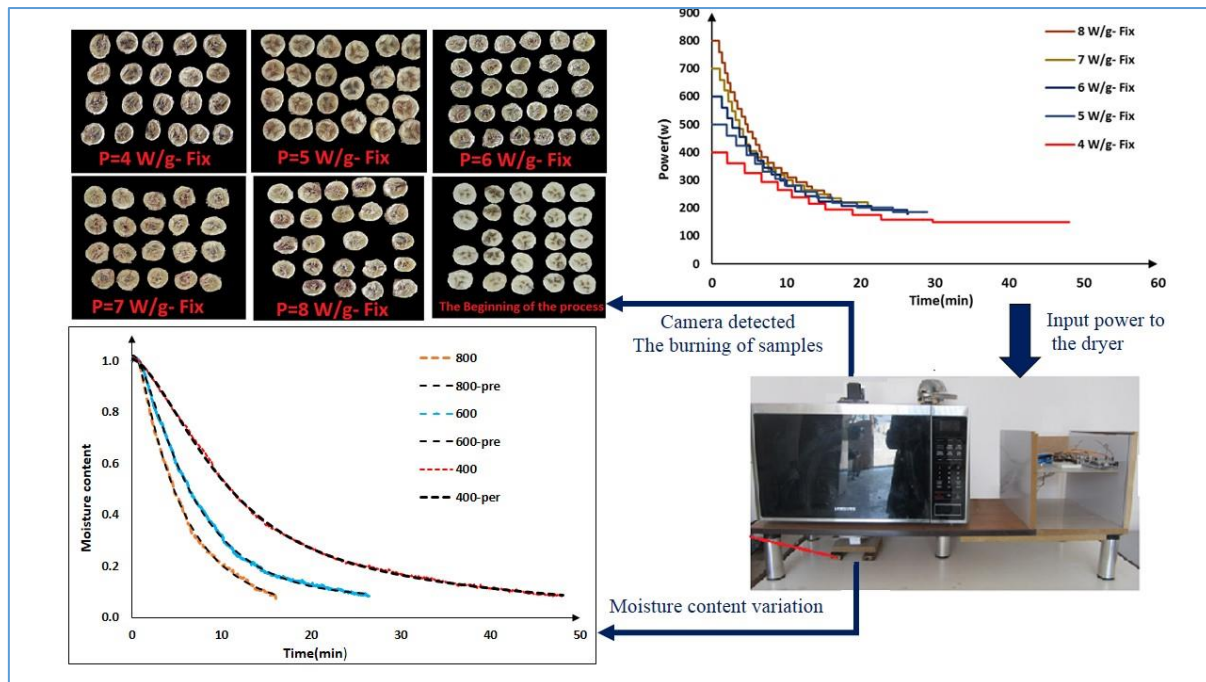


Developing the Microwave- Hot Air Dryer with Power Density Control System Using Kinetic Modeling of Banana Slice

Masumeh Sabzevari¹, Nasser Behroozi-Khazaei^{1*}, Hossein Darvshi¹

1. Biosystems Engineering Department, Agriculture Faculty, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(Received: Oct. 13, 2020- Revised: Dec. 20, 2020- Accepted: May 25, 2021)



ABSTRACT: A microwave-hot air dryer with online microwave power density control was developed for banana slice drying in the present study. This dryer consisted of the online mass measurement, imaging unit, and microwave power control circuit systems. The microwave power control system was set with an Arduino board, SSR relay, and control program in MATLAB environment. Experiments with five levels of fixed power density (4, 5, 6, 7, and 8 Wg⁻¹) were done for examining the kinetics of moisture content and microwave power during the drying process. Also, an image processing algorithm was investigated for measuring the burning percentage of banana slices. For modeling of moisture content kinetics, seven mathematical models were nominated. Results showed that the Logarithmic model could predict the drying kinetics of banana slices better than the other models with the highest R² (0.9966-0.9831) and lowest RMSE (0.01646-0.02679). Also, the trend of microwave power with time for constant remaining the microwave power density during the drying process such as moisture content variation in all experiments was exponential. Quality evaluation of the final product showed that treatments with power densities of 6, 7, and 8 had 12, 24, and 29% burns, respectively, compared to treatments of 4 and 5 without burns.

Keywords: Power density, Microwave power control, Machine vision, Quality.

توسعه خشک کن مایکروویو- جریان هوای گرم با سامانه کنترل چگالی

توان برای مدل سازی سینتیک خشک شدن برگه موز

معصومه سبزواری^۱، ناصر بهروزی خزائی^{۱*}، حسین درویشی^۱

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۳۰- تاریخ تصویب:

۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده: در این پژوهش یک خشک کن مایکروویو-جریان هوای گرم با سامانه کنترل برخط چگالی توان برای خشک کردن برگه موز توسعه داده شد. این خشک کن دارای بخش‌های اندازه‌گیری برخط جرم، تصویربرداری و مدار کنترل توان مایکروویو می‌باشد. کنترل توان مایکروویو توسط یک سامانه شامل برد آردینو، رله حالت جامد (SSR) و برنامه کنترلی در محیط MATLAB انجام گرفت. در این پژوهش آزمایش‌ها با پنج سطح چگالی توان ثابت ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ وات بر گرم برای بررسی سینتیک تغییرات محتوای رطوبتی و توان ورودی به مایکروویو انجام گرفت. همچنین یک الگوریتم پردازش تصویر برای محاسبه درصد سوختگی برگه‌های موز توسعه داده شد. برای مدل سازی تغییرات محتوای رطوبتی از ۷ مدل ریاضی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی با بیشترین مقادیر R^2 (۰/۹۹۶۶/۹۸۳۱) و کمترین مقادیر RMSE (۰/۰۱۶۴۶ - ۰/۰۲۶۷۹) دارای بهترین دقت مدل سازی برای داده‌ها آزمایشگاهی می‌باشد. همچنین روند تغییرات توان با زمان برای ثابت ماندن چگالی توان در حین فرآیند، مانند تغییرات محتوای رطوبتی در همه تیمارها شکل نمایی به خود گرفت. ارزیابی کیفی محصول نهایی نشان داد که تیمارهای با چگالی توان ۶، ۷ و ۸ وات بر گرم بترتیب دارای ۱۲، ۲۴ و ۲۹ درصد سوختگی در مقایسه با تیمارهای ۴ و ۵ وات بر گرم بدون سوختگی بودند.

واژه‌های کلیدی: چگالی توان، کنترل توان مایکروویو، بینایی ماشین، کیفیت

مقدمه

فرآیند خشک کردن یکی از شناخته شده ترین و مهم ترین روش های محافظت از محصولات کشاورزی پس از برداشت است. برای تولید محصول بهتر از نظر کیفی، نیاز به خشک کردن در شرایط عملیاتی مناسب و کنترل شده است. انجام صحیح عملیات خشک کردن به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی اهمیت زیادی دارد. برای کاهش آب مواد غذایی به منظور افزایش عمر ماندگاری به ویژه مواد غذایی دارای ترکیبات قندی (نظیر میوه ها)، نیازمند زمان طولانی و دمای نسبتا بالا می باشد که همین عوامل موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب می شوند که از جمله می توان به تغییرات رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (به علت چروکیدگی شدید) و کاهش ظرفیت آبیگری مجدد محصول خشک شده اشاره کرد (Askari et al., 2009).

معمول ترین روش خشک کردن صنعتی، خشک کردن به روش جریان هوای گرم است. خشک شدن مواد غذایی با هوای گرم، یک فرآیند ساده اما آهسته است. این فرآیند شامل توزیع یکنواخت هوای گرم بر روی بستر ماده خشک شونده است که سبب کاهش رطوبت ماده غذایی می گردد. با این حال، این روش معایبی نظیر کاهش کیفیت محصول، کاهش ظرفیت باز جذب آب، کاهش راندمان انرژی، افزایش زمان خشک شدن و سفت شدن بافت محصول را دارد (Song et al., 2017). یکی از روش ها برای رفع ایرادات خشک کردن به روش هوای گرم استفاده از انرژی میکروویو می باشد.

