

تعیین پارامترهای عملکردی بهینه خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - همرفت در

خشک کردن ورقه‌های موز

حبیبه نعلبندی^۱، سید صادق سیدلو هریس^{۱*} و پرویز احمدی قشلاق^۲

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۸ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۸

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- گروه علوم و صنایع غذایی، پردیس بین‌المللی دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: E-mail: ss_seiedlo@yahoo.com

چکیده

تولید محصول خشک با کیفیت قابل قبول یکی از اهداف مهندسی پس از برداشت در مقیاس صنعتی است. بر اساس اطلاعات موجود در منابع، کیفیت محصول خشک تولیدی با استفاده از فناوری‌های نوین مانند خشک‌کن‌های ترکیبی مادون قرمز - همرفت نسبت به خشک‌کن‌های همرفتی منفرد بالاتر است. بنابراین، بررسی تاثیر مشخصه‌های عملکردی فرآیندهای خشک‌کنی روی خواص مهندسی و کیفیت محصول نهایی ضروری بوده و رعایت آنها در طراحی و مدل‌سازی خشک‌کن‌ها ضروری است. در این مطالعه با استفاده از خشک‌کن ترکیبی ساخته شده، در شرایط مختلف خشک‌کردن موز مانند کاربرد دماها (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد) و ضخامت‌های مختلف محصول (۴ و ۶ میلی‌متر)، مشخصاتی از قبیل ضریب نفوذ موثر رطوبت، چروکیدگی و شاخص‌های جذب مجدد آب مورد آزمون قرار گرفت. در دمای خشک‌کردن ۷۵ درجه سانتی‌گراد مادون قرمز، سرعت هوای ۰/۷ متر بر ثانیه و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد هوای گرم، کمترین زمان خشک‌شدن در حدود ۸۳ دقیقه برای ورقه‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر حاصل شد. ضریب نفوذ موثر رطوبت تابعی از دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز بوده و بین $5/81 \times 10^{-10}$ تا $2/141 \times 10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود. ضخامت محصول اثر معنی‌داری روی ظرفیت جذب مجدد آب و ظرفیت حفظ ماده خشک داشت. در محدوده دمایی مورد مطالعه اثر دما و ضخامت روی چروکیدگی غیر معنی‌دار بود ولی این مشخصه تابعی از رطوبت نمونه به‌صورت خطی افزایش یافت. بنابراین، اعمال چروکیدگی به صورت تابعی از دما و ضخامت در شبیه‌سازی فرآیند الزامی نیست.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن ترکیبی، چروکیدگی، ضریب نفوذ موثر رطوبت، مادون قرمز - همرفت، موز

Determination of Optimum Performance Characteristics of Combined Infrared- Convectional Dryer in Drying of Banana Slices

Habibeh Nalbandi¹, Sadegh Seiedlou^{1*} and Parviz Ahmadi Gheshlagh²

Received: 27 Jan 2021

Accepted: 8 Mar 2021

¹Department of Biosystems Engineering, Agricultural Faculty, University of Tabriz, Iran²Department of Food Engineering, International Campus University of Tabriz, Iran*Corresponding author: E-mail: ss_seiedlo@yahoo.com

Abstract

Producing any dried product with acceptable quality is one of the main processes in the postharvest engineering. Several researchers reported the high quality of the product dried with new drying methods such as combined infrared-convectional drying methods compared with ones dried with convectional dryers. Evaluation of drying method and their effects on dried product could increase the quality of the final product and be used in designing and engineering of dryers. In this research, a constructed combined infrared-convectional dryer was evaluated at the various drying temperatures for banana slices with various thicknesses at the constant air temperature. The experiments were performed to calculate the values for effective moisture diffusivity, shrinkage percentage, and rehydration ability of banana slices. The drying duration of the slices with a thickness of 4 mm was 83 min at the infrared drying temperature of 75 °C, the air velocity of 0.7 ms⁻¹ and the air temperature of 50°C. The effective moisture diffusivity was varied from 5.81×10^{-10} to 2.14×10^{-9} m² s⁻¹; as a function of drying temperature and slices thickness. The results indicated that the effect of slice thickness was significant on the rehydration ability of dried products. The drying temperature and the slice thickness had no significant effect on the shrinkage of the slices. This property was increased linearly as a function of moisture content. Therefore, it is not essential to consider the shrinkage as a function of temperature and thickness during the simulation process.

Keywords: Banana, Combined drying, Effective moisture diffusivity, Infrared-convectional

How to cite:

Nalbandi H., Seiedlou, S., and Ahmadi Gheshlagh, P. 2021. *Determination of Optimum Performance Characteristics of Combined Infrared- Convectional Dryer in Drying of Banana Slices*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (1): 11-21.

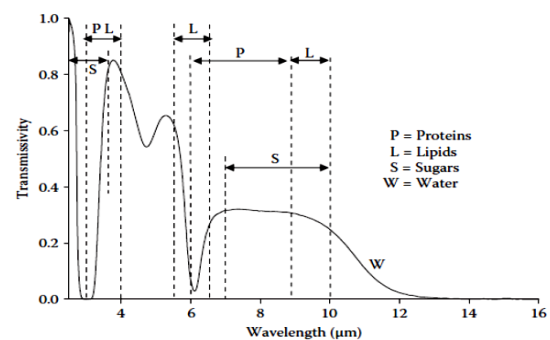
۱- مقدمه

و مشخصه‌های عملکردی در حین خشک‌شدن مانند دمای خشک-کردن است (Lewicki et al., 1997). مواد غذایی که تحت شرایط بهینه خشک می‌شوند صدمه کمتری متحمل می‌شوند و جذب مجدد آب آنها سریع‌تر و کامل‌تر خواهد بود (Lee, 2006; Fellows, 2000). تغییر شکل و کاهش حجم در طی خشک‌کردن مواد غذایی در اکثر موارد یک ویژگی منفی از نظر مصرف‌کنندگان محسوب می‌شود. در طی خشک‌کردن مواد غذایی، چروکیدگی به‌طور مداوم اتفاق می‌افتد و روی بافت محصول و کیفیت آن تاثیرگذار است. مقدار چروکیدگی بستگی به مشخصه‌های عملکردی خشک‌کن دارد. در تحقیقات مختلفی اثرات هر کدام از شرایط خشک‌کردن مانند دمای خشک‌کردن و رطوبت-نسبی هوا، روی چروکیدگی به تنهایی مطالعه شده است. در اکثر موارد نتایج تحقیقات شفاف نیست و اثرات این عوامل روی مقدار چروکیدگی واضح و گویا بیان نشده است. ولی اغلب افزایش دمای خشک‌کردن موجب کاهش چروکیدگی شده است (Del Valle et al., 1998).

