

توسعه، آزمون و ارزیابی خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم به منظور تعیین مشخصه‌های عملکردی بهینه آن در خشک‌کردن موز

پرویز احمدی قشلاق¹ - سیدصادق سیدلو هریس^{2*} - حبیبه نعلبندی³

تاریخ دریافت: 1397/08/08

تاریخ پذیرش: 1398/02/18

چکیده

استفاده از امواج مادون قرمز برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی و غذایی موجب کاهش مصرف انرژی و مدت زمان خشک‌کردن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌گردد. در این تحقیق مراحل تغییر خشک‌کن مادون قرمز منفرد موجود، به دستگاه ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم انجام و دستگاه مذکور ساخته شد. سپس برای ارزیابی سیستم در خشک‌کردن موز و بر اساس مبانی علمی موجود و نیز نیاز بازار مصرف، تاثیر مشخصه‌هایی مانند ضخامت ورقه‌های موز (4 و 6 میلی‌متر) و دمای سطح محصول (55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد) روی سینتیک خشک‌شدن و خواص کیفی محصول نهایی مطالعه شد. همچنین جهت سهولت استفاده از نتایج آزمون‌ها، مدل‌های ریاضی مختلف روی داده‌های آزمایش برآزش و مناسب‌ترین مدل توسعه داده شد. بر اساس نتایج حاصله، افزایش دما از 55 به 75 درجه سانتی‌گراد و نیز کاهش ضخامت نمونه‌ها تاثیر معنی‌داری روی تغییرات رنگ نمونه‌ها و زمان خشک شدن داشت ولی اثر فاکتورهای مذکور روی دانسیته نمونه‌ها غیرمعنی‌دار بود. به عبارت دیگر استفاده از دمای 55 درجه سانتی‌گراد موجب تولید بهترین محصول خشک از نظر کیفیت ظاهری شد. با توجه به خصوصیات کیفی مناسب استحصال و مقایسه آن با داده‌های مرتبط با روش خشک‌کردن هوای گرم مشاهده شد که روش ترکیبی از دیدگاه تغییرات کیفی و زمان خشک شدن از رجحیت برخوردار است. مقایسه مدل‌های ریاضی نشان داد که مدل پیچ انتخاب مناسبی برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌شدن موز تحت شرایط مورد مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی، موز، خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم، خواص کیفی.

مقدمه

در کلیه واحدهای صنعتی مرتبط با صنایع غذایی، خشک‌کردن یکی از فرآیندهای مهم محسوب می‌شود، زیرا در اکثر مراحل تولید مواد غذایی، حداقل یک مرحله خشک‌کردن به چشم می‌خورد. خشک‌کردن به فرآیند کاهش رطوبت مواد تا رسیدن به یک محصول خشک اطلاق می‌شود که به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. خشک‌کردن مواد با استفاده از منابع گرمایی مهم ترین و متداول‌ترین روش خشک‌کردن می‌باشد (امیرنجات، 1389). در فرآیند خشک‌کردن هدف اصلی استفاده از حداقل انرژی حرارتی برای خارج ساختن حداکثر مقدار رطوبت با در نظر گرفتن کیفیت نهایی محصول است. بر این اساس روش‌های مختلفی برای خشک‌کردن ابداع و معرفی شدند که از آن جمله می‌توان به خشک‌کردن مواد با استفاده از امواج مادون قرمز اشاره کرد. امواج مادون قرمز ساطع شده از هر منبع، حامل انرژی است که بدون نیاز به واسطه، از منبع به جسم منتقل می‌شود و سپس موجب ارتعاش مولکول‌های ماده غذایی و در نتیجه گرم‌شدن آنها می‌گردد.

امواج مادون قرمز دارای ویژگی‌هایی است که استفاده از آن در خشک‌کردن محصولات کشاورزی، موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش مدت‌زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Panand and Atungulu, 2011 Khampakool, et al., 2019). به همین دلیل استفاده از آن در سال‌های اخیر با پیشرفت در نوع منابع مادون قرمز رو به افزایش است. در خشک‌کردن به روش ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم انتقال گرما به‌طور توأم، از طریق جریان هوای گرم و تابش امواج مادون قرمز صورت می‌گیرد. بدین صورت که خشک‌کن‌های ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم محاسن هر دو روش منفرد را داشته و معمولاً موجب کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌گردد (امیرنجات، 1389).

با ابداع هر روش جدید می‌بایست تاثیر آن روی فرآیند خشک‌کردن محصولات مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. زیرا هر محصول خصوصیات و ویژگی‌های منحصر به خود را داشته و تغییرات کیفی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. بنابراین مطالعات جامعی باید در شرایط مختلف خشک‌

* - نویسنده مسئول: (Email: ss_seidlo@yahoo.com)

DOI: 10.22067/iftstrj.v16i1.76330

1- کارشناس ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فنی حرفه‌ای شهید بهشتی ارومیه

2 و 3 - به ترتیب دانشیار و استادیار، مهندسی مکانیک‌اسیون کشاورزی، دانشگاه تبریز.

خشک کردن یک عامل محدودکننده در انتخاب روش خشک کردن است، با این وجود دست‌یابی به محصول با کیفیت بالا نیازمند یافتن بهترین ترکیب دمای منبع مادون قرمز، سرعت و دمای هوای گرم همرفتی در خشک کن های ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم است تا ضمن حفظ کیفیت محصول، فرآیند با بازده بالا انجام شود. بنابراین در این تحقیق هدف اصلی، طراحی و ساخت خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم بود به طوری که برای ارزیابی عملکرد خشک کن ساخته شده، فرآیند خشک کردن موز مورد مطالعه قرار گرفت تا تاثیر شرایط خشک کردن بر روی زمان خشک شدن و خواص کیفی محصول نهایی مانند رنگ و دانسیته محصول مشخص گردد. هم چنین هدف بعدی تحقیق، مدل سازی سینتیک خشک شدن موز با استفاده از خشک کن ترکیبی بود که این امر برای ایجاد تسهیل در امر کنترل و کاربرد خشک کن بود.

