



Effect of microwave pretreatment on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration of dried orange slices

Fakhreddin Salehi^{1✉}, Kimia Samary² and Maryam Tashakori²

¹PhD, Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

✉ Corresponding author: F.Salehi@Basu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article history:

Received: December 10, 2023

Accepted: February 27, 2024

Published: March 3, 2024

Keywords:

Effective moisture diffusivity coefficient, Microwave, Orange, Page model, Total color difference

ABSTRACT

Background: Orange is one of the main types of citrus fruits and are used as fresh fruit, juice, concentrate, or dried slices. In this research, in evaluating the effect of microwave pretreatment on orange slices, the most appropriate mathematical model to describe the drying kinetics of this product was introduced.

Aims: In this research, the effects of microwave pretreatment on the mass transfer rate, effective moisture diffusivity, rehydration, shrinkage, and color indexes of orange slices were investigated and the drying kinetics was modeled.

Methods: To apply microwave pre-treatment, the oranges were placed inside the microwave device for 0, 1, 2, and 3 min, and after treatment, slices with a thickness of 0.5 cm were prepared from oranges and in thin-layers placed in a hot air dryer.

Results: Microwave treatment increased moisture removal rate, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time of orange slices. By increasing the microwave treatment time from 0 to 3 min, the average drying time of orange slices in the hot-air dryer decreased from 216.67 min to 186.67 min. Also, with increasing the microwave treatment time from 0 to 3 min, the average effective moisture diffusivity coefficient increased from $4.72 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $6.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Applying 2 and 3 min of microwave on orange slices had a significant effect on increasing the dried product rehydration. Microwave pretreatment did not have a significant effect on surface shrinkage change of the product, but in terms of the total color difference, the treated and dried samples had less changes in appearance color than the fresh sample. The average yellowness, redness, and lightness indexes of dried orange slices were 40.71, 2.02, and 52.65, respectively. Due to less error, Page model was used for kinetic modeling of orange slices drying.

Conclusion: Generally, it is recommended to apply 2 min of microwave before drying orange slices due to the reduction of drying time.



Extended Abstract

Introduction: Orange is one of the main types of citrus fruits and are used as fresh fruit, juice, concentrate, or dried slices. In this research, in evaluating the effect of microwave pretreatment on orange slices, the most appropriate mathematical model to describe the drying kinetics of this product was introduced (Sharifi *et al.* 2010). Moisture content promotes the growth of microorganisms and is a major cause of food spoilage. Therefore, decreasing the moisture content economically reduces foods spoilage (Subramanyam *et al.* 2017). Drying is a concurrent heat and mass transfer process that is widely used in fresh fruits and vegetables processing to prolong the shelf-life of agricultural products by decreasing moisture content and lowering water activity (Salehi, 2023). Microwave radiation is a type of non-ionizing radiation energy utilized in foods production, which can efficiently alter the structural and functional properties of foods ingredients. The operating frequency is 915MHz or 2450MHz and is widely used in the food industries (Yılmaz and Tugrul 2023). Microwave pretreatments can facilitate mass transfer in the dehydration procedure and reduce drying time for fruit and vegetable products (Wray and Ramaswamy 2015). Surface color and size of dried fruits are the main important quality parameters that determine the acceptance of these products. Procedure variables include pretreatment, dryer type, and drying conditions that are expected to influence the color and finish of the dried product (Kowalska *et al.*, 2021). We found no report on the effects of microwave pretreatment on the hot-air drying kinetics of orange slices in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of microwave pretreatment on the drying time, mass transfer kinetic, effective moisture diffusivity (D_{eff}), shrinkage, color indexes, and rehydration of orange slices. In addition, the moisture ratio changes of orange slices during drying were modeled.

Material and methods: The average diameter of fresh orange slices was 7.3 cm. In this study, the water content of fresh and dried orange slices was calculated using an oven at 105°C

for 4 h (Shimaz, Iran). In this research, the effect of microwave time on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient, and rehydration of orange slices were investigated, and drying kinetics were modeled. To apply the microwave treatments on the orange slices, a microwave oven (Gplus, Model; GMW-M425S.MIS00, Goldiran Industries Co., Iran) was employed with a power of 330 W. To apply microwave pre-treatment, the orange were placed inside the microwave device for 0, 1, 2, and 3 minutes, and after leaving the device, the samples in thin layers were placed in the hot-air dryer (with a temperature of 70°C). The dehydration kinetics of orange slices have been explained using 4 simplified drying equations. Fick's second law of diffusion was used to calculate the moisture diffusivity of orange slices. The color of orange slices was analyzed using an Image J software (V.1.42e, USA). The L^* (lightness), a^* (greenness/redness) and b^* (blueness/yellowness) values for each sample were recorded in triplicates. The rehydration tests were conducted with a water bath (R. J42, Pars Azma Co., Iran). Dried orange slices were weighed and immersed for 30 min in distilled water in a 250 ml glass beaker at 50°C. The experiments were conducted with a fully randomized factorial design using SPSS software version 21. All tests were run in triplicate and Duncan's test was utilized to compare the averages of observed responses at the 95% probability level.