انتشار یا نفوذ رطوبت یک خصوصیت مهم انتقال است که در محاسبات و مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی یکی از مشخصه‌های ضروری و مورد نیاز می‌باشد (Crank, 1975). آهنگ حرکت رطوبت با ضریب نفوذ موثر (Deff) توصیف می‌شود. پیش‌بینی دقیق انتشار رطوبت می‌تواند موجب بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن با استفاده از مدل‌های کامپیوتری شود. (Khampakool et al., 2019) ضریب نفوذ موثر رطوبت ورقه‌های موز با ضخامت ۵ میلی‌متر را در خشک‌کردن به‌روش انجمادی و روش ترکیبی انجمادی-مادون‌قرمز با توان ۲/۷ کیلو وات بر متر مربع را به ترتیب برابر $10^{-8} \times 1/22$ و $10^{-8} \times 4/79$ متر مربع بر دقیقه گزارش نمودند.

تحقیقات زیادی در مورد تعیین مشخصه‌های عملکردی خشک-کن‌های مختلف از جمله خشک‌کن‌های ترکیبی مادون‌قرمز-همرفت و تاثیر این پارامترها روی خواص کیفی و زمان خشک‌شدن محصولات کشاورزی انجام شده است. (Nuthong et al., 2011) فرآیند خشک-کردن یک نوع میوه محلی به نام لنگان را مطالعه نمودند. آنان گزارش کردند که دمای محصول و آهنگ خشک‌شدن وابسته به توان رادیاتورهای مادون‌قرمز بوده و با افزایش توان منبع مادون‌قرمز، آهنگ تبخیر افزایش می‌یابد. (Adak et al., 2017) نشان دادند که افزایش توان منبع مادون‌قرمز، دما و سرعت هوای گرم موجب کاهش زمان خشک‌شدن توت‌فرنگی و افت کیفی محصول گردید. تحقیقات مشابهی نیز توسط سایر محققین انجام شده است (Umesh Hebbar et al., 2004; Sharma et al., 2005; Togrul, 2006; Timoumi et al., 2007; Rzca & Rajchert, 2009; Ponkham et al., 2012; Aktas et al., 2016). موز نیز همانند همه محصولات کشاورزی از عمر انبارمانی کوتاهی برخوردار است که خشک‌کردن این محصول ضمن جلوگیری از ضایعات آن می‌تواند منجر به تولید محصولی با ارزش افزوده بالا گردد. بنابراین، در این تحقیق شرایط مختلف خشک‌کردن مانند دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز بر روی زمان و آهنگ خشک-شدن، ضریب انتشار موثر رطوبت و خواص کیفی محصول نهایی مانند

خشک‌کردن لایه نازک میوه‌ها با استفاده از خشک‌کن‌های مادون‌قرمز یکی از روش‌های جذاب خشک‌کردن می‌باشد که در آن از امواج مادون‌قرمز استفاده می‌شود (Sharma et al., 2005). امواج مادون‌قرمز ساطع شده از هر منبع، حامل انرژی هستند که بدون نیاز به محیط واسط، از منبع مادون‌قرمز به جسم منتقل شده و سپس موجب ارتعاش مولکول‌های دو قطبی آب موجود در ماده غذایی و در نتیجه گرم‌شدن آنها می‌شود. هر یک از اجزای مختلف موجود در مواد غذایی مانند آب، پروتئین، چربی، خاکستر و کربوهیدرات‌ها بر حسب ماهیت خود، حداکثر جذب از توان انتشاری امواج مادون‌قرمز را در طول موج‌های بخصوصی دریافت می‌کنند (شکل ۱). (Pan & Atungulu, 2011) بیان کردند که با خشک‌کردن مواد غذایی با طول موج‌های بین ۳/۵ تا ۵/۵ میکرومتر، بیشتر امواج توسط سایر ترکیبات مواد غذایی جذب می‌شود که این امر با افزایش دما و تغییر در ساختار ترکیبات مواد غذایی موجب تشکیل لایه سخت در سطح مواد می‌شود. ولی در طول موج‌های ۳/۱ و ۶ میکرومتر، امواج مادون‌قرمز توسط آب جذب شده و سخت‌شدگی سطحی در ماده ایجاد نشده و عملیات خشک‌کردن و تبخیر رطوبت با راندمان بالایی صورت می‌گیرد. در این حالت صدمه ماده غذایی کمتر خواهد بود.



شکل ۱- طول موج مربوط به حداکثر جذب از توان انتشاری

امواج مادون‌قرمز موجود در ترکیب ماده غذایی

Fig 1. Wavelength associated to absorb maximum infrared energy of the main food components

خشک‌کردن به‌روش ترکیبی مادون‌قرمز-همرفت نیز یکی از روش‌های نسبتاً جدید است که در آن انتقال گرما به‌طور توأم، از طریق جریان هوای گرم و تابش امواج مادون‌قرمز صورت می‌گیرد. به این ترتیب این خشک‌کن‌ها محاسن هر دو روش منفرد را داشته و معمولاً موجب کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌شوند. کیفیت محصول خشک‌شده توسط شاخص‌های مختلفی سنجیده می‌شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به توانایی جذب مجدد آب و چروکیدگی اشاره نمود. جذب مجدد آب می‌تواند به‌عنوان معیاری از صدمات به‌مواد غذایی نیز در نظر گرفته شود که به دلیل خشک‌کردن روی مواد اتفاق می‌افتد. مقدار آب جذب شده در این فرآیند تابع شرایط

۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

۲-۳- آزمون خشک‌شدن موز

برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، ابتدا دمای هوای گرم مورد استفاده با استفاده از دایمر در حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد با دقت ± 1 درجه سانتی‌گراد تنظیم و سرعت جریان هوای گرم با استفاده از سرعت سنج پره‌ای در حدود ۰/۷ متر بر ثانیه تنظیم شد. دمای سطح محصول به‌وسیله چند ترموکوپل که روی سطح محصول قرار می‌گرفتند اندازه‌گیری شد. با تغییر ولتاژ ورودی به‌رادیاتورها، دمای رادیاتورها به‌نحوی تغییر داده شد تا دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد روی سینی محصول حاصل شود. بدیهی است دمای سطح محصول به دلیل گرمای نهان تاخیر در طول فرآیند، از مقادیر اولیه تا حداکثر مقدار آن یعنی ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یافت. این دماها به‌عنوان دمای خشک‌کردن در نظر گرفته شدند. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شدند که فاکتور اول عبارت از دمای خشک‌کردن در سه سطح (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد) و فاکتور دوم عبارت از ضخامت ورقه‌های موز در دو سطح (۴ و ۶ میلی‌متری) بود. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند. پس از اعمال تنظیمات مورد نظر روی خشک‌کن در هر آزمایش، ۱۰۰ گرم نمونه آماده شده به‌صورت لایه نازک روی دو سینی توری در داخل خشک‌کن قرار داده شدند. یکی از سینی‌ها به ترازو دیجیتالی متصل بود که این ترازو در فواصل زمانی ۵ دقیقه، از طریق یک اتصال RS232 به یک واحد کامپیوتر، اقدام به داده‌برداری از جرم نمونه‌های در حال خشک‌شدن می‌کرد که از آن برای رسم منحنی‌های سینتیک افت رطوبت استفاده شد. سینی دوم در امتداد سینی اول قرار داشت ولی به ترازو متصل نبود. از نمونه‌های روی سینی دوم در رطوبت‌های مختلف شامل ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک، برای ارزیابی شاخص‌های کیفی شامل جذب مجدد آب و چروکیدگی استفاده شد.

