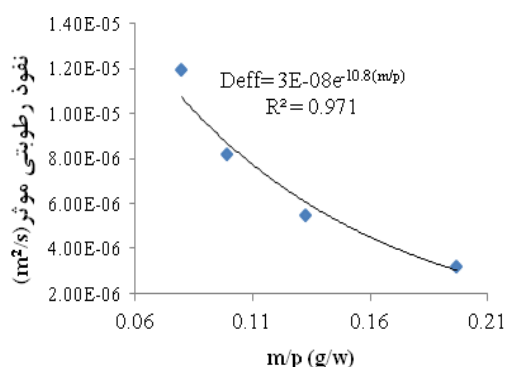
از آنجایی که اندازه‌گیری دما به طور دقیق در داخل یک خشک‌کن مایکروویو امکان‌پذیر نیست، معادله آرنیوس برای اندازه‌گیری انرژی فعال‌سازی به صورت معادله ۷ اصلاح شد (اوزبک و دادالی، ۲۰۰۷). برای به دست آوردن انرژی فعال‌سازی در مایکروویو می‌توان از وابستگی بین

حسب مقادیر (m/p) به دست آورد. با افزایش توان میزان انرژی لازم برای خشک کردن کاهش می‌یابد.

جدول ۱- تغییرات نفوذ رطوبتی مؤثر در سطوح مختلف توانی برای نمونه‌های توت سفید

مقدار نفوذ رطوبتی مؤثر (m ² /s)	سطح توان (وات)
۳/۱۹E-۸	۲۰۰
۵/۴۹E-۸	۳۰۰
۸/۲۱E-۸	۴۰۰
۱۱/۹۱E-۸	۵۰۰

تغییرات نفوذ رطوبتی در مقابل مقدار (m/p) در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق با نمودار به دست آمده مقدار انرژی فعال‌سازی برای نمونه‌های توت سفید (W/g) ۱۰/۸- به دست آمد.



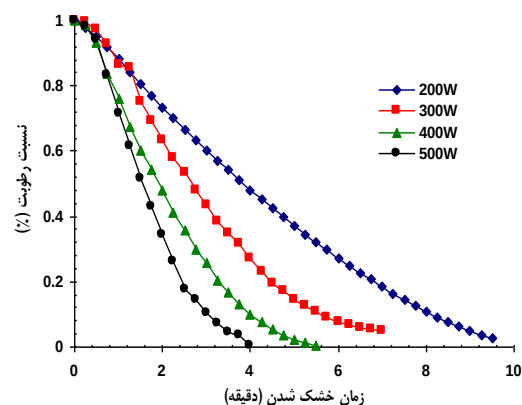
شکل ۳- تغییرات نفوذ رطوبتی مؤثر بر حسب m/p

نتیجه‌گیری

با افزایش توان، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش پیدا کرده و زمان خشک شدن نمونه‌های توت سفید کاهش یافت. همچنین با افزایش توان خشک‌کن مایکروویو، ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر هم افزایش می‌یابد و میزان انرژی لازم برای خشک کردن کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد که خشک کردن با مایکروویو به دلیل زمان کوتاه و کارایی بالای آن روش مناسبی برای خشک کردن توت است.

با مایکروویو می‌شود. اما دیواره سلولی نمی‌تواند تغییر حجم ایجاد شده را نگه دارد و در نهایت ساختار سلولی به حالت ابتدایی نزدیک می‌شود ولی به هر حال در مقایسه با خشک کردن با هوای داغ ساختار نمونه‌های خشک شده با مایکروویو خلل و فرج بیشتری دارد (عسکری و همکاران، ۲۰۰۶).

مطابق شکل ۲، در شروع روند خشک کردن، رطوبت اولیه نمونه‌های توت سفید زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با گذشت زمان میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و کاهش رطوبت به طور طبیعی صورت می‌گیرد. محصول، بیشتر رطوبت خود را در لحظات اولیه خشک شدن از دست می‌دهد و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده لازم است.



شکل ۲- تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک شدن برای نمونه‌های توت سفید

مقدار نفوذ رطوبتی مؤثر در جدول ۱ برای نمونه‌ها ارائه شده است. مطابق با این جدول نفوذ رطوبتی برای نمونه‌های توت سفید از $3/19 \times 10^{-8}$ تا $11/91 \times 10^{-8}$ m²/s تغییر می‌کند. مطابق با جدول ۱ برای خشک‌کن مایکروویو می‌توان دریافت که با افزایش توان خشک‌کن مایکروویو، ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر نیز افزایش می‌یابد. علت این امر ممکن است به دلیل اختلاف در سطوح جانبی نمونه‌ها باشد. انرژی فعال‌سازی را می‌توان با رسم نمودار (D_{eff}) بر

منابع

۱. توکلی‌پور ح. ۱۳۸۶. خشک کردن مواد غذایی، اصول و روش‌ها. انتشارات آبیژ، تهران. ۳۱۶ ص.
۲. زیرجانی ل. توکلی‌پور ح. و پدramنیا ا. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن موز با هوای داغ و مایکروویو. نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران. ۶(۱): ۵۸-۶۷.

3. Abbasi S. and Rahimi S. 2007. Microwave-assisted encapsulation of citric acid using hydrocolloids. *International Journal of Food Science and Technology*. 43(7):1226-1232.
4. Adu B. and Otten L. 1996. Effect of increasing hygroscopicity on the microwave heating of solid foods. *Journal of Food Engineering*. 27(1):35-44.
5. Askari G. R. Emam-Djomeh Z. and Mousavi S. M. 2006. Effects of combined coating and microwave assisted hot-air drying on the texture, microstructure and rehydration characteristics of apple Slices. *Food Science and Technology International*. 12(1):39-46.
6. Crank J. 1975. *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press. 414 pp.
7. Diamante L. M. and Munro P. A. 1991. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato lices. *Solar Energy*. 51:271-276.
8. Feng H. and Tang J. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*. 63(4):679-683.
9. Maskan M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*. 44(2):71-78.
10. Mertens B. and Knorr D. 1992. Developments of nonthermal processes for food preservation. *Food Technology*. 46(5):124-133.
11. Ozbek B. and Dadali G. 2007. Thin layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*. 83(4):541-549.