در خشک کن های میکروویو نرخ از دست دادن رطوبت، انتقال جرم و حرارت سریع تر از روش های خشک کردن مرسوم است. در نتیجه، این نوع خشک کن ها باعث کاهش چشم گیری در زمان و انرژی مصرفی در فرآیند خشک کردن می شوند (Li et al., 2011). با این حال، این روش معایبی نیز مانند افزایش بی رویه دما، کاهش کیفیت محصول و حذف نشدن رطوبت از سطح

محصول را دارد (Kone et al., 2013). یکی از روش هایی که با استفاده از آن می توان از کاهش کیفیت محصول در خشک کن میکروویو جلوگیری کرد، استفاده از نسبت چگالی توان ثابت در طی فرآیند خشک کردن می باشد (Li et al., 2011; Kone et al., 2013). چون در طی فرآیند خشک کردن محتوای رطوبتی محصول و به تبع آن جرم محصول کاهش می یابد، نسبت چگالی توان (جرم محصول / توان ورودی به خشک کن) در طی خشک کردن افزایش می یابد، این افزایش نسبت چگالی در طی فرآیند خشک کردن باعث می شود دمای محصول به شدت افزایش یابد و منجر به کاهش کیفیت محصول شود. برای ثابت ماندن نسبت چگالی توان، توان میکروویو نسبت به کاهش جرم در طی فرآیند باید کاهش یابد. بهترین روش برای کنترل توان ورودی به میکروویو در طی فرآیند خشک کردن استفاده از نسبت پالسی می باشد. نسبت پالسی عبارت است از نسبت زمان روشن بودن لامپ مگنترون به زمان خاموشی آن. بنابراین در طی فرآیند خشک کردن با کاهش نسبت پالسی، می توان توان ورودی به خشک کن را کاهش داد تا از صدماتی جدی که در اثر افزایش دما در محصول ایجاد می شود، جلوگیری شود (Li et al., 2010). بنابراین برای هر محصولی یافتن مناسب ترین نسبت چگالی توان برای خشک کردن آن بسیار حائز اهمیت می باشد. از طرف دیگر در روش پالسی به دلیل اینکه مگنترون دائما در حال کار نیست و فرصت خنک شدن دارد باعث افزایش طول عمر آن می شود و عملکرد مناسب مگنترون، بازده خشک کن را افزایش می دهد (Cheng et al., 2006).

یکی از جنبه های مهم فرآوری خشک کردن به خصوص برای فرآیندهای صنعتی، مدل سازی فرآیند خشک کردن است. هدف از مدل سازی این است که بتوان سینتیک خشک کردن را در تمام شرایط خشک کردن با رعایت محدوده عملکرد مدل پیش بینی کرد و

داده‌های حاصل از آزمایش‌های خشک کردن با هفت مدل شناخته شده ریاضی برازش داده شد. برای مدل-سازی ریاضی و بدست آوردن پارامترهای مدل از جعبه ابزار متلب MATLAB R2013a و از روش رگرسیون خطی و غیر خطی استفاده شد. بر اساس نتایج برازش، مدل پیچ^۳ با بالاترین مقدار ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۹۹۲ و کمترین مقدار خطا (RMSE) $10^{-3} \times 2/71$ در مقایسه با سایر مدل‌ها عملکرد بهتری در برآورد نسبت رطوبت نشان داد (Nikzad et al., 2018). همچنین مدل‌سازی ریاضی خشک کردن برگه موز در خشک‌کن پمپ حرارتی نشان داد که مدل میدیلی و کواکاک^۴ قادر است با (R^2) ۰/۹۹۹۶ و (RMSE) ۰/۰۷۵۱ نسبت به بقیه مدل عملکرد بالاتری داشته باشد (Tunckal and Doymaz, 2020). برای پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی نخود سبز در یک خشک‌کن هوای گرم مدل-های مختلف ریاضی استفاده شد. نتایج نشان دهنده آن بود در دمای بهینه ۳۵ درجه سلسیوس مدل پیچ بخوبی قادر است پیش‌بینی محتوای رطوبتی را انجام دهد (Kumar et al., 2020).

پژوهش‌های زیادی از بینایی ماشین در پیش‌بینی محتوای رطوبتی و بررسی کیفیت ظاهری محصول در طی فرآیند خشک کردن در خشک‌کن‌های جریان هوای گرم (Suprpto and Riyanto, 2020; Yu et al., 2020; Sturm et al., 2020; Seyedabadi et al., 2019) و میکروویو (Rezaei et al., 2019) استفاده کرده‌اند. تا بحال پژوهشی که زمان دقیق شروع سوختگی محصول که معمولاً در خشک‌کن میکروویو اتفاق می‌افتد، ارائه نشده است. در پژوهش حاضر از قابلیت بینایی ماشین در تعیین زمان شروع سوختگی و میزان سوختگی در انتهای فرآیند استفاده خواهد شد. لذا هدف این پژوهش توسعه خشک‌کن میکروویو مجهز به سامانه کنترل توان میکروویو برای ثابت نگه‌داشتن

همچنین در کنترل برخط^۱ خشک‌کن و بهینه‌سازی فرآیند از آن استفاده کرد. برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن می‌توان به مدل‌های تجربی، روش‌های عددی مانند المان محدود و کامپیوتری نظیر شبکه عصبی مصنوعی اشاره کرد هر کدام از این روش‌ها با مهیا کردن اطلاعات کافی در خصوص ویژگی ماده خشک شده می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها حائز اهمیت باشد. متداول‌ترین روش در مدل‌سازی فرآیند خشک کردن، ارائه یک مدل تجربی است. در این روش برای بیان یک پدیده، معادله یا معادلات ریاضی ساده شده آن پدیده ارائه می‌شود و برای یافتن ثابت‌های معادلات ارائه شده و ارزیابی دقت این معادلات از داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود (Behroozi-Khazaei and Darvishi, 2019).

در پژوهشی تأثیر توان میکروویو بر سینتیک خشک کردن، مصرف انرژی و راندمان خشک کردن فلفل سبز در سطوح توانی ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰، ۴۲۰، ۴۸۰ و ۵۴۰ وات مورد بررسی قرار گرفت. هفت مدل ریاضی برای توصیف رفتار خشک شدن نمونه‌های فلفل مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌ها بر اساس مقادیر R^2 و RMSE بین نسبت رطوبتی به دست آمده از آزمایش‌ها و پیش‌بینی شده مقایسه شدند. با افزایش توان خروجی میکروویو (از ۱۸۰ به ۵۴۰ وات)، زمان خشک شدن از ۹ به ۲/۵ دقیقه کاهش یافت. فرآیند خشک کردن در دوره نزولی صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل میدیلی^۲ مناسب‌ترین مدل رفتار خشک کردن نمونه‌های فلفل است (Darvishi et al., 2014).

در پژوهشی خشک کردن لایه نازک برش‌های پرتقال در خشک‌کن هوای گرم آزمایشگاهی مدل‌سازی شد. فرآیند خشک کردن تحت شرایط متفاوت، سه دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت جابه‌جایی هوا ۱ و ۲ متر بر ثانیه انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها،

AOAC، ۷۵٪ بر پایه نمونه تر بود (AOAC, 1980). برای انجام هر آزمایش ۱۰۰ گرم از محصول به صورت لایه نازک بر روی سینی قرار گرفت.

خشک کن هیبریدی مایکروویو- هوای گرم

در این پژوهش به منظور خشک کردن برگه موز با انرژی مایکروویو- جریان هوای گرم، یک خشک کن آزمایشگاهی ساخته شد. این خشک کن دارای بخش های اندازه گیری برخط جرم، سامانه کنترل دمای هوای گرم، کنترل توان مایکروویو و سیستم بینایی ماشین می باشد (شکل ۱). برای ساخت و توسعه خشک کن از یک دستگاه مایکروویو خانگی (MG40J5133AT- Samsung) با ابعاد محفظه ۴۲×۳۸×۲۴ سانتی متر به حجم تقریبی ۴۰ لیتر و توان نامی ۹۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ هرتز برای تولید امواج مایکروویو با اعمال تغییراتی در آن، استفاده شد (شکل ۱).

چگالی توان و سیستم بینایی ماشین برای بررسی کیفیت محصول تحت تیمارهای مختلف و تعیین زمان شروع سوختگی و میزان سوختگی در انتهای فرآیند می باشد.

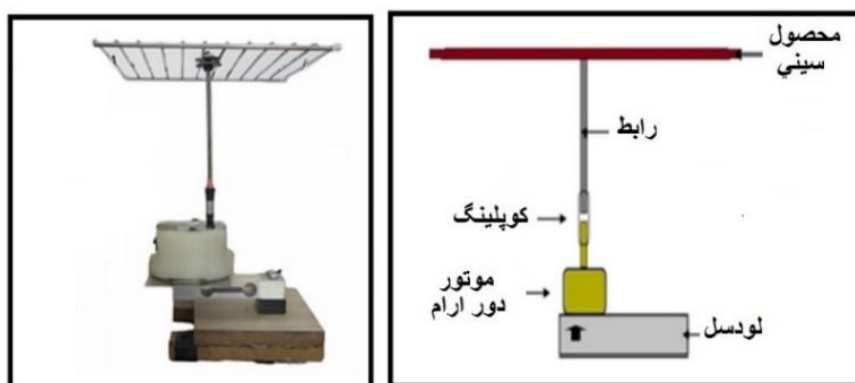
مواد و روش

محصول

موزهای رسیده واریته کاوندیش مورد استفاده در این تحقیق از بازار تره بار در استان کردستان، شهر سنندج در اردیبهشت ۱۳۹۸ فراهم گردید. به منظور حفظ کیفیت اصلی محصول، در یخچال در دمای ۵ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش ها نگهداری شدند. موز-ها با دست پوست گیری شده سپس به وسیله ی یک چاقوی تیز به قطعات با ضخامت ۵ میلی متر برش زده شدند (Seyedabadi *et al.*, 2019). قبل از شروع فرآیند هیچ گونه پیش تیماری روی نمونه ها اعمال نگردید. مقدار محتوای رطوبتی اولیه محصول بر اساس استاندارد