۲-۴- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در خشک‌شدن

ورقه‌های موز

حل تحلیلی قانون دوم فیک در حالت نفوذ غیرپایا (رابطه ۱) و برای موادی به‌شکل لایه نازک و با شکل هندسی تخت (مکعب مستطیلی)، می‌تواند حرکت رطوبت را در طی فرآیندی که در مرحله نزولی خشک‌کردن اتفاق می‌افتد، توصیف کند که با ساده‌سازی آن و در نظر گرفتن جمله اول سری به‌دست آمده، رابطه ۲ حاصل می‌شود. از لگاریتم معادله حاصل (رابطه ۲)، معادله خطی ۳ به‌دست آمد که شیب آن با k_1 (رابطه ۴) نشان داده شده است. بنابراین، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به‌طور متداول با استفاده از داده‌های تجربی خشک‌کردن تعیین شد. با

درصد چروکیدگی و ضریب جذب مجدد آب مطالعه شد، تا بتوان به بهترین شرایط خشک‌کردن برای حصول محصول خشک با کیفیت بالا و با حداقل مصرف انرژی دست یافت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - همرفت

برای انجام آزمایش‌ها، از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - همرفت که قبلاً توسط تیم تحقیقاتی طراحی و ساخته شده بود استفاده شد (Ahmadi Gheshlagh *et al.*, 2020). این خشک‌کن به ابعاد $۷۶ \times ۶۰ \times ۵۵$ سانتی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) از عایق مناسب به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر ساخته شده و دیواره‌های داخلی آن با ورق آلومینیومی شفاف پوشش داده شده بود (شکل ۲). جریان هوای گرم ورودی به خشک‌کن توسط یک هیتر و دم‌ننده با توان حدود ۴۵ وات و جریان ۰/۲ آمپر تامین شد که در کانال متصل به بدنه اصلی تعبیه شده بودند. منبع امواج مادون قرمز رادیاتورهای لوله کوارتز با المنت داخلی تنگستن بود. رادیاتورها دارای توان مصرفی ۵۰۰ وات و طول و قطر هر یک آنها به ترتیب ۲۵۰ و ۱۲ میلی‌متر بود. این رادیاتورها در بالا و پایین سینی محصول روی شاسی مخصوص نصب شدند تا امواج مادون قرمز از بالا و پایین روی محصول تابیده شود. به‌منظور تابش یکنواخت امواج مادون قرمز روی سینی حاوی محصول، فاصله عمودی و افقی رادیاتورها از سطح محصول به ترتیب ۳۰ و ۵ سانتی‌متر تنظیم شد (Seiiedlou *et al.*, 2020). دمای رادیاتورها بوسیله یک دستگاه دایمر صنعتی و با تغییر ولتاژ ورودی تنظیم و به‌وسیله ترموکوپل نوع K متصل به بدنه رادیاتورها اندازه‌گیری شده و روی ۱۹۷ درجه سانتی‌گراد تثبیت شد. کنترل دمای سطح محصول نیز توسط دیتالاگر مجهز به ترموکوپل‌های نوع K صورت گرفت. هم‌چنین سینی حاوی محصول توسط چهار عدد میله فلزی به ترازوی دقیق نوع A&D مدل EK-3000i با دقت ۰/۰۱ گرم متصل شد (شکل ۲) و امکان توزین و محاسبه کاهش جرم به صورت تابعی از زمان خشک‌شدن فراهم شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های موز روزانه از بازار محلی خریداری و تا زمان شروع آزمایش‌ها در دمای ۱۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌ها پس از برش به‌صورت ورقه‌های نازک به ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متری، در آب گرم با دمای ۸۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه آنزیم‌بری و سپس به مدت یک دقیقه در محلول ۰/۱ درصد اسید سیتریک غوطه‌ور شدند و در نهایت با استفاده از کاغذ صافی رطوبت سطحی نمونه‌ها گرفته شد (Zirjani & Tavakkolipour, 2010). این پیش‌تیمار برای کاهش تغییرات رنگ محصول حین خشک‌شدن انجام شد. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌های موز بر اساس استاندارد AOAC در آون با دمای ± 2

وابسته به خصوصیات فیزیکی ماده جامد و R ثابت عمومی گازها برابر با $۸/۳۱۴۵۱$ (ژول بر مول - درجه کلوین) می‌باشد.

۲-۵- چروکیدگی محصول طی زمان خشک کردن

برای محاسبه مقدار چروکیدگی، حجم ورقه‌های موز در طی خشک کردن و در رطوبت‌های مختلف شامل ۰/۲، ۰/۵، ۰/۷۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲ گرم آب به‌ازای هر گرم ماده خشک اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی سه نمونه موز به‌صورت تصادفی از داخل خشک‌کن بیرون آورده شده و حجم آنها با استفاده از روش جایجایی تولوئن اندازه‌گیری شد (Chakraverty & Poul, 2001; Mohsenin, 1986). مقدار چروکیدگی حجمی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد که در آن V_t حجم نمونه خشک‌شده در زمان مورد نظر (سانتی‌متر مکعب)، V_0 حجم اولیه همان نمونه (قبل از خشک کردن) (سانتی‌متر مکعب) و Sh درصد چروکیدگی می‌باشد.

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0}\right) \times 100 \quad (7)$$

۲-۶- قابلیت جذب مجدد آب محصول

یکی از شاخص‌های کیفی که برای ارزیابی محصول خشک‌شده استفاده می‌شود، توانایی آبرگیری مجدد می‌باشد. پس از اتمام فرآیند خشک شدن ورقه‌های موز، دو ورقه از داخل خشک‌کن خارج و در ۱۵۰ میلی لیتر آب با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت غوطه‌ور شدند. پس از سپری شدن زمان مورد نظر، نمونه‌ها از آب بیرون آورده شده و بلافاصله پس از گرفتن آب سطحی، توزین شدند. برای بدست آوردن مقدار ماده خشک، نمونه‌هایی که آب جذب کرده بودند، در آن تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردیده و دوباره توزین شدند. ظرفیت جذب آب (WAC)، ظرفیت حفظ ماده خشک (DHC) و قابلیت جذب مجدد آب (RA) به ترتیب با استفاده از روابط ۸، ۹ و ۱۰ محاسبه شدند (Lewicki, 1998). پایین بودن مقادیر شاخص‌های جذب مجدد به طور مستقیم مرتبط با میزان صدمات وارده به محصول در حین فرآیند خشک کردن است.

