

Effect of Microwave Treatment on Physicochemical Characteristics and Efficiency of Sour Cherry Drying Process

Introduction

Sour cherries (*Prunus cerasus* L.) are relatively diverse and broadly distributed around the world, being found in Asia, Europe, and North America. Sour cherries have unique anthocyanin content, and they are rich in phenolic compounds. The fruits are generally used for processing purposes, such as for juice and jam. The fruits of sour cherries can also be frozen and dried. One of the best methods for the preservation of agricultural product is drying, which consists in removing water from the manufactured goods. Dried sour cherries have a long shelf life and therefore may be a fine alternative to fresh fruit all year round. There are no reports on the effect of microwave pretreatment on the hot air drying kinetics of sour cherries in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of microwave pretreatment on the total phenol, drying time, mass transfer kinetic, effective moisture diffusivity, total color difference index, shrinkage and rehydration of sour cherry. In addition, the moisture ratio changes of sour cherry during drying were modeled.

Material and methods

Sour cherries were purchased from the market at Bahar, Hamedan Province, Iran. The average diameter of fresh sour cherries was 1.6 cm. In this study, the water content of fresh and dried sour cherries was calculated using an oven at 103°C for 5 h (Shimaz, Iran). In this research, the effect of microwave time on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of sour cherries were investigated and drying kinetics were modeled. To apply the microwave pretreatment on the sour cherries, a microwave oven (Gplus, Model; GMW-M425S.MIS00, Goldiran Industries Co., Iran) was used under atmospheric pressure. In this work, the influence of the microwave pretreatment time at five levels of 0, 30, 60, 90, and 120 s (power=220W) on the cherries was examined. After leaving the treated sour cherries from microwave device, the samples in thin layers were placed in the hot-air dryer (with a temperature of 70°C). The dehydration kinetics of sour cherries has been explained using 7 simplified drying equations. Fick's second law of diffusion using spherical coordinates was used to calculate the moisture diffusivity of sour cherries at various hot-air drying conditions. The rehydration test was conducted with a water bath (R.J42, Pars Azma Co. , Iran). Dried sour cherries were weighed and immersed for 30 min in distilled water in a 250 ml glass beaker at 50°C.

Results and discussion

The results showed that microwave treatment led to an increase in moisture removal rate from the sour cherries, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and, consequently, a decrease in drying time. By increasing the microwave time from 0 to 12 s, the average drying time of sour cherries in the hot-air dryer was decreased from 370 min to 250 min ($p < 0.05$). The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot-air dryer was 4.25×10^{-10} m²/s. Increasing the microwave time from 0 to 120 s increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 85%. The maximum amount of phenol was related to the sample treated with microwave for 90 seconds. Microwave treatment time had no significant effect on the rehydration of dried sour cherries.

Conclusion

Kinetic modeling of weight changes of sour cherries during drying was carried out using models in the sources, followed the Page model was selected as the best model to predict moisture ratio changes under the selected experimental conditions. The mean values of sum of squares due to error, root mean square error, and r for all samples ranged from 0.001 to 0.007, 0.005 to 0.017, and 0.997 to 0.999, respectively. Generally, 120 s pre-treatment by microwave is the best condition for drying sour cherries.

Keywords: Drying, Effective moisture diffusivity coefficient, Shrinkage, Total phenol.

مجله علمی دانش کشاورزی

اثر تیماردهی با امواج مایکروویو بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کارایی فرآیند خشک شدن آلبالو

فخرالدین صالحی^{۱*}، معین اینانلودوقوز^۲، سارا قزوینه^۳، پرینا مرادخانی^۳

F.Salehi@Basu.ac.ir

چکیده

آلبالو خشک شده ماندگاری زیادی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه تازه باشد. در این پژوهش اثر اعمال پیش تیمار مایکروویو بر محتوای فنل کل، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، شاخص تغییرات رنگ کلی، چروکیدگی و آبگیری مجدد آلبالو بررسی و سینتیک خشک شدن آن مدل سازی شد. برای اعمال پیش تیمار مایکروویو، آلبالوها به مدت ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه، به صورت لایه نازک داخل خشک کن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو، به صورت معنی داری سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از آلبالوها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک کردن آلبالوها شد ($p < 0.05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک کن ۳۲ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت ($p < 0.05$). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش اعمال تیمار مایکروویو، شاخص تغییرات رنگ نمونه‌ها افزایش یافت، البته این تغییر معنی دار نبود ($p > 0.05$). با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به صورت معنی داری کاهش یافت ($p < 0.05$). زمان اعمال امواج مایکروویو تأثیر معنی داری بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک شده نداشت. مدل پیچ به عنوان مدل مناسب برای پیش بینی کننده تغییرات نسبت رطوبت تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. در مجموع، اعمال ۱۲۰ ثانیه مایکروویو پیش از فرآیند خشک کردن آلبالو به دلیل حفظ ترکیبات فنلی، افزایش سرعت انتقال جرم و کاهش زمان خشک کردن، توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: چروکیدگی، خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، فنل کل.