Results and discussion: The results showed that microwave treatment, causes an increase in moisture removal rate from the orange slices, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing the microwave time from zero to 3 min, the average drying time of orange slices in the hot-air dryer decreased from 216.67 min to 186.67 min. Sharma and Prasad (2006) used a laboratory microwave for drying of garlic. They confirmed that the microwave drying of garlic cloves decreased drying duration compared to hot air dehydration, and the quality attributes of dehydrated product by microwave methods, was found higher. The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for

the samples placed in the hot-air dryer was equal to $5.70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Increasing the microwave time from 0 to 3 minutes increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 31.76%. Microwave pretreatment did not have a significant effect on the surface shrinkage change of the product, but in terms of the total color difference index, the treated and dried samples had less changes in appearance color than the original sample. The average yellowness, redness, and lightness indexes of dried orange slices were 40.71, 2.02, and 52.65, respectively. By increasing the microwave treatment time from 0 to 3 min, the total color difference index of the dried orange slices significantly decreased from 12.70 to 6.38 ($p < 0.05$). The time of microwave treatment had significant effects on the rehydration of dried orange slices.

Conclusion: Kinetic modeling of orange slices weight changes during drying was carried out by models in the sources, followed the Page model was selected as the best model to predict moisture ratio changes under the selected experimental conditions. Mean values of the sum of squares due to error, root mean square error, and r for all samples ranged from 0.0148-0.0329, 0.0249-0.0370, and 0.9930-0.9967, respectively. Generally, 2 min pretreatment by microwave is the best condition for drying orange slices.

تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر سینتیک خشک شدن، رنگ، چروکیدگی و آبگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک شده

فخرالدین صالحی^۱، کیمیا ثمری^۲ و مریم تشکری^۲

^۱دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

✉مسئول مکاتبه: F.Salehi@Basu.ac.ir

چکیده

مشخصات مقاله

زمینه مطالعاتی: پرتقال یکی از مهمترین گونه‌های مرکبات می‌باشد که به صورت میوه تازه، آب‌میوه، کنسانتره و یا برش‌های نازک خشک شده استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن ارزیابی اثر پیش تیمار مایکروویو بر برش‌های پرتقال، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن این محصول معرفی شود.

هدف: در این پژوهش اثر اعمال پیش تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، آبگیری مجدد، چروکیدگی و شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال بررسی و سینتیک خشک شدن آن مدل‌سازی شد.

روش کار: برای اعمال پیش تیمار مایکروویو، پرتقال‌ها به مدت ۰، ۱، ۲ و ۳ دقیقه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از تیماردهی، برش‌هایی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر از پرتقال‌ها تهیه و به صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن هوای داغ قرار گرفتند.

نتایج: پیش تیمار مایکروویو سبب افزایش سرعت خروج رطوبت، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک کردن برش‌های پرتقال شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، متوسط زمان خشک شدن برش‌های پرتقال در خشک‌کن همرفتی از ۲۱۶/۶۷ دقیقه به ۱۸۶/۶۷ دقیقه کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از $4/72 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $6/23 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت. اعمال ۲ و ۳ دقیقه مایکروویو بر برش‌های پرتقال تأثیر معنی‌داری بر افزایش آبگیری مجدد محصول خشک شده داشت. پیش تیمار مایکروویو بر تغییر چروکیدگی سطحی محصول تأثیر معنی‌داری نداشت، اما از نظر شاخص تغییرات رنگ، نمونه‌های تیمار و خشک شده، تغییرات کمتری از نظر رنگ ظاهری نسبت به نمونه اولیه داشتند. متوسط شاخص‌های زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال خشک شده به ترتیب برابر ۴۰/۷۱، ۲/۰۲ و ۵۲/۶۵ بود. به دلیل خطای کمتر، جهت مدل‌سازی سینتیک خشک شدن برش‌های پرتقال، از مدل پیچ استفاده شد.

نتیجه‌گیری نهایی: در مجموع، اعمال ۲ دقیقه مایکروویو پیش از خشک کردن برش‌های پرتقال به دلیل کاهش زمان خشک کردن، توصیه می‌شود.

نوع مقاله:
علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۸

انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

کلید واژگان:

پرتقال، شاخص تغییرات رنگ، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، مایکروویو، مدل پیچ

مقدمه

گلابی (*Pyrus communis L.*) را بررسی کردند. ویژگی‌های خشک‌کردن میوه‌های گلابی نیز با در نظر گرفتن مدل‌های تجربی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مدل پیچیده‌ترین پیش‌بینی رفتار خشک‌کردن را ارائه کرد. تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو با توان‌های مختلف مایکروویو (۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ وات) در زمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دقیقه بر کیفیت نمونه‌های هویج تو سط Sabry و همکاران (۲۰۱۶) بررسی شد. سپس بهترین تیمار مایکروویو (پارامترهای با کیفیت بالا) برای خشک‌کردن کامل با دو فن خشک‌کن همرفتی و خشک‌کن آون خلأ انتخاب شد. نتایج گزارش شده از این پژوهش نشان داد که بهترین تیمار مایکروویو توان ۳۶۰ وات در ۶ دقیقه بود که باعث افت وزن به میزان ۸۱/۷۵ درصد و رطوبت به مقدار ۵۲/۳۲ درصد شد. Coklar و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که پیش‌تیمار مایکروویو قبل از فرآیند خشک‌کردن می‌تواند برای کاهش زمان و هزینه خشک‌کردن استفاده شود.