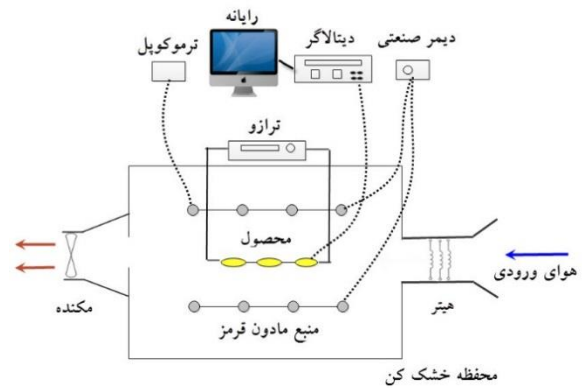
$$WAC = \frac{M_r(100 - S_r) - M_d(100 - S_d)}{M_0(100 - S_0) - M_d(100 - S_d)} \quad (8)$$

$$DHC = \frac{M_f \times S_f}{M_i \times S_i} \quad (9)$$

$$RA = WAC \& DHC \quad (10)$$

در این روابط M و S به ترتیب جرم نمونه موز و جرم ماده خشک بر حسب گرم می‌باشد. اندیس‌های ۰، f و d به ترتیب مربوط به نمونه بعد از جذب مجدد آب، قبل از خشک کردن و پس از خشک کردن می‌باشد.

استفاده از این داده‌ها در هر دما و ضخامت ورقه‌های موز، ضریب نفوذ از طریق رسم $\ln(MR)$ به صورت تابعی از $\frac{t}{L^2}$ تعیین گردید و از روی شیب خط برازش شده روی داده‌های مذکور، مقدار ضریب نفوذ موثر به دست آمد.



شکل ۲- مجموعه خشک‌کن مادون قرمز به همراه ابزار اندازه‌گیری

Fig 2. Combined infrared-convective dryer and its associated measuring system

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

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

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (3)$$

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

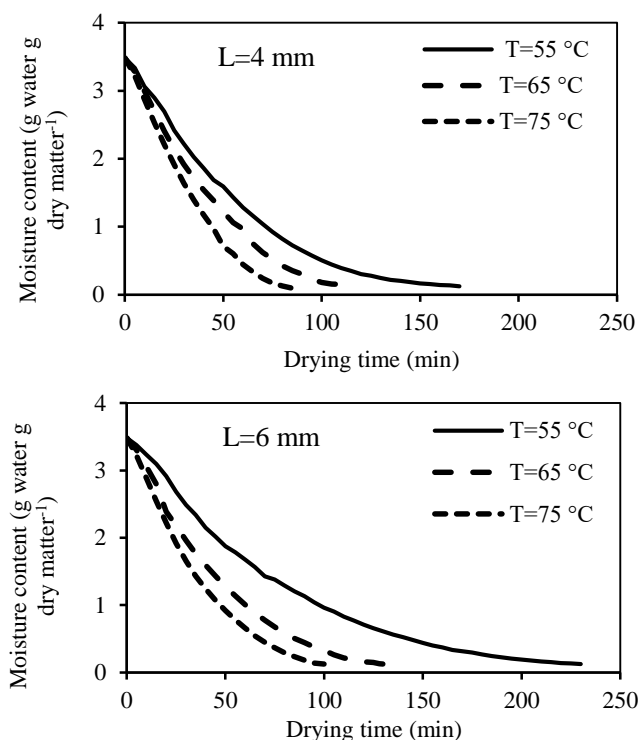
$$k_1 = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4} \quad (5)$$

در این روابط D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه)، t زمان (ثانیه)، L نصف ضخامت ورقه موز (متر)، M_d مقدار رطوبت در هر لحظه (گرم آب بر گرم ماده خشک) و n شمارنده سری می‌باشد. در مرحله بعدی تغییر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت تابعی از دمای خشک کردن (T) با استفاده از رابطه آرنوس (رابطه ۵) در ضخامت‌های مختلف ورقه‌های موز توصیف گردید. با لگاریتم‌گیری از رابطه آرنوس (رابطه ۶)، تغییرات $\ln(D_{eff})$ در دماهای مختلف و برحسب $\frac{1}{T}$ رسم شد. شیب خط حاصل برابر با $-\frac{E_a}{R}$ و عرض از مبدا آن برابر با $\ln(D_0)$ بود. به این ترتیب مقادیر E_0 و D_0 تعیین شدند.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (6)$$

در این روابط E_a انرژی اکتیواسیون (ژول بر مول) وابسته به خصوصیات شیمیایی ماده، D_0 فاکتور پیش‌نمایی (متر مربع بر ثانیه)



شکل ۳- منحنی خشک‌شدن ورقه‌های موز در دما و ضخامت‌های مختلف

Fig 3. Drying kinetic of banana slices at various temperature and slice thickness

افزایش ضخامت از ۴ به ۶ میلی‌متر، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن نمونه‌ها در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۶۰، ۱۵ و ۱۷ دقیقه افزایش یافت.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد روی زمان خشک‌شدن نمونه‌ها داشته و اثر متقابل آن‌ها نیز روی زمان خشک‌شدن معنی‌دار بود (جدول ۱).

مقایسه میانگین اثر متقابل دما و ضخامت نمونه‌ها روی زمان خشک‌کردن در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌شود بین تمامی تیمارها به جز تیمارهای مربوط به دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر و دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۶ میلی‌متر، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد وجود دارد. به‌طور کلی با افزایش دمای خشک‌کردن و کاهش ضخامت میوه‌ها زمان خشک‌شدن به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد و کمترین زمان مورد نیاز برای کاهش رطوبت از ۳/۴۸ تا ۰/۱۲ (گرم آب بر گرم ماده خشک) مربوط به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر بود. (Sharma et al. (2005) به‌نتایج مشابهی با بکارگیری توان‌های مختلف طی فرآیند خشک‌کردن پیاز با خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم دست یافتند. نتایج هم‌چنین با نتایج بدست آمده توسط Pan et al. (2008) در خشک‌کردن لایه نازک موز تحت خشک‌کردن ترکیبی مادون قرمز- انجمادی و (Minh-Hue & William (2007) مطابقت دارد.

۲-۷- تجزیه و تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌های حاصل از اثر دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز روی زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، چروکیدگی و جذب مجدد آب با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی در محیط نرم‌افزار SAS انجام شد. مقایسه میانگین به‌روش دانکن انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنی‌های خشک‌شدن ورقه‌های موز

پس از اینکه تمامی مراحل آزمایش‌های مربوط به خشک‌کردن ورقه‌های موز در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به-رطوبت نهایی ۰/۱۲ (گرم آب بر گرم ماده خشک) انجام شد، سینتیک خشک‌شدن به‌صورت مقدار رطوبت ماده (خشک پایه) در مقابل زمان در دماها و ضخامت‌های مختلف ورقه‌های موز رسم گردید (شکل ۳) این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوی رطوبت نمونه‌ها به طور مداوم طی خشک‌کردن به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد و زمان خشک‌شدن در دماهای بالا و ضخامت‌های کم ورقه‌های موز کوتاه‌تر است. زمان مورد نیاز برای کاهش رطوبت از ۳/۴۸ به ۰/۱۲ گرم آب بر گرم ماده خشک در ضخامت ۴ میلی‌متر و در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر ۱۷۰، ۱۱۶ و ۸۳ دقیقه بود. هم‌چنین با

یک ضخامت ثابت ورقه‌های موز، با افزایش دمای خشک کردن، آهنگ خشک شدن افزایش می‌یابد و در دماهای بالاتر منحنی از شیب بیشتری برخوردار می‌باشد. در این منحنی‌ها، دوره سرعت ثابت خشک شدن مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مکانیسم نفوذ عامل اصلی کنترل کننده افت رطوبت در نمونه‌های موز است.

