



بررسی رفتار خشک شدن پاستیل هویج و ضرایب نفوذ موثر آن طی خشک کردن با خشک کن هوای داغ

صفیه خلیلیان^{۱*}، فخری شهیدی^۲، محبت محبی^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گروه علوم و صنایع غذایی

۲و۳- هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد، گروه علوم و صنایع غذایی

Khaliliansafie02@gmail.com

چکیده

در این پژوهش رفتار خشک شدن نمونه‌های پاستیل هویج و ضرایب نفوذ آن در سه دمای خشک کن با هوای داغ (۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی-گراد) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی رفتار خشک شدن پاستیل هویج در دماهای مختلف حاکی از آن بود که بیشترین و کمترین سرعت خشک شدن به ترتیب مربوط به دمای ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی-گراد بود. بیشترین ضریب نفوذ در دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد مشاهده گردید. این امر نشان می‌دهد که شدت فعل و انفعالات در این دما در نمونه بیشتر است. انرژی فعال‌سازی با افزایش دما از ۶۰ به ۸۰ درجه سانتی-گراد، روند صعودی داشت. براساس قوانین ترمودینامیک میزان انرژی فعال‌سازی سد انرژی است که مولکول‌های آب می‌بایست در مرحله انتقال در محصول، از آن عبور نمایند. میزان انرژی فعال‌سازی کمتر و مقادیر بالای ضریب نفوذ در دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد بیانگر سرعت بالای خشک شدن نمونه‌های پاستیل هویج بود.

واژه های کلیدی: پاستیل هویج، خشک کن هوای داغ، رفتار خشک شدن، ضریب نفوذ موثر



۱. مقدمه

انتقال جرم و نفوذ رطوبت مهم‌ترین عامل کنترل کننده فرآیند خشک کردن می‌باشد. آگاهی از چگونگی توزیع رطوبت در فرآورده در طی مراحل مختلف فرآوری جهت کنترل شرایط و بهبود ویژگی‌های کیفی ماده غذایی از جمله میزان چروکیدگی نمونه‌ها (مولت، ۱۹۹۴) از جایگاه ارزشمندی برخوردار می‌باشد. از آنجایی که که مکانیسم‌های مختلفی در انتقال رطوبت از ماده غذایی موثر می‌باشند، جدا کردن هر مکانیسم و اندازه گیری میزان انتقال جرم در هر یک دشوار می باشد. از این رو در چنین فرآیندهایی از ضریب نفوذ موثر و برای بیان مفهوم آن از قانون فیک استفاده می شود (جایاس و همکاران، ۱۹۹۱). تغییر در ساختار منافذ مواد غذایی طی فرآیندهای حرارتی، ضریب نفوذ موثر رطوبت را تحت تاثیر می دهد. ضریب نفوذ ابزاری مناسب جهت به دست آوردن زمان و دمای مناسبی خشک کردن فرآورده طی مدت زمان خشک کردن است. به طور معمول ضریب نفوذ رطوبت در مواد غذایی در دامنه 10^{-12} تا 10^{-8} گزارش شده است (بابلیس و بلسیوتیس، ۲۰۰۴).

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در رابطه با بررسی ضرایب نفوذ و چگونگی توزیع رطوبت در مواد غذایی صورت پذیرفته است که از این جمله می‌توان به کار گارسیا و همکاران (۱۹۸۸) اشاره نمود. آنها رفتار خشک شدن قطعات موز با استفاده از ماکروویو و آن را مورد بررسی قرار دادند. تسامی و کاتسیوتی (۲۰۰۰) تغییرات نسبت رطوبت و سینتیک تخلخل و رنگ برخی میوه‌ها را در طی زمان خشک شدن بررسی نمودند. آق‌باشلو و همکاران (۲۰۰۸) و بابلیس و بلسیوتیس (۲۰۰۴) ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی را به ترتیب برای میوه زرشک و انجیر طی خشک شدن در خشک‌کن لایه نازک مورد مطالعه قرار دادند. زلیبسکا و مارکوسکی (۲۰۱۰) با استفاده از خشک‌کن بستر سیال قطعات هویج را خشک نموده و ضرایب نفوذ موثر و رفتار خشک شدن را مورد بررسی و مدل‌سازی قرار دادند. مولت (۱۹۹۴) ضریب نفوذ آب را حین خشک کردن با خشک‌کن هوای داغ برای هویج و سیب زمینی مطالعه و مدل‌سازی نمودند.