شکل ۱- نمایی از خشک کن مایکروویو- هوای گرم و اجزای آن (۱ دوربین، ۲ فن و هیتر، ۳ جعبه کنترل، ۴ رله SSR برای کنترل توان مایکروویو، ۵ رله SSR برای کنترل سرعت فن، ۶ رله SSR برای کنترل دمای هوای ورودی، ۷ برد آردوینو، ۸ برد بورد، ۹ لودسل



شکل ۲- شماتیک از لودسل و سینی استفاده شده در خشک کن هیبریدی مایکروویو- هوای گرم به منظور خشک کردن برگه موز



شکل ۳- الف) موقعیت نصب فن روی خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم، ب) محل ورود و خروج هوای گرم به خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم

ارتعاش چرخش سینی به لودسل و به دلیل حساس بودن آن، خطا در جرم محصول نمایش داده می‌شد، از یک کوپلینگ نرم برای اتصال رابط به موتور جهت میرا کردن ارتعاشات استفاده شد.

هوای گرم مورد نیاز توسط یک فن هیتر ۱۲۰۰ وات تأمین شد. برای نصب آن قسمت فوقانی مایکروویو سوراخ شد و فن در آنجا نصب گردید. (شکل ۳- الف). سرعت جریان هوای گرم ایجاد شده توسط فن به وسیله یک سرعت سنج پره‌ای (Lutron AM- 4200) با دقت 0.1 متر بر ثانیه در داخل محفظه خشک‌کن اندازه‌گیری شد. در تمام آزمایش‌ها مقدار سرعت 0.5 متر بر ثانیه استفاده شد. برای کنترل دمای هوای گرم از یک رله SSR و دماسنج مقاومتی NTC با دقت ± 0.1 درجه سیلسیوس استفاده شد. در شکل ۳- ب موقعیت قرار گیری سینی در داخل مایکروویو و مسیرهای ورود و خروج هوا از مایکروویو نشان داده شده است.

برای تصویربرداری از نمونه‌ها، از یک دوربین وب-کم^۱ (Logitech-C920-HD) استفاده شد. برای نصب دوربین، سقف مایکروویو سوراخکاری شده و دوربین در آنجا نصب شد (شکل ۴). برای جلوگیری از اثر موج مایکروویو بر روی کارکرد دوربین، قطر سوراخ ایجاد شده کوچک (۱ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد (Aghilinategh et al., 2016) و در هر تیمار آزمایشی

مدار کنترل مایکروویو از سامانه خارج و مدار طراحی شده بر اساس ساختار On/Off جهت ایجاد سطوح توانی مختلف جایگزین و استفاده شد.

برای اندازه‌گیری برخط جرم نمونه‌ها حین انجام آزمایش از یک لودسل زمیک ساخت کشور چین (ZEMIC model, L6D-C3-3kg) که در زیر محفظه خشک‌کن مستقر شده بود، استفاده شد (شکل ۲). سینی که محصول بر روی آن قرار می‌گیرد از جنس استیل به همراه یک توری نسوز از جنس تفلون که اصطلاحاً به تسمه نسوز PTFE معروف هستند، می‌باشد که به پایه‌ی از جنس استیل متصل می‌باشد. در ضمن این لودسل با استفاده از رابط Hx711 به برد آردوینو وصل گردید که به‌طور پیوسته، در هر یک ثانیه وزن نمونه قرائت، ثبت و برای تحلیل‌های بعدی ذخیره شد. قبل از انجام آزمایش‌ها، لودسل توسط وزنه‌های مشخص در شرایط واقعی کاری خشک‌کن به طور دقیق کالیبره شد. یکی از ویژگی‌های ذاتی مایکروویو، پخش غیر یکنواخت امواج مایکروویو در داخل محفظه خشک‌کن می‌باشد. برای رفع این مشکل از یک موتور دور آرام (۲ rpm) برای گرداندن سینی محصول استفاده گردید (شکل ۲). موتور استفاده شده برای چرخش سینی با برق ۲۲۰ ولت شهری تغذیه می‌شد و توان موتور ۳ وات و ساخت کشور کره است. از آنجایی که در صورت انتقال

تصاویر و حذف پس‌زمینه از تصاویر از جعبه افزار^۲ Traing Image Laber نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. به منظور بررسی درصد سوختگی محصول در طی فرآیند، ابتدا پس‌زمینه تصویر حذف شد (شکل ۵-الف) و تعداد کل پیکسل‌های مربوط به محصول محاسبه شد. سپس نواحی دچار سوختگی حذف گردید و تعداد پیکسل‌های قسمت‌های بدون سوختگی از محصول محاسبه گردید (شکل ۵-ب). برای محاسبه تعداد پیکسل‌های نواحی دچار سوختگی، پیکسل‌های نواحی بدون سوختگی از تعداد کل پیکسل‌های مربوط به محصول کم شد. در نهایت میزان درصد سوختگی به کمک روابط زیر محاسبه گردید:

$$\text{درصد سوختگی} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$A = B - C \quad (\text{رابطه ۲})$$

در یک یا دو تصویر به علت اثر موج بر دوربین، تصاویر گرفته شده دارای نویز^۱ بالایی بودند. تصاویر توسط برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب به صورت برخط و در فواصل زمانی مشخصی، که توزین نمونه‌ها صورت می‌گرفت، تهیه شد (شکل ۴-ب). تمام تصاویر در ابعاد ۹۶۰×۷۲۰ پیکسل گرفته شد و برای تحلیل‌های بعدی در رایانه و در فضای RGB ذخیره شد. برای نورپردازی داخل خشک‌کن از دو عدد LED-SMD با شدت نور ۴۰۰Lux استفاده شد. فقط در دو قسمت بدون سوراخکاری میکروویو برای پرهیز از نشت امواج میکروویو به بیرون امکان نصب لامپ برای نورپردازی بود: یکی در دیواره جانبی میکروویو که برای خروج هوای داخل میکروویو توسط کارخانه سوراخکاری شده بود و لذا بخشی از آن برای نورپردازی و بخشی برای خروج هوای داخل میکروویو استفاده شد (شکل ۳-ب) و دیگری داخل درب میکروویو نصب شد. برای پردازش

```
for i=1:400
    vid = videoinput('winvideo',1, 'H264_1024x576');
    RGB = getsnapshot(vid);
    imwrite(RGB, strcat('E:\az18\', num2str(i), '.jpg'));
    pause(5)
end
```



ب

الف

شکل ۴-الف) موقعیت نصب دوربین روی خشک‌کن میکروویو-هوای گرم، ب) برنامه نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB برای عکس‌برداری به صورت برخط در حین خشک کردن



ب

الف

شکل ۵-الف) تصویر کل پیکسل‌ها، ب) تصویر پیکسل‌های نسوخته

در نظر گرفته شود، زمان خاموش و روشن بودن دستگاه متناسب با روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود که به ترتیب برابر است با ۱۷۷۷۶ و ۲۲۲۴ میلی ثانیه است. یعنی امواج مایکروویو ۱۷/۸ ثانیه در یک سیکل ۲۰ ثانیه وارد دستگاه می‌شود و برای جلوگیری از افزایش بی‌رویه دما و کنترل آن ۲/۲ ثانیه هیچ انرژی به داخل دستگاه فرستاده نمی‌شود.

$$Power = PD * mass \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$On \ Time = Power \times 22.22 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$Off \ Time = Duty \ cycle - On \ Time \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این روابط Power توان ورودی به مایکروویو، PD چگالی توان، mass جرم محصول، On Time زمان روشن بودن مایکروویو، Off Time زمان خاموش بودن مایکروویو و Duty cycle سیکل کاری مایکروویو می‌باشد.

برنامه کنترل توان مایکروویو

فلوچارت برنامه توسعه داده شده برای انجام آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. در برنامه مورد نظر ابتدا برد آردوینو (arduino) و توابع مربوط به لودسل برای اندازه‌گیری جرم (eml.extrinsic; addon) در متلب فراخوانی و شناسایی می‌شد. سپس جرم اولیه محصول داخل خشک‌کن (M_0)، محتوای رطوبت اولیه (MC)، دمای هوای گرم در طی فرآیند (T)، توان اولیه (P_0)، سیکل کاری مایکروویو (Duty cycle)، زمان روشن بودن مایکروویو به ازای ورود یک وات توان به داخل مایکروویو (ONtime)، تعریف وضعیت روشن (HIGH) و خاموش بودن مایکروویو (LOW) در برنامه مشخص می‌شدند.