مقدمه

آلبالو (*Prunus cerasus* L.) میوه‌ای نسبتاً متنوع است و به طور گسترده در سراسر جهان پراکنده است و در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی یافت می‌شود. آلبالو به دلیل طعم خاص و ترکیبات مفید برای سلامتی، یکی از محبوب‌ترین میوه‌ها است. آلبالو دارای ترکیبات منحصر به فردی همچون انواع آنتوسیانین و ترکیبات فنلی مختلف است. میوه تازه آلبالو را می‌توان علاوه بر تازه خوری برای تهیه کمپوت، آبمیوه، مربا و شربت استفاده کرد. همچنین این محصول به صورت منجمد و خشک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Šumić et al., 2013; Doymaz, 2007).

فرآیند خشک کردن می‌تواند یکی از مهمترین فرایندها در تهیه مواد غذایی از محصولات کشاورزی باشد. خشک کردن حذف حداکثر آب از محصول مورد نظر با هدف افزایش مدت ماندگاری است (Momenzadeh et al., 2010). به خشک شدن فراورده‌های غذایی به صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک کردن به روش لایه نازک می‌گویند. در اکثر موارد خشک کردن باعث بهبود ویژگی ارگانولپتیکی محصول می‌گردد. محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند (Delgado and da Silva, 2014; Ghaderi et al., 2011). متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده از جریان هوای داغ و به روش انتقال حرارت جابه‌جایی است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در محصول می‌باشد. خشک کردن با خشک کن هوای داغ علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند، دارای معیایی مانند زمان طولانی‌تر برای خشک کردن محصولات در مقایسه با سایر روش‌ها است (Amin Ekhlās et al., 2023).

استفاده از پیش تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش تیمار 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 دی الکتریک و فروسرخ 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 به‌خصوص بین مولکول‌های آب، در غذا تولید حرارت می‌کند. حرارت تولید شده در سیستم مایکروویو به میزان آب موجود در مواد غذایی بستگی دارد و به عمق غذا نفوذ می‌کند (Wray and Ramaswamy, 2015; Salehi, 2020). نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌ تیمار مایکروویو سبب کمترین آسیب به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود (Akbarian Meymand *et al.*, 2015).

عین‌افشار (Einafshar, 2014) در پژوهشی خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکروبی و آنتی‌اکسیدانی چهار رقم آلبالو خشک‌شده به‌روش اسمزی را بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که ارقام مختلف آلبالو از نظر خصوصیات رنگی، مقدار ترکیبات فنلی، آنتوسیانین‌ها و قدرت آنتی‌اکسیدانی با یکدیگر متفاوت هستند. همچنین انجام پیش‌ تیمار اسمز بر خشک‌کردن آلبالو مؤثر بوده و کیفیت محصول خشک‌شده و خصوصیات آنتی‌اکسیدانی آن را افزایش می‌دهد. آلبالو خشک ماندگاری طولانی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه‌های تازه در تمام طول سال باشد (Wojdyło *et al.*, 2014). برای مثال دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش‌ تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به‌صورت تجربی را بررسی کرد. در این پژوهش خشک‌کردن لایه‌نازک آلبالو در دو دمای هوای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس انجام شد. در پژوهش دیگری نیز وجدیلو و همکاران (Wojdyło *et al.*, 2014) اثر خشک‌کردن همرفتی و خلاء-مایکروویو بر سینتیک خشک شدن آلبالو را بررسی کردند. گروهی از پژوهشگران گزارش کردند که با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای خشک‌کن، میزان چروکیدگی محصول خشک‌شده به دلیل سرعت بالای خروج رطوبت از محصول کاهش یافته و اندازه نمونه خشک‌شده بزرگتر می‌شود (Momenzadeh *et al.*, 2010). در فرآیند خشک‌کردن توسط مایکروویو به علت تمرکز بهتر انرژی، رطوبت با سرعت بیشتری خارج شده و مدت زمان خشک شدن نیز کاهش می‌یابد (Maskan, 2000). در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن ارزیابی توانایی امواج مایکروویو در کاهش زمان خشک‌کردن آلبالو و حفظ ترکیبات فنلی، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن این میوه معرفی شود.

مواد و روش‌ها

– درصد رطوبت اولیه آلبالو

این پژوهش در محدوده زمانی بهار تا تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تخصصی دانشکده صنایع غذایی انجام شد. برای این پژوهش، آلبالو تازه از شهرستان بهار (استان همدان)، تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. برای تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها، از دستگاه آون (شیماز، ایران) با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ ساعت استفاده شد.