مدل‌سازی ریاضی برای ارزیابی فرآیند خشک‌کردن و بررسی پتانسیل یک روش برای افزایش مقیاس استفاده می‌شود (Turan and Firatligil, 2019). مدل‌های ریاضی لایه‌نازک که به صورت متداول استفاده می‌شوند عبارت‌اند از مدل هندرسون و پابیس^۱ (معادله ۱)، مدل تقریب انتشار^۲ (معادله ۲)، مدل پیچ^۳ (معادله ۳) و مدل نیوتن^۴ (معادله ۴) (Salehi and Satorabi, 2021).

$$MR = a \exp(-kt) \quad (1)$$

$$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (2)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

$$MR = \exp(-kt) \quad (4)$$

در این معادلات، MR نشان دهنده نسبت رطوبت (بدون بعد)، زمان خشک‌کردن (دقیقه) و حروف k ، a ، b و n ثابت‌های معادلات هستند که بعد از برازش کردن داده‌های نسبت رطوبت در برابر زمان خشک‌کردن، محاسبه می‌شوند.

رطوبت زیاد باعث رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود و عامل اصلی فساد در مواد غذایی است؛ بنابراین کاهش رطوبت باعث کاهش فساد مواد غذایی می‌شود (Subramanyam et al., 2017). خشک‌کردن یک روش فرآوری است که هدف آن کاهش وزن یا حجم مواد جهت بهبود پارامترهای کیفیت یک محصول است (Gaukel et al., 2017). به خشک شدن فراورده‌های غذایی به صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک‌کردن به روش لایه‌نازک می‌گویند. در اکثر موارد خشک‌کردن میوه‌ها باعث بهبود ویژگی حسی محصول می‌گردد (Salehi, 2023). استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش‌تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (Sahin and Doymaz, 2017). امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس هستند و در طیف بین امواج دی‌الکتریک و فرسرخ قرار گرفته‌اند. این امواج به دلیل دارا بودن فرکانس کم، برخلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب‌رسانی به مولکول‌های مواد غذایی نیستند. مایکروویو از طریق ایجاد اصطکاک مولکولی بین مولکول‌های آب، تولید گرما در محصول می‌کند. گرمای تولید شده توسط سیستم مایکروویو در محصول، به میزان آب موجود در مواد غذایی بستگی دارد و این گرما به عمق آن نفوذ می‌کند (Wray and Ramaswamy, 2015; Yilmaz and Tugrul, 2023). نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب کمترین آسیب به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود (Akbarian Meymand et al., 2015). Önal و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو (۵۳۹ وات، ۴ دقیقه) بر پارامترهای فیتوشیمیایی، تغییرات رنگ و سینتیک خشک‌کردن یک نوع

وزن برش‌ها هر ۱۰ دقیقه توسط ترازوی آزمایشگاهی (کیا، مدل SL1000، ایران) با دقت ۰/۰۱ گرم ثبت شد.

تعیین درصد رطوبت اولیه برش‌ها

برای تعیین رطوبت اولیه محصول، برش‌های تازه پرتقال داخل آون (شیماز، ایران) با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت (حدود ۴ ساعت) قرار گرفتند.

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۳ برش‌های پرتقال تیمار شده هنگام خشک شدن توسط خشک‌کردن همرفتی، ابتدا مختصات نمونه تیغه در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک^۳ استفاده گردید. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک‌کردن و با استفاده از معادله ۵ محاسبه شد (Salehi and Satorabi, 2021).

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

در این معادله، L نصف ضخامت برش‌ها (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2s^{-1}) و Slope شیب خط می‌باشد.

مدل‌سازی سینتیکی

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن برش‌های پرتقال تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ و نیوتن برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (Salehi and Satorabi, 2021). به منظور مدل‌کردن داده‌های تجربی خشک‌کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

محاسبه چروکیدگی و شاخص‌های رنگی

جهت بررسی چروکیدگی و تغییرات رنگ برش‌های پرتقال خشک و آبگیری شده از روش پردازش تصویر استفاده گردید. در این روش از یک اسکنر اچ‌پی^۴، جهت تهیه عکس از

پرتقال یکی از مهمترین گونه‌های مرکبات است که به صورت میوه تازه، آب‌میوه، کنسانتره و یا برش‌های نازک خشک شده استفاده می‌شود (Sharifi et al., 2010). افتخاری و همکاران (۱۴۰۲) تأثیر پیش تیمارهای فراصوت و شرایط فرآیند بر سرعت انتقال جرم طی آبگیری اسمزی برش‌های پرتقال را بررسی کردند. این پژوهشگران اعمال ۵ دقیقه فراصوت با توان ۱۵۰ وات، به دلیل کاهش جذب مواد جامد و افزایش درصد آبگیری مجدد، قبل از فرآیند آبگیری اسمزی از برش‌های پرتقال توسط محلول حاوی ۴۰ درصد ساکارز را توصیه کرده‌اند.