در مرحله بعد محتوای رطوبت نهایی (MC_f)، جرم آب بخار شده با توجه به محتوای رطوبتی اولیه و نهایی ($VeperMass$)، جرم نهایی محصول در داخل خشک‌کن ($Mass \ Final$)، چگالی توان اولیه (PD)، ماکزیمم چگالی توان (HPD)، مینیمم چگالی توان (LPD)، زمان روشن بودن (On Time) و خاموش بودن (Off Time) مایکروویو با توجه به روابط مورد نظر تعیین می‌گردیدند.

در روابط ۱ و ۲، A برابر با تعداد پیکسل‌های قسمت‌های سوخته شده، B برابر با کل تعداد پیکسل‌های تصویر اولیه، C برابر با تعداد پیکسل‌های قسمت‌های سالم مانده می‌باشد.

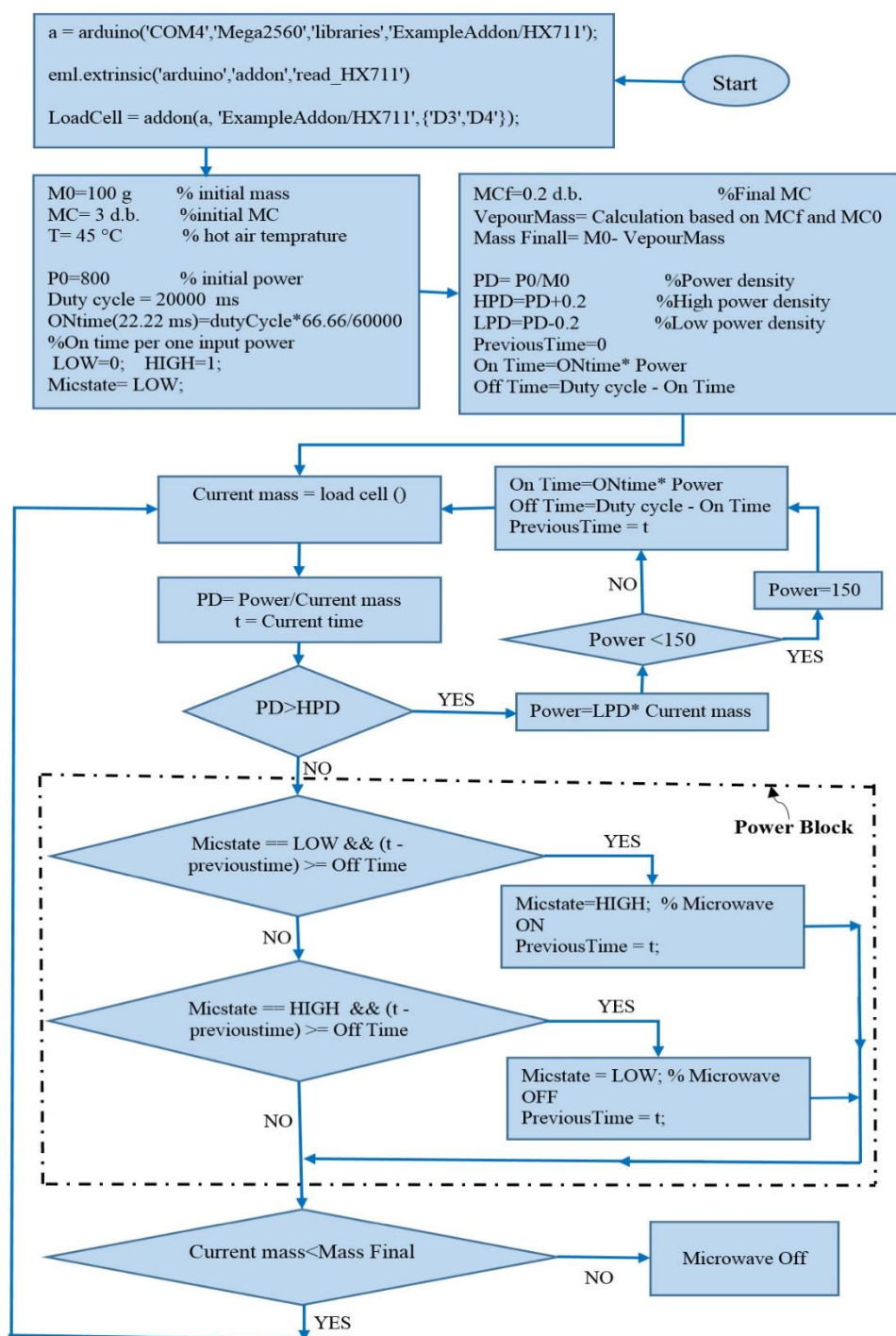
سامانه کنترل توان مایکروویو

سامانه کنترل توان مایکروویو دارای دو قسمت است:

۱- مدار کنترلی، ۲- برنامه کنترلی

مدار کنترلی

به منظور کنترل توان مایکروویو، یک مدار کنترلی بر اساس ساختار On-Off مورد استفاده قرار گرفت. این مدار در حقیقت یک رله قطع و وصل SSR و برنامه کنترل در محیط متلب است که بجای برد اصلی دستگاه برای کنترل توان بر اساس زمان استفاده شد (شکل ۱). توان نامی مایکروویو مورد نظر ۹۰۰ وات و سیکل کاری آن ۶۰ ثانیه است. لذا برای ورودی یک وات توان در هر سیکل کاری، نیاز هست تا مایکروویو ۶۶/۶۶ میلی ثانیه روشن باشد. در این پژوهش برای جلوگیری از افزایش دما، سیکل کاری (زمان خاموش + زمان روشن) ۲۰ ثانیه (۲۰۰۰۰ میلی ثانیه) در نظر گرفته شد. لذا برای هر وات توان ورودی به مایکروویو در سیکل کاری تعریف شده نیاز است تا مایکروویو ۲۲/۲۲ میلی ثانیه روشن بماند. حال بر اساس جرم محصول و چگالی توان توسط رابطه ۳، توان ورودی به مایکروویو محاسبه می‌شود و سپس به کمک روابط ۴ و ۵ به ترتیب زمان روشن و زمان خاموش مایکروویو محاسبه و تنظیم می‌شدند. رله SSR مورد نظر بین مایکروویو و برد آردوینو قرار گرفته است که فرمان قطع و وصل را از طریق برنامه کنترل توان مایکروویو در محیط متلب دریافت می‌کند و برق مایکروویو را قطع و وصل می‌کند. برنامه‌ای که در نرم‌افزار متلب نوشته شد با کنترل زمان روشن و خاموش بودن مایکروویو در هر سیکل در طی فرآیند خشک کردن، سطوح توانی ورودی به مایکروویو را تنظیم می‌کند. به عنوان مثال اگر چگالی توان ورودی به مایکروویو را ۸ وات بر گرم و جرم محصول را ۱۰۰ گرم



شکل ۶- فلوجارت برنامه کنترل چگالی توان ثابت بصورت برخط در خشک کن میکروویو- هوای گرم

شده با حداکثر چگالی توان از پیش تعریف شده مقایسه می‌شد و در صورت برقرار نبودن شرط $PD > HPD$ (کوچک‌تر بودن چگالی توان از HPD)، برنامه وارد بلوک کنترل توان شده و با توجه به زمان روشن و خاموش بودن میکروویو در سیکل کاری آن را روشن و خاموش می‌کرد و همچنین در هر گام بعدی چگالی توان محاسبه

بعد از تنظیمات اولیه وارده شده، برنامه در یک حلقه بسته شروع به کار می‌کرد. ابتدا جرم توسط لودسل قرائت و در متغیر $Current\ mass$ ذخیره می‌گردید. سپس با توجه به توان و جرم قرائت شده، چگالی توان (PD) محاسبه می‌شد. همچنین زمان طی شده در متغیر t ذخیره می‌گردید. در گام بعدی چگالی توان محاسبه

شد (Pereira et al., 2007; Li et al., 2010; Li et al., 2011). از سه سطح ۵، ۶ و ۸ برای مدل‌سازی و از سطوح ۵ و ۷ برای ارزیابی مدل‌های برازش داده شده، استفاده شد.

مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن

مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی توسط ۷ مدل تجربی که به طور معمول برای مدل‌سازی خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شوند، انجام شد (جدول ۱). منحنی‌های خشک کردن از رسم تغییرات نسبت رطوبت بر حسب زمان خشک کردن حاصل می‌شود. جهت برازش داده‌های آزمایشگاهی از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۸ استفاده شد (Sharma et al., 2005). در روابط ذکر شده در جدول ۲، h_2 ، g ، k_1 ، k_0 ، c ، b ، a و n ثابت‌های معادله‌ها و k ثابت نرخ خشک کردن و t زمان خشک کردن (برحسب دقیقه) می‌باشند. برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل‌های موجود از ضریب تعیین R^2 نشان‌دهنده دقت مدل و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان دهنده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی، استفاده شد. بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک کردن، مدلی است که دارای بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE باشد. میزان رطوبت نمونه را در هر زمان از فرآیند خشک شدن می‌توان بر حسب نسبت رطوبت (MR) بیان نمود.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن، M_t ، M_0 و M_e به ترتیب میزان رطوبت در هر زمان از خشک شدن، میزان رطوبت اولیه و میزان رطوبت تعادلی (kg water/kg dry matter) می‌باشند. به دلیل نوسات پیوسته رطوبت نسبی هوا در داخل محفظه مایکروویو در طول فرآیند خشک کردن، نسبت رطوبت را می‌توان به صورت M_t/M_0 ساده در نظر گرفت (Al-Harshseh et al., 2009).