مواد و روش‌ها

خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم

برای انجام آزمایش‌ها، خشک کنی به صورت ترکیب مادون قرمز- هوای گرم ساخته شد (شکل 1). بدنه خشک کن از عایق مناسب به ضخامت 1/5 سانتی متر و به ابعاد 55×60×76 (طول، عرض و ارتفاع) سانتی متر ساخته شد و دیواره‌های داخلی دارای پوششی از ورق آلومینیومی شفاف بود که دارای بیشترین ضریب انعکاس در طول موج‌های بیش از 1/5 میکرومتر می‌باشد (شکل 1). برای تامین جریان هوای گرم در داخل دستگاه خشک کن، یک کانال به ابعاد 50×20×20 سانتی متر از آهن گالوانیزه ساخته شده و به بدنه اصلی خشک کن نصب گردید. در قسمت ورودی این کانال یک دمند به توان 45 وات و 0/2 آمپر و در قسمت داخلی آن یک هیتر جهت گرم کردن هوای ورودی نصب گردید تا دما و سرعت هوای ورودی به خشک کن قابل تنظیم باشد. در دیواره کناری خشک کن دریچه‌ای برای خروج هوا تعبیه شد تا با خروج هوای داخل خشک کن، از افزایش رطوبت نسبی در محیط اطراف محصول جلوگیری شود. منبع امواج مادون قرمز رادیاتورهای لوله کوارتز با المنت داخلی تنگستن بود. توان مصرفی هر یک از این رادیاتورها 500 وات و طول و قطر آن‌ها به ترتیب 250 و 12 میلی متر بودند. این رادیاتورها روی شاسی مخصوص خود در بالا و پایین سینی محصول و در داخل خشک کن نصب شدند تا امواج مادون قرمز از بالا و پایین روی محصول تابیده شود. ارتفاع عمودی رادیاتورها از محصول و نیز فاصله افقی رادیاتورها از یکدیگر قابل تنظیم بود. فاصله عمودی رادیاتورها از سطح محصول 30 سانتی متر و فاصله افقی رادیاتورها به اندازه 5 سانتی متر مورد استفاده قرار گرفت زیرا در این فواصل، تابش امواج مادون قرمز در خشک کن ترکیبی مذکور و بر روی سینی حاوی محصول یکنواخت بود (بدقی، 1392). برای اندازه‌گیری دمای رادیاتورهای مادون قرمز از یک ترموکوپل نوع K با اتصال موقت

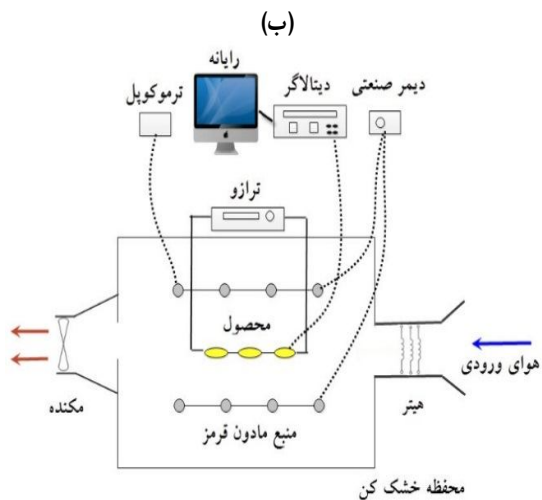
کردن روی محصول انجام گیرد و تاثیر مشخصه‌های عملکردی دستگاه روی زمان و آهنگ خشک شدن، خصوصیات کیفی مختلف محصول مانند دانسیته، رنگ و خصوصیات جذب مجدد محصول مورد بررسی قرار گیرد. به ویژه اینکه رنگ محصول خشک شده، مهمترین شاخص کیفی از دیدگاه مصرف کننده بوده و تاثیر مستقیمی روی بازاریابی و مشتری پسندی محصول مورد نظر دارد. در این میان مطالعه سینتیک خشک کردن محصول و نیز مدل سازی آن از دیدگاه کنترل و کاربرد خشک کن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا زمان خشک کردن ارتباط مستقیمی با مشخصه های عملکردی سیستم دارد. بنابراین با مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن می‌توان زمان خاتمه عملیات را تخمین زده و ضمن جلوگیری از مصرف زیاد انرژی، از افت کیفی محصول به دلیل خشک شدن طولانی مدت و افزایش دمای سطح ماده جلوگیری نمود. در نهایت مدل سازی سینتیک به اتوماسیون سیستم خشک کن کمک کرده و لازم و ضروری است.

به طور کلی از سه نوع مدل جهت توصیف خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود که عبارت از مدل‌های تئوری، نیمه تئوری و تجربی می‌باشند. مدل‌های تئوری خصوصیات خشک شدن و کاربردپذیری آن را در شرایط مختلف توصیف می‌کند اما برخی فرضیات مسئله از قبیل شکل هندسی محصول، ضریب نفوذ رطوبت و ضریب هدایت حرارتی منجر به بروز برخی خطاها در پیش بینی فرآیند خشک شدن می‌شود (Doymaz, 2007). مدل تجربی از اصول نظری خشک کردن صرف نظر کرده و یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین میانگین محتوی رطوبت و زمان خشک شدن محصول ارائه می‌کند. روش نیمه تئوری حد واسطی از روش‌های تجربی و تئوری است (Yaldiz et al., 2001). مدل‌های نیمه تئوری بر اساس قانون دوم فیک استوار هستند و مدل‌ها بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی، گسترش می‌یابند (Doymaz, 2007). برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن سینتیک خشک شدن محصول هدف را توصیف کرد باید آزمایش‌های مختلفی در سطوح مختلف تیمارهای موثر بر فرآیند خشک کردن انجام گیرد.

در این خصوص محققین مختلفی به مدل سازی فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از خشک کن های مختلف پرداخته و مدل‌های ریاضی مختلفی نیز برای توصیف فرآیند ارائه کرده‌اند (موسوی بایگی و همکاران، 1395؛ حسینی قابوس و همکاران، 1395؛ Hakan: Sharma, et al., 2005; Hebbar et al., 2004; and Can., 2006).

در تحقیق حاضر از میوه موز برای ارزیابی خشک کن ترکیبی توسعه داده شده استفاده شده است. موز نیز همانند همه محصولات کشاورزی از عمر انبارمندی کوتاهی برخوردار است که خشک کردن این محصول می‌تواند از ضایعات آن جلوگیری نموده و در نهایت منجر به تولید محصولی با ارزش افزوده بالا گردد. با اینکه تغییر رنگ موز حین فرآیند

محصول توسط دیتالاگر مجهز به ترموکوپل‌های نوع k صورت پذیرفت. همچنین سینی حاوی محصول توسط چهار عدد میله فلزی به ترازوی دقیق نوع A&D مدل EK-3000i با دقت 0/01 گرم متصل شد (شکل 1) و امکان توزین و محاسبه کاهش جرم به صورت تابعی از زمان خشک شدن فراهم شد.