– اعمال تیمار مایکروویو

با توجه به اینکه آلبالو تازه بیشتر به‌صورت سالم و همراه با هسته خشک و به بازار فروش عرضه می‌شود، در این پژوهش نیز برای اعمال تیمار مایکروویو و فرآیند خشک‌کردن از آلبالوهای سالم (هسته‌دار) استفاده شد. پیش‌ تیمار مایکروویو توسط دستگاه مایکروویو (جی‌پلاس، مدل GMW-M425S.MIS00، شرکت گلدیران، ایران) بر آلبالوها اعمال گردید. برای این منظور، آلبالوها داخل دستگاه مایکروویو با توان ۲۲۰ وات به مدت ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه قرار گرفتند.

– فرآیند خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده

برای خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده از خشک‌کردن همرفتی (هوای داغ) استفاده شد. برای انجام عملیات خشک‌کردن با هوای داغ از آون فن‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (شیماز، ایران) استفاده شد. در این روش تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن تا دستیابی به وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتالی (کیا، مدل SL1000، ایران) با دقت ± 0.1 گرم، ثبت شد.

– محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۱ آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن توسط خشک‌کردن همرفتی، ابتدا مختصات نمونه کروی^۲ در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک^۳ استفاده شد. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط

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

2- Spherical coordinate

3- Fick's second law of diffusion

لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Amin & Ekhlas et al., 2023).

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (1)$$

در این معادله، r متوسط شعاع آلبالوها (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2s^{-1}) و Slope شیب خط می‌باشد.

– مدل سازی سینتیکی

به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، مدل سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی برای مدل سازی فرآیند خشک کردن آلبالو و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (Salehi and Satorabi, 2021b). به منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

– تعیین فنل کل

برای تهیه عصاره آلبالو، ۱۰ میلی لیتر متانول ۸۰ درصد به ۱ گرم پودر آلبالو خشک شده درون فالکون اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت. سپس مخلوط به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه جهت حذف ترکیبات با قابلیت رسوب، سانتریفوژ^۱ شد.

برای محاسبه فنل کل آلبالوهای خشک، ۰/۵ میلی لیتر از عصاره آلبالو (ماده رویی فالکون) در لوله آزمایش ریخته شد و ۰/۵ میلی لیتر معرف فنل فولین سیوکالتو^۲ (سیگما-آلدردیج، آمریکا) به آن اضافه شد. پس از ۵ دقیقه، ۲ میلی لیتر کربنات سدیم (۲۰٪ وزنی در حجم) (مرک، آلمان) اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. پس از آنکوباسیون به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۱۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه و رسوب تشکیل شده با استفاده از سانتریفوژ به مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه جدا شد. نهایت، جذب مایع رویی در ۷۶۵ نانومتر با اسپکتروفوتومتر (XD-7500، لاویباند، آلمان) ثبت و با منحنی استاندارد اسید گالیک مقایسه گردید. نتایج فنل کل با واحد معادل میکروگرم اسید گالیک بر گرم ماده خشک گزارش شد (Vega-Gálvez et al., 2009).

– شاخص تغییرات رنگ

جهت بررسی تغییرات رنگ آلبالوهای خشک شده، از روش پردازش تصویر استفاده گردید. قبل و بعد از فرآیند خشک کردن، از نمونه‌ها توسط دوربین با کیفیت ۱۲ مگاپیکسل (iPhone 12 Pro, Apple Co., USA) عکس در فرمت JPG تهیه شد. بعد از تبدیل عکس‌ها به فرمت $L^*a^*b^*$ توسط نرم‌افزار Image J (version 1.42e, USA)، مؤلفه‌های رنگی آنها شامل مؤلفه‌های روشنایی - تیرگی (L^*)، سبزی - قرمزی (a^*)، آبی - زردی (b^*) به دست آمد و از آنها برای محاسبه شاخص تغییرات رنگ (ΔE) استفاده شد. مقادیر شاخص تغییرات رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (Salehi and Satorabi, 2021a).

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

– چروکیدگی

درصد چروکیدگی یا تغییرات اندازه سطح (ΔA) آلبالوها که معیاری از کاهش سطح محصول در طی فرآیند خشک کردن می‌باشد، با استفاده از روش پردازش تصویر و رابطه ۳ محاسبه و گزارش شد. در این روش ابتدا از نمونه‌ها عکس با کیفیت بالا تهیه شد. سپس توسط نرم‌افزار Image J تعداد پیکسل‌های موجود در عکس به سانتی متر تبدیل گردید و با استفاده از بخش آنالیز نرم‌افزار، سطح نمونه‌ها برحسب سانتی متر مربع محاسبه و گزارش شد.

