

Mathematical Modeling of Drying Kinetic of Strawberry Slice in Microwave-Hot Air Dryer

NASSER BEHROOZI-KHAZAEI^{1*}, HOSSEIN DARVSHI²

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

(Received: Dec. 31, 2018- Revised: Feb. 18, 2019- Accepted: Apr. 17, 2019)

ABSTRACT

In this study, a hot air- microwave dryer equipped to imaging system was used for modeling of drying kinetics of strawberry slice. The experiments were conducted at three levels of hot air temperature of 50, 60, and 70 C with 0.5 m/s air velocity as well as three levels of microwave power density of 2.7, 3.5 and 5 W/g with 40 C air temperature. In order to estimate the drying curve, seven different thin layer mathematical drying models were fitted to experimental data and according to the obtained results, Page's model could satisfactorily describe the drying curve with highest R2 value (0.9945-0.9987) and lowest RMSE (0.0097-0.0213) of microwave data and Logarithmic model could describe the drying curve with highest R2 value (0.9945-0.9987) and lowest RMSE (0.0097-0.0213) of hot air drying data. Also ΔE color kinetic demonstrated that highest color changes were happened in the initial drying stage and remained constant in the other drying stage in microwave and finally the ΔE value changed in any power density near 10. But in hot air drying the color changes occurred progressively during drying process and reached upper than 15.

Keywords: Moisture content, Color kinetic, Drying time

مدل سازی ریاضی سینتیک خشک شدن برگه توت‌فرنگی در خشک‌کن مایکروویو- جریان هوای گرم

ناصر بهروزی خزاعی^{۱*}، حسین درویشی^۲

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

۲. استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱/۲۸)

چکیده

در این پژوهش یک خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم مجهز به سیستم کنترل توان مایکروویو و سیستم تصویربرداری برخط برای مدل‌سازی سینتیک خشک کردن برگه توت‌فرنگی استفاده شد. تیمارهای هوای گرم با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۰/۵ متربرثانیه و تیمارهای مایکروویو با چگالی توان ۲/۷، ۳/۵ و ۵ وات بر گرم و دمای ۴۰ درجه سلسیوس انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل پیچ با R^2 (۰/۰۹۹۴۵/۹۹۸۷) و RMSE (۰/۰۰۹۷ - ۰/۰۲۱۳) و مدل لگاریتمی با R^2 (۰/۰۹۹۸۴/۹۹۹۶) و RMSE (۰/۰۱۴۳۷ - ۰/۰۶۲۷۶) دارای بهترین برازش به ترتیب بر روی داده‌های مایکروویو و هوای گرم بودند. همچنین سینتیک تغییرات رنگ کلی (ΔE) نشان داد که در خشک‌کن مایکروویو بیشترین تغییرات رنگ در ابتدای فرایند رخ می‌دهد و در انتهای فرایند تقریباً به ۱۰ می‌رسد. ولی در روش هوای گرم تغییرات رنگ در طول فرایند بتدریج افزایش می‌یابد و در انتها به بیشتر از ۱۵ می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: محتوای رطوبتی، تغییرات رنگ، زمان خشک کردن.

مقدمه

توت‌فرنگی میوه‌ای با ترکیبات شیمیایی مفید، مزه شیرین و عطر دار می‌باشد که بسیار هم مورد توجه مصرف کنندگان قرار گرفته است (Da Silva et al., 2007). همچنین توت‌فرنگی دارای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالاتر از انگور، سیب و هلو می‌باشد و بخاطر این ظرفیت آنتی‌اکسیدانی دارای خواص تغذیه‌ای و دارویی می‌باشد (Scalzo et al., 2005). با این حال، طول عمر پس از برداشت توت‌فرنگی بخاطر ساختار شکننده و نرخ بالای تنفس آن، نسبتاً پایین است و بسیار حساس به صدمات مکانیکی است (Modise, 2008). یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای افزایش عمر ماندگاری و جلوگیری از خرابی آن، خشک کردن آن است.

خشک کردن با کاهش فعالیت آبی، امکان نگهداری مواد غذایی در شرایط سالم و ثابت را فراهم می‌کند. در خشک کردن با جریان هوای گرم، خلایق و انجمادی، سرعت خشک کردن در دوره نزولی پایین است. لذا زمان خشک کردن زیاد در دماهای بالا در طول دوره نزولی نرخ خشک شدن منجر به کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Mousa and Farid, 2002). همچنین انتقال رطوبت در داخل محصول در فرایند خشک کردن، تابع خواص فیزیکی و حرارتی محصول و ویژگی‌های سایکرومتریک هواست. خشک کردن با جریان هوای گرم بخاطر راندمان پایین بسیار انرژی‌بر است و به همین دلیل تحقیقات زیادی برای یافتن

روش‌های جایگزین به منظور افزایش راندمان حرارتی در فرایند خشک کردن، انجام گرفته است (Boldor, 2003). یکی از روش‌های جایگزین، استفاده از انرژی مایکروویو و یا رادیو گرما است. بیشتر مطالعات پیشین از خشک‌کن جریان هوای گرم برای خشک کردن توت‌فرنگی استفاده کرده‌اند. هرچند خشک‌کن‌های جریان هوای گرم سرمایه‌ی اولیه کمتری لازم دارند ولی فرایند خشک کردن در آن‌ها بسیار زمان‌بر و انرژی‌بر است. همچنین زمان خشک کردن طولانی در دماهای بالا در طی فرایند نزولی خشک کردن با جریان هوای گرم اغلب منجر به کاهش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Mousa and Farid, 2002). در حالی که استفاده از انرژی مایکروویو، نرخ خشک شدن را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Omari et al., 2018; Lakshminarayana, 2006; Shivhare et al., 1991). به خاطر دارا بودن محتوای رطوبتی و رسانایی یونی بالا بسیار مناسب برای خشک کردن با انرژی مایکروویو می‌باشند. لذا محصولی مانند توت‌فرنگی به دلیل داشتن محتوای رطوبتی بالا بخوبی می‌تواند انرژی مایکروویو جذب کنند. لذا کاربرد انرژی مایکروویو می‌تواند منجر به کاهش زمان خشک کردن توت‌فرنگی و بهبود کیفیت آن شود.