شکل 1- الف: خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم شامل 1- مجموعه دمنده و هیتر 2- درب خشک کن 3- بدنه خشک کن 4- دریچه خروجی هوا 5- ترازوی دیجیتال 6- دیتالاگر 7- رایانه 8- دیمبر؛ ب: شکل شماتیک خشک کن

50، 65 و 75 درجه سانتی گراد روی سینی محصول حاصل شود. بدیهی است دمای سطح محصول به دلیل گرمای نهان تبخیر در طول فرآیند، از مقادیر اولیه تا حداکثر مقدار آن یعنی 55، 65 و 75 درجه سانتی گراد افزایش می‌یافت. دمای سطح محصول به وسیله چند ترموکوپل که روی سطح محصول قرار می‌گرفتند اندازه‌گیری شد که نمونه‌ای از نمودارهای تغییرات دمای سطح محصول تابعی از زمان خشک شدن در قسمت نتایج آورده شده است. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شدند که فاکتور اول عبارت از دمای سطح محصول در سه سطح (50، 65 و 75 درجه سانتی گراد) و فاکتور دوم عبارت از ضخامت ورقه‌های موز در دو سطح (4 و 6 میلی‌متری) بود. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند. پس از اعمال تنظیمات مورد نظر روی خشک کن در هر آزمایش، 100 گرم نمونه آماده شده به صورت لایه نازک روی دو سینی توری در داخل خشک کن قرار داده شدند. یکی از سینی‌ها به ترازو دیجیتالی متصل بود که این ترازو در فواصل زمانی 5 دقیقه، از طریق یک اتصال RS232 به یک واحد کامپیوتر، اقدام به داده برداری از جرم نمونه‌های در حال خشک شدن می‌کرد. سینی دوم در امتداد سینی اول قرار داشت ولی به ترازو متصل نبود. از نمونه‌های روی سینی دوم در رطوبت‌های مختلف

و دستی آنها روی بدنه رادیاتورها و در فواصل زمانی مختلف استفاده شد و با استفاده از یک دستگاه دیمبر صنعتی، ولتاژ ورودی به رادیاتورها جهت حصول دمای مورد نظر کنترل شد. همچنین تغییر دمای رادیاتورهای مادون قرمز توسط دیمبر مربوطه صورت گرفت تا دمای حداکثر مذکور روی محصول قابل حصول باشد. کنترل دمای سطح

(الف)



آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های موز روزانه از بازار محلی خریداری و تا زمان شروع آزمایش‌ها در دمای 13 درجه سانتی گراد نگهداری شدند. نمونه‌ها پس از برش به صورت ورقه‌های نازک به ضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متری، در آب گرم با دمای 88 درجه سانتی گراد به مدت 3 دقیقه بلانچ و سپس به مدت یک دقیقه در محلول 0/1 درصد اسید سیتریک غوطه‌ور شدند و در نهایت با استفاده از کاغذ صافی رطوبت سطحی نمونه‌ها گرفته شد (زیرجانی و توکلی‌پور، 1389). این پیش تیمار برای کاهش تغییرات رنگ محصول حین خشک شدن انجام شد. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌های موز بر اساس استاندارد AOAC در آن با دمای 105 ± 2 درجه سانتی گراد به مدت 24 ساعت اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

آزمون خشک شدن موز

برای انجام آزمایش‌های خشک کردن، ابتدا دمای هوای گرم مورد استفاده با استفاده از دیمبر مربوطه در حدود 55 درجه سانتی گراد با دقت ± 1 درجه سانتی گراد تنظیم و سرعت جریان هوای گرم با استفاده از سرعت سنج پره‌ای در حدود 0/7 متر بر ثانیه تنظیم شد. با تغییر ولتاژ ورودی به رادیاتورها، دمای رادیاتورها به نحوی تغییر داده شد تا دماهای

شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک، برای ارزیابی شاخص‌های کیفی شامل تغییرات حجم، دانسیته ظاهری، چروکیدگی و مشخصه‌های رنگ استفاده شد.

سینتیک خشک شدن ورقه‌های موز و مدل سازی آن

پس از انجام آزمایش‌های مرتبط با سینتیک خشک شدن لایه نازک موز، مدل‌های ریاضی فرایند خشک شدن آنها در خشک‌کن ترکیبی توسعه داده شد. برای این منظور ابتدا منحنی‌های خشک شدن ورقه‌های موز به صورت تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان ترسیم شد. نسبت رطوبت، مقدار رطوبت نمونه‌ها را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه بیان می‌کند که در هر لحظه از معادله 1 محاسبه گردید (Cakmak

and Yildiz, 2011). رطوبت اولیه موز 3/48 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک به دست آمد. برای انطباق داده‌های آزمایشی با مدل‌های مختلف مورد استفاده برای بیان سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی، از مدل‌های موجود در جدول 1 استفاده شد (Doymaz, 2007).

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

در این رابطه MR نسبت رطوبت (بدون واحد)، M_t رطوبت محصول در هر زمان مورد نظر و M_0 رطوبت اولیه محصول می‌باشد. MR: نسبت رطوبت، t : زمان خشک شدن، a, b, c, k, K_0, K_1 و n اعداد یا ثابت‌های مدل‌ها هستند.

جدول 1- مدل‌های ریاضی فرایند خشک شدن لایه نازک میوه‌ها

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
1	نیوتون	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	پیچ	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
3	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-k \cdot t)^n$
4	هندرسون و پابلیس	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
5	لگاریتمی	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
6	دوجمله‌ای	$MR = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$
7	دو جمله‌ای نمائی	$MR = a * \exp(-k \cdot t) + \exp(-n \cdot t)$
8	وانگ سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
9	میدلی و همکاران	$MR = a * \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

مدل‌های مذکور در محیط نرم افزار متلب بر روی داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها اعمال و ضرایب مدل‌ها استخراج شدند. از شاخص‌های آماری مناسب شامل ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان ملاک‌های ارزیابی میزان انطباق مدل استفاده شد (Doymaz and Pala, 2002). مدلی که بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و کمترین جملات مدل را داشت به عنوان بهترین مدل انتخاب و سپس مدل‌های به دست آمده در شرایط مختلف آزمایش شامل دماها و ضخامت‌های مختلف با یکدیگر تلفیق شده و ضرایب مدل چندگانه به صورت تابعی از متغیرهای مستقل مذکور محاسبه شدند.

اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ

رنگ میوه‌های خشک شده یکی از ملاک‌های مهم در ارزیابی خشک‌کن، انتخاب مناسب‌ترین نوع آن، تعیین مشخصه‌های عملکردی آن و نیز کیفیت محصول نهایی می‌باشد. بنابراین شاخص‌های رنگ میوه‌های خام و نیز رنگ آنها در حین خشک شدن ارزیابی شد. برای این منظور در سطوح رطوبتی مختلف شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک، چهار ورقه موز به صورت تصادفی از خشک‌کن خارج و با استفاده از دستگاه هانتربل از آنها عکس برداری شد. در ادامه هر یک از عکس‌ها در محیط نرم‌افزار فتوشاپ فراخوانی شده و شاخص‌های رنگ از قبیل L^* ، a و b که به ترتیب بیان‌گر مقدار شفافیت، قرمزی و سبزی و نهایتاً زردی و آبی بودن نمونه‌ها می‌باشند، قرائت و تفاوت رنگ کل نمونه‌های خشک شده با نمونه‌های تازه به

تغییرات دانسیته ظاهری

علاوه بر مدل‌سازی فرایند خشک شدن ورقه‌های نازک موز، مطالعه تغییرات کیفی محصول خشک شده هم از اهمیت بالایی برخوردار بود. به طوری که برای محاسبه دانسیته ظاهری، حجم نمونه‌های موز طی فرایند شدن در رطوبت‌های مختلف شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک اندازه‌گیری شد.

تغییرات دانسیته ظاهری

www.SID.ir

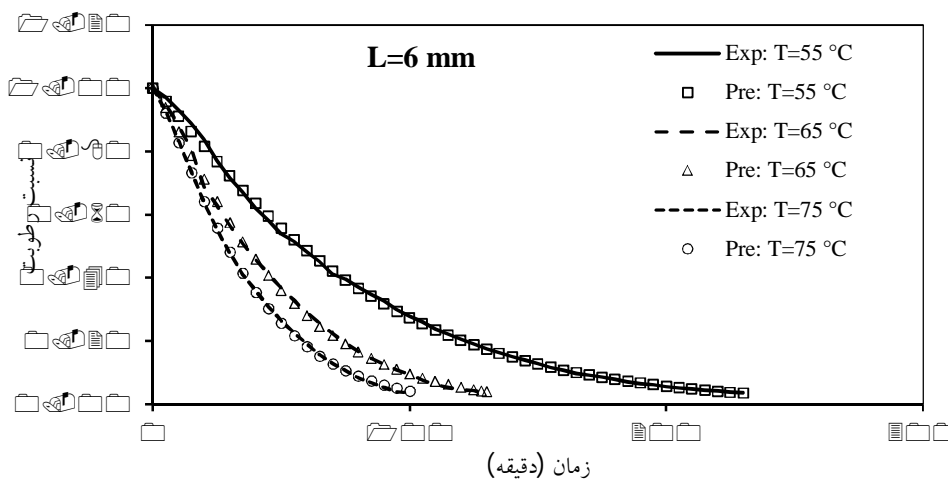
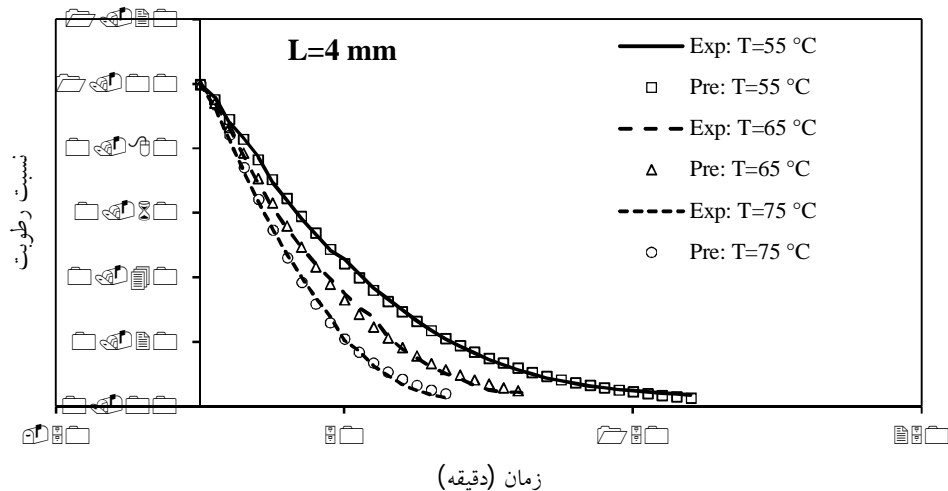
نتایج و بحث

سینتیک خشک شدن ورقه های موز

فرآیند خشک کردن ورقه های موز در دما و ضخامت های مختلف با استفاده از خشک کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم انجام شد و سینتیک خشک شدن آنها به صورت تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان رسم گردید (شکل 2).

عنوان معیاری برای بیان مقدار تغییرات رنگ کلی (ΔE) در طی خشک کردن، توسط رابطه (2) محاسبه گردید. در این معادلات زیر نویس های 0 و 1 به ترتیب بیانگر مشخصه های رنگ موز تازه و خشک شده می باشند (Yildiz et al., 2001).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2} \quad (2)$$



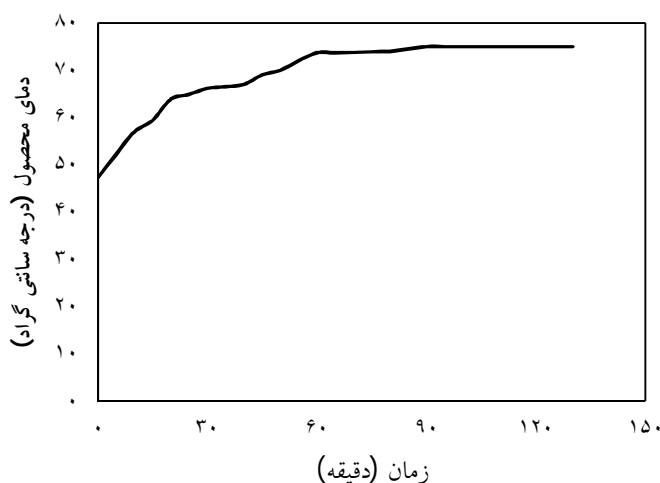
شکل 2- منحنی خشک شدن لایه نازک موز در دماهای مختلف سطح محصول و ضخامت های مختلف برای داده های تجربی و پیش بینی شده توسط مدل پیچ