1- Universal 320R, Hettich, Germany
2- Folin-Ciocalteu's phenol reagent

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، A_1 : سطح نمونه تازه (سانتی متر مربع) و A_2 : سطح نمونه خشک شده (سانتی متر مربع) است (Salehi et al., 2023).

– آنگیری مجدد آلبالوهای خشک شده

برای محاسبه درصد آنگیری مجدد (RR)، آلبالوهای خشک شده 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. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۴ محاسبه و گزارش شد (Salehi et al., 2022).

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (4)$$

در این معادله M وزن آلبالوها بعد از باز جذب آب و M_0 وزن آلبالوهای خشک می‌باشد.

– آنالیز آماری

در این پژوهش اثر پیش تیمار مایکروویو در پنج سطح ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه بر فنل کل، سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آنگیری مجدد آلبالو بررسی شد. برای آنالیز آماری نتایج از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ استفاده شد. آزمون‌های خشک کردن 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 مایکروویو بر زمان خشک شدن

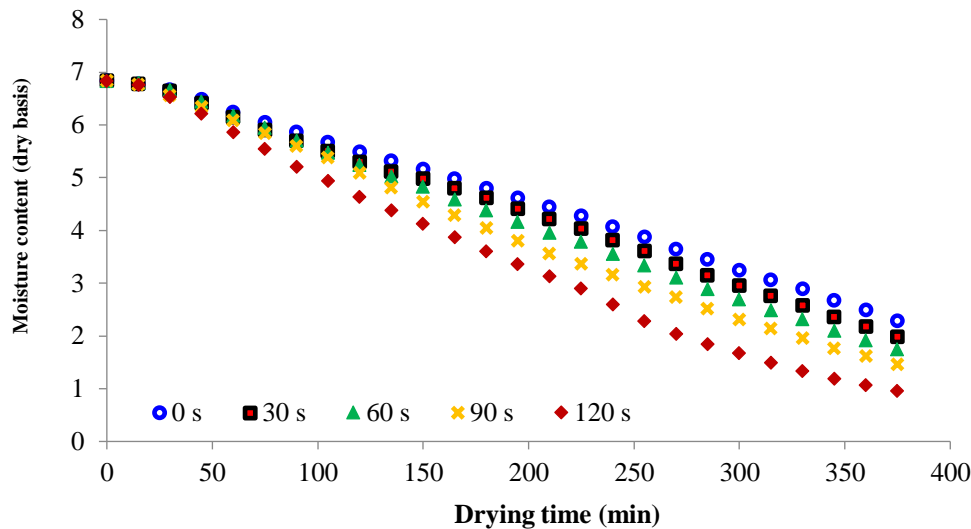
میانگین رطوبت اولیه آلبالوها برابر ۷۳/۸۰ درصد بر پایه مرطوب بود. در جدول ۱ اثر زمان اعمال مایکروویو بر زمان خشک شدن آلبالوها گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال مایکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها به صورت معنی داری کاهش یافته است ($p < 0.05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک کن هوای داغ به صورت معنی داری ۳۲/۴ درصد کاهش یافت ($p < 0.05$). شارما و پراساد (Sharma and Prasad, 2006) برای خشک کردن سیر از مایکروویو آزمایشگاهی استفاده کرد. آنها تأیید کردند که خشک کردن جبه‌های سیر در مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک شدن در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم می‌شود و ویژگی‌های کیفی محصول خشک شده با روش مایکروویو نیز بالاتر است. دویماز (Doymaz, 2007) گزارش کرد که زمان خشک شدن آلبالو پیش تیمار شده با محلول اتیل اولئات قلیایی حدود ۲۶ تا ۳۰ درصد کوتاه‌تر از نمونه‌های تیمار نشده است. شکل ۱ تغییر محتوای رطوبت آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو طی فرآیند خشک شدن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تیماردهی آلبالو توسط امواج مایکروویو باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است. قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2011) سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو-خلأ را بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، توان ماکروویو و میزان خلأ روی سرعت خشک شدن آلبالو اثر مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش یافت.

جدول ۱- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر زمان خشک کردن آلبالو

Table 1- Impact of microwave pretreatment on the drying time of sour cherry

| Microwave time زمان مایکروویو | Drying time (min) زمان خشک کردن (دقیقه) |
|----------------------------------|--|
| 0 s | 370.0±7.07 ^a |
| 30 s | 345.0±12.25 ^b |
| 60 s | 320.0±7.07 ^c |
| 90 s | 300.0±12.25 ^c |
| 120 s | 250.0±7.07 ^d |

Different letters above the values indicate significant difference ($p < 0.05$)



شکل ۱- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر محتوای رطوبت آلبالو طی فرآیند خشک شدن

Figure 1- Impact of microwave pretreatment on the moisture content of sour cherry during drying process