در پژوهشی از انرژی مایکروویو برای خشک کردن هویج

مواد و روش‌ها

مواد

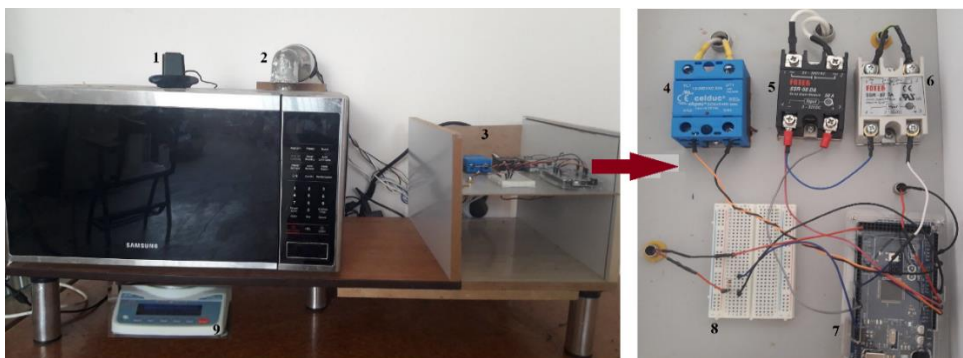
نمونه‌های توت‌فرنگی رقم پاروس از یکی از مزارع شهرستان سنندج تهیه شد. برای انجام آزمایش‌ها ساقه محصول از محصول جدا و توت‌فرنگی دارای قطر $2/5 \pm 0/2$ سانتی‌متر، عرض و ضخامت $2/3 \pm 0/3$ سانتی‌متر جدا شدند. سپس با یک چاقوی تیز، نمونه‌ها از وسط برش خورده و برای شروع آزمایش آماده شد. قبل از شروع فرآیند هیچ‌گونه پیش تیماری روی نمونه‌ها اعمال نگردید. مقدار محتوای رطوبتی اولیه محصول بر اساس استاندارد AOAC(1980)، ۹۰٪ بر پایه تر بود.

خشک‌کن هیبریدی مایکروویو- هوای گرم

در این پژوهش به منظور خشک کردن برگه توت‌فرنگی با انرژی مایکروویو، یک خشک‌کن آزمایشگاهی ساخته شد. این خشک‌کن دارای بخش‌های اندازه‌گیری برخط جرم، سامانه کنترل دمای هوای گرم، کنترل توان مایکروویو و سیستم بینایی ماشین می‌باشد (شکل ۱). برای ساخت و توسعه خشک‌کن از یک دستگاه مایکروویو خانگی (MG40J5133AT-Samsung) با ابعاد محفظه $24 \times 38 \times 42$ سانتی‌متر به حجم تقریبی ۴۰ لیتر و توان نامی ۹۰۰ وات با اعمال تغییراتی در آن، استفاده شد (شکل ۱). مدار کنترل مایکروویو از سامانه خارج و مدار طراحی شده بر اساس ساختار On/Off جهت ایجاد سطوح توانی مختلف جایگزین و استفاده شد. 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. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها حین انجام آزمایش بدون خارج کردن آن‌ها از محفظه خشک‌کن پایه‌ی سینی بر روی یک ترازوی دیجیتال (A&D, FX-3000GD, Japan) که در زیر محفظه خشک‌کن مستقر شده بود، قرار می‌گرفت و وزن محصول با دقت ۰/۱ گرم با اتصال ترازو به کامپیوتر قابل اندازه‌گیری بود.

استفاده شد که نتایج حاصل نشان دهنده آن بود که مدت زمان خشک کردن نسبت به خشک کردن با جریان هوای گرم بشدت کاهش می‌یابد (Sumnu et al., 2005). در خشک کردن توسط مایکروویو، چگالی توان مایکروویو یک عامل مهم است که باید در فرآیندهای مربوط به محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گیرد. این عامل، مقدار توان اعمال شده به محصول در واحد جرم یا حجم می‌باشد. چگالی توان، روی رفتار خشک شدن محصول از جمله سرعت خشک شدن، زمان و بازده خشک کردن تأثیر می‌گذارد (Cheng et al., 2006). در صورتی که چگالی توان مورد استفاده برای خشک کردن در نظر گرفته نشود، ممکن است کیفیت محصول خشک شده؛ به‌ویژه در مراحل پایانی خشک کردن، پایین بیاید. در فرآیند خشک کردن توسط مایکروویو، معمولاً توان اعمالی در طی فرآیند که با کاهش جرم و حجم محصول همراه است، ثابت است و لذا منجر به افزایش چگالی توان می‌شود و ممکن است از ۳ وات بر گرم در ابتدای فرآیند به ۴۰ وات بر گرم در انتهای فرآیند برسد. (Li et al., 2010) در تحقیق خود مشاهده کردند که این پدیده باعث افزایش شدید دما و فرار حرارتی شده و منجر به ایجاد نقاط داغ و در نتیجه تخریب کیفی محصول خشک شده می‌شود. همچنین (Song et al., 2017) از یک خشک‌کن مایکروویو با قابلیت کنترل دما برای خشک کردن برگه سیب استفاده کردند. نتایج آنها نشان دهنده آن بود که کنترل نکردن دما باعث می‌شود محصول با جذب انرژی و افزایش دمای داخل آن دچار سوختگی شود. همچنین تعریف سطوح توانی مختلف بر اساس دمای داخل محصول منجر به بهبود کیفیت محصول می‌شود.

در این پژوهش هدف مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک کردن توت‌فرنگی در خشک‌کن مایکروویو و هوای گرم می‌باشد. در خشک‌کن مایکروویو توان در طی فرآیند تغییر داده می‌شود تا از افزایش چگالی توان جلوگیری شود.



شکل (۱) نمای از خشک‌کن: (۱) دوربین، (۲) فن و هیتر هوای گرم، (۳) جعبه کنترل، (۴) رله SSR کنترل توان مایکروویو، (۵) رله SSR کنترل سرعت فن، (۶) رله کنترل دمای هوای گرم، (۷) برد آردینو، (۸) برد برد، (۹) ترازو

دوربین، تصاویر گرفته شده دارای نویز 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. تمام تصاویر در ابعاد ۷۲۰×۹۶۰ پیکسل گرفته شد و برای تحلیل-های بعدی در رایانه و در فضای RGB ذخیره شد. برای نورپردازی داخل خشک‌کن از دو عدد LED-SMD با شدت نور ۴۰۰ Lux استفاده شد. فقط در دو قسمت بدون سوراخکاری مایکروویو برای پرهیز از نشت امواج مایکروویو به بیرون امکان نصب لامپ برای نورپردازی بود: یکی در دیواره جانبی مایکروویو که برای خروج هوای داخل مایکروویو توسط کارخانه سوراخکاری شده بود و لذا بخشی از آن برای نورپردازی و بخشی برای خروج هوای داخل مایکروویو استفاده شد (شکل ۲- الف). دیگری داخل درب مایکروویو و پشت صفحه سوراخکاری شده روی درب مایکروویو (شکل ۲- ب).