میوه‌های مختلف به دلیل دارا بودن انواع ویتامین و فیبر نقش مهمی در کاهش ابتلا به انواع بیماری‌ها دارند. هدف از این پژوهش بررسی اثر پیش تیمار مایکروویو در چهار سطح ۰، ۱، ۲ و ۳ دقیقه بر سرعت انتقال جرم، آبگیری مجدد، چروکیدگی و شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال بود.

مواد و روش‌ها

تیماردهی و خشک‌کردن برش‌های پرتقال

این پژوهش در آزمایشگاه تخصصی دانشکده صنایع غذایی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شد. برای انجام این پژوهش، پرتقال تامسون با اندازه و شکل یکسان از شهرستان قائم‌شهر تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. برای تیماردهی با مایکروویو، در هر مرحله یک پرتقال سالم (بدون پوست‌گیری) با میانگین وزن ۱۶۰ گرم درون دستگاه مایکروویو آزمایشگاهی (جی پلاس، مدل GMW-M425S.MIS00، شرکت گلدیران، ایران) قرار می‌گرفت. زمان اعمال تیمار مایکروویو برابر ۰، ۱، ۲ و ۳ دقیقه با توان ۳۳۰ وات در نظر گرفته شد. بعد از تیماردهی، برش‌هایی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر توسط اسلایسر صنعتی (جرمی، ایتالیا^۱) از پرتقال‌ها تهیه (با پوست) و به صورت لایه نازک داخل آون فن دار (شیماز، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند. در این مرحله، تغییرات

3- Fick's second law of diffusion

4- Hp Scanjet 300, China

1- Girmi, Italy

2- Effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff})

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (۸)$$

در این معادله، RR نسبت باز جذب آب، M وزن برش‌های پرتقال بعد از باز جذب آب و M_0 وزن برش‌های پرتقال خشک می‌باشد.

آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون‌های خشک‌کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر زمان خشک شدن

میانگین رطوبت اولیه برش‌های پرتقال (با پوست) برابر ۸۴/۵۳ درصد برپایه مرطوب بود. خروج ۹۰ درصد رطوبت از برش‌های پرتقال به‌عنوان زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. در جدول ۱ اثر زمان اعمال مایکروویو بر زمان خشک شدن برش‌های پرتقال گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش زمان اعمال مایکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش یافته است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن برش‌های پرتقال در خشک‌کن هوای داغ از ۲۱۶/۶۷ دقیقه به ۱۸۶/۶۷ دقیقه کاهش یافت ($p > 0.05$). نتایج حاکی از این است که زمان خشک شدن تیمارهای ۲ و ۳ دقیقه یکسان است و اعمال ۲ دقیقه پیش‌تیمار مایکروویو برای کاهش زمان خشک شدن برش‌های پرتقال کافی است. Prasad و Sharma (۲۰۰۶) برای خشک‌کردن سیر از مایکروویو آزمایشگاهی استفاده کرد. آنها تأیید کردند که خشک‌کردن حبه‌های سیر در مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک شدن در مقایسه با خشک‌کردن با هوای گرم

نمونه‌های تازه، خشک و آبگیری شده استفاده شد. ابتدا تصاویر با فرمت JPG و در فضای رنگی RGB ذخیره شدند. تصاویر گرفته‌شده توسط نرم‌افزار Image J (Image J software version 1.42e, USA) آنالیز و مساحت و پارامترهای رنگی آنها شامل روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*) و زردی (b^*) محاسبه شد.

درصد تغییر اندازه سطح برش‌های پرتقال خشک و آبگیری شده که معیاری از چروکیدگی و کاهش سطح محصول در طی فرآیند خشک‌کردن می‌باشد، با استفاده از روش پردازش تصویر و رابطه ۶ محاسبه و گزارش شد.

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (۶)$$

در این رابطه، A_1 : سطح نمونه تازه (سانتی‌متر مربع) و A_2 : سطح نمونه خشک‌شده (سانتی‌متر مربع) است.

در نرم‌افزار ایمیج جی برای تبدیل فضای رنگی RGB به $L^* a^* b^*$ از پلاگین Color Space Converter استفاده شد. مدل رنگی $L^* a^* b^*$ مرکب از جزء روشنایی (مقدار L که دامنه‌ای از صفر تا ۱۰۰ را دارد) و دو جزء رنگی (دامنه‌ای از ۱۲۰- تا ۱۲۰+) که شامل جزء a^* (دارای طیف رنگی سبز تا قرمز) و جزء b^* (دارای طیف رنگی آبی تا زرد) می‌باشد، تشکیل شده است. مقادیر پارامتر تغییر رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه، با استفاده از معادله ۷ محاسبه شد (Salehi, 2019).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (۷)$$

آبگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک‌شده

برای محاسبه درصد آبگیری مجدد^۱ (RR)، برش‌های پرتقال خشک‌شده توزین، سپس درون حمام آب (مدل R.J42، شرکت پارس آزما، ایران) با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از آب خارج شده و توزین شدند (Salehi et al., 2022). نسبت باز جذب آب توسط معادله ۸ محاسبه و گزارش شد.

بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش توان ترکیبی امواج مایکروویو در یک دمای مشخص و همچنین افزایش دمای هوای گرم در یک توان ترکیبی مشخص، باعث کاهش چشمگیر زمان و افزایش قابل توجه سرعت خشک کردن می‌شود. Sabry و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که استفاده از پیش تیمار مایکروویو قبل از خشک کردن ۷۵ تا ۷۸/۵ درصد دوره خشک شدن را نسبت به سایر روش‌ها کاهش می‌دهد.

Table 1- Impact of microwave pretreatment on the drying time of orange slices

Microwave time	Drying time (min)
0 min	216.67±12.47 ^a
1 min	206.67±18.86 ^a
2 min	186.67±12.47 ^a
3 min	186.67±9.43 ^a

Same letters above the values means non-statistically significant differences among the groups ($p > 0.05$)

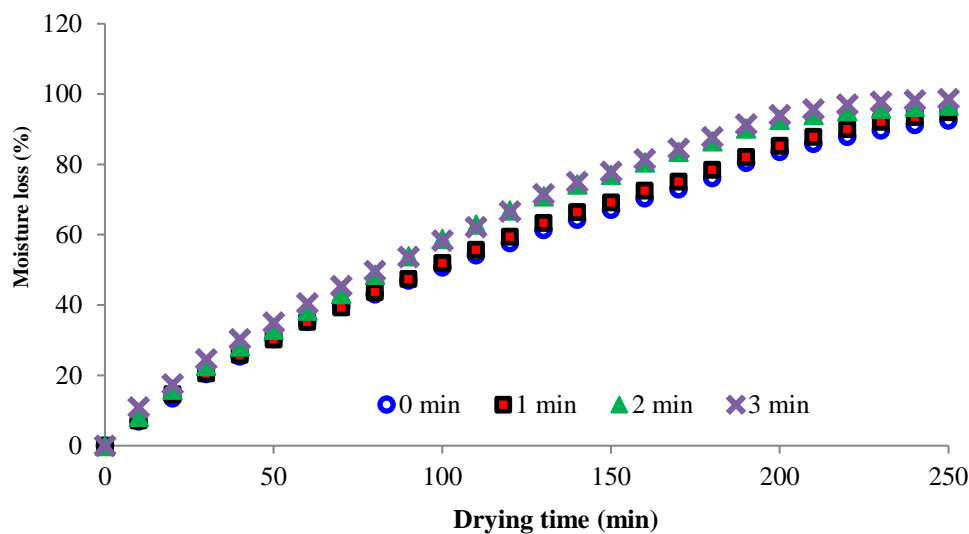


Figure 1- Impact of microwave pretreatment on the moisture loss rate of orange slices during drying process

با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت از برش‌های پرتقال و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول می‌شود. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای برش‌های پرتقال قرار گرفته در خشک‌کن از $6.72 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ به $4.72 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p > 0.05$). دهقانی‌خیای و

می‌شود و ویژگی‌های کیفی محصول خشک شده با روش مایکروویو نیز بالاتر است.

خشک کردن با مایکروویو رطوبت را سریع‌تر از روش‌های خشک کردن متداول منتقل می‌کند و ارزش غذایی مواد غذایی را بهتر حفظ می‌کند (Aydar et al., 2022). در این پژوهش، همه برش‌های پرتقال تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند و هر ۱۰ دقیقه تغییرات وزن آنها ثبت شد. شکل ۱ افت رطوبت برش‌های پرتقال تیمار شده با مایکروویو طی فرآیند خشک شدن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تیماردهی برش‌های پرتقال توسط امواج مایکروویو باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است. Karimi و همکاران (۲۰۲۱) اثر روش ترکیبی امواج مایکروویو- هوای گرم تحت پیش تیمار مایکروویو بر سینتیک خشک کردن میوه مورد مطالعه کردند.

اثر مایکروویو بر نفوذ مؤثر رطوبت

در فرآیند خشک کردن توسط مایکروویو به علت تمرکز بهتر انرژی، رطوبت با سرعت بیشتری خارج شده و مدت زمان خشک شدن نیز کاهش می‌یابد (Maskan 2000). در جدول ۲ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود

همکاران (۱۳۹۹) از روش‌های هیبریدی (هوای داغ- مایکروویو- فرورسرخ) جهت خشک‌کردن سیب‌زمینی استفاده و ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت مربوط به روش‌های ترکیبی هوای داغ- مایکروویو و هوای داغ- مایکروویو- فرورسرخ می‌باشد. همچنین روش هوای داغ- مایکروویو بیشترین میزان بازجذب آب و روش هوای داغ- مایکروویو- فرورسرخ کمترین میزان چروکیدگی را به خود اختصاص داد.

Table 2- Impact of microwave pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of orange slices

Microwave time	Moisture diffusivity coefficient (m ² /s)
0 min	4.72×10 ⁻¹⁰ ±5.38×10 ⁻¹¹ a
1 min	5.79×10 ⁻¹⁰ ±1.66×10 ⁻¹⁰ a
2 min	6.07×10 ⁻¹⁰ ±7.46×10 ⁻¹¹ a
3 min	6.23×10 ⁻¹⁰ ±6.26×10 ⁻¹¹ a

Same letters above the values means non-statistically significant differences among the groups (p > 0.05)

مدل‌سازی فرآیند خشک شدن برش‌های پرتقال با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مدل‌سازی نشان داد که بهترین مدل در مورد فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال با بالاترین برازش، بیشترین مقدار ضریب تبیین (r) و حداقل خطا، مدل پیچ است. در جدول ۴ مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (n و k) برای شرایط مختلف خشک‌کردن برش‌های پرتقال گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در محدوده ۰/۰۱۴۸ تا ۰/۰۳۲۹، ۰/۰۹۹۳۰ تا ۰/۹۹۶۷ و ۰/۰۲۴۹ تا ۰/۰۳۷۰ به دست آمد.