– اثر مایکروویو بر نفوذ مؤثر رطوبت

برای کاهش مشکلات ناشی از هدایت حرارتی پایین طی خشک کردن محصولات غذایی و دست یافتن به فرآیند تأثیرگذار، استفاده از مایکروویو برای این منظور افزایش یافته است. افزایش تمرکز حرارتی منجر به افزایش نفوذ رطوبت از محصول به محیط می شود (Pourhaji *et al.*, 2018; Mohammadpour Mir *et al.*, 2020; Kouchakzadeh and Shafeei, 2010). در جدول ۲ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو طی خشک شدن در خشک کن هوای داغ گزارش شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می شود با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت از آلبالوها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول شده است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای آلبالوهای قرار گرفته در خشک کن همرفتی به صورت معنی داری از $3/16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $5/83 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p < 0/05$). دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به صورت تجربی را بررسی کرد. این پژوهشگر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو را در محدوده $4/75 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش کرده است.

جدول ۲- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو

Table 2- Impact of microwave pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of sour cherry

| Microwave time زمان مایکروویو | moisture diffusivity coefficient (m ² /s) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m ² /s) |
|----------------------------------|--|
| 0 s | $3.16 \times 10^{-10} \pm 1.12 \times 10^{-11} \text{ d}$ |
| 30 s | $3.59 \times 10^{-10} \pm 1.86 \times 10^{-11} \text{ d}$ |
| 60 s | $4.08 \times 10^{-10} \pm 1.79 \times 10^{-11} \text{ c}$ |
| 90 s | $4.56 \times 10^{-10} \pm 2.85 \times 10^{-11} \text{ b}$ |
| 120 s | $5.83 \times 10^{-10} \pm 1.89 \times 10^{-11} \text{ a}$ |

Different letters above the values indicate significant difference ($p < 0.05$)

– مدل سازی فرآیند خشک شدن آلبالو

با انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که به کمک آن بتوان سینتیک خشک شدن یک محصول را پیش بینی کرد، می توان یک خشک کن جدید طراحی یا کارایی آن را ارزیابی نمود (Ghaderi *et al.*, 2011). با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک کردن آلبالوها و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (R²)

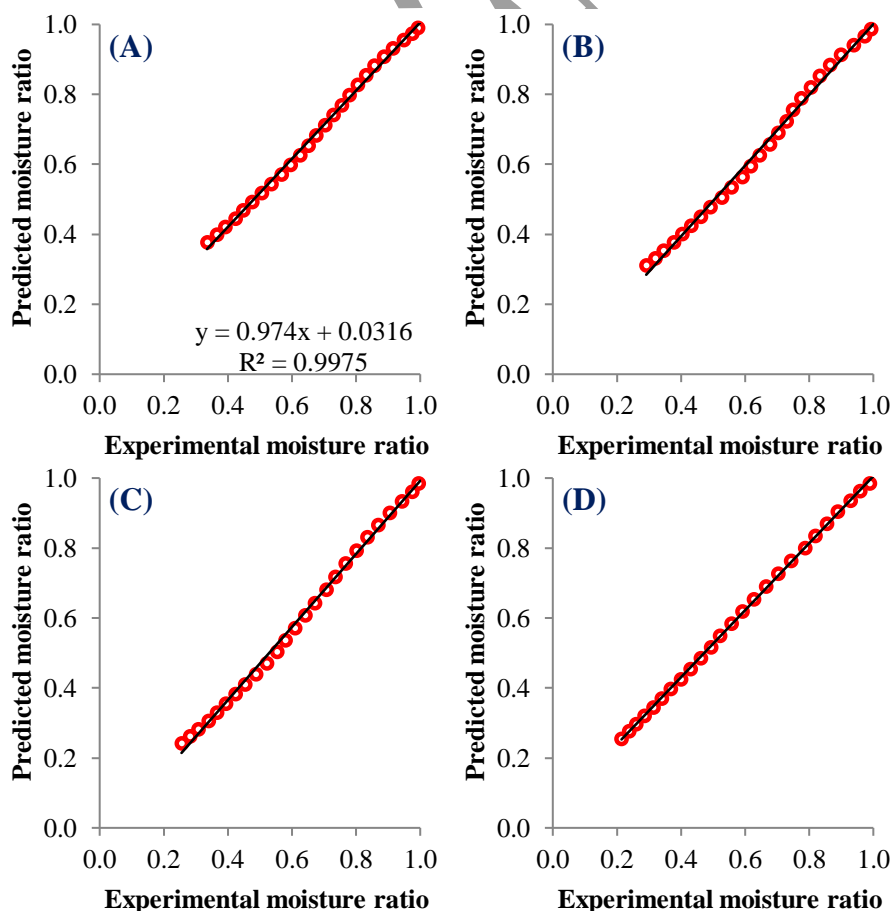
و حداقل مقادیر خطا باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک کردن آلبالوها، مدل پیچ است. در جدول ۳ مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (k و n) برای شرایط مختلف خشک کردن آلبالوها گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۷، ۰/۹۹۷ تا ۰/۹۹۹ و ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۷ به دست آمد. در شکل ۲ نیز مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیچ با نتایج تجربی نسبت رطوبت برای زمان‌های پیش تیمار مختلف گزارش شده است. نمودارهای موجود در این شکل نیز نشان می‌دهد که مدل پیچ انطباق خوبی با داده‌های نسبت رطوبت آزمایشگاهی دارد. لذا این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو توصیه می‌شود. قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2011) گزارش کردند که مدل میدلی به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطا، مناسب‌ترین مدل برای بررسی فرآیند خشک شدن آلبالو در خشک کن مایکروویو-خلاء است.