هدف این پژوهش تعیین دمای مناسب خشک کردن نمونه‌های پاستیل هویج با توجه به نوع رفتار خشک‌شدن، ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال-سازی نمونه‌های پاستیل هویج بوده‌است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مواد اولیه و تولید

فرمولاسیون پاستیل هویج حاوی پوره هویج، قنداینورت، نشاسته، گوار، آگار و پکتین به ترتیب در مقادیر ۶۰، ۳۰، ۲، ۱، ۱ و ۶ درصد بود. بعد از تهیه مخلوط ژل، درون قالب دارای قطعات مکعبی $10 \times 10 \times 20$ سانتی متر ریخته شده و پس از ۲ ساعت یخچال گذاری و بستن ژل، عمل خروج از قالب‌ها صورت پذیرفت و سپس به ابعاد $20 \times 20 \times 20$ میلیمتر برش داده شد و در خشک‌کن با دماهای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت (در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه، نمونه‌ها از خشک‌کن خارج و وزن گردید) خشک گردیدند. در نهایت منحنی‌های رطوبت، ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی محاسبه و رسم گردید.

۲.۲. اندازه‌گیری رفتار خشک شدن

انتقال جرم نفوذ طی خشک کردن مواد غذایی فرآیندی بسیار پیچیده و شامل مکانیسم‌های مختلفی نظیر نفوذ مولکولی، حرکت در لوله‌های مویین، نفوذ مایع در خلل و فرج ماده جامد، نفوذ بخار در منافذ حاوی هوا و جریان هیدرودینامیکی و یا انتشار سطحی می‌باشد.

پارامتر بدون بعد MR با محاسبه محتوای رطوبت نمونه در هر لحظه از خشک کردن و رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی از رابطه زیر محاسبه

گردید.

$$MR = \frac{M_t - M_E}{M_0 - M_E}$$

MR = نسبت رطوبت، X_t = رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه، X_0 = رطوبت اولیه نمونه‌ها و X_E = رطوبت تعادلی نمونه‌ها می‌باشد.

۲.۳. تعیین ضریب نفوذ رطوبت

با توجه به این که خشک کردن پاستیل هویج در مرحله سرعت نزولی تشخیص داده شد، نفوذ رطوبت مهم ترین عامل کنترل کننده فرآیند خشک کردن می‌باشد. هنگامی که مکانیسم‌های مختلفی در انتقال موثر می باشند، جدا کردن هر مکانیسم و اندازه گیری هر مکانیسم و اندازه گیری میزان انتقال جرم در هر یک دشوار می باشد. از این رو در چنین فرآیندهایی از توصیف نفوذ موثر و برای بیان مفهوم آن از قانون فیک استفاده می‌شود. محاسبه ضریب نفوذ مؤثر با استفاده از قانون دوم فیک، ابزاری جهت توصیف فرآیند خشک کردن و مکانیسم‌های ممکن در انتقال رطوبت درون مواد غذایی می‌باشد.



$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت، L ضخامت ورقه ها (m)، k_0 شیب حاصل از رسم $\ln(MR)$ در برابر زمان می باشد. در نهایت ضریب نفوذ از رابطه زیر محاسبه می گردد.

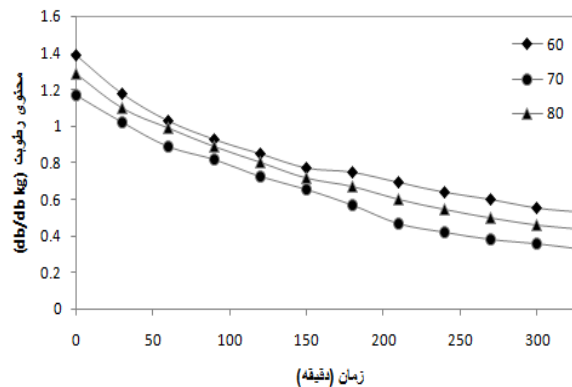
$$k_0 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

تغییر در ساختار منافذ مواد غذایی ضریب نفوذ را تحت تاثیر می دهد. در محصولات متخلخل تر، ضریب نفوذ به خاطر امکان تحرک بیشتر رطوبت بالاتر است. دما مهم ترین عامل خارجی موثر بر ضریب نفوذ طی فرآیند خشک کردن می باشد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی رفتار خشک شدن پاستیل هویج

شکل ۱، رفتار خشک شدن نمونه های پاستیل هویج طی فرآیند خشک شدن را در سه دمای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. همان طور که انتظار می رود با افزایش زمان خشک کردن میزان رطوبت نمونه ها کاهش می یابد. افزون بر این، با افزایش دمای خشک کردن از ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی گراد، محتوی رطوبتی نمونه ها کاهش یافته اما در ادامه از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد، افزایش در محتوی رطوبتی نمونه ها را مشاهده می کنیم. سواپانیچایانان و همکاران (۲۰۰۸) و کادام و همکاران (۲۰۱۱) دلیل کاهش محتوی رطوبتی با افزایش دما را در نمونه ها را افزایش سرعت انتقال جرم و رطوبت عنوان کردند. اما در ادامه به طور غیره منتظره ای افزایش دما از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد، باعث کاهش در سرعت انتقال جرم و حرارت در دمای ۸۰ درجه سانتی - گراد گردید. دلیل این پدیده را می توان این گونه عنوان نمود که دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، باعث تشکیل سریع پوسته سطحی گردیده و در نهایت باعث کاهش انتقال جرم و حرارت شده است.