خشک شدن میوه ها مربوط به دمای سطح محصول 75 درجه سانتی گراد و ضخامت 4 میلی متر می باشد و منحنی این تیمار از شیب تندتری نسبت به سایر تیمارها برخوردار است. همچنین نتایج نشان می دهد زمان خشک شدن میوه ها با افزایش دمای سطح میوه ها کاهش می یابد. به طوری که با افزایش دمای سطح محصول از 55 درجه سانتی گراد به

در این نمودارها علامت T دمای سطح محصول و L_1 و L_2 به ترتیب ضخامت 4 و 6 میلی متر ورقه های موز را نشان می دهد. همان طوری که منحنی ها نشان می دهند نسبت رطوبت نمونه ها (خطوط پیوسته و منقطع در شکل 2) طی فرآیند خشک کردن به صورت یک تابع نمایی با تغییرات زمان خشک شدن کاهش می یابد. کمترین زمان

گزارش کردند که بسیار طولانی‌تر از زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز به روش ترکیبی مادون قرمز- هوای به‌دست آمده در تحقیق حاضر می‌باشد که این امر موید ارجحیت روش خشک‌کردن ترکیبی می‌باشد. Pekke و همکاران (2013) نیز با مقایسه خشک‌کردن ورقه‌های موز به دو روش هوای گرم و مادون قرمز نشان دادند که خشک‌کردن نمونه‌ها به روش مادون قرمز سریعتر از هوای گرم انجام می‌شود زیرا در این روش نمونه‌ها سریعتر گرم شده و دمای آنها در زمان کمتری به دمای مورد نظر می‌رسد.

شکل 3 تغییرات دمای سطح محصول را در طول خشک‌کردن محصول با دمای 75 درجه سانتی‌گراد بصورت تابعی از زمان خشک شدن نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود دمای سطح محصول به دلیل تاثیر گرمای نهان تبخیر به‌صورت تدریجی افزایش یافته و پس از 80 دقیقه به دمای 75 درجه سانتی‌گراد رسیده است.



شکل 3- تغییرات دمای سطح محصول تابعی از زمان در طول خشک‌کردن با دمای 75 درجه سانتی‌گراد

کند.

مدل منفرد توسعه داده شده از ترکیب مدل‌های جدول 3 در شرایط مختلف آزمایش شامل دماها و ضخامت‌های متفاوت نمونه موز حاصل شده و توسط رابطه 4 نشان داده شده است که در آن L ضخامت ورقه‌های موز بر حسب متر و T دمای سطح محصول بر حسب کلوین می‌باشد. این مدل می‌تواند در ضخامت‌های مختلف نمونه در محدوده 4 تا 6 میلی‌متر و در دماهای مورد استفاده منابع مادون قرمز (در محدوده 55 تا 75 درجه سانتی‌گراد) نسبت به پیش‌بینی میزان رطوبت محصول در حین فرآیند خشک‌کردن ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.

$$MR = \exp[-(0.02008 + 7.07 \times 10^{-5} \times T + 0.869 \times L)^{(0.850089 + 0.00185 \times T - 47.3333 \times L)}] \quad (4)$$

75 درجه سانتی‌گراد، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن نمونه‌های مدور موز در ضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متر به ترتیب 88/4 و 128/4 دقیقه کاهش یافت. همچنین در یک دمای ثابت، زمان خشک شدن نمونه‌ها با افزایش ضخامت آنها، افزایش یافت. به‌طور میانگین با افزایش ضخامت نمونه‌ها از 4 به 6 میلی‌متر، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن نمونه‌ها در دماهای 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد به ترتیب 60، 16/7 و 20 دقیقه افزایش یافت.

Swasdisevi و همکاران (2009) طی خشک‌کردن ورقه‌های موز به روش ترکیبی FTIR و خلایبی تاثیر ضخامت ورقه‌های موز از 2 به 4 میلی‌متر در دمای 50 درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت تاثیر معنی‌داری روی زمان خشک شدن دارد. Thuwapanichayanan و همکاران (2011) زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز با ضخامت 3 میلی‌متر و با هوای گرم با دمای 70، 80، 90 و 100 درجه سانتی‌گراد را به ترتیب 400، 140، 100 و 75 دقیقه

مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن

برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن موز، مدل‌های ارایه شده در جدول 1 روی داده‌های تجربی برازش شدند و شاخص‌های آماری به‌دست آمده در شرایط مختلف خشک‌کردن در جدول 2 ارایه شد. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE در مدل پیچ به‌دست آمد. بنابراین این مدل به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک‌کردن موز در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم انتخاب شد که ضرایب آن در جدول 3 ارایه شده است. در شکل 2 مقادیر داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل منفرد (مدل رگرسیونی چندگانه) نشان داده شده است. هم‌بستگی خوبی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده وجود دارد که مدل پیچ توانسته است در پیش‌بینی رطوبت محصول تابعی از زمان فرآیند به‌خوبی عمل

جدول 2- میانگین شاخص‌های آماری حاصل از برازش منحنی‌های خشک کردن ورقه‌های موز در تیمارهای مختلف

مدل	RMSE	R ²
نیوتون	0/036346	0/997357
بیج	0/009163	0/999523
بیج اصلاح شده	0/036346	0/997357
هندرسون و پابلیس	0/096392	0/995118
لگاریتمی	0/013999	0/998904
دوجمله‌ای	0/013382	0/998696
دو جمله‌ای نمائی	0/028026	0/995904
وانگ اسپینگ	0/013842	0/998908
میدلی	0/013121	0/998568

جدول 3- مقادیر ثابت و ضرایب مدل بیج در دما و ضخامت‌های مختلف

دما (°C)	ضخامت (mm)	K	n	R ²
55	4	0/006972	1/217	0/9995
65	6	0/006598	1/147	0/9992
75	4	0/007735	1/269	0/9982
55	6	0/009244	1/203	0/9999
65	4	0/007231	1/373	0/9984
75	6	0/01131	1/225	0/9997