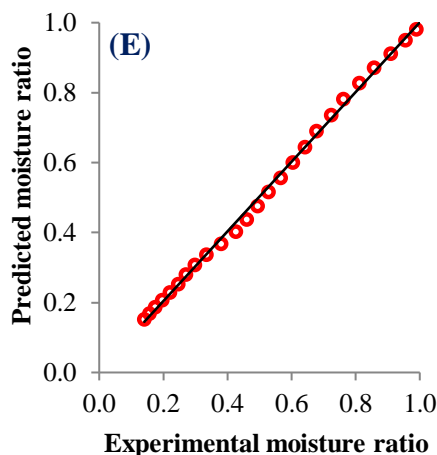
جدول ۳- ثابت‌ها و ضرایب مدل پیچ برای پیش‌بینی پارامتر نسبت رطوبت

Table 3- The constants and coefficients of the Page model to predict the moisture ratio parameter

| Microwave time زمان مایکروویو | k | n | SSE ¹ | r | RMSE ² |
|----------------------------------|--------|--------|------------------|--------|-------------------|
| 0 s | 0.0003 | 1.4050 | 0.0026 | 0.9989 | 0.0102 |
| 30 s | 0.0003 | 1.4123 | 0.0051 | 0.9980 | 0.0143 |
| 60 s | 0.0003 | 1.4340 | 0.0029 | 0.9991 | 0.0108 |
| 90 s | 0.0004 | 1.3983 | 0.0026 | 0.9992 | 0.0091 |
| 120 s | 0.0003 | 1.4610 | 0.0029 | 0.9993 | 0.0109 |

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



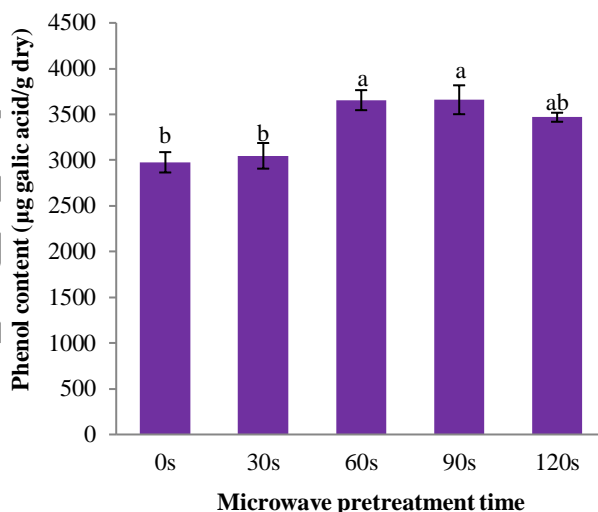


شکل ۲- مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیج با نتایج تجربی نسبت رطوبت. A: ۰ ثانیه، B: ۳۰ ثانیه، C: ۶۰ ثانیه، D: ۹۰ ثانیه و E: ۱۲۰ ثانیه.

Figure 2- Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio; A: 0 s, B: 30 s, C: 60 s, D: 90 s, and E: 120 s.

– فنل کل

آلبالو دارای آنتوسیانین‌های منحصر به فردی است و سرشار از ترکیبات فنلی است. در شکل ۳ اثر زمان اعمال مایکروویو بر فنل کل آلبالوهای خشک‌شده گزارش شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در این شکل، اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر حفظ ترکیبات فنلی و افزایش مقدار این ترکیبات در آلبالوهای خشک‌شده داشته است ($p < 0.05$). مقدار فنل کل نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز بیشتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت ($p > 0.05$). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). هم‌راستا با نتایج این پژوهش، آزادبخت و همکاران (Azadbakht *et al.*, 2021) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو سبب افزایش مقدار فنل کل و ترکیبات فلاونوئیدی در هویج خشک‌شده می‌شود.