Table 3- Calculated statistical parameters to verify the agreement of each mathematical model with the moisture ratio (MR) data (microwave time=2 min)

Model name	Page	Newton	Henderson and Pabis	Approximation of diffusion
Model equation	MR=exp(-kt ⁿ)	MR=exp(-kt)	MR=aexp(-kt)	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)
Model constants	k=0.0028 n=1.2620	k=0.0097	a=1.056 k=0.0107	a=-0.8463 k=0.0112 b=0.9246
SSE ¹	0.0148	0.0528	0.0434	0.0509
r	0.9967	0.9884	0.9905	0.9888
RMSE ²	0.0249	0.0459	0.0425	0.0471

1- Sum of squares due to error (SSE); 2- Root mean square error (RMSE)

Table 4- The constants and coefficients of the Page model to predict the moisture ratio of orange slices

Microwave time	k	n	SSE ¹	r	RMSE ²
0 min	0.0035	1.1827	0.0156	0.9962	0.0255
1 min	0.0029	1.2333	0.0246	0.9944	0.0317
2 min	0.0027	1.2687	0.0163	0.9964	0.0260
3 min	0.0027	1.2613	0.0227	0.9950	0.0305

1- Sum of squares due to error (SSE); 2- Root mean square error (RMSE)

تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک‌شده و آنگیری شده ندارد (p>۰/۰۵). البته با اعمال ۲ و ۳ دقیقه مایکروویو بر برش‌های پرتقال، درصد چروکیدگی سطحی افزایش یافت، اما از نظر آماری اختلاف

اثر مایکروویو بر چروکیدگی سطحی

در جدول ۵ اثر زمان اعمال مایکروویو بر چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک‌شده و آنگیری شده گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو

در جدول ۶ شاخص تغییر رنگ کل نیز گزارش شده است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، شاخص تغییر رنگ کل برش‌های پرتقال خشک شده به صورت معنی داری از ۱۲/۷۰ به ۶/۳۸ کاهش یافت ($p < 0/05$).

در جدول ۷ اثر زمان اعمال مایکروویو بر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال آبگیری شده گزارش شده است. متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال آبگیری شده به ترتیب برابر ۴۲/۶۳، ۲/۲۴- و ۵۹/۵۳ بود. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر شاخص زردی برش‌های پرتقال آبگیری شده دارد ($p < 0/05$) و شاخص زردی نمونه‌های تیمار شده با مایکروویو کمتر از نمونه شاهد است. از نظر شاخص قرمزی فقط نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳ دقیقه با سایر نمونه‌ها اختلاف معناداری داشت ($p < 0/05$). از نظر شاخص روشنایی نیز اختلاف معناداری بین نمونه‌ها وجود نداشت ($p > 0/05$). همچنین، شاخص تغییر رنگ کل نیز با اعمال پیش تیمار مایکروویو کاهش یافت و از نظر آماری اختلاف معناداری بین نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳ دقیقه با نمونه شاهد وجود دارد ($p < 0/05$). این موضوع نشان می‌دهد که با اعمال پیش تیمار مایکروویو به مدت ۳ دقیقه، تغییرات رنگی نمونه آبگیری شده کمتر شده و از نظر ظاهری و شاخص‌های رنگی، این برش‌ها به برش‌های تازه پرتقال نزدیکتر هستند. خاکبازحشمتی و سیفی مقدم (۱۳۹۶) تکنیک متناوب مایکروویو- هوای گرم بر خواص کیفی و تغذیه‌ای برگه‌های کیوی خشک شده را بررسی کردند. در این پژوهش، کمترین میزان چروکیدگی محصول مربوط به نمونه‌های خشک شده به روش ترکیبی بود. همچنین کمترین میزان تغییرات رنگ نمونه‌ها نیز مربوط به کیوی‌های خشک شده توسط خشک‌کن مایکروویو بود.

معناداری مشاهده نشد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، میانگین چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک شده از ۲۰/۱۸ درصد به ۲۴/۵۹ درصد افزایش یافت. متوسط اندازه برش‌های تازه پرتقال ۴۱/۳۳ سانتی مترمربع بود که بعد از خشک شدن متوسط اندازه آنها به ۳۲/۲۷ سانتی مترمربع کاهش یافت و بعد از آبگیری نیز متوسط اندازه آنها ۳۵/۴۱ سانتی مترمربع شد. بعد از فرآیند آبگیری مجدد، از نظر پارامتر تغییرات سطح (چروکیدگی سطحی) نسبت به نمونه تازه، نمونه شاهد کمترین مقدار (۱۳/۱۹٪) و نمونه پیش تیمار شده با مایکروویو به مدت ۲ دقیقه بیشترین مقدار (۱۵/۶۱٪) را داشتند.