نهایی مقایسه می‌شد و در صورت کوچک‌تر شدن جرم اندازه‌گیری از جرم نهایی، مایکروویو خاموش و خشک کردن متوقف می‌شد.

در طی فرآیند خشک کردن در اثر کاهش جرم و ثابت بودن توان ورودی به مایکروویو مقدار چگالی توان افزایش می‌یابد و اگر در اثر افزایش چگالی توان شرط $PD > HPD$ برقرار شود نیاز به کاهش توان ورودی به مایکروویو به منظور ثابت نگه‌داشتن چگالی توان می‌باشد. برای این کار مقدار توان ورودی جدید از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$\text{Power} = \text{LPD} * \text{Current mass} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه Current mass جرم اندازه‌گیری شده توسط لودسل و LPD مینیمم چگالی توان است. در صورتی که مقدار توان کمتر از ۱۵۰ وات نباشد بر اساس توان جدید ورودی، زمان روشن و خاموش بودن مایکروویو در یک سیکل کاری محاسبه شده و بر اساس این زمان‌ها، روشن و خاموش بودن مایکروویو به کمک بلوک کنترل توان، کنترل می‌شود. اگر توان کمتر از ۱۵۰ وات شود زمان فرآیند بسیار طولانی می‌شود لذا برنامه اجازه کاهش توان به کمتر از ۱۵۰ وات را نمی‌دهد.

روند انجام آزمایش‌ها

به طور کلی تمام آزمایش‌ها در یک خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم و در سه تکرار انجام شد. در طول آزمایش‌ها، توان مایکروویو با توجه به الگوریتم شکل ۴ تنظیم می‌شد تا چگالی توان ثابت بماند. جرم محصول استفاده شده در هر آزمایش ۱۰۰ گرم و دمای هوای گرم ورودی در این پژوهش ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی در تمام تیمارها مقدار ثابت ۵/۰ متر بر ثانیه بود. روند تحویل تصویر، توزین نمونه‌ها و ثبت دما به صورت برخط و در فواصل زمانی تعیین شده در طول فرآیند انجام شد. در این پژوهش ۵ سطح چگالی توان ثابت ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ وات بر گرم استفاده

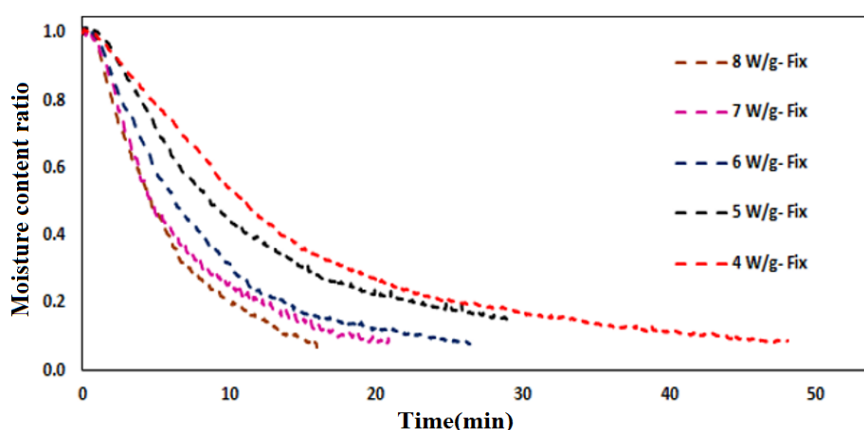
جدول ۱- مدل های ریاضی استفاده شده برای مدل سازی فرآیند خشک کردن بر گه موز در خشک کن مایکروویو- هوای گرم

منبع	معادله ریاضی	مدل
Sobukola <i>et al.</i> (2007)	$MR = \exp(-kt)$	Newton
Page (1949)	$MR = (-kt^n)$	Page
Henderson and Pabis (1961)	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
Togrul and Pehlivan (2002)	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic
Sobukola <i>et al.</i> (2007)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Tow Term Exponential
Wang and Singh (1978)	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh
Akpinar and Bicer (2008)	$MR = a \exp(-kt) + b\exp(-gt) + c\exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis

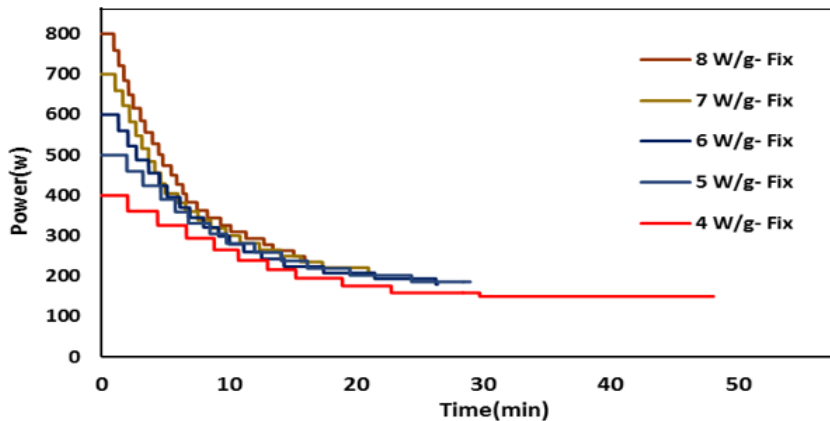
نتایج و بحث

را در یک خشک کن مایکروویو- هوای گرم در توان متغیر کاهشی ۷۶۰ وات و دمای هوای ۵۰ درجه سلسیوس ۷۰ دقیقه گزارش کرده است. دلیل طولانی بودن فرآیند خشک کردن در پژوهش مورد نظر کاهش بسیار سریع توان از ۷۶۰ وات به ۳۸۰ وات و سپس به ۲۳۰ وات می باشد. Bai *et al.* (2018) مدت زمان خشک شدن گیاه جینکوبیلوبا را در خشک کن مایکروویو در توان ثابت ۶۴۰ وات ۷ دقیقه گزارش کردند. در حالی که (Seyedabadi *et al.*, 2019) زمان خشک شدن بر گه موز در خشک کن هوای گرم در دماهای ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ سلسیوس به ترتیب ۲۲۰، ۱۸۰ و ۱۲۰ دقیقه ذکر کرده است و Silva *et al.* (2014) مدت زمان خشک شدن کل میوه موز در خشک کن هوای گرم را در دمای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس را به ترتیب ۳۶۰۰، ۲۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۲۰۰ دقیقه گزارش کرده اند که این نتایج نشان دهنده آن است که در خشک کن هوای گرم زمان خشک کردن بسیار طولانی بوده و باعث بسیاری از تغییرات نامطلوب در محصول نهایی می گردد.

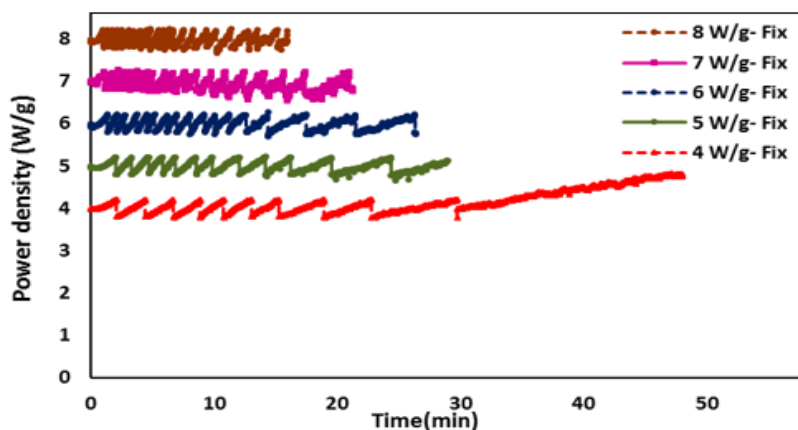
تغییرات محتوای رطوبتی موز بر حسب زمان در خشک کن مایکروویو- هوای گرم در شکل ۷ نشان داده شده است. تأثیر سطوح چگالی توان بر روند کاهش محتوای رطوبتی مشخص شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سطوح چگالی توان، شیب منحنی محتوای رطوبتی تندتر و زمان فرآیند کمتر می شود که به دلیل افزایش دمای داخلی محصول در اثر افزایش مقدار چگالی توان، محصول رطوبت خود را سریعتر از دست می دهد و شیب منحنی تندتر می شود. در ابتدای نمودار تقریباً کاهش رطوبتی مشاهده نمی شود که در این مرحله تمام انرژی وارده به محصول صرف گرم کردن آن می شود. بعد از آن نرخ کاهش رطوبت افزایش می یابد و در انتهای فرآیند نرخ تغییرات آن کاهش می یابد. زمان لازم برای خشک کردن محصول با چگالی توان ثابت ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ وات بر گرم به ترتیب برابر با ۴۸، ۲۹، ۲۶، ۲۱ و ۱۶ دقیقه می باشد. Pereira *et al.* (2007) مدت زمان لازم برای خشک کردن موز