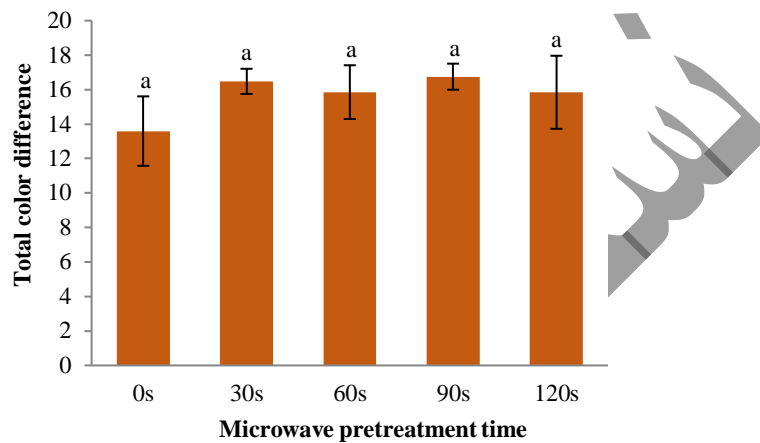


شکل ۳- اثر پیش تیمار مایکروویو بر فنل کل آلبالو خشک.

Figure 3- Effect of microwave pretreatment on the total phenols of dried sour cherry. Different letters above the columns indicate a significant differences ($p < 0.05$)

– شاخص تغییرات رنگ

در این پژوهش متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*) و زردی (b^*) آلبالوهای تازه به ترتیب برابر ۳۱/۲۰، ۱۶/۴۱ و ۰/۷۶ بود. فرآیند خشک شدن باعث کاهش مؤلفه‌های رنگی آلبالوها شد و متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی، قرمزی و زردی آلبالوهای خشک شده (تیمار نشده و تیمار شده) به ترتیب برابر ۲۲/۰۵، ۷/۱۹ و ۰/۳۹ بود. برای بررسی دقیق‌تر تغییرات رنگ آلبالوها بعد از فرآیند خشک کردن، شاخص تغییرات رنگ کلی برای همه تیمارهای میکروویو با استفاده از میانگین عددی مؤلفه‌های رنگی محاسبه در شکل ۴ گزارش شد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، اعمال تیمار میکروویو باعث افزایش مقدار عددی شاخص تغییرات رنگ آلبالوهای خشک شده شد، اما تأثیر معنی‌داری بر تغییر آنها نداشت ($p > 0.05$). این شکل نشان می‌دهد که تیمار میکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی هم بر رنگ سطحی نمونه‌ها نمی‌گذارد.

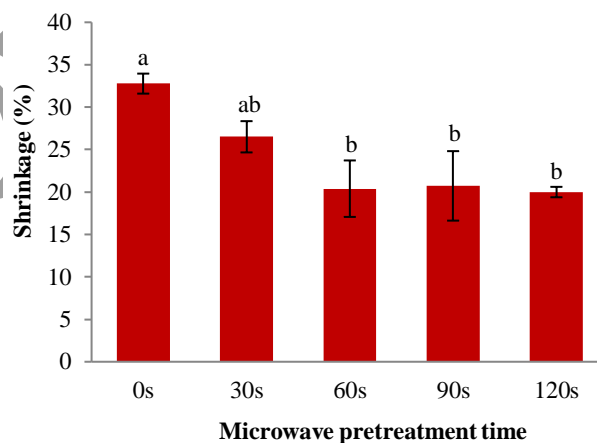


شکل ۴- اثر پیش تیمار میکروویو بر شاخص تغییرات رنگ کلی آلبالو خشک.

Figure 4- Effect of microwave pretreatment on the total color difference index of dried sour cherry. Different letters above the columns indicate a significant differences ($p < 0.05$)

چروکیدگی -

در شکل ۵ اثر زمان اعمال میکروویو بر چروکیدگی آلبالوهای خشک شده گزارش شده است. با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه میکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به صورت معنی‌داری کاهش یافت ($p < 0.05$). مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با میکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت ($p > 0.05$).



شکل ۵- اثر پیش تیمار میکروویو بر چروکیدگی آلبالو خشک.

Figure 5- Effect of microwave pretreatment on the shrinkage of dried sour cherry. Different letters above the columns indicate a significant differences ($p < 0.05$)

– آبیگری مجدد

آلبالو را می‌توان به صورت تازه، خشک یا فرآوری شده در بسیاری از محصولات استفاده کرد. در جدول ۴ اثر زمان اعمال مایکروویو بر آبیگری مجدد آلبالوهای خشک شده گزارش شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آبیگری مجدد آلبالوهای خشک شده نداشت ($p > 0.05$). در این پژوهش، متوسط آبیگری مجدد آلبالوهای خشک شده ۱۱۱/۶۵ درصد بود.

