

Improvement of mass transfer rate by ultrasound pretreatment in convective drying of sour cherry

Fakhreddin Salehi¹✉ and Moein Inanloodoghous²

¹Associate 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

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: July 18, 2023

Accepted: September 23, 2023

Published: May 19, 2024

Keywords:

Effective moisture diffusivity coefficient, Page model, Rehydration, Sour cherry, Ultrasonic bath

Background: Sour cherry has unique anthocyanin content, and it is rich in phenolic compounds. Dried sour cherry has a long shelf life and therefore may be a fine alternative to fresh fruit all year round.

Aims: In this research, it was tried to evaluate the ability of ultrasonic method in reducing the drying time of sour cherry, while also introducing a mathematical model that best describes the drying kinetics.

Methods: To apply ultrasound pre-treatment, the sour cherries were placed inside the ultrasonic bath device for 0, 4, 8, and 12 min, and after leaving the device and removing extra moisture, the samples in thin layers were placed in the dryer. In order to investigate the kinetics and predict the drying process of treated sour cherries, kinetic modeling was done with the help of experimental data and using the mathematical models.

Results: The results showed that sonication treatment, causes an increase in moisture removal rate from the sour cherries, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing the sonication time from 0 to 12 min, the average drying time of sour cherries in the hot-air dryer was decreased by approximately 27%. Also, increasing the sonication time from 0 to 12 min increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 38%. The sonication time had no significant effect on the rehydration of dried sour cherries, and increasing pretreatment time from 4 to 12 min only increased the rehydration of the samples by 7%. The Page model was selected as the best model to predict moisture ratio changes under the selected experimental conditions.

Conclusion: Generally, it is recommended to apply 12 min of ultrasound before the sour cherry drying process due to increasing the mass transfer rate and reducing the drying time.



Extended Abstract

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 (Doymaz 2007; Šumić et al 2013). One of the best methods for the preservation of agricultural products is drying, which consists in removing water from the manufactured goods (Salehi 2023). Dried sour cherries have a long shelf life and therefore may be a fine alternative to fresh fruit all year round (Wojdyło et al 2014). The effect of alkali ethyl oleate solution on the drying time of sour cherry was studied by Doymaz (2007). In this study, the thin-layer drying of sour cherries was carried out under two air temperatures of 55°C and 65°C. Their results showed that the effective moisture diffusivity of sour cherries based on the analytical solution of Fick's second law ranged from 4.75×10^{-10} to 1.03×10^{-9} m²/s. Ultrasound pre-treatment as a non-thermal food processing technology could be a better pre-treatment technique for food processing, due to its benefits which comprise energy saving, preservation of original freshness and nutritional contents, keeping bioactive compounds, the decline in processing duration, and cost. Ultrasound pre-treatment accelerates the mass transfer in dehydration and drying of fruit and vegetable slices mostly due to the breakdown of cells and the creation of microchannels (Awad et al. 2012; Ghorbani et al. 2013). In terms of cost, ultrasonic is less expensive than other technologies, and the main cost of operating a sonication system is electrical energy, making it more cost-effective and environmentally friendly than other methods (Jalilzadeh et al. 2018). We found no report on the effects of ultrasound pretreatment on the hot-air drying kinetics of sour cherry in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of ultrasound

pretreatment on the drying time, mass transfer kinetic, effective moisture diffusivity (D_{eff}), 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 Hamedan, 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 ultrasound time on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient, and rehydration of sour cherries were investigated, and drying kinetics were modeled. To apply the sonication treatments on the sour cherries, a Backer vCLEAN1-L6 ultrasonic bath (Iran) was employed with a frequency of 40 kHz and a power of 150 watts. The tank of the device was filled with 6L of distilled water and, then, after the temperature of the water reached 25°C, the sour cherries were placed directly in the bath. To apply ultrasound pre-treatment, the sour cherries were placed inside the ultrasonic bath device for 0, 4, 8, and 12 minutes, and after leaving the device and removing extra moisture, the samples in thin layers were placed in the hot-air dryer (with a temperature of 70°C). The dehydration kinetics of sour cherries have been explained using 6 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 tests were 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. All the measurements were carried out in triplicate. Data were presented as the mean and the error bar as the standard deviation of tests performed in triplicate. SPSS (version 21) and Microsoft Office Excel (version 2007) were both used for the data analysis. Differences between means were deemed statistically significant at a significance level

of $p < 0.05$ using Duncan's multiple range test.