Table 5- Impact of microwave pretreatment on shrinkage of dried and rehydrated orange slices.

Microwave time	Shrinkage (%)	
	Dried	Rehydrated
0 min	20.18±1.70 ^a	13.19±0.78 ^a
1 min	19.83±2.19 ^a	14.47±1.09 ^a
2 min	24.48±3.93 ^a	15.61±0.80 ^a
3 min	24.59±1.65 ^a	14.20±2.62 ^a

Same letters above the values means non-statistically significant differences among the groups ($p > 0.05$)

اثر مایکروویو بر شاخص‌های رنگی

رنگ سطح و اندازه میوه‌های خشک اصلی‌ترین پارامترهای کیفی هستند که میزان پذیرش این محصولات را تعیین می‌کنند. متغیرهای فرآیند شامل پیش تیمارهای مختلف، نوع خشک‌کن و شرایط خشک کردن بر رنگ و چروکیدگی محصول خشک تأثیر می‌گذارند (Kowalska et al., 2021). متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال تازه به ترتیب برابر ۳۳/۰۷، ۰/۳۱ و ۵۱/۰۷ بود. در جدول ۶ اثر زمان اعمال مایکروویو بر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال خشک شده گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال خشک شده ندارد ($p > 0/05$). متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال خشک شده به ترتیب برابر ۴۰/۷۱، ۲/۰۲ و ۵۲/۶۵ بود.

Table 6- Impact of microwave pretreatment on color indexes of dried orange slices.

Microwave time	Yellowness (b*)	Redness (a*)	Lightness (L*)	Total color difference (ΔE)
0 min	44.04±3.70 ^a	1.48±1.34 ^a	54.99±4.91 ^a	12.70±2.85 ^a
1 min	38.27±4.18 ^a	1.41±1.12 ^a	51.15±1.65 ^a	11.37±2.61 ^{ab}
2 min	43.22±1.72 ^a	1.62±1.03 ^a	52.10±3.91 ^a	9.67±1.71 ^{ab}
3 min	37.30±3.31 ^a	3.52±0.21 ^a	52.34±2.23 ^a	6.38±2.67 ^b

Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$)

Table 7- Impact of microwave pretreatment on color indexes of rehydrated orange slices.

Microwave time	Yellowness (b*)	Redness (a*)	Lightness (L*)	Total color difference (ΔE)
0 min	50.68±3.25 ^a	-2.78±0.84 ^b	59.92±1.10 ^a	15.57±1.70 ^a
1 min	38.17±1.69 ^b	-2.91±1.04 ^b	58.63±1.14 ^a	14.82±0.43 ^{ab}
2 min	40.79±4.50 ^b	-2.63±0.11 ^b	59.83±0.17 ^a	13.64±1.51 ^{ab}
3 min	42.86±2.19 ^b	-0.63±0.77 ^a	59.74±0.72 ^a	11.92±0.72 ^b

Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$)

اثر مایکروویو بر شاخص آبگیری مجدد

در جدول ۸ اثر زمان اعمال مایکروویو بر آبگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک‌شده گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آبگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک‌شده دارد ($p < 0.05$). با اعمال ۲ و ۳ دقیقه مایکروویو بر برش‌های پرتقال، درصد آبگیری مجدد افزایش یافت. البته بین تیمارهای ۲ و ۳ دقیقه از نظر آماری اختلاف معناداری مشاهده نشد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، میانگین آبگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک‌شده از ۲۴۰/۶۲ درصد به ۲۷۲/۹۷ درصد افزایش یافت. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، دهقانی‌خیوای و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که بیشترین میزان بازجذب آب برای سیب‌زمینی خشک‌شده به روش‌های مختلف، مربوط به نمونه‌های تهیه شده توسط خشک‌کن هوای داغ- مایکروویو بوده است. همچنین، بیشترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت مربوط به روش‌های ترکیبی هوای داغ- مایکروویو و هوای داغ- مایکروویو- فرسوخ بوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال در خشک‌کن هوای داغ بررسی شد. اعمال تیمار مایکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن برش‌های پرتقال شد اما این تأثیر معنی‌دار نبود. برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش‌های پرتقال تیمار شده هنگام خشک شدن، ابتدا مختصات نمونه تیغه در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک استفاده شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت. جهت بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های پرتقال تیمار شده، مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیچ بر اساس کمترین خطا به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو شاخص تغییر رنگ کل برش‌های پرتقال خشک‌شده به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو، تغییرات رنگی نمونه آبگیری شده کمتر شد و از نظر ظاهری و شاخص‌های رنگی، این برش‌ها به برش‌های تازه پرتقال نزدیکتر بودند. با افزایش زمان تیمار مایکروویو نیز آبگیری مجدد برش‌های پرتقال افزایش یافت. براساس نتایج این پژوهش، بهترین شرایط برای خشک‌کردن برش‌های پرتقال، ۲ دقیقه پیش‌تیمار با مایکروویو بود.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا از این پژوهش، قدردانی می‌کنیم.

Table 8- Impact of microwave pretreatment on rehydration ratio of dried orange slices.