شکل ۷- نمودار سینتیک خشک شدن موز در خشک کن مایکروویو- هوای گرم با چگالی توان مایکروویو ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ وات بر گرم



شکل ۸- تغییرات توان مایکروویو اعمال شده بر حسب زمان در خشک کن مایکروویو-هوای گرم



شکل ۹- تغییرات چگالی توان بر حسب زمان در خشک کن مایکروویو-هوای گرم

رطوبت ماده است، نه زمان فرآیند. در شکل ۹ تغییرات چگالی توان با زمان نشان داده شده است. در این شکل برای هر سطح چگالی توان مقدار آن از مقادیر پیش تعیین شده برای حداکثر و حداقل مقدار چگالی توان فراتر نرفته است که بیان کننده آن است سامانه طراحی شده بخوبی قادر بوده است توان ورودی به مایکروویو را برای جلوگیری از افزایش چگالی توان در طی فرایند خشک کردن، کنترل کند. جدول ۲ نتایج برازش مدل-های ذکر شده با استفاده از داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۲ هر چند مدل اصلاح شده هندرسون و پاپیس نتایج بهتری نسبت به بقیه مدل‌ها داشت ولی تعداد زیاد ثابت‌های این مدل و مدل-سازی این ثابت‌ها با چگالی توان برای تعمیم دادن این مدل برای پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی در

همانطور که از شکل ۸ پیداست روند تغییرات توان برای ثابت ماندن چگالی توان شکل نمایی به خود گرفته است. چون کاهش توان با توجه به جرم صورت گرفته است و کاهش جرم و محتوای رطوبتی هم در فرآیندهای خشک کردن معمولاً بصورت نمایی کاهش می‌یابد، همچنان که بیشتر مدل‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی تغییرات محتوای رطوبتی طبق جدول ۱ مدل‌های نمایی هستند، بدین خاطر تغییرات چگالی توان روند نمایی کاهشی از خود نشان داده‌اند. (Li et al. (2010) نیز در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که برای ثابت نگهداشتن دمای داخل محصول، توان ورودی به صورت نمایی با زمان بایستی کاهش یابد. کنترل توان بر اساس رابطه توان- زمان نمی‌تواند به خوبی عمل کند. چرا که نحوه کنترل توان نیازمند رابطه‌ای بر اساس جرم و

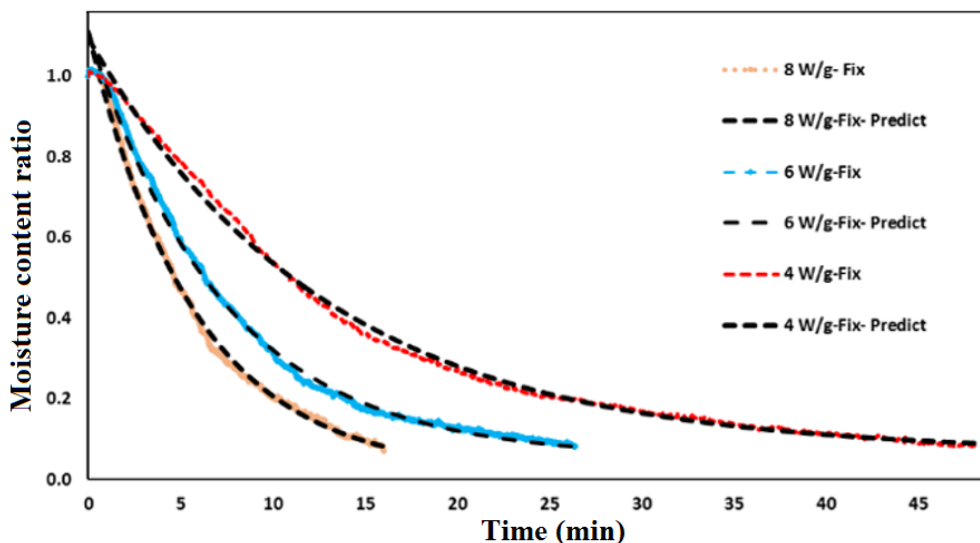
توان از مدل ریاضی دو جمله ای نمایی^۱ برای مدل سازی محتوای رطوبتی در هر مرحله کاهش توان استفاده کردند. نتایج نشان دهنده آن بود مدل قادر است با خطای استاندارد^۲ در محدوده ۰/۵-۰/۱ پیش بینی محتوای رطوبتی را در هر مرحله انجام دهد. در پژوهش حاضر با توجه به شکل ۸ توان با توجه به رطوبت و در چندین مرحله به صورت نمایی کاهش یافته است، لذا، مدل لگاریتمی نتایج بهتری نسبت به مدل دو جمله ای نمایی داشته است.

چگالی توان ۵ و ۷ وات بر گرم نشان داد که دقت مدل تعمیم داده شده در پیش بینی محتوای رطوبتی در چگالی توان ۵ و ۷ وات بر گرم بشدت کاهش می یابد. بعد از مدل هندرسون و پابیس، با توجه به جدول ۲، مدل لگاریتمی (Logarithmic) با بیشترین مقادیر R^2 (۰/۹۸۳۱-۰/۹۹۶۶) و کمترین مقادیر RMSE (۰/۱۶۴۶-۰/۰۲۶۷۹) دارای بیشترین دقت برازش بر داده های خشک کن میکروویو بود. *Pereira et al.* (2007) برای مدل سازی محتوای رطوبتی بر گره موز در خشک کن میکروویو- هوای گرم با سه مرحله کاهش

جدول ۲- نتایج مدل سازی در خشک کن میکروویو- هوای گرم

RMSE	R^2	ثابت های مدل		چگالی توان (وات بر گرم)	مدل	
۰/۰۳۵۵۲	۰/۹۸۴۱	$k=۰/۱۵۱۲$		۸	Newton	
۰/۰۳۲۰۶	۰/۹۸۶۲	$k=۰/۱۰۸$		۶		
۰/۰۲۹۳۹	۰/۹۸۷۶	$k=۰/۰۶۰۵۸$		۴		
۰/۰۲۴۴۵	۰/۹۹۲۵	$n=۱/۱۶۲$	$k=۰/۱۱۰۲$	۸	Page	
۰/۰۲۴۴۵	۰/۹۸۸۳	$n=۱/۰۷۷$	$k=۰/۰۹۰۲۵$	۶		
۰/۰۲۹۲۸	۰/۹۸۷۷	$n=۱/۰۱۶$	$k=۰/۰۵۷۸$	۴		
۰/۰۱۶۷	۰/۹۹۶۵	$a=۱/۱۰۳$	$k=۰/۱۶۷۹$	۸	Henderson and pabis	
۰/۰۲۲۸۶	۰/۹۹۳	$a=۱/۰۸$	$k=۰/۱۱۷۲$	۶		
۰/۰۲۵۹۹	۰/۹۹۰۳	$a=۱/۰۴۹$	$k=۰/۰۶۳۷۹$	۴		
۰/۰۱۶۴۶	۰/۹۹۶۶	$c=۰/۰۱۲۳۵$	$a=۱/۰۹۷$	$k=۰/۱۷۳۲$	۸	Logarithmic
۰/۰۱۵۵۱	۰/۹۹۶۸	$c=۰/۰۵۲۱۹$	$a=۱/۰۶۱$	$k=۰/۱۳۶۹$	۶	
۰/۰۱۵۵۱	۰/۹۹۶۵	$c=۰/۰۶۴۱۴$	$a=۱/۰۲۹$	$k=۰/۰۷۸$	۴	
۰/۰۳۵۵۸	۰/۹۸۴	$a=۰/۰۰۱۲۶۲$		$k=۱۱۹۸$	۸	Tow term exponential
۰/۰۳۱۰۹	۰/۹۸۷	$a=۱/۵۲۳$		$k=۰/۱۳۰۵$	۶	
۰/۰۲۹۴۳	۰/۹۸۷۶	$a=۰/۰۰۲۵۵۷$		$k=۲۳۶/۸$	۴	
۰/۰۲۸۲۵	۰/۹۸۹۹	$b=۰/۰۰۴۲۱۷$		$a=-۰/۱۲۲۷$	۸	Wang and Singh
۰/۰۳۰۰۶	۰/۹۸۷۹	$b=۰/۰۰۲۰۶۴$		$a=-۰/۰۸۶۶$	۶	
۰/۰۳۵۸۶	۰/۹۸۱۵	$b=۰/۰۰۰۶۴۳۹$		$a=-۰/۰۴۸۳۵$	۴	
۰/۰۰۸۵۹۴	۰/۹۹۹۱	$b=۰/۸۹۱۶$	$a=-۰/۲۰۶$	$k=۱/۹۰۸$	۸	Modifid Henderson and pabis
		$h=۰/۰۹۶۹۱$	$g=۰/۲۳۴۷$	$c=۰/۳۳۱۳$		
۰/۰۰۶۸۱۵	۰/۹۹۹۴	$b=۱/۸۸۲$	$a=-۱/۰۵۶$	$k=۰/۳۳۵۵$	۶	
		$h=۰/۰۲۲۴$	$g=۰/۲۱۷۳$	$c=۰/۱۵۰۶$		
۰/۰۰۶۱۹۴	۰/۹۹۹۴	$b=۲/۶۷۷$	$a=-۲/۰۷۷$	$k=۰/۱۷۸۳$	۴	