نرخ یا آهنگ خشک شدن نمونه‌های موز به صورت مقدار رطوبت حذف شده ماده در واحد زمان به صورت تابعی از مقدار رطوبت ماده در شکل ۴ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که منحنی آهنگ خشک شدن دارای دو دوره سرعت نزولی می‌باشد. بیشترین مقدار افت رطوبت در دوره اول اتفاق می‌افتد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که در

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و ضخامت نمونه‌ها روی زمان خشک شدن و شاخص‌های کیفی ورقه‌های موز

Table 1. ANOVA for the parameters drying temperature and thickness of slices on the drying time and quality indexes of banana slices

میانگین مربعات (MS)							منابع تغییر S.V.
ظرفیت جذب ماده خشک DHC	ظرفیت جذب آب WHC	قابلیت جذب مجدد آب RA	چروکیدگی Sh	ضریب انتشار مؤثر رطوبت D _{eff}	زمان خشک شدن Drying time	درجه آزادی df	
0.13495 ^{ns}	0.00017 ^{ns}	0.00053 ^{ns}	0.00108 ^{ns}	5.2×10^{-22} ^{ns}	9.7 ^{ns}	2	تکرار Repetition
0.09753 ^{ns}	0.00006 ^{ns}	0.00036 ^{ns}	0.00108 ^{ns}	1.29×10^{-18} ^{**}	18939 ^{**}	2	دمای خشک کردن Drying temperature
3.4857 ^{**}	0.00141 ^{**}	0.00019 ^{ns}	0.00110 ^{ns}	2.12×10^{-18} ^{**}	4672.2 ^{**}	2	ضخامت thickness
0.7404 ^{ns}	0.00057 [*]	0.00019 ^{ns}	0.00130 ^{ns}	1.43×10^{-19} ^{**}	436.1 ^{**}	4	دمای خشک کردن × ضخامت Drying temperature × thickness
0.33647	0.00008	0.00035	0.0009	2.69×10^{-21}	19.7	10	اشتباه Error

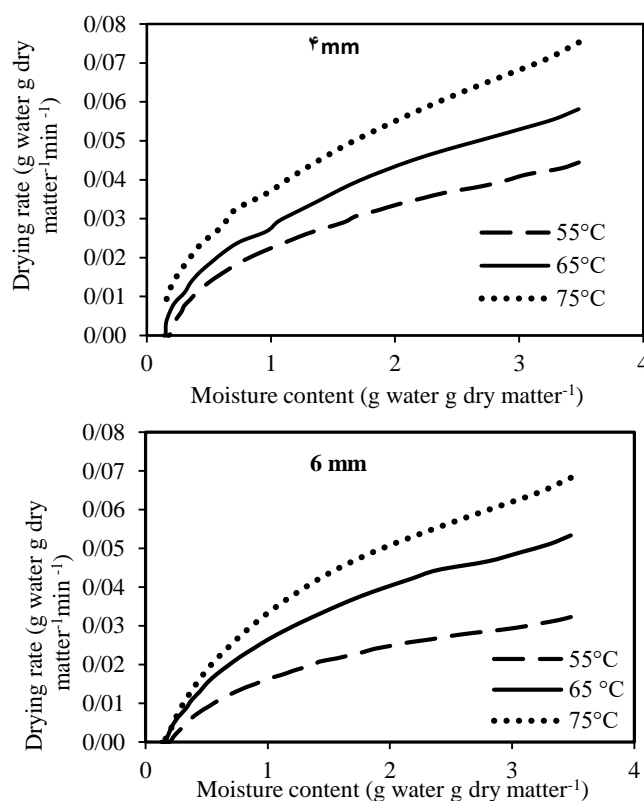
^{**} و ^{*} به ترتیب نشانگر معنی دار بودن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ^{ns} به معنای عدم معنی دار بودن است.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای خشک کردن و ضخامت ورقه‌های موز روی زمان نهایی خشک شدن

Table 2. Mean comparison of interaction effect of drying temperature and banana slice thickness on the drying time

ظرفیت جذب آب WHC	ضریب انتشار مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) D _{eff} (m ² s ⁻¹)	زمان خشک شدن (دقیقه) Drying time (min)	تیمار Treatment
0.061 ^A	2.14×10^{-9} ^A	230 ^A	۵۵°C-۶ mm 55°C-6 mm
0.047 ^{AB}	1.65×10^{-9} ^B	170 ^B	۵۵°C-۴ mm 55°C-4 mm
0.047 ^{AB}	1.21×10^{-9} ^D	128.3 ^C	۶۵°C-۶ mm 65°C-6 mm
0.045 ^{AB}	9.2×10^{-10} ^D	111.6 ^D	۶۵°C-۴ mm 65°C-4 mm
0.034 ^B	8.63×10^{-10} ^D	1.1.6 ^D	۷۵°C-۶ mm 75°C-6 mm
0.021 ^B	5.8×10^{-10} ^E	81.6 ^E	۷۵°C-۴ mm 75°C-4 mm

حروف متفاوت نشان دهنده وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۴- آهنگ خشک‌شدن ورقه‌های موز در مقابل محتوی رطوبت در دما و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها
 Fig 4. Drying rate of banana slices verse moisture content at different temperature and slice thickness

۳-۲- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

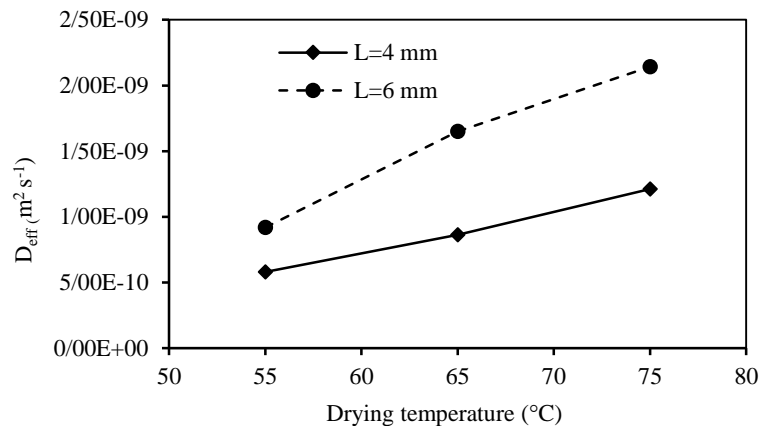
مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با استفاده از داده‌های خشک‌کردن در دماها و ضخامت‌های مختلف ورقه‌های موز و بر اساس روش ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها، برآورد شدند. گستره مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، در دماهای مختلف خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز بین $۵/۸۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ و $۲/۱۴۱ \times ۱۰^{-۹}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بود (شکل ۵). نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دمای خشک‌کردن و ضخامت ورقه‌های موز روی ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که اثر دما و ضخامت ورقه‌ها و نیز اثر متقابل این عوامل روی مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌های ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (جدول ۲)، بیشترین مقدار این ضریب در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۶ میلی‌متر و کمترین مقدار آن در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد بین اکثر تیمارها وجود دارد. ولی بین دو تیمار دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۶ میلی‌متر و دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). مطابق نتایج به‌دست آمده با افزایش دمای خشک‌کردن در یک ضخامت ثابت نمونه‌ها، ضریب انتشار مؤثر رطوبت نمونه‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌طوری‌که با افزایش دما از ۵۵ به ۷۵ درجه سانتی‌گراد، ضریب