هوام گرم مورد نیاز توسط یک فن هیت‌ردار ۱۲۰۰ وات تأمین شد. برای نصب آن قسمت فوقانی مایکروویو سوراخ شد و فن در آنجا نصب گردید. (شکل ۱). سرعت جریان هوای گرم ایجاد شده توسط فن به وسیله یک سرعت سنج پره‌ای (Lutron AM-4200) با دقت ۰/۰۱ متر بر ثانیه در داخل محفظه خشک-کن اندازه‌گیری شد. در تمام آزمایش‌ها مقدار سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه استفاده شد. برای کنترل دمای هوای گرم از یک رله SSR و دماسنج مقاوم‌تی NTC با دقت ۱/۰± درجه سیلسیوس استفاده شد.

برای تصویربرداری از نمونه‌ها، از یک دوربین وب‌کم (Logitech-C920-HD) استفاده شد. برای نصب دوربین، سقف مایکروویو سوراخکاری شده و دوربین در آنجا نصب شد (شکل ۱). برای جلوگیری از اثر موج مایکروویو بر روی کارکرد دوربین، قطر سوراخ ایجاد شده کوچک (۱ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد و در هرتیمار آزمایشی در یک یا دو تصویر به علت اثر موج بر



ب



الف

شکل (۲) سیستم نورپردازی (الف) بر روی دیواره جانبی، (ب) بر روی درب مایکروویو

توان نامی مایکروویو × نسبت پالسی = توان ورودی مایکروویو (رابطه ۲)

$$\text{نسبت پالسی} = \frac{\text{زمان روشن}}{\text{سیکل کاری (زمان خاموش + زمان روشن)}}$$

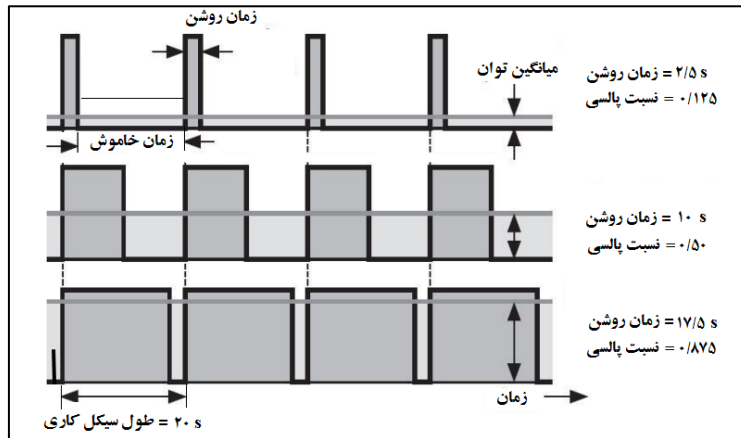
(رابطه ۳) زمان روشن - سیکل کاری = زمان خاموش

رله SSR مورد نظر بین مایکروویو و برد آردوینو قرار گرفته است که فرمان قطع و وصل را از طریق برنامه‌نویسی در نرم افزار آردوینو دریافت می‌کند و برق مایکروویو را قطع و وصل می‌کند. برنامه‌ای که در نرم افزار Arduino نوشته شد بر اساس زمان برای جلوگیری از افزایش بیش از اندازه نسبت توان به جرم (نسبت چگالی)، با کنترل زمان روشن و خاموش بودن مایکروویو در هر سیکل در طی فرآیند خشک کردن، سطوح توانی ورودی به مایکروویو را تنظیم می‌کند.

سامانه کنترل توان در داخل مایکروویو

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 است که بجای برد اصلی مایکروویو برای کنترل توان بر اساس زمان استفاده شد (شکل ۱). این رله به مانند یک کلید در یک سیکل کاری و با توجه به زمان روشن و خاموش تعریف شده در هر سیکل، موج مایکروویو را قطع و وصل می‌کرد. توان نامی مایکروویو مورد نظر ۹۰۰ وات بود و سیکل کاری (زمان خاموش + زمان روشن) ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد (شکل ۳). حال با تعیین توان ورودی به مایکروویو به کمک رابطه ۱ نسبت پالسی محاسبه می‌شد و سپس به کمک رابطه ۲ و ۳ به ترتیب زمان روشن و زمان خاموش محاسبه و تنظیم می‌شدند.

(رابطه ۱)



شکل (۲) توان ورودی به مایکروویو بر اساس نسبت پالسی

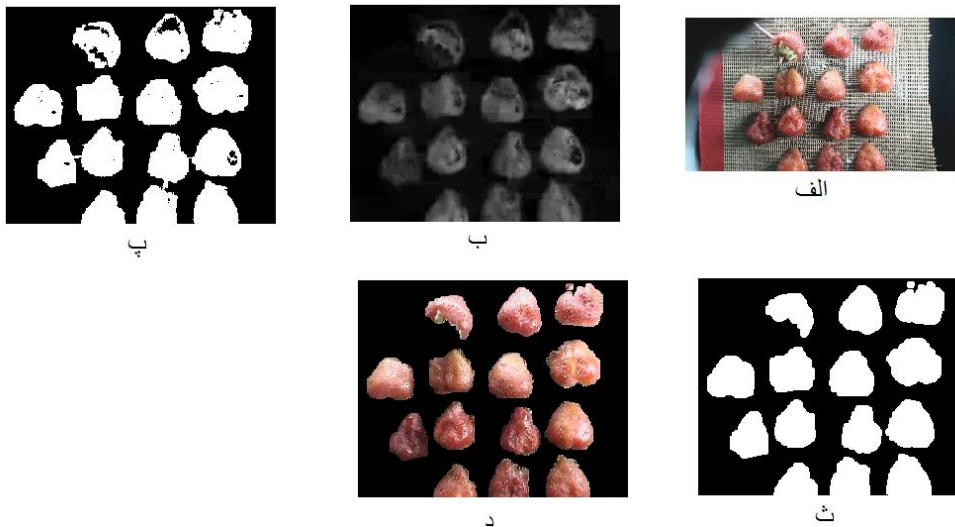
الگوریتم پردازش تصویر

یک الگوریتم پردازش تصویر طراحی شد تا به کمک آن بتوان پس زمینه را از تصاویر حذف کرد و تغییرات رنگ کلی محصول را در طی فرآیند خشک کردن محاسبه کرد. این الگوریتم شامل قسمت‌های زیر می باشد:

فراخوانی تصاویر گرفته شده در فضای RGB (شکل ۴-الف) تبدیل تصویر رنگی به تصویر خاکستری با استفاده کانال

رنگی R-B (شکل ۴-ب)

تبدیل تصویر خاکستری به باینری با آستانه ۰/۱۱ بصورت دستی (شکل ۴-پ) انجام عملیات مورفولوژیکی مانند پر کردن حفره‌ها، حذف نویزهای چسبیده به مرز (شکل ۴-ث) ماسک گذاری تصویر باینری حاصل از مرحله قبل بر روی تصویر اصلی (شکل ۴-د)



شکل (۴) نتایج مراحل پیاده سازی الگوریتم پردازش تصویر

جریان هوای گرم و در سه تکرار انجام شد. در طول آزمایش‌ها توان مایکروویو با مقدار مشخصی در ابتدای فرآیند شروع می شد اما در ادامه فرآیند با کاهش محتوای رطوبتی و در نتیجه جرم محصول میزان توان اعمالی در سه مرحله کاهش یافت تا چگالی توان خیلی افزایش نیابد (شکل ۵). جرم محصول استفاده شده در هر آزمایش ۱۰۰ گرم و دمای هوای گرم ورودی در این پژوهش ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی در تمام تیمارها مقدار ثابت ۰/۵ متر بر ثانیه بود. خشک کردن تا زمانی که جرم

از این تصویر (شکل ۴-د) برای محاسبه تغییرات رنگ کلی (ΔE) طبق رابطه ۴ استفاده شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در L_0^* ، a_0^* و b_0^* به ترتیب مقادیر میانگین اولیه پارامترهای رنگ در فضای $L^*a^*b^*$ و L^* ، a^* و b^* مقادیر میانگین پارامترهای رنگ در طی فرآیند خشک کردن می باشد.