بررسی دانسیته ظاهری نمونه‌های موز خشک شده

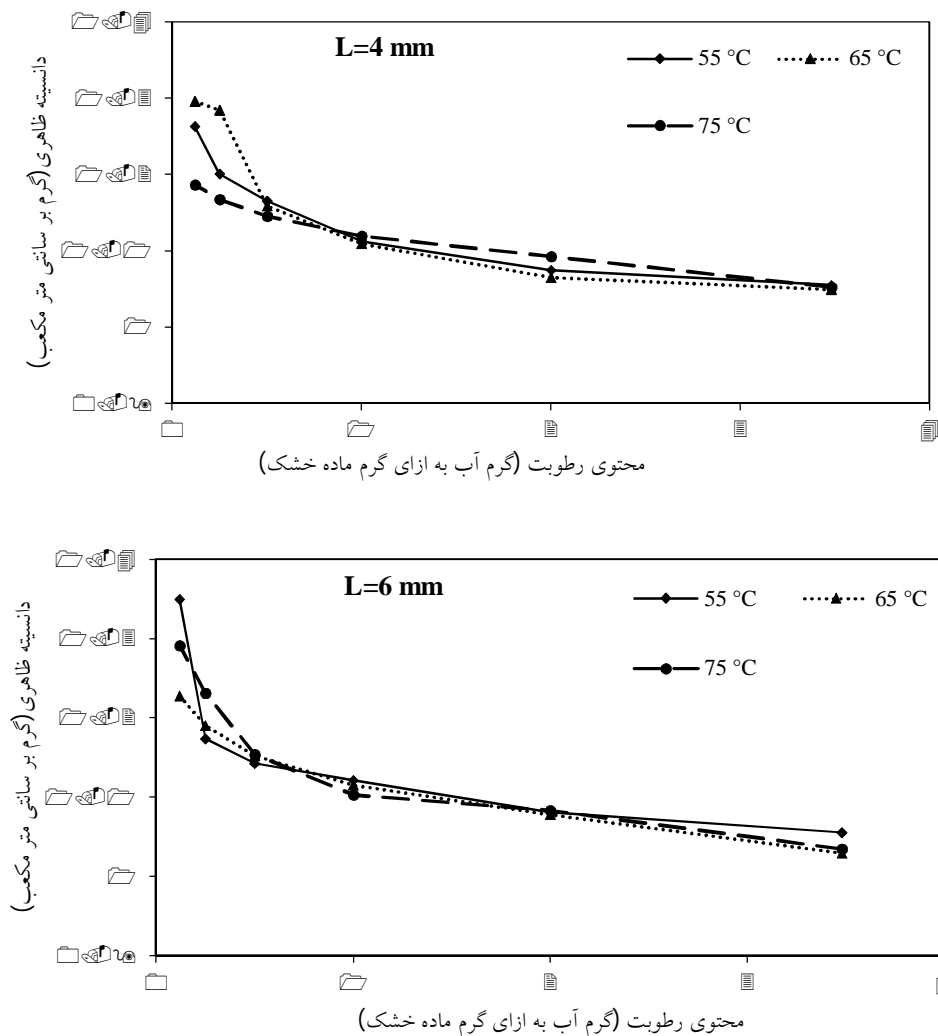
شکل 4 تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های موز را به صورت تابعی از محتوی رطوبت خشک پایه در طی فرآیند خشک شدن نشان می‌دهد. با کاهش محتوی رطوبت، دانسیته ظاهری در تیمارهای مختلف افزایش می‌یابد. علت افزایش دانسیته ظاهری، کاهش بیشتر حجم موز در مقایسه با مقدار آب خارج شده از داخل ماده غذایی در بازه زمانی مورد نظر است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتورهای دمای سطح محصول و ضخامت ورقه‌های موز اثر معنی‌داری بر روی تغییرات دانسیته ظاهری ندارند (جدول 4). با این حال بیشترین و کمترین مقدار دانسیته ظاهری موز خشک شده به ترتیب مربوط به دمای 55 درجه سانتی‌گراد و ضخامت 6 میلی‌متر و دمای 75 و ضخامت 4 میلی‌متر

می‌باشد. چندین محقق از قبیل Talla و همکاران (2004)، Fernandez و همکاران (2008)، Koc و همکاران (2008)، Ortuno و همکاران (2010) و قربانی و همکاران (1392) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند به طوری که در محصولاتی مانند موز، آناناس و به و پرتقال و آلو تحرک ماتریکس جامد در حین خشک شدن و به تبع آن چروکیدگی محصول در مقابل میزان تغییرات رطوبت طوری است که در پایان فرآیند موجب افزایش دانسیته محصول می‌گردد که مشابه نتیجه تحقیقات حاضر است. این درحالی است که در بعضی از محصولات مانند سیب و سیب‌زمینی، مقدار حجم کاهش یافته در مقایسه با حجم آب تبخیر شده در طول فرآیند خشک کردن کمتر و به تبع آن دانسیته محصول نسبت به وضعیت اولیه، کاهش می‌یابد.

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای سطح محصول و ضخامت نمونه‌ها بر روی دانسیته ظاهری نمونه‌های موز خشک شده

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
دمای سطح محصول	2	0/007051 ns
ضخامت	1	0/007459 ns
اثر متقابل دمای سطح محصول و ضخامت	2	0/013578 ns
بلوک	2	0/000663 ns
خطا	10	0/015372

ns نشان دهنده عدم معنی‌دار بودن می‌باشد



شکل 4- تغییرات دانشیته ظاهری نمونه‌های موز را به صورت تابعی از محتوی رطوبت خشک پایه

محصول و ضخامت نمونه‌ها اثر معنی‌داری در سطح احتمال 1 درصد روی شاخص‌های رنگ مذکور دارند (جدول 5). نتایج مقایسه میانگین اثر دمای سطح محصول بر روی شاخص‌های رنگ از قبیل شفافیت، زردی و قرمزی در جدول 6 ارائه شده است. بر اساس نتایج با افزایش دمای سطح محصول از شفافیت میوه‌ها کاسته شده و بر میزان قرمزی آنها افزوده شده است. همچنین با افزایش ضخامت نمونه‌ها نیز رنگ میوه‌ها کدرتر شده است که دلیل آن طولانی بودن زمان خشک‌شدن و تاثیر حرارت بر رنگ دانه‌ها در طول زمان‌های بالای خشک شدن می‌باشد (جدول 7).