شکل ۱. منحنی های خشک شدن پاستیل هویج در دماهای مختلف خشک کن.

۳.۲. بررسی ضرایب نفوذ موثر

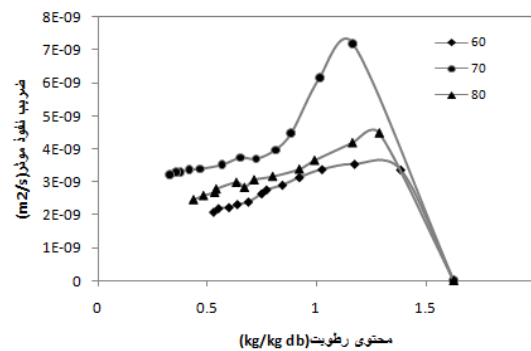
مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت نمونه های پاستیل هویج در دماهای خشک کردن ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد در جدول ۱، ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج بیانگر اثر مثبت افزایش دما از ۶۰ به ۷۰ درجه سانتی گراد می باشد. به طوری که با افزایش دما، به دلیل شدت فعل و انفعالات این ضریب افزایش می یابد. اما با افزایش دما از ۷۰ به ۸۰ درجه سانتی گراد ضریب نفوذ موثر کاهش یافته است.



جدول ۱. اثر رطوبت و انرژی فعال سازی در دماهای مختلف خشک شدن

| دمای (°C) | ضریب نفوذ موثر (m ² /s) |
|-----------|------------------------------------|
| ۶۰ | ۲/۴۳۴۲E-۰۹ |
| ۷۰ | ۳/۲۴۵۶E-۰۹ |
| ۸۰ | ۲/۸۳۹۹E-۰۹ |

تغییرات ضریب نفوذ با محتوی رطوبت نمونه‌ها در شکل ۲، نشان داده شده است. طبق آن چه مشاهده می‌گردد در مرحله اول خشک کردن، ضریب نفوذ با کاهش محتوی رطوبت افزایش قابل توجهی داشته است. اما در ادامه با کاهش محتوی رطوبت، ضریب نفوذ کاهش نشان داده است. به طوری که بیشترین ضریب نفوذ موثر (۷/۲۱۵۱۱E-۰۹ m²/s) در در محتوی رطوبت ۱/۱۷ (kg/kg db) و دمای ۷۰°C بوده در حالی که کمترین میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت (۲/۰۸۲۳۱۱E-۰۹ m²/s) مربوط به نمونه پاستیل هویج در محتوی رطوبت (۰/۵۳ (kg/kg db) و دمای ۶۰°C مشاهده گردید.



شکل ۲. تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت به عنوان تابعی از محتوی رطوبت بر مبنای وزن خشک.

۴. نتیجه گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مناسب‌ترین دما برای خشک نمودن نمونه‌های پاستیل هویج، ۷۰ درجه سانتی‌گراد می باشد زیرا در این دما نسبت به دماهای ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت خشک شدن و ضریب نفوذ رطوبت بالاتر بوده در عین حال که انرژی فعال‌سازی متوسط دارد.



منابع

1. Babalis SJ, &VG. Belessiotis, 2004, Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *J Food Eng*, 65:449-58.
2. Garcia, R., F. Leal, C. Rolz, 1988, Drying of bananas using microwave and air ovens. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 73-80.
3. Jayas, D.S., S. Cenkowski, S. Pabis, W.E. Muir, 1991, Review of thin-layer drying and wetting equations, *Dry. Technol.* 9, 551-588
4. Kadam, D. M., R. T. Patil, & P. Kaushik, 2010, Foam Mat Drying of Fruit and Vegetable Products. In: Jangam, S. V., Law, C. L. & Mujumdar, A. S (eds) *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, Vol 1, pp 113-124. Central Institute of Post-Harvest Engineering and Technology, Ludhiana, India.
5. Aghbashlo, M., M. H. Kianmehr, H. Samimi-Akhijahani, 2008, Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae), *Energy Conversion and Management* 49, 2865-2871
6. Mulet, A., 1994, Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes, *J. Food Eng.* 22, 329-348.
7. Thuwapanichayanan, R., S. Prachayawarakorn, & S. Soponronnarit 2008. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering*, 86(4): 573-583.
8. Tsami, E. & M. Katsioti, 2000, Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying Technology* 18, 1559-1581.
9. Zielinska, M., M., Markowski, 2010, Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots *Chemical Engineering and Processing* 49, 212-218