روند انجام آزمایش‌ها در خشک کن مایکروویو

به طوری کلی تمام آزمایش‌ها در یک خشک کن ترکیبی مایکروویو-

می‌باشند. برای انتخاب بهترین مدل از بین مدل های 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.

جدول ۱. مدل‌های ریاضی استفاده شده در پژوهش برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن

Model Name	Model
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = (-kt^n)$
Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Tow term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$
Wang and Sing	$MR = 1 + at + bt^2$
Modified Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$

نتایج و بحث

تغییرات محتوای رطوبتی توت‌فرنگی بر حسب زمان در خشک‌کن مایکروویو و هوای گرم در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶-الف تأثیر سطوح چگالی توان بر روند کاهش محتوای رطوبتی مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سطوح چگالی توان، 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. در ابتدای نمودار تقریباً کاهش رطوبتی مشاهده نمی‌شود که در این مرحله تمام انرژی وارده به محصول صرف گرم کردن آن می‌شود. بعد از آن نرخ کاهش رطوبت افزایش می‌یابد و در انتهای فرآیند نرخ تغییرات آن کاهش می‌یابد. زمان لازم برای خشک کردن با تیمارهای ۲/۷، ۳/۵ و ۵ وات بر گرم به ترتیب برابر با ۴۶، ۶۰ و ۴۰ دقیقه می‌باشد.

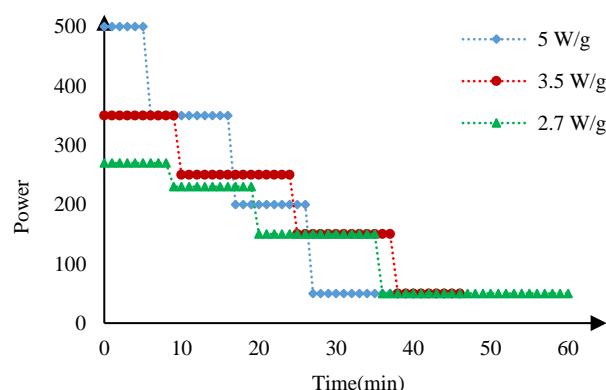
تأثیر دماهای مختلف هوای گرم بر تغییرات محتوای رطوبتی توت‌فرنگی بر حسب زمان در شکل ۶-ب نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای هوا شیب منحنی تغییرات محتوای رطوبتی تندتر و زمان فرآیند کمتر می‌شود که به دلیل افزایش نرخ انتقال جرم در اثر افزایش دما می‌باشد. زمان لازم برای خشک کردن با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۳۹۰، ۳۰۰ و ۲۷۰ دقیقه می‌باشد. این نتایج نشان دهنده آن است که زمان خشک کردن در خشک‌کن جریان هوای گرم به مراتب بیشتر از خشک‌کن مایکروویو می‌باشد. نتایج مشابهی توسط سایر محققین گزارش شده است (Funabo and Ohlsson, 1998; Maskan, 2000). همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که نصف کردن توت‌فرنگی زمان خشک کردن

محصول به مقدار از پیش تعیین شده نمی‌رسید، ادامه داشت. مقدار جرم نهایی بر اساس جرم اولیه، محتوای رطوبت اولیه و محتوای رطوبت نهایی تعیین می‌شود. مقدار محتوای رطوبت نهایی ۱۶٪ بر پایه تر در نظر گرفته شد. تصویربرداری و توزین نمونه‌ها به صورت برخط و در فواصل زمانی تعیین شده در طول فرآیند انجام گرفت. در این پژوهش سه سطح توانی ۵، ۳/۵ و ۲/۷ وات بر گرم استفاده شد. مقدار رطوبت موجود در محصول، در هر زمان بر پایه ماده خشک با توجه به جرم بر اساس رابطه ۵ و نسبت رطوبت به کمک رابطه ۶ محاسبه شد (Omari et al., 2018).

$$MC = \frac{m(t) - m_d}{m_d} * 100 \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MR = \frac{MC}{MC_0} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در رابطه بالا، MC : محتوای رطوبتی بر پایه خشک، $m(t)$: جرم اندازه‌گیری شده توسط ترازو (گرم) و m_d : جرم محصول خشک شده بر حسب گرم، MC_0 محتوای رطوبت اولیه محصول (بر پایه خشک) و MR : نسبت رطوبت است.



شکل (۵) تغییرات توان اعمال شده بر حسب زمان

در این پژوهش علاوه بر خشک کردن نمونه‌های توت‌فرنگی در خشک‌کن مایکروویو- هوای گرم، از خشک جریان هوای گرم نیز استفاده شد. نمونه در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه خشک شدند و اندازه‌گیری وزن و تصویر هر ۱۰ دقیقه یکبار صورت می‌گرفت.

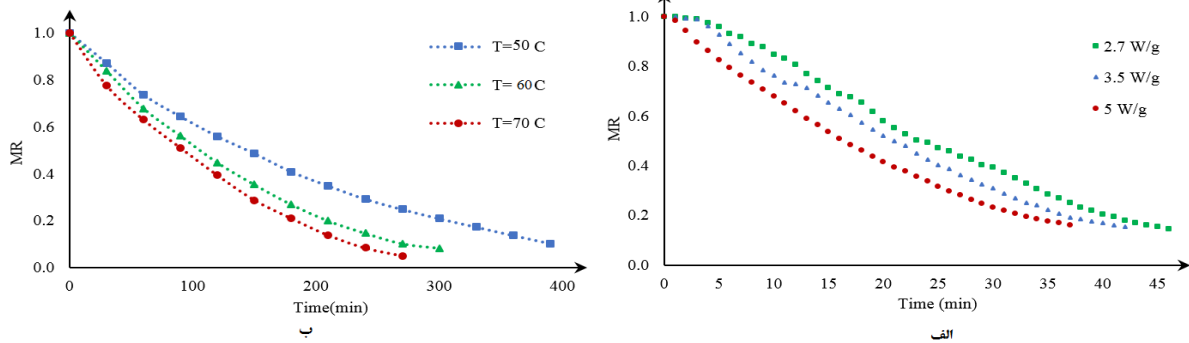
مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن

مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی توسط مدل تجربی که به طور معمول برای مدل‌سازی خشک شدن 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 ۲۰۱۳ استفاده شد (Sharma et al., 2005).