انتشار مؤثر رطوبت در ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب $۱۰/۸/۶$ و ۱۳۲ درصد افزایش یافت. (Doymaz (2010) نیز ضریب انتشار مؤثر رطوبت ورقه‌های موز با ضخامت ۵ میلی‌متر را در سرعت هوای $۲/۴$ متر بر ثانیه و در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب $۷/۳۷ \times ۱۰^{-۱۱}$ ، $۱/۰۷ \times ۱۰^{-۱۰}$ ، $۱/۳۶ \times ۱۰^{-۱۰}$ و $۲/۱۵ \times ۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه گزارش نمود. (Karim و Thuwapani chayanan et al. (2011) و Hawlader & هم چنین به‌نتایج مشابهی طی خشک‌کردن موز رسیدند.

اثر ضخامت محصول نیز همانند دمای خشک‌کردن روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت معنی‌دار بود (جدول ۱). به‌طوری‌که در دمای ثابت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش ضخامت ورقه‌های موز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵). به‌طور مثال در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت در ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر به‌ترتیب برابر $۵/۸۱ \times ۱۰^{-۱۰}$ و $۹/۲۰ \times ۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه بود. مطابق مدل ضریب انتشار، فرض بر این است که پدیده انتشار فقط از قسمت سطح محصول (در یک جهت) صورت می‌گیرد و این فرضیه در مورد ورقه‌های نازک محصول نیز صدق می‌کند و اثر لبه‌های کناری نادیده گرفته می‌شود. این اثر می‌تواند علت بیشتر بودن ضریب انتشار مؤثر رطوبت در یک دمای مشخص در ورقه‌های ضخیم‌تر نسبت به ورقه‌های نازک را بیان کند (Minh-Hue & William, 2007). Johnson et al. (1998) مقدار ضریب انتشار مؤثر رطوبت ورقه‌های موز

کردند. Aysun *et al.* (2002) و Minh-Minh-Hue & William (2007) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

با ضخامت‌های ۷/۲ و ۱۷/۸ میلی‌متر را در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب $۱۰^{-۱۰} \times ۵/۱۲$ و $۱۰^{-۹} \times ۱/۸۰$ متر مربع بر ثانیه گزارش



شکل ۵ - تأثیر دما و ضخامت ورقه‌های موز بر روی ضریب انتشار موثر رطوبت

Fig 5. Effect of drying temperature and slice thickness of banana on D_{eff}

محدوده ۸۳-۷۹٪ قرار داشت. به عبارت دیگر درصد چروکیدگی ورقه‌های موز تابعی از شرایط خشک کردن نبود. تجزیه واریانس تأثیر دما و ضخامت ورقه‌های موز روی درصد چروکیدگی نهایی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج بیانگر آن است که اثر دما و ضخامت ورقه‌های موز روی چروکیدگی معنی‌دار نمی‌باشد. (Talla *et al.* (2004) در خشک کردن موز و نیز Ratti (1994) در خشک کردن سیب‌زمینی و هویج به نتایج مشابهی رسیدند و نشان دادند که دمای هوا تأثیر معنی‌داری روی مقدار چروکیدگی این محصولات در فرآیند خشک کردن ندارد.

با توجه به اینکه میزان چروکیدگی عبارت از نسبت حجم نمونه در هر لحظه به حجم اولیه آن است، خشک کردن موجب تغییر در شکل و کاهش حجم محصول و در نتیجه افزایش چروکیدگی می‌شود. در حالت کلی چروکیدگی محصول به دلیل خروج رطوبت و کاهش حجم محصول برای رسیدن به تعادل فشاری بین داخل و بیرون محصول است. در تمام شرایط آزمایش بیشترین تغییر در میزان چروکیدگی در زمان‌های اولیه خشک کردن و رطوبت‌های بالا اتفاق افتاده و با گذشت زمان عملیات میزان تغییرات حجم نمونه‌ها تغییر چندانی نکرده است؛ زیرا در ابتدای فرآیند آهنگ تبخیر رطوبت بسیار بالاتر از مراحل پایانی فرآیند خشک شدن است. دلیل دوم متوقف شدن چروکیدگی در مراحل پایانی عملیات خشک شدن، تغییرات در ساختار ماتریکس جامد محصول می‌باشد چرا که در مراحل پایانی خشک کردن، دمای محصول افزایش یافته و محصول به دمای انتقال شیشه‌ای نزدیک شده و از حالت لاستیکی به حالت شیشه‌ای تبدیل می‌شود که موجب افزایش استحکام شبکه ماتریس جامد شده و کاهش حجم متوقف و افزایش چروکیدگی را داشتیم. (Yan *et al.* (2008) نیز به نتایج مشابهی در این زمینه دست یافتند.

شکل ۶ هم‌چنین بیانگر این مطلب است که با کاهش محتوی رطوبت، مقدار چروکیدگی به صورت تابعی خطی از محتوی رطوبت،

تغییرات ضریب نفوذ به صورت تابعی از دمای خشک کردن به وسیله رابطه آرنیوس توصیف گردید (رابطه ۱۱ و ۱۲). مقدار انرژی فعال‌سازی در ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب $۳۴/۹۱۲$ و $۴۰/۲۶۲$ کیلوژول بر مول به دست آمد. محدوده مقدار انرژی فعال‌سازی برای مواد غذایی بین $۱۲/۷$ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول متغیر می‌باشد. این نتایج بیانگر آن است که مقدار انرژی فعال‌سازی با افزایش دمای خشک کردن افزایش می‌یابد. (Thuwapani chayanan *et al.* (2008) انرژی فعال‌سازی ورقه‌های موز را در محدوده دمایی ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد $۲۲/۹۰$ کیلوژول بر مول گزارش کردند.