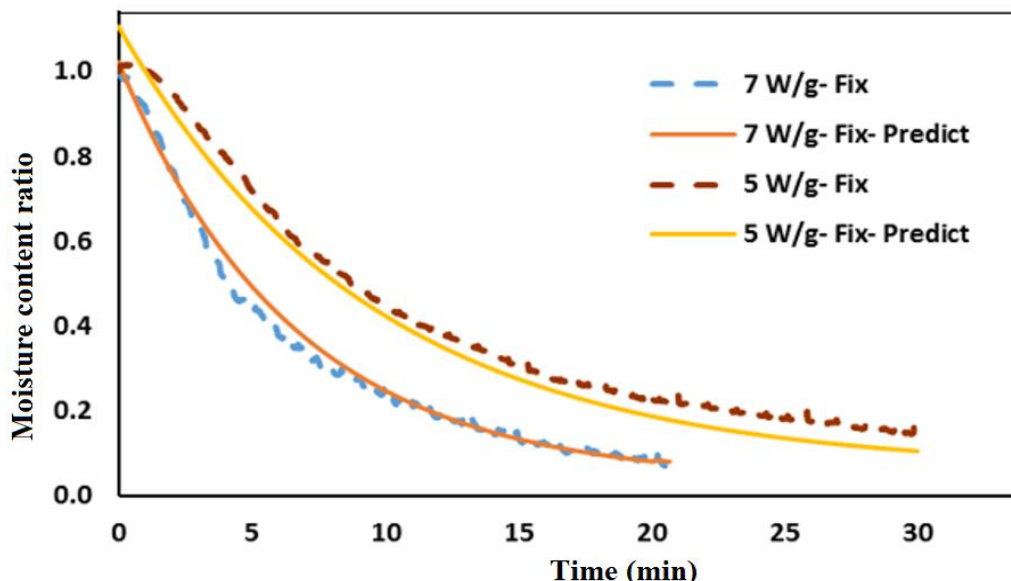
$$h = 0.03219 \quad g = 0.1783 \quad c = 0.4065$$



شکل ۱۰- نمودار تغییرات محتوای رطوبتی واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل لگاریتمی با زمان

نسبت تغییرات محتوای رطوبتی توسط مدل الگاریتمی برای توان‌های مذکور در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنان که از این شکل پیداست، مدل ابتدای فرآیند را نتوانسته بخوبی پیش‌بینی کند و همچنین برای چگالی توان ۵ وات بر گرم دقت آن در انتهای فرآیند پایین است. مقادیر ضریب همبستگی و خطای RMSE برای چگالی توان‌های ۵ و ۷ وات بر گرم بترتیب عبارت بودند از: ۰/۹۹۷۳، ۰/۹۹۶۲، ۰/۳۸۴۴ و ۰/۲۴۸۲.

شکل ۱۰ دقت برازش مدل لگاریتمی بر داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. همچنان که از شکل ۱۰ برمی‌آید مدل لگاریتمی به خوبی قادر است تغییرات محتوای رطوبتی را پیش‌بینی کند و فقط در ابتدای فرآیند (مرحله گرم کردن محصول) دارای مقداری خطا می‌باشد. مدل‌سازی ثابت‌های مدل الگاریتمی (a, k, c) بر اساس چگالی توان ثابت در جدول ۳ نشان داده شده است که بر اساس این مدل‌ها، ثابت مدل برای چگالی توان‌های ۵ و ۷ وات بر گرم به دست آمدند. نتایج پیش‌بینی برون خط



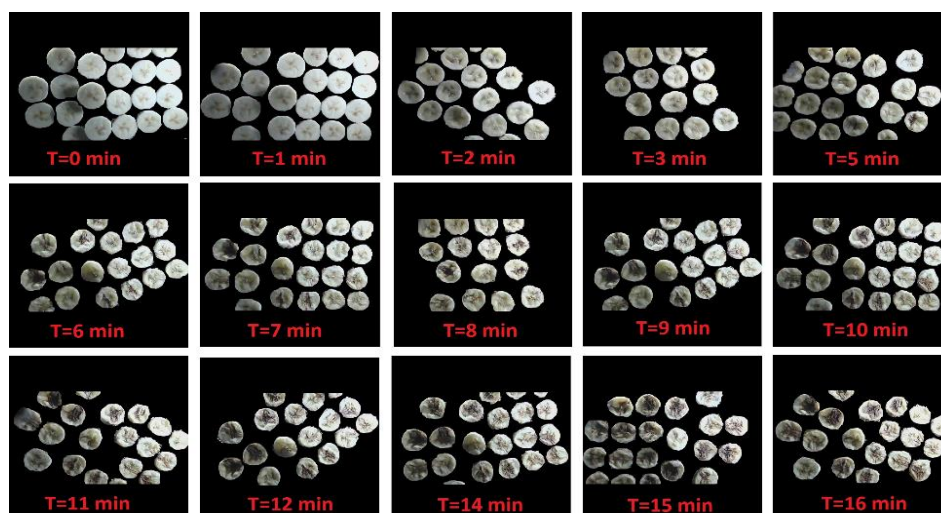
شکل ۱۱- ارزیابی برون خط مدل لگاریتمی برای پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی بر گره موز

جدول ۳- نتایج پیش بینی نسبت تغییرات محتوای رطوبتی توسط مدل لگاریتمی

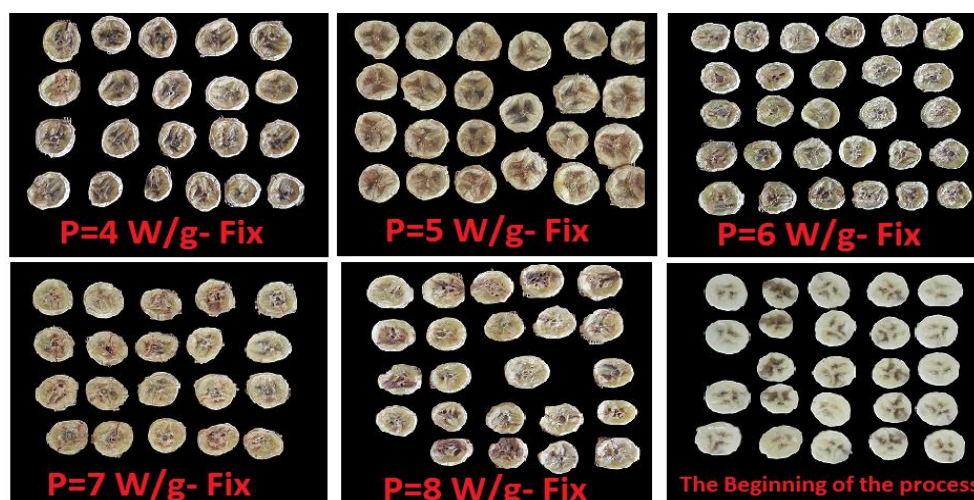
فرمول	R ²	RMSE	چگالی توان (وات بر گرم)	
			۵	۷
$k = 0.0238PD - 0.0134$	۰/۹۸۱۶	۰/۰۰۵۳۲۷	۰/۱۰۵۶	۰/۱۵۳۲
$a=0.017PD+0.9603$	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۰۹۴۳	۱/۰۴۵۳	۱/۰۷۹۳
$c=-0.0035PD^2+0.0289PD+0.0044$	۱	۰/۰۰۰۴۹۴	۰/۰۶۱۴	۰/۰۳۵۲

۱۳ تغییرات ظاهری که در انتهای فرایند در تیمارهای مختلف رخ می دهد را نشان می دهد. با توجه این شکل، درصد سوختگی در چگالی توان های ۶، ۷ و ۸ در انتهای فرایند به ترتیب برابر با ۱۲٪، ۲۴٪ و ۲۹٪ می باشد، در حالی که در دیگر سطوح چگالی توان هیچ گونه سوختگی مشاهده نشد (شکل ۱۳). لذا این نتایج نشان می دهند که اگر فرایند با چگالی توان های بالا شروع شود نیاز به کاهش چگالی توان به جای ثابت نگه داشتن آن ضروری می باشد. تا به حال پژوهشی که میزان کاهش چگالی توان را با توجه به زمان یا جرم مدل سازی کرده باشد، صورت نگرفته است. هرچند میزان کاهش توان بر اساس دمای داخل محصول توسط *Li et al.* (2010) و *Li et al.* (2011) ارائه شده است. ولی در حالت کاربردی اندازه گیری دمای داخل محصول در طی فرایند و به کمک دماسنج فیبر نوری سخت است و مطالعات فوق هم پیشنهاد کاهش پله ای توان برای استفاده در صنعت را ارائه کرده اند. لذا نیاز هست مطالعات بیشتری برای تعیین روند کاهش چگالی توان انجام گیرد تا مناسب ترین روش آن برای هر محصول ارائه شود.