در این روابط $n, a, b, c, k, k_0, k_1, g, h$ ثابت‌های معادله‌ها

زمان خشک کردن در دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس برای برگه توت‌فرنگی با ضخامت ۵ میلی‌متر و با سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه به ترتیب ۲۱۵ و ۱۴۰ دقیقه گزارش کردند.

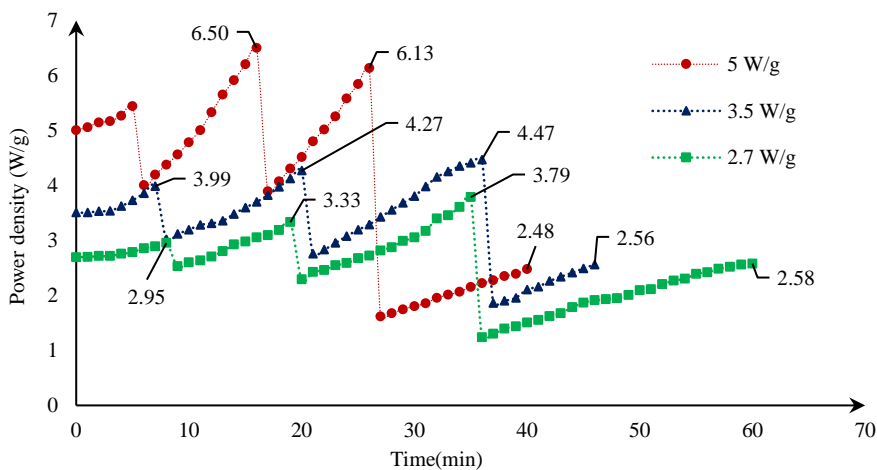
را در مقایسه با توت‌فرنگی کامل که توسط Doymaz (2008) گزارش شده است، به یک سوم کاهش می‌دهد که نشان دهنده آن است که برگه توت‌فرنگی در مقایسه با توت‌فرنگی کامل دارای نرخ انتقال جرم بالایی می‌باشد. همچنین Cam et al. (2018)



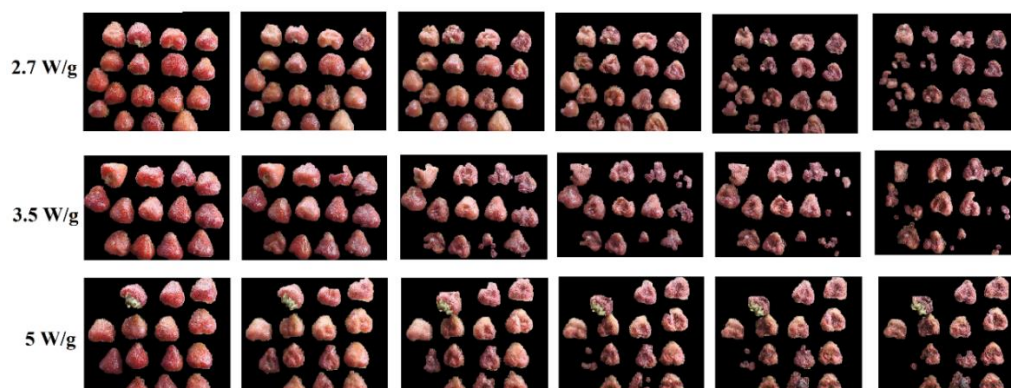
شکل (۶) نمودار سینتیک خشک شدن توت‌فرنگی: الف) مایکروویو-هوای گرم، ب) هوای گرم

تیمار ۵ وات بر گرم است، با این حال کیفیت محصول در سه تیمار در انتهای فرایند بشدت کاهش یافته است. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات قبلی یکسان است (Kone et al., 2013; Li et al., 2010; Pereira et al., 2007) همچنین این نتایج نشان دهنده آن است که تنها کاهش توان برای جلوگیری از کاهش کیفیت محصول کافی نیست و نیاز به کنترل دمای محصول هم در طی فرآیند خشک کردن می‌باشد. همچنین در شکل ۹-الف تغییرات رنگ کل (ΔE) محصول برای هر سه تیمار چگالی توان نشان داده شده است. بیشتر تغییرات رنگ محصول در ابتدای فرایند رخ می‌دهد و بعد از آن تغییرات زیادی از خود نشان نمی‌دهد. برای هر سه تیمار در انتهای فرآیند به اندازه ۱۰ واحد تغییرات رنگ کل اتفاق می‌افتد.

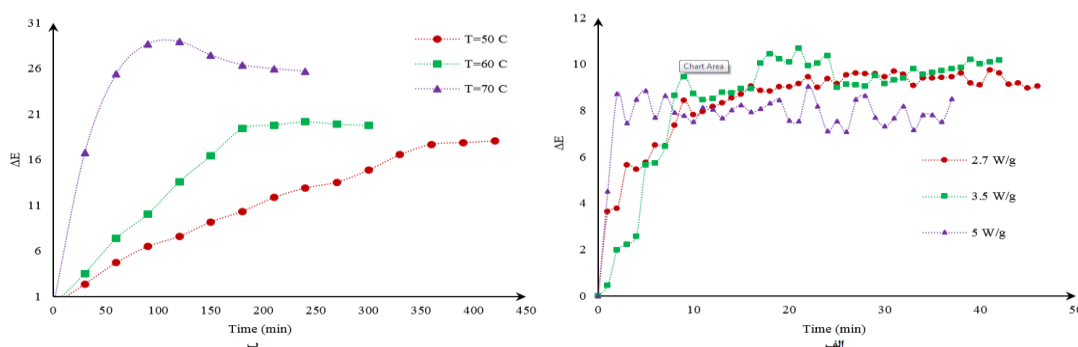
در شکل ۷ تغییرات چگالی توان در خشک‌کن مایکروویو در طی فرایند خشک کردن نشان داده شده است. با توجه به شکل، چگالی توان برای سه تیمار آزمایشی که در ابتدا ۲/۷، ۳/۵ و ۵ هست، در انتهای فرآیند به ترتیب به مقادیر ۲/۵۸، ۲/۵۶ و ۲/۴۸ رسیده است. در شکل ۸ تغییرات ظاهری محصول برای هر سه تیمار چگالی توان در طی فرایند خشک کردن نشان داده شده است. با توجه به اینکه محتوای رطوبتی اولیه توت‌فرنگی بالاست و در طی فرآیند خشک کردن، محصول بخش زیادی از آب خود را از دست می‌دهد، بدین خاطر به شدت چروکیده شده و در انتهای فرآیند تغییرات رنگ زیادی را هم نسبت به حالت اولیه نشان می‌دهد. با توجه به اینکه چگالی توان برای تیمارهای با چگالی توان ۲/۷ و ۳/۵ وات بر گرم در طول فرایند هم کمتر از