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق در شبیه‌سازی فرآیند خشک‌شدن ترکیبی ورقه‌های موز می‌بایست ضریب نفوذ موثر رطوبت تابع دما و ضخامت محصول در نظر گرفته شود تا شبیه‌ساز توسعه‌یافته از دقت قابل قبولی برخوردار گردد.

$$L = 4 \text{ mm} \rightarrow D_{eff} = 2.12 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-34912}{R.T}\right) \quad (11)$$

$$L = 6 \text{ mm} \rightarrow D_{eff} = 24.9 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-40262}{R.T}\right) \quad (12)$$

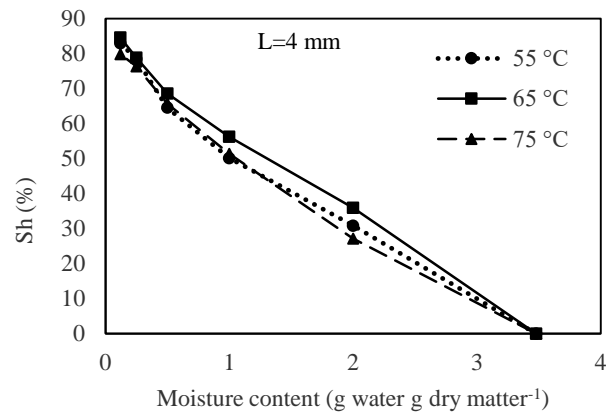
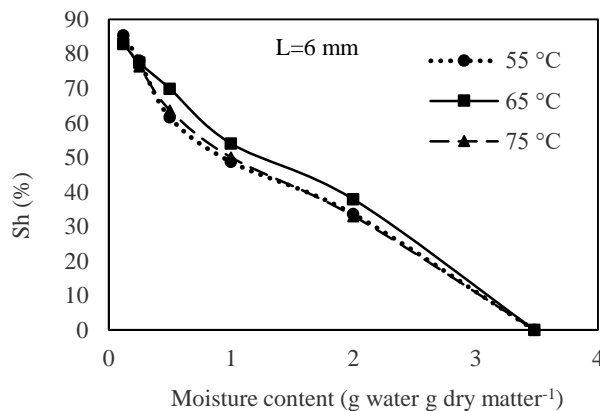
۳-۳- بررسی چروکیدگی نمونه‌های موز خشک شده

با توجه به اینکه کیفیت محصولات خشک عمدتاً با مقدار چروکیدگی آن در پایان فرآیند خشک کردن ارزیابی می‌شود، تغییرات چروکیدگی حجمی ورقه‌های موز در حین خشک‌شدن به صورت تابعی از نسبت رطوبت ورقه‌ها در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طوریکه می‌توان مشاهده نمود با کاهش محتوی رطوبت، درصد چروکیدگی ورقه‌های موز افزایش می‌یابد. از شیب نمودارها در شکل ۶ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثر دمای خشک کردن روی درصد چروکیدگی محسوس نمی‌باشد و درصد چروکیدگی نهایی در پایان فرآیند خشک کردن در همه دماها و ضخامت‌های مورد مطالعه تقریباً به هم نزدیک بوده و در

چروکیدگی موز به‌محتوی رطوبت محصول در حین خشک‌کردن را گزارش کردند.

$$Sh = -23.866 \times C + 81.128, R^2 = 0.9841 \quad (13)$$

بنابراین در توسعه شبیه‌ساز برای پیش‌بینی فرآیند خشک‌شدن ترکیبی ورقه‌های موز ضروری است چروکیدگی ورقه‌های موز در معادلات توسعه یافته لحاظ و سرعت حرکت مرزها در فضای محاسباتی لحاظ شود. ولی نیازی به اعمال اثر دما و ضخامت ورقه‌های موز در معادلات حرکت مرز وجود ندارد.



شکل ۶- چروکیدگی ورقه‌های موز تابعی از محتوی رطوبت در دما و ضخامت‌های مختلف

Fig 6. Shrinkage of banana slices as a function of moisture content at different drying temperature and thickness

دارد. همین مساله موجب صدمات حرارتی به‌محصول شده و در زمان جذب مجدد، میزان ظرفیت جذب کاهش می‌یابد و این بیانگر بالا بودن صدمات حرارتی در حین خشک‌کردن نمونه‌های نازک است. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دما و ضخامت بر روی ظرفیت جذب آب در جدول ۲ و اثر ضخامت بر روی ظرفیت حفظ ماده خشک در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار ظرفیت جذب آب مربوط به تیمار ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش ضخامت ورقه‌های موز ظرفیت حفظ ماده خشک نیز افزایش یافت.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر ضخامت ورقه‌های بر روی ظرفیت

حفظ ماده خشک

Table 3. Mean comparison of slices thickness of banana on the DHC

ظرفیت حفظ ماده خشک	ضخامت ورقه‌های موز (میلی‌متر)
DHC	Thickness of banana (mm)
0.033 ^B	4
0.051 ^A	6

حروف متفاوت نشانگر وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

افزایش یافته است. بنابراین می‌توان مقدار درصد چروکیدگی ورقه‌های موز در محدوده دمایی و ضخامت‌های مورد مطالعه را با استفاده از رابطه خطی ۱۳ پیش‌بینی نمود. در این رابطه C مقدار رطوبت خشک پایه موز (گرم آب بر گرم ماده خشک) و Sh درصد چروکیدگی می‌باشد. لوزانو و همکاران (Mayor & Sereno, 2004) نیز از رابطه خطی برای بیان تغییرات چروکیدگی محصولات کشاورزی بصورت تابعی از محتوی رطوبت آنها استفاده کردند. (Talla et al. (2004) نیز وابستگی

۳-۴- شاخص‌های جذب مجدد

تغییرات ظرفیت جذب آب (WAC)، قابلیت حفظ ماده خشک (DHC) و نیز قابلیت جذب مجدد آب (RA) ورقه‌های موز پس از اتمام فرآیند مطابق روش ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس مربوط به‌اثر دما و ضخامت ورقه‌ها روی قابلیت جذب مجدد (RA) نمونه‌های موز (جدول ۱) نشان داد که تاثیر دما و ضخامت ورقه‌ها روی متغیرهای وابسته مذکور معنی‌دار نمی‌باشد. با این وجود بیشترین قابلیت جذب مجدد آب مربوط به دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر و کمترین مقدار آن مربوط به دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۶ میلی‌متر می‌باشد.

هم‌چنین نتایج تجزیه واریانس اثر دمای خشک‌کردن و ضخامت بر ظرفیت جذب مجدد آب (WAC) و ظرفیت حفظ ماده خشک (DHC) در عملیات جذب مجدد آب نمونه‌های موز خشک شده در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر ضخامت و اثر متقابل فاکتور دما و ضخامت روی تغییرات WAC به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌داری می‌باشد. هم‌چنین ضخامت اثر معنی‌داری روی DHC نیز دارد. در نمونه‌های نازک‌تر، سطح تماس حرارتی نمونه در واحد جرم بسیار بیشتر از نمونه‌های ضخیم‌تر می‌باشد. بنابراین تبادل حرارتی سطحی بین فاز هوای گرم و سطح مرطوب ماده در نمونه‌های نازک‌تر، بیشتر است و امکان تغییر در ساختار میکروسکوپی به‌دلیل افزایش سطح بیشتری از محصول نسبت به‌نمونه‌های ضخیم وجود

۴- نتیجه گیری

خشک کردن و ضخامت نمونه‌ها اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت داشته و مقدار آن در دماها و ضخامت‌های مورد مطالعه در محدوده 10^{-10} الی 10^{-9} $\times 5/20$ متر مربع بر ثانیه قرار داشت و مقدار آن با تغییر دما از رابطه آرنیوس تبعیت کرد. مقدار انرژی فعال‌سازی در دماهای مختلف (۵۵، ۶۵ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد) برای ضخامت ۶ میلی‌متر (۴۰/۲۶۲ کیلو ژول بر مول) بیشتر از ضخامت ۴ میلی‌متر (۳۴/۹۱۲ کیلو ژول بر مول) به‌دست آمد. چروکیدگی ورقه‌های موز تابع محتوی رطوبت نمونه‌ها بوده و مقدار آن با کاهش محتوی رطوبت به‌صورت خطی کاهش یافت ولی دما و ضخامت نمونه‌ها تاثیر معنی‌داری روی آن نداشت. هم‌چنین دمای خشک کردن هیچ گونه اثر معنی‌داری بر روی شاخص‌های جذب آب نداشت و تنها اثر ضخامت روی ظرفیت حفظ ماده خشک و ظرفیت جذب آب معنی‌دار بود.