برای ارزیابی ظاهری محصول در طی فرایند خشک کردن و همچنین تعیین نقطه شروع سوختگی در هر تیمار آزمایشی طی فرایند خشک شدن، تصویربرداری توسط دوربین انجام گرفته شد. هدف از انجام این کار بررسی زمان آغاز سوختگی محصول در چگالی توان های مختلف بود تا به واسطه آن بتوان محتوای رطوبتی، توان و چگالی توان در نقطه آغاز سوختگی در هر تیمار را جهت بررسی بیشتر مشخص کرد. شکل ۱۲ تصاویر گرفته شده در طی فرایند با زمان در چگالی توان ۸ وات بر گرم را نشان می دهد. سوختگی های که در طی فرایند اتفاق می افتد، در این شکل به وضوح قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، همانطور که مشاهده می شود محصول در دقیقه ۵ از شروع فرایند در توان ۴۷۴ وات و چگالی توان ۷/۸۵ وات بر گرم و محتوای رطوبتی ۰/۴۷ شروع به سوختگی می کند. در تیمار با چگالی توان ۶ وات بر گرم سوختگی در دقیقه ۶ در توان ۴۲۴ وات و چگالی توان ۶/۰۸ وات بر گرم و محتوای رطوبتی ۰/۵۹ شروع می شود. در فرایند با چگالی توان ۴ و ۵ وات بر گرم هیچ گونه سوختگی در طول مدت خشک کردن محصول مشاهده نشد. شکل



شکل ۱۲- تغییرات ظاهری برگه موز در طی فرایند خشک کردن برای چگالی توان ۸ وات بر گرم در خشک کن مایکروویو-هوای گرم



شکل ۱۳- تغییرات ظاهری برگه موز در انتهای فرآیند خشک کردن در خشک کن مایکروویو-هوای گرم با چگالی توان‌های مختلف

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه ابتدا یک خشک کن مایکروویو با جریان هوای گرم با قابلیت کنترل چگالی توان در طی فرآیند خشک کردن توسعه داده شد. این خشک کن همچنین قابلیت اندازه‌گیری برخط جرم و تصویربرداری در طی فرآیند خشک کردن را دارا بود. آزمایش‌ها در سطوح مختلف چگالی توان ثابت به کمک برنامه توسعه داده شده برای کنترل چگالی توان انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش سطوح چگالی توان ثابت شیب منحنی محتوای رطوبتی تندتر و زمان فرآیند کمتر می‌شود که به دلیل افزایش دمای داخلی محصول در اثر افزایش مقدار چگالی توان، محصول رطوبت خود را سریعتر از دست می‌دهد و شیب منحنی تندتر می‌شود. کمترین زمان خشک کردن (۱۶ دقیقه) برگه‌های موز در خشک کن مایکروویو- هوای گرم در چگالی توان ثابت ۸ وات بر گرم، دمای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای

۰/۵ متر بر ثانیه مشاهده گردید. همچنین روند تغییرات توان برحسب جرم برای ثابت ماندن چگالی توان در حین فرآیند، مانند تغییرات محتوای رطوبتی شکل نمایی به خود گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل‌های ریاضی از دقت بالاتری برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی در طی زمان برخوردار بود. ارزیابی کیفی محصول نهایی نشان داد که تیمارهای با چگالی توان ۶، ۷ و ۸ ثابت به ترتیب دارای ۱۲٪، ۲۴٪ و ۲۹٪ درصد میزان سوختگی می‌باشند. این نتایج بیان کننده آن است فقط در تیمارهای با چگالی توان ۴ و ۵ وات بر گرم سوختگی رخ نداد ولی با این چگالی توان‌ها زمان خشک کردن زیاد می‌شود. لذا برای کاهش زمان خشک کردن و جلوگیری از سوختگی محصول لازم است که خشک کردن با چگالی‌های توان بالا شروع و در طی فرآیند خشک کردن کاهش یابد. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

- Aghilinategh, N., Rafiee, Sh., Hosseinpour, S., Omid, M., Mohtasebi, S.S. (2016). Real-time color change monitoring of apple slices using image processing during intermittent microwave convective drying. *Food Science and Technology International*, 22 (7), 1-13.
- Al-Harashsheh, M., Al-Muhtaseb, A.H. & Magee, T.R.A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 524-531.
- AOAC. (1980). Official method of analysis. 13th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

- Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z. & Mousavi, S.M. (2009). An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air /microwave-assisted dehydration. *Drying Technology*, 27, 831–841.
- Akpinar, E. K. (2008). Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1544-1553.
- Behrooz-Khazaei, N. & Darvishi, H. (2019). Mathematical modeling of drying kinetic of strawberry slice in microwave-hot air dryer. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(3), 523-533. (In Farsi)
- Bai, j.W., Xiao, H.W., Ma, H.L. & Zhou, C.S. (2018). Artificial neural network modeling of drying kinetics and color changes of ginkgo biloba seeds during microwave drying process. *Journal of Food Quality*, DOI: 10.1155/2018/3278595.
- Cheng, W.M., Raghavan, G.S.V., Ngadi, M. and Wang, N. (2006). Microwave power control strategies on the drying process I. Development and evaluation of new microwave drying system. *Journal of Food Engineering*, 76: 188-194.
- Darvishi, H., Rezaie Asl, A., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, Gh. & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13, 130–138.
- Kone, K.Y., Druon, C., Gnimpieba, E.Z., Delmotte, M., Duquenoy, A. & Laguerre, J.C. (2013). Power density control in microwave assisted air drying to improve quality of food. *Journal of Food Engineering*, 119, 750-757.
- Kumar, Y., Singh, L., Sharanagat, V. & Tarafdar, A. (2020). Artificial neural network (ANNs) and mathematical modelling of hydration of green chickpea. *Information Processing in Agriculture*, 8, 75-86.
- Li, Z., Raghavan, G.S.V. & Orsat, V. (2010). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97, 478–483.
- Li, Z., Raghavan, G.S.V., Wang, N. & Vigneault, C. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 104, 234-238.
- Nikzad, N., Khavarpour, M., Movagharnezhad, K. (2018). Comparison of mathematical models and artificial neural network for prediction of moisture ration of orange slices during drying process. *Innovative Food Technology*, 6(2), 161-174. (In Farsi)
- Pereira, N., Marsaioli, A. & Ahrne, L. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81, 79-87.
- Seyedabadi, E., Khojastehpour, M. & Abbaspour-Fard, M.H. (2019). Online measuring of quality changes of banana slabs during convective drying. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 111- 117.
- Silva, W.P., Silva, C., Gama, F. & Gomes, J.P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13, 67-74.
- Song, F., Li, Z. & Raghavan, G.S.V. (2017). Combined microwave–hot-air drying of burdock slices with feedback temperature control at surface and core. *Drying Technology*, 35(14), 1781-1790.
- Sturm, S., Raut, Sh., Kuliga, B., Münsterer, J., Kammhuber, K., Hensel, O. & Stuart, O.J.C. (2020). In-process investigation of the dynamics in drying behavior and quality development of hops using visual and environmental sensors combined with chemometrics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105547.
- Suprpto, & Riyanto, E. (2020). Grape drying process using machine vision based on multilayer perceptron networks. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 5 (3), 382-394
- Sharma, G.P., Verma, R.C. & Pankaj, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 71, 282-286.

Tunckal, Cü, Doymaz, İ. 2020. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. *Renewable Energ*, 150, 918-923.

Rezaei, S., Behroozi-Khazaei, N. & Darvishi, H. (2019). Microwave power adjusting during potato slice drying process using machine vision. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 160, 40-50.

Yu, P., Huang, M., Zhang, M., Zhu, Q. & Qin, J. (2020). Rapid detection of moisture content and shrinkage ratio of dried carrot slices by using a multispectral imaging system. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103361.