شکل (۷) تغییرات چگالی توان بر حسب زمان



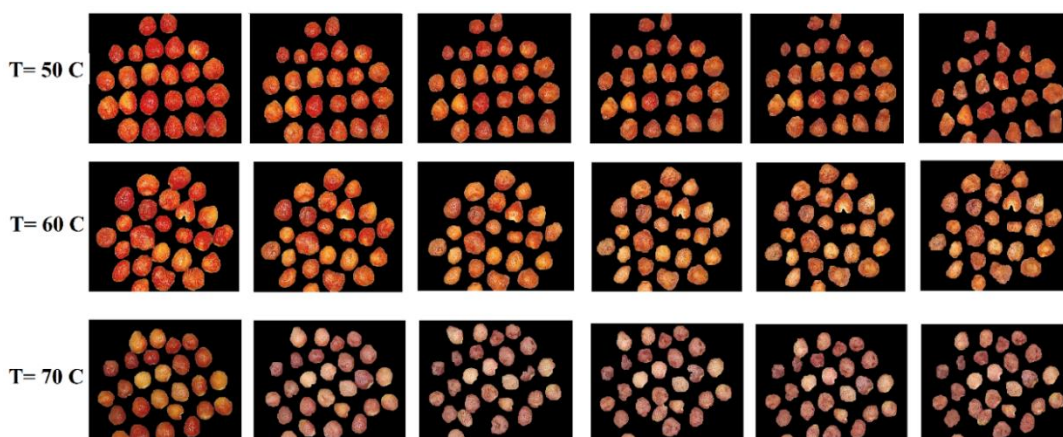
شکل (۸) تغییرات ظاهری محصول در طول فرایند خشک کردن با مایکروویو- هوای گرم



شکل (۹) تغییرات رنگ ΔE محصول در طول فرایند: الف) در داخل مایکروویو، ب) جریان هوای گرم

کردن رخ می‌دهد و فقط در انتهای فرآیند به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین هرچه دمای خشک کردن بیشتر باشد این تخریب رنگ محصول بیشتر اتفاق می‌افتد که برای دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه به ترتیب به اندازه ۱۸، ۱۹/۷۵ و ۲۵/۷۵ تغییرات کلی رنگ رخ می‌دهد. به عبارتی در خشک کردن به روش جریان هوای گرم تغییرات کاهش رنگ بیشتری نسبت به خشک کن مایکروویو رخ می‌دهد.

در شکل ۱۰ تغییرات ظاهری محصول برای هر سه تیمار دمای هوا در طی فرایند خشک کردن نشان داده شده است. همچنان که از این شکل‌ها مشخص است در طی فرایند خشک کردن رنگ محصول تغییرات زیادی از خود نشان می‌دهد و در طی فرایند رنگ نهایی محصول نشان از کاهش کیفیت ظاهری محصول دارد. همچنین در شکل ۹- ب تغییرات رنگ کل (ΔE) محصول برای هر سه تیمار دمای هوا نشان داده شده است. برخلاف مایکروویو، تغییرات رنگ بتدریج در طی فرآیند خشک



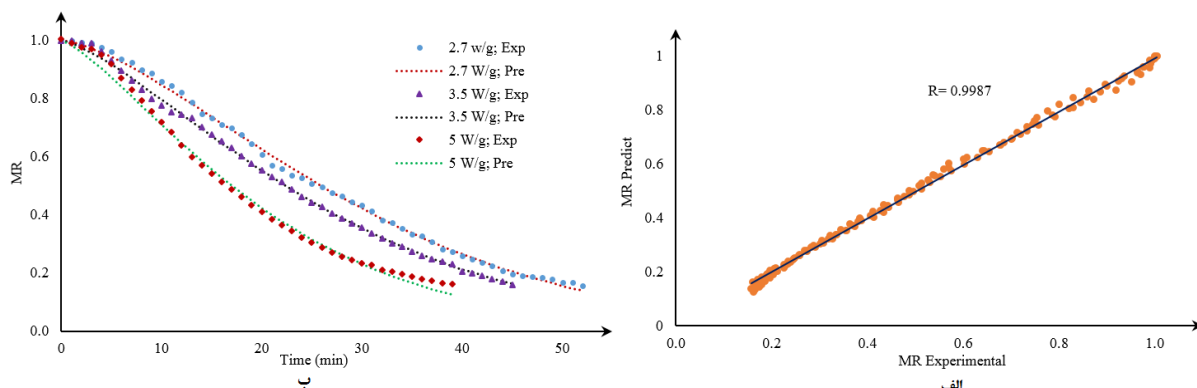
شکل (۱۰) تغییرات ظاهری محصول در طی فرآیند خشک کردن با هوای گرم

پیش‌بینی کند و فقط در ابتدای فرآیند که مرحله گرم کردن محصول می‌باشد و همچنین در انتهای فرآیند دارای مقداری خطا می‌باشد. همچنین جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل لگاریتمی (Logarithmic) با بیشترین مقادیر R^2 (۰/۹۹۹۶-۰/۹۹۸۴) و کمترین مقادیر RMSE (۰/۰۱۴۳۷ - ۰/۰۰۶۲۷۶) دارای بیشترین دقت مدل سازی برای داده های خشک کن جریان هوای گرم می‌باشد. شکل ۱۲-الف دقت برازش مدل لگاریتمی بر داده های تجربی را نشان می‌دهد. نتایج (2008) Doymas نیز نشان داد که مدل لگاریتمی برای مدل سازی تغییرات محتوای رطوبتی دارای دقت مناسب تری است.