خشک کردن به‌روش ترکیبی مادون‌قرمز-همرفت نیز یکی از روش‌های نسبتاً جدید است که در آن انتقال گرما به‌طور توأم، از طریق جریان هوای گرم و تابش امواج مادون‌قرمز صورت می‌گیرد. در این تحقیق فرآیند خشک کردن لایه نازک موز به وسیله خشک‌کن ترکیبی مادون‌قرمز- هوای گرم در دماهای مختلف خشک کردن و ضخامت‌های مختلف ورقه‌های مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده، زمان خشک‌شدن میوه‌ها با افزایش دمای خشک کردن و کاهش ضخامت ورقه‌های موز، به‌ور معنی‌داری کاهش می‌یابد. بالاترین آهنگ خشک شدن مربوط به‌دمای خشک کردن ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر بود. در یک ضخامت ثابت، با افزایش دما، آهنگ خشک‌شدن افزایش یافت. هم‌چنین دمای

۵- منابع

- Adak, N., Heybeli, N., and Ertekin, C. (2017). *Infrared drying of strawberry. Food Chemistry*. 219: 109-116.
- Ahmadi Gheslgh, P., Seiielou, S., and Nalbandi, H. (2020). *Development, test and evaluation of a combined infrared and hot-air dryer to determine its performance characteristics during banana slice drying. Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 15(5): 623-634 (In Persian).
- Aktas, M., Sevik, S., Amini, A., and Khanlari, A. (2016). *Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer. Solar Energy*. 137: 500-515.
- AOAC. (1990). *Official Method of Analysis, Association of Official Analytical Chemists* (No.934.06).
- Aysun, M., Sevim, K., and Medeni, M. (2002). *Hot air and sun drying of grape leather (pistil). Journal of Food Engineering*. 54: 81-88.
- Chakraverty, A., and Poul, S.R. (2001). *Postharvest technology: cereals, pulses and vegetables*. Science Publishers, Inc. India. pp: 183-188.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*. London, Oxford University Press.
- Del Valle, J.M., Cuadros, T.R., and Agulera, J.M. (1998). *Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. Food Research International*. 31(3): 191-204.
- Doymaz, I. (2010). *Effect of citric acid and blanching pre-treatment son drying and rehydration of Amass yard apples. Food and Bio Products Processing*. 88(2-3): 124-132.
- Fellows, P.J. (2000). *Food processing technology: Principles and practice*. Second edition. Published by CRC press.
- Johnson, P.N.T., Brennan, J.G., and Addo-Yobo, F.Y. (1998). *Air-drying characteristics of plantain. Journal of Food Engineering*. 37: 233-242.
- Karim, Md.A. and Hawlader, M.N.A. (2005). *Drying characteristics of banana: Theoretical modeling and experimental validation. Journal of Food Engineering*. 70: 35-45.
- Khampakool, A., Soisungwan, S., and Park, S.H. (2019). *Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture. LWT - Food Science and Technology*. 99: 355-363.
- Lee, K.T., Farid, M., and Nguang, S.K. (2006). *The mathematical modeling of the rehydration characteristics of fruits. Journal of Food Engineering*. 72: 16-23.
- Lewicki, P.P. (1998). *Some remarks on rehydration of dried foods. Journal of Food Engineering*. 36: 81-87.
- Lewicki, P.P., Witrowa, D., and Mariak, J. (1997). *Changes of structure during rehydration of dried apples. Journal of Food Engineering*. 32 (4): 347 - 350.
- Mayor, L., and Sereno, A.M. (2004). *Modeling shrinkage during convective drying of food materials: A review. Journal of Food Engineering*. 61: 373-386.

- Minh-Hue, N., and William, E.P. (2007). *Air-drying of banana: influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season*. Journal of Food Engineering. 79: 200-207.
- Mohsenin, N.N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Sci. Publ, New York.
- Nuthong, P., Achariyaviriya, A., Namsanguan, K., and Achariyaviriya, S. (2011). *Kinetics and modeling of whole langan with combined infrared and hot air*. Journal of Food Engineering. 102: 233-239.
- Pan, Z., and Atungulu, G.G. (2011). *Infrared heating for food and agricultural processing*. Taylor & Francis Group.
- Pan, Z., Shih, C., Tara, H.M., and Hirschberg, E. (2008). *Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating*. Food Science and Technology. 41: 1944-1951.
- Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., and Siriamornpun, S. (2012). *Modeling of combine far-infrared radiation and air drying of a ring shaped pineapple with/ without shrinkage*. Food and Byproduct Processing. 90: 155-164.
- Ratti, C. (1994). *Shrinkage during drying of food stuffs*. Journal of Food Engineering. 23(1): 91 – 105.
- Rzca, M., and Rajchert, D.W. (2009). *Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apple*. Drying Technology. 27: 903- 909.
- Seiiedlou, S., Nalbandi, H., and Bidaghi, A. (2020). *Determination of performance parameters of infrared dryer to increase drying performance and uniformity of heat distribution*. Innovative Food Technologies. 7(2): 313-326 (In Persian).
- Sharma, G.P., Verma, R.C., and Pathare, P.B. (2005). *Thin-layer infrared radiation drying of onion slices*. Journal of Food Engineering. 67: 361-366.
- Talla, A., Puiggali, J.R., Jomaa, W., and Jannot, Y. (2004). *Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: Application to banana*. Journal of Food Engineering. 64: 103-109.
- Thuwapani chayanan, R., Prachayawarakorn, S., and Kunwisawa, J. (2011). *Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying*. Food Science and Technology. 44: 1502-1510.
- Thuwapani chayanan, R., Prachayawarakorn, S., and Sponronnarition, S. (2008). *Drying characteristics and quality of banana foam mat*. Journal of Food Engineering. 86: 573-583.
- Togrul, H. (2006). *Suitable drying model for infrared drying of carrot*. Journal of Food Engineering. 77: 610- 619.
- Timoumi, S., Mihoubi, D., and Zagrouba, F. (2007). *Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices*. Journal of LWT-Food Science and Technology. 40: 1648-1654.
- Umesh Hebbar, H., Vishwanatham, K.H., and Ramesh, M.N. (2004). *Development combined infrared and hot air dryer for vegetables*. Journal of Food Engineering. 65: 557-563.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., and Oliveira, F.A.R. (2008). *Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying*. Journal of Food Engineering. 84: 430-4.
- Zirjani, L. and Tavakkolipour, H. (2010). *Study of the possibility of producing banana leaves by the method of combined drying of hot air and microwave*. Iranian Food Science and Technology Research Journal. 66(1): 58-67.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)