تغییرات شاخص‌های رنگ در حین خشک شدن شاخص‌های شفافیت، قرمزی و زردی

نتایج مطالعه شاخص‌های رنگ نمونه‌های موز نشان می‌دهد که با پیشرفت خشک کردن و کاهش رطوبت محصول، مقادیر شاخص‌های شفافیت (L) و زردی (b) به صورت تابعی از محتوی رطوبت ماده کاهش می‌یابند. ولی شاخص قرمزی (a) در طول فرآیند افزایش یافته و بر میزان شدت قرمزی ماده افزوده می‌شود. به طور کلی در طول خشک کردن رنگ محصول تیره‌تر می‌شود که به دلیل تغییر در رنگ دانه‌ها، واکنش قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (میلارد) و کاراملیزاسیون می‌باشد. همان طوری که نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد دمای سطح

جدول 5- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای سطح محصول و ضخامت نمونه‌ها بر روی شاخص‌های رنگ موز خشک شده

ΔE	میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
	b	a	L		
120/917**	7/2625**	2/00914**	128/782**	2	دمای سطح محصول
48/23**	25/7602**	1/20988**	29/219**	1	ضخامت
0/857 ^{ns}	1/4165*	0/00765 ^{ns}	0/159 ^{ns}	2	اثرات متقابل دمای سطح محصول و ضخامت
0/412	0/1610	0/00617	0/661	2	بلوک
0/238	0/3370	0/02632	0/387	10	اشتباه

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال 1 و 5 درصد است.

^{ns} نشان دهنده عدم معنی‌دار بودن می‌باشد.

جدول 6- مقایسه میانگین اثر دمای سطح محصول روی شاخص‌های رنگ

ΔE	ب زردی	قرمزی a	شفافیت نهایی (L)	دمای سطح محصول (°C)
28/99 ^A	19/25 ^A	4/41 ^A	94/25 ^A	55
35/59 ^B	18/35 ^B	5/33 ^B	18/83 ^B	65
37/57 ^C	17 ^C	5/47 ^B	17/24 ^C	75

حروف متفاوت نشان دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد می‌باشد.

جدول 7- مقادیر شاخص‌های رنگ در ضخامت‌های مختلف ورقه‌های موز

ΔE	b	a	L	ضخامت
33/41	19/42	4/81	21/94	4
35/69	17/02	5/33	19/39	6

تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها

تغییرات کلی رنگ اولیه اسلایس‌های موز نسبت به انتهای فرآیند خشک کردن، تابع میزان تغییرات توام شاخص‌های رنگی L ، a و b است به طوری که هرچه مقدار تغییرات این شاخص‌ها در طول فرآیند خشک کردن بیشتر باشد مقدار تغییر رنگ کلی نیز افزایش می‌یابد که بزرگی داده‌ها نشانگر کاهش کیفیت و میزان صدمات در طول فرآیند خشک کردن می‌باشد. به وضوح می‌توان اظهار نمود استفاده از شاخص تغییر رنگ کلی (ΔE) برای بیان تغییرات کیفی (رنگ) بهتر از استفاده منفرد از مقادیر a ، b و L می‌باشد. بر مبنای نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها (جدول 5 و 6)، با افزایش دما تغییرات کلی رنگ افزایش یافته است. ضخامت نیز تأثیر مشابهی داشته و افزایش آن موجب افزایش رنگ کلی نمونه‌ها از 33/41 به 35/69 گردید.

Thuwapanichayanan و همکاران (2011) بیان داشتند که طی فرآیند خشک کردن همرفتی ورقه‌های موز، افزایش دمای هوای گرم از 70 به 90 درجه سانتی‌گراد تأثیر معنی‌داری در شاخص‌های رنگ نمونه‌ها نداشت ولی افزایش بیشتر دما از 90 به 100 درجه سانتی‌گراد منجر به قهوه‌ای‌تر شدن ورقه‌های موز گردید. Baini و Langrish

(2009) نیز گزارش کردند که افزایش دمای هوا از 50 به 80 درجه سانتی‌گراد تأثیر محسوس روی آهنگ قهوه‌ای شدن ورقه‌های موز نداشت. ولی افزایش دمای هوا به 100 درجه سانتی‌گراد روی شاخص‌های رنگ تأثیرگذار بود. Pekke و همکاران (2013) طی خشک کردن ورقه‌های موز به دو روش هوای گرم و مادون قرمز گزارش کردند که تغییر رنگ نمونه‌های موز در خشک کردن به روش مادون قرمز بیشتر از خشک کردن با هوای گرم است. به طوری که در ضخامت 5 میلی‌متر، شاخص تغییرات رنگ کلی ورقه‌های موز با افزایش دمای هوای گرم از 60 به 80 درجه سانتی‌گراد از 21 به 26 افزایش یافت ولی میزان افزایش آن در خشک کردن به روش مادون قرمز و در دمای یکسان از 25 به 37 بود. به عبارت دیگر می‌توان عنوان نمود که در موقع استفاده از خشک کن مادون قرمز و ترکیبی، مقادیر تغییر رنگ کلی در محدوده 30 تا 40 قرار می‌گیرد و دلیلی اصلی آن افزایش جذب امواج مادون قرمز در لایه سطحی محصول و به تبع آن افزایش دمای سطحی محصول و بروز تغییر در ساختار رنگ دانه‌ها و نهایتاً تغییر رنگ کلی می‌باشد.

به طوری که برای جلوگیری از تغییرات رنگ محصول در حین فرآیند خشک کردن استفاده از دمای سطح محصول 55 درجه سانتی‌گراد و

انتظار می‌رفت خشک‌کن ترکیبی از نظر کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی از دیدگاه کاهش چروکیدگی و دانسیته ظاهری، نسبت به روش همرفتی منفرد جذاب‌تر می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد زمان فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز تحت تأثیر حداکثر دمای سطح محصول تابعی از دمای منبع مادون قرمز و هوای گرم و ضخامت نمونه‌ها قرار دارد. به طوری که زمان فرآیند نسبت به روش‌های همرفتی هوای گرم کوتاه‌تر می‌باشد. همچنین استفاده از دماهای مختلف مادون قرمز تأثیر معنی‌داری روی چروکیدگی نهایی نمونه‌ها ندارد ولی شرایط مختلف خشک‌کردن روی کیفیت ظاهری نمونه‌های موز معنی‌دار بود و با افزایش دمای منبع مادون قرمز و هوای گرم مقدار تغییر رنگ کلی افزایش می‌یابد که یک نکته منفی از دیدگاه مصرف‌کننده نهایی است. مدل پیچ بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک‌شدن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم ورقه‌های موز، با بیشترین مقدار R^2 و حداقل مقدار RMSE می‌باشد.