برای مدل سازی و پیش‌بینی سینتیک خشک کردن از نرم افزار متلب استفاده شد. مقادیر ثابت های معادلات، R^2 و RMSE به دست آمده از مدل ها در جدول ۲ و ۳ به ترتیب برای خشک کن مایکروویو و جریان هوای گرم نشان داده شده است. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مدل پیچ (Page) با بیشترین مقادیر R^2 (۰/۹۹۸۷-۰/۹۹۴۵) و کمترین مقادیر RMSE (۰/۰۲۱۳ - ۰/۰۰۹۷) دارای بهترین دقت مدل سازی برای داده های خشک کن مایکروویو می‌باشد. شکل ۱۱-الف دقت برازش مدل پیچ بر داده های تجربی را نشان می‌دهد. همچنان که از شکل ۱۱-ب برمی آید مدل پیچ به خوبی قادر است تغییرات محتوای رطوبتی را

جدول (۲) نتایج مدل سازی در خشک کن مایکروویو

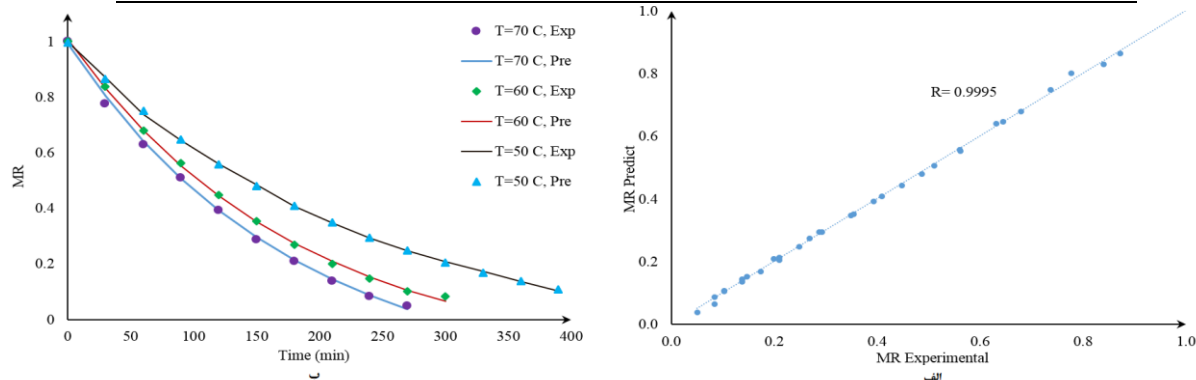
مدل	چگالی توان	ثابت های مدل	R^2	RMSE
Newton	۲/۷	$k=۰/۰۲۸۵۶$	۰/۹۴۴۶	۰/۰۶۶۷
	۳/۵	$k=۰/۰۳۲۶۸$	۰/۹۶۳۰	۰/۰۵۲۲
	۵	$k=۰/۰۴۳۴۰$	۰/۹۶۶۶	۰/۰۵۶۶۶
Page	۲/۷	$k=۰/۰۰۵۱۸۸$ $n=۱/۵۰۴$	۰/۹۹۸۰	۰/۰۱۲۸
	۳/۵	$k=۰/۰۰۹۳۵$ $n=۱/۳۸۵$	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۹۷
	۵	$k=۰/۰۱۵۹۹$ $n=۱/۳۲۹$	۰/۹۹۴۵	۰/۰۲۱۳
Henderson and pabis	۲/۷	$k=۰/۰۳۳۴۷$ $a=۱/۱۳۴$	۰/۹۷۶۵	۰/۰۴۳۹
	۳/۵	$k=۰/۰۳۷۱۷$ $a=۱/۱۰۵$	۰/۹۸۴۶	۰/۰۳۴۱
	۵	$k=۰/۰۴۳۹۰$ $a=۱/۱۱۲$	۰/۹۸۷۶	۰/۰۳۲۰
Logarithmic	۲/۷	$k=۰/۰۱۵۳۹$ $a=۱/۷۳۵$ $c=-۰/۶۵۹۲$	۰/۹۹۲۸	۰/۰۲۴۴
	۳/۵	$k=۰/۰۱۸۵$ $a=۱/۶۱۵$ $c=-۰/۵۶۱۷$	۰/۹۹۷۱	۰/۰۱۴۸
	۵	$k=۰/۰۳۸۳۲$ $a=۱/۲۳۵$ $c=-۰/۱۴۹۳$	۰/۹۹۱۰	۰/۰۲۷۶
Tow term exponential	۲/۷	$k=۰/۰۳۳۴۶$ $a=۱/۱۳۴$	۰/۹۷۶۵	۰/۰۴۴۳
	۳/۵	$k=۰/۰۳۷۱۷$ $a=۱/۱۰۵$	۰/۹۸۴۶	۰/۰۳۴۵
	۵	$k=۰/۰۳۸۳۲$ $a=۱/۲۳۵$	۰/۹۹۱۰	۰/۰۲۷۶
Wang and Singh	۲/۷	$a=-۰/۰۲۰۳۲$ $b=۶/۰۶۴e-۵$	۰/۹۸۵۱	۰/۰۳۴۹
	۳/۵	$a=-۰/۰۲۴۲۷$ $b=۰/۰۰۰۱۱$	۰/۹۹۳۲	۰/۰۲۲۵
	۵	$a=-۰/۰۳۴۹۳$ $b=۰/۰۰۰۳۲$	۰/۹۸۵۱	۰/۰۳۴۹
Modified Henderson and pabis	۲/۷	$k=۰/۰۱۰۴$ $a=۰/۵۴۳۸$ $g=۰/۶۰۵$ $b=-۷/۰۳۹$ $c=۷/۱۳۸$ $h=۰/۵۹۱۴$	۰/۸۴۱۹	۰/۱۱۷۴
	۳/۵	$k=۰/۰۳۴۳$ $a=۲۱/۶۳$ $g=۰/۵۰$ $b=۰/۱۴۶۴$ $c=-۴۸/۲۰$ $h=۰/۰۳۴۱$	۰/۹۹۵۷	۰/۰۱۸۷
	۵	$k=۰/۱۷۵۷$ $a=۰/۴۶۴$ $g=۰/۰۱۷۴$ $b=-۱۳/۰۸$ $c=۱۳/۹$ $h=۰/۰۱۸$	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۷۸



شکل (۱۱) الف) تغییرات محتوای رطوبتی واقعی در مقابل رطوبت پیش بینی شده، ب) نمودار تغییرات محتوای رطوبتی واقعی و پیش بینی شده با زمان در خشک کن مایکروویو