جدول ۴- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر آبیگری مجدد آلبالو خشک شده
Table 4- Impact of microwave pretreatment on the rehydration ratio of dried sour cherry.

| Microwave time زمان مایکروویو | Rehydration ratio(%) آبیگری مجدد (درصد) |
|----------------------------------|--|
| 0 s | 112.87±3.69 ^a |
| 30 s | 110.79±2.23 ^a |
| 60 s | 109.70±2.68 ^a |
| 90 s | 112.62±2.95 ^a |
| 120 s | 112.25±3.48 ^a |

Different letters above the values indicate significant difference ($p < 0.05$)

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پیش تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک کردن آلبالو در خشک کن همرفتی بررسی شد. زمان تیماردهی با مایکروویو تأثیر معنی‌داری در کاهش زمان خشک شدن آلبالوها در خشک کن هوای داغ نداشت ($p < 0.05$). برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن، ابتدا مختصات نمونه کروی در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک استفاده شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو تا ۱۲۰ ثانیه، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت که منجر به ۳۲ درصد کاهش در زمان خشک شدن آلبالوها شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیچ بر اساس بالاترین صحت به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. به طور کلی، بهترین شرایط برای خشک کردن آلبالو، ۱۲۰ ثانیه پیش تیمار با مایکروویو بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی بر رنگ سطحی و درصد آبیگری مجدد آلبالوهای خشک شده نمی‌گذارد. مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت ($p > 0.05$).

منابع

- Akbarian Meymand, M.J., Faraji Kafshgari, S., Mahmodi, E., 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.
- Amin Ekhlās, S., Pajohi-Alamoti, M.R., Salehi, F. 2023. Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 20(135), 159-168. <https://doi.org/10.22034/fsct.19.135.159>.
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., Mahmoodi, M.J., Ghazagh Jahed, R. 2021. Mathematical modeling of the biochemical properties of carrots by microwave drying with different pretreatments using response surface methodology. *Food Engineering Research*, 21(72), 35-56. <https://doi.org/10.22092/fooder.2020.343389.1273>.
- Delgado, J.M.P.Q., da Silva, M.V., 2014. Food Dehydration: Fundamentals, Modelling and Applications, in: Delgado, J.M.P.Q., Barbosa de Lima, A.G. (Eds.), *Transport*

phenomena and drying of solids and particulate materials. Springer International Publishing, Cham, pp. 69-94.

Doymaz, İ. 2007. Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.037>.

Einafshar, S. 2014. Quality and Microbial Changes of Four Dried Sour Cherry by Osmosis Process through One Year Storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 10(4), 363-374. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v10i4.43732>.

Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., Minaei, S. 2011. Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) in a microwave-vacuum dryer. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 6(2), 55-64.

Kouchakzadeh, A., Shafeei, S. 2010. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 2012-2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.034>.

Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71-78. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00167-3).

Mohammadpour Mir, M.E., Nanvakenari, S., Movagharnejad, K. 2020. Modeling and investigation of the performance of MLP and RBF during the paddy rice drying in microwave dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 16(2), 331-341. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v16i2.80737>.

Momenzadeh, L., Zomorodian, A.A., Mowla, D. 2010. Applying artificial neural network for shrinkage prediction of green pea in a microwave assisted fluidized bed dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 6(4), 277-285. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v6i4.9285>.

Pourhaji, F., Tabatabaei Yazdi, F., Mortazavi, S.A., Mohebbi, M., Mazaheri Tehrani, M. 2018. Foam mat drying of banana milk using microwave and evaluation of resulting powders's properties. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(2), 283-296. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v0i0.60551>.

Sahin, M., Doymaz, İ. 2017. Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(2), 507-517. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1835-0>.

Salehi, F., (2020). *Food industry machines and equipment*. Bu-Ali Sina University Press, Hamedan, Iran.

Salehi, F., Cheraghi, R., 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19826-w>.

Salehi, F., Razavi Kamran, H., Goharpour, K. 2023. Effects of ultrasound time, xanthan gum, and sucrose levels on the osmosis dehydration and appearance characteristics of grapefruit slices: process optimization using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106505. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106505>.

Salehi, F., Satorabi, M. 2021a. Effect of basil seed and xanthan gums coating on colour and surface change kinetics of peach slices during infrared drying. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(3), 150-156. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0025>.

Salehi, F., Satorabi, M. 2021b. 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. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>.

- Sharma, G.P., Prasad, S. 2006. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75(4), 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.029>.
- Šumić, Z., Tepić, A., Vidović, S., Jokić, S., Malbaša, R. 2013. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. *Food Chemistry*, 136(1), 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.102>.
- Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., Perez-Won, M. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4), 647-653. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.066>.
- Wojdyło, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., Oszmiański, J. 2014. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 829-841. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>.
- Wray, D., Ramaswamy, H.S. 2015. Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, 33(7), 769-783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>.