ضخامت 4 میلی‌متر ورقه‌های موز ارجح‌تر می‌باشند. این در حالیست که در این تیمار، زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز طولانی‌تر می‌باشد. با این وجود برای حفظ کیفیت مطلوب میوه‌های خشک شده به خصوص حفظ رنگ آنها، لازم است از دمای سطح محصول پایین استفاده شود زیرا رنگ محصول اولین شاخص در مشتری‌پسندی محصول بوده و مصرف‌کننده‌ها بیشتر به شفافیت و رنگ محصول اهمیت می‌دهند. برای جبران طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن و نیز برای جلوگیری از مصرف انرژی بیشتر، استفاده از ضخامت‌های کمتر اسلایس‌ها (کمتر از 4 میلی‌متر) توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز - هوای گرم توسعه داده شد و برای آزمون و ارزیابی آن، سینتیک خشک‌شدن لایه نازک موز با استفاده از خشک‌کن مذکور مورد بررسی قرار گرفت. چنانکه

منابع

- امیرنجات، ح.، 1389، ارزیابی اثرات توأم روش‌های جابه‌جایی حرارت و تابش اشعه مادون قرمز بر خشک‌کردن لایه نازک قارچ خوراکی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.
- موسوی بایگی، ف.، فرهمند، ع.، تقی‌زاده، م. و ضیا فروغی، 1، 1395، مدل سازی خشک‌کردن لایه نازک خرما لوله به دو روش هوای داغ و مادون قرمز، فصلنامه علوم و صنایع غذایی، دوره 13، شماره 53، 161-171.
- بداقی، ا.، 1392، طراحی و ساخت خشک‌کن آزمایشگاهی ترکیبی مادون قرمز هوای گرم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
- زیرجانی، ل. و توکلی پور، ح.، 1389، مطالعه امکان تولید برگه موز توسط روش خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم و ماکروویو، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، جلد 66، شماره 1، 73-86.
- حسینی‌قاپوس، س.، سیدین‌اردبیلی، م.، کاشانی‌نژاد، م.، اسدی، غ. و اعلمی، م.، 1395، سینتیک انتقال جرم خشک‌کردن ترکیبی مادون قرمز - هوای داغ کدو حلواپی، علوم غذایی و تغذیه، دوره 13، شماره 4، 5-16.
- قربانی، ر.، دهقان‌نیا، ج.، سیدلو هریس، س. و قنبرزاده، ق.، 1392، مدل سازی دانسیته ظاهری در طی خشک کردن آلوی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبیگری اسمزی. فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، دوره 1، شماره 2، 23-38.
- کریمی، ف.، 1390، مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های موز، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

AOAC, 1990, Official Method of Analysis, Association of Official Analytical Chemists (No.934.06).

Baini, R., & Langrish, T. A. G., 2009, Assessment of colour development in dried bananas measurements and implications for modelling. *Journal of Food Engineering*, 93, 177-182.

Cakmak, G. & Yildiz, C., 2011, the drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 103-108.

Doymaz, I. & Pala, M., 2002, the effect of dipping pretreatment on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52: 413-417.

Doymaz, I., 2007, the kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.

Fernandez, F. A.N., Linhares J.F.E. & Rodrigues, S., 2008, Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Son chemistry*, 15, 1049-1054.

Hakan, O.M. & Can, E., 2006, Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119-125.

Hebbbar, U.H., Vishwanatham, K.H. & Ramesh, M.N., 2004, combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal*

- of *Food Engineering*, 65, 557-563.
- Khampakool, A., Soisungwan, S., & Sung 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.
- Koc, B., Eren, I. & Ertekin, F. K., 2008, Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.
- Ortuno, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A. & Riera, E., 2010, Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 3, 153-159.
- Pan, Z. & Atungulu, G. G., 2011, Infrared heating for food and agricultural processing. *Taylor & Francis Group*, 5, 353-360.
- Pekke, M.A., Pan, Z., Atungulu, G.G., Gary Smith, G., & Thompson, J.F., 2013, Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. *International Journal of Agricultural and Biology Engineering*, 6 (3), 58-70.
- Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B., 2005, Thin-layer infrared radiation drying of onion slice. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.
- Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P. & Soponronnarit, S., 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92, 100-106.
- Talla, A., Puiggali, J.-R., Jomaa, W. & Jannot, Y., 2004, Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64, 103-109.
- Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Jaruwan Kunwisawa, J., & Soponronnarit, S., 2011, Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1502-1510.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I., 2001, Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J. & Oliveira, F.A.R., 2008, Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84, 430-4.

Development, assessment and evaluation of a combined infrared and hot-air dryer to determine its performance characteristics during banana slice drying

P. Ahmadi Gheshlagh¹, S. S. Seiedlou^{2*}, H. Nalbandi³

Received: 2018.10.30

Accepted: 2019.05.08

Introduction: Thin layer drying of agricultural products using an infrared dryer (IR) is one of the interesting and low cost methods of dehydration. Quality of dried products could be increased if the engineering aspects and proper selection of performance parameters be well considered in the designing of a dryer. The dryer that uses two or more drying methods in combination, produces in the most cases the higher quality product with lower energy consumption.

Materials and methods: In this study, an available IR dryer was modified and a combined IR and hot-air dryer was constructed. According to the reported quality factors in the literatures and market desire, the developed dryer performance was evaluated during the drying of banana slices. The studied factors were the effects of the thickness of slices (4 and 6 mm) and the surface temperature of the product (55, 65 and 75 °C) on the drying kinetic and quality of the dried product. Some various mathematical models were fitted to the experimental data and results and among them the best fitted model was selected.

Results & discussion: Based on the results, the different surface temperature and thickness of the slices had a significant effect on the drying time and color changes of the samples. However, they did not affect the density of samples. Drying time of the banana slices (to reach the moisture ratio of 0.04) with the thickness of 4 mm was 155, 105 and 80 min at the surface temperatures of 55, 65 and 75 °C, respectively. At the thickness of 6 mm, the drying time was 230, 130 and 100 min, respectively at the mentioned temperature. The minimum color change were observed at the thickness of 4 mm ($\Delta E=32.41$) and surface temperature of 55°C ($\Delta E=28.99$). The samples dried at the temperature of 55 °C had the best quality. Evaluation of the various mathematical models indicated that the Page model is the most suitable to predict the drying kinetic of banana slices under the studied condition. Comparing the obtained results with the reported ones for just hot-air or IR drying of banana slices; it is obvious that in point of product quality and drying time, the combined IR and hot-air dryer has better conditions.

Key words: Mathematical Model, Banana, Combined IR and Hot-Air Dryer, Qualitative Properties

1. MSc student, Technical and Vocational University Beheshti of Urmia.

2 and 3. Associate Professor and Assistant Professor, Department of agricultural mechanization engineering, University of Tabriz.

*(Corresponding author: email: ss_seiedlo@yahoo.com)