جدول (۳) نتایج مدل سازی در خشک کن جریان هوای گرم

مدل	دما (°C)	ثابت های مدل	R ²	RMSE
Newton	۵۰	k=۰/۰۰۵۰۹۶	۰/۹۹۶۸	۰/۰۱۶۰۸
	۶۰	k=۰/۰۰۷۱۷۲	۰/۹۹۱۰	۰/۰۲۹۴۷
	۷۰	k=۰/۰۰۸۳۲۹	۰/۹۸۵۷	۰/۰۳۸۲۴
Page	۵۰	k=۰/۰۰۳۴۱۷ n=۱/۰۷۵	۰/۹۹۸۶	۰/۰۱۱۱۲
	۶۰	k=۰/۰۰۲۹۲۷ n=۱/۱۷۹	۰/۹۹۹۰	۰/۰۱۰۳۷
	۷۰	k=۰/۰۰۳۲۰۸ n=۱/۱۹۵	۰/۹۹۴۴	۰/۰۲۵۴۷
Henderson and pabis	۵۰	K=۰/۰۰۵۱۸۴ a=۱/۰۱۵	۰/۹۹۷۲	۰/۰۱۵۵۵
	۶۰	k=۰/۰۰۷۴۳۵ a=۱/۰۳۴	۰/۹۹۳۱	۰/۰۲۷۳۲
	۷۰	k=۰/۰۰۸۵۵۵ a=۱/۰۲۶	۰/۹۸۶۹	۰/۰۳۸۸۵
Logarithmic	۵۰	k=۰/۰۰۴۲۳ a=۱/۱ c=-۰/۱۰۳۴	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۶۲۷
	۶۰	k=۰/۰۰۵۴۷۶ a=۱/۱۶۹ c=-۰/۱۶۰۹	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۸۶۷
	۷۰	k=۰/۰۰۵۶۱۷ a=۱/۲۲۳ c=-۰/۲۳۰۵	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۴۳۷
Tow term exponential	۵۰	k=۰/۰۰۶۲۱۷ a=۱/۵۳۴	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۰۰۲
	۶۰	k=۰/۰۰۹۶۶۸ a=۱/۷۰۷	۰/۹۹۹۰	۰/۰۱۰۱۱
	۷۰	k=۰/۰۱۱۱۸ a=۱/۷۰۹	۰/۹۹۴۵	۰/۰۲۵۱۰
Wang and Singh	۵۰	a=-۰/۰۰۴۱۶ b=۴/۹۲۱e-۶	۰/۹۹۷۲	۰/۰۱۵۵۶
	۶۰	a=-۰/۰۰۵۶۱۷ b=۸/۵۳۳e-۶	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۵۹۲
	۷۰	a=-۰/۰۰۶۳۰۹ b=۱/۰۴e-۵	۰/۹۹۷۸	۰/۰۱۵۹۸
Modified Henderson and pabis	۵۰	k=۰/۰۰۷۲۸۵ a=۴/۲۷۸ g=۰/۰۰۸۲۷۳ b=-۰/۰۰۳۰۵ c=۰/۰۲۶۵۳ h=۰/۷۱۹	۰/۹۹۹۱	۰/۰۱۰۷۶
	۶۰	k=۰/۰۱۱۳۸ a=۴/۰۴۴ g=۰/۰۱۳۸ b=-۳/۰۸۷ c=۰/۰۴۲۷۴ h=۰/۰۷۱۹	۰/۹۹۹۴	۰/۰۱۰۴۵
	۷۰	k=۰/۰۰۰۲۸۲۲ a=-۰/۳۱۰۸ g=۰/۶۹۳۲ b=۰/۰۲۷۴ c=۱/۲۸۴ h=۰/۰۰۵۱۰۵	۰/۹۹۸۰	۰/۰۱۷۵۳



شکل (۱۲) الف) تغییرات محتوای رطوبتی واقعی در مقابل رطوبت پیش بینی شده، ب) نمودار تغییرات محتوای رطوبتی واقعی و پیش بینی شده با زمان در خشک کن هوای گرم

می‌افتد که در مقایسه با هوای گرم که برای دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه به ترتیب به اندازه ۱۸، ۱۹/۷۵ و ۲۵/۷۵ تغییرات کلی رنگ رخ می‌دهد، بسیار پایین است. نتایج مربوط به مدل سازی نشان داد که مدل پیچ برای داده‌های خشک‌کن مایکروویو و مدل لگاریتمی برای داده‌های خشک‌کن جریان هوای گرم از میان سایر مدل‌ها دارای دقت بیشتری می‌باشند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه کردستان برای حمایت مالی از پژوهش حاضر با شماره قرارداد ۴/۵۳۰۶۸ نهایت تشکر و قدردانی داشته باشند.

REFERENCES

- Da Silva, F.L., Escribano-Bailon, M.T., Pérez Alonso, J.J., Rivas-Gonzalo, J.C., Santos-Buelga, C. (2007). Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT - Food Science and Technology*, 40, 374-382.
- Scalzo, J., Politi, A., Pellegrini, N., Mezzetti, B., Battino, M. (2005). Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition*, 21(2), 207-213.
- Modise, D. M. (2008). Does freezing and thawing affect the volatile profile of strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), 25-30.
- Mousa, N., Farid, M. (2002). Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology*, 20, 2055-2066.
- Boldor, D. (2003). Temperature Control of the Continuous Peanut Drying Process Using Microwave Technology. MS Thesis, NCSU.
- Cam, I. B., Gulmez, B. H., Eroglu, E., Topuz, A. (2018). Strawberry drying: Development of a closed-cycle modified atmosphere drying system for food products and the performance evaluation of a case study. *Drying Technology*, 36 (12), 1460-1473.
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L.S., Bejar, A.K., Perez, C.T., Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286-300.
- Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 47, 914-919.
- Omari, A., Behrooz-Khazaei, N., Sharifian, F. (2018). Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer. *Journal of Food Process Engineering*, e12849.
- Lakshminarayana, R. (2006). Drying characteristics of Saskatoon berries under microwave and combined microwave-convection heating. MSc Thesis, University of Saskatchewan.
- Shivhare, U., Raghavan, G. Bosisio, R. (1991). Drying of corn using variable microwave power with a surface wave applicator. *Journal of the Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 26, 38-44
- Cheng, W.M., Raghavan, G.S.V., Ngadi, M. 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.
- Li, Z., Raghavan, G.S.V. Orsat, V. (2010). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 97(4): 478-483.
- 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.
- Sumnu, G., Turabi, E. Oztop, M. (2005). Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens. *LWT*, 38, 549-553.
- AOAC. (1980). Official methods of analysis (13th ed.). Washington, DC: Author.
- Sharma, G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *J. Food Eng.* 67, 361-366.
- Funebo, T., Ohlsson, T. (1998). Microwave assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering* 38, 353-367.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44, 71-78.
- 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.
- Pereira, N., Marsaioli, A., Arhne, L.M. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically treated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81, 79-87.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش سینتیک خشک کردن برگه توت‌فرنگی در خشک‌کن مایکروویو و هوای گرم مدل سازی شد. نتایج نشان داد زمان خشک کردن در خشک‌کن مایکروویو با چگالی توان ۵، ۳/۵ و ۲/۷ وات بر گرم به ترتیب برابر با ۶۰، ۴۶ و ۴۰ دقیقه می‌باشد که در مقایسه با زمان خشک کردن در خشک‌کن هوای گرم با دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس به ترتیب با زمان‌های ۳۹۰، ۳۰۰ و ۲۷۰ دقیقه، بسیار پایین می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد بیشتر تغییرات رنگ محصول در خشک‌کن مایکروویو در همان ابتدا رخ می‌دهد و بعد از آن تغییرات زیادی از خود نشان نمی‌دهد. برای هر سه تیمار چگالی توان در انتهای فرآیند به اندازه ۱۰ واحد تغییرات رنگ کل اتفاق