Microwave time	Rehydration ratio (%)
0 min	240.62±7.88 ^b
1 min	240.77±12.40 ^b
2 min	270.68±2.75 ^a
3 min	272.97±10.45 ^a

Different letters within each column represent significance difference ($p < 0.05$)

References

- افتخاری ا، صالحی ف، گوهری‌اردبیلی ا و آقاجانی ن، ۱۴۰۲. تأثیر پیش‌تیمارهای فراصوت و شرایط فرآیند بر سرعت انتقال جرم طی آبگیری اسمزی برش‌های پرتقال. علوم و صنایع غذایی ایران، ۲۰(۱۳۵)، ۳۰-۲۱.
- خاکباز حشمتی م و سیفی‌مقدم ا، ۱۳۹۶. بررسی تکنیک متناوب مایکروویو- هوای گرم بر خواص کیفی و تغذیه‌ای برگه‌های کیوی خشک شده. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۷(۱)، ۱۱۱-۱۲۶.
- دهقانی‌خیای ه، خاکبازحشمتی م، دهقان‌نیا ج و باغبان ح، ۱۳۹۹. کاربرد روش‌های هیبریدی (هوای داغ- مایکروویو- مادون قرمز) جهت خشک‌کردن سیب‌زمینی و مطالعه ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۰(۲)، ۱۴۳-۱۶۱.
- Akbarian Meymand MJ, Faraji Kafshgari S, Mahmodi E and Vatankhah M, 2015. The effect of using microwave pretreatment in drying roots nutmeg on antimicrobial properties against pathogenic bacteria and spoilage molds. *Iranian Journal of Medical Microbiology* 9(2): 47-55.
- Aydar AY, Aydın T, Yılmaz T, Kothakota A, Socol CT, Criste FL and Pandiselvam R, 2022. Investigation on the influence of ultrasonic pretreatment on color, quality and antioxidant attributes of microwave dried *Inula viscosa* (L.). *Ultrasonics Sonochemistry* 90: 106184.
- Coklar H, Akbulut M, Kilinc S, Yildirim A and Alhassan I, 2018. Effect of freeze, oven and microwave pretreated oven drying on color, browning index, phenolic compounds and antioxidant activity of hawthorn (*Crataegus orientalis*) fruit. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 46(2): 449-456.
- Gaukel V, Siebert T and Erle U, 2017. Microwave-assisted drying. In *The microwave processing of foods* (pp. 152-178). Woodhead Publishing.
- Karimi S, Mohammadi S, Layeghiniya N and Abbasi H, 2021. Effect of combined microwave-hot air under microwave pretreatment on drying kinetics of Myrtus fruit. *Journal of Food Processing and Preservation* 13(1): 125-138.
- Kowalska H, Marzec A, Domian E, Kowalska J, Ciużyńska A and Galus S, 2021. Edible coatings as osmotic dehydration pretreatment in nutrient-enhanced fruit or vegetable snacks development: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 20(6): 5641-5674.
- Maskan M, 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44(2): 71-78.
- Önal B, Adiletta G, Di Matteo M, Russo P, Ramos IN, Silva CLM. 2021. Microwave and ultrasound pretreatments for drying of the "Rocha" pear: impact on phytochemical parameters, color changes and drying kinetics. *Foods* 10(4): 853.
- Sabry ZA, Bahlol H E, El-Desouky AI and Assous M T, 2016. Effect of microwave pre-treatment and drying methods on the carrot powder quality. *Middle East Journal of Applied Science* 6(2): 349-356.
- Sahin M and Doymaz İ, 2017. Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat and Mass Transfer* 53(2): 507-517.
- Salehi F and Satorabi M, 2021. Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science* 21(1): 519-527.
- Salehi F, 2019. Color changes kinetics during deep fat frying of kohlrabi (*Brassica oleracea* var. gongylodes) slice. *International Journal of Food Properties* 22(1): 511-519.
- Salehi F, Cheraghi R and Rasouli M, 2022. Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. *Scientific Reports* 12(1): 15392.
- Salehi F, Ghazvineh S and Inanloodoghuz M, 2023. Effects of edible coatings and ultrasonic pretreatment on the phenolic content, antioxidant potential, drying rate, and rehydration ratio of sweet cherry. *Ultrasonics Sonochemistry* 99: 106565.
- Salehi F. 2023. Recent progress and application of freeze dryers for agricultural product drying. *ChemBioEng Reviews* 10(5): 618-627.
- Sharifi M, Rafiei S, Keyhani A and Omid, M, 2010. Drying of orange and selection of a suitable thin layer drying model 41: 61-67.

- Sharma GP and Prasad S, 2006. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering* 75(4): 441-446.
- Subramanyam R, Narayanan M and Rao DG, 2017. Engineering studies on moisture diffusivity of solid food products during processing-A review. *ChemBioEng Reviews* 4(5): 304-309.
- Turan OY and Firatligil FE, 2019. Modelling and characteristics of thin layer convective air-drying of thyme (*Thymus vulgaris*) leaves. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(2).
- Wray D and Ramaswamy HS, 2015. Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology* 33(7): 769-783.
- Yilmaz A and Tugrul N, 2023. Effect of ultrasound-microwave and microwave-ultrasound treatment on physicochemical properties of corn starch. *Ultrasonics Sonochemistry* 98: 106516.