Results and discussion: The results showed that sonication treatment, causes an increase in moisture removal rate from the sour cherries, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing the sonication time from zero to 12 min, the average drying time of sour cherries in the hot-air dryer decreased from 465 min to 340 min. The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot-air dryer was equal to $3.86 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Increasing the sonication time from 0 to 12 minutes increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 38%. Xu et al. (2022) reported that ultrasonic pretreatment changes the microstructure of pineapple slices, and the combination of ultrasonic and osmosis dehydration improves the effectiveness of the sonication, shortens the dehydration time, and produces a higher-quality product. The results of Rani and Tripathy (2019) study showed that pretreated pineapple slices provided higher dehydration rate, increased effective moisture diffusivity

coefficient, and lighter color than that of untreated dried sample. They reported that the 20 and 30 minute ultrasound pretreatment reduced the drying time of pineapple slices by 19% and 14.3%, respectively. The time of ultrasound treatment had no significant effects on the rehydration of dried sour cherries.

Conclusion: The ultrasound will be more promising method for sour cherries pretreatment before drying procedure in food industries. It is anticipated from the outcomes that the research will be helpful to prepare value-added dried agricultural products in future researches. Kinetic modeling of sour cherries 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 0.003-0.010, 0.010-0.018, and 0.998-0.999, respectively. Generally, 12 minutes pre-treatment by ultrasound is the best condition for drying sour cherries.



بهبود سرعت انتقال جرم با پیش تیمار فراصوت در خشک کردن همرفتی آلبالو

فخرالدین صالحی^{۱*} و معین اینانلودوقوز^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

نوع مقاله:

علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۱

انتشار: ۱۴۰۳/۲/۳۰

کلید واژگان:

آبگیری مجدد، آلبالو، حمام فراصوت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، مدل پیچ

زمینه مطالعاتی: آلبالو دارای ترکیبات آنتوسیانین منحصر به فردی است و سرشار از ترکیبات فنلی است. آلبالو خشک ماندگاری زیادی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه تازه باشد. **هدف:** در پژوهش حاضر سعی شد تا ضمن ارزیابی توانایی روش فراصوت در کاهش زمان خشک کردن آلبالو، مناسب‌ترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن این میوه معرفی شود.

روش کار: برای اعمال پیش تیمار فراصوت، آلبالوها به مدت ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دقیقه داخل دستگاه حمام فراصوت قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه و حذف رطوبت اضافی، نمونه‌ها به صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن قرار گرفتند. جهت بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید.

نتایج: نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار فراصوت، به صورت معنی‌داری 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 فراصوت از صفر به ۱۲ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن همرفتی ۲۷ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۱۲ دقیقه، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۳۸ درصد افزایش یافت. زمان اعمال امواج فراصوت تأثیر معنی‌داری بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نداشت و با افزایش زمان پیش تیمار از ۴ به ۱۲ دقیقه، آبگیری مجدد نمونه‌ها فقط ۷ درصد افزایش یافت. مدل پیچ به عنوان مدل مناسب برای پیش‌بینی کننده تغییرات نسبت رطوبت تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

نتیجه‌گیری نهایی: در مجموع، اعمال ۱۲ دقیقه فراصوت پیش از فرآیند خشک کردن آلبالو به دلیل افزایش سرعت انتقال جرم و کاهش زمان خشک کردن، توصیه می‌شود.

مقدمه

میوه‌ها و سبزی‌ها به دلیل دارا بودن فیبر و انواع ریزمغذی‌های مهم نظیر ویتامین‌ها و موادمعدنی، نقش مهمی در متعادل ساختن رژیم غذایی انسان و کاهش ابتلا به انواع بیماری‌ها را ایفا می‌کنند (خاکبازحشمتی و خوشقدم ۱۳۹۶). آلبالو (*Prunus cerasus L.*) میوه‌ای نسبتاً متنوع است و به‌طور 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 آنتوسیانین منحصراً به فردی است و سرشار از ترکیبات فنلی است. میوه تازه آلبالو را می‌توان علاوه بر تازه خوری برای تهیه کمپوت، آبمیوه، مربا و شربت استفاده کرد. همچنین این محصول به‌صورت منجمد و خشک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (دویماز ۲۰۰۷؛ شومیک و همکاران ۲۰۱۳). آلبالو خشک ماندگاری طولانی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه‌های تازه در تمام طول سال باشد (وجدیلو و همکاران ۲۰۱۴).

به خشک شدن فراورده‌های غذایی به‌صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک کردن به روش لایه‌نازک 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 (قادری و همکاران ۱۳۹۰؛ دلگادو و داسیلوا ۲۰۱۴). 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 خشک‌کن هوای داغ علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند، دارای معایبی مانند زمان طولانی‌تر برای خشک کردن محصولات در مقایسه با سایر روش‌ها است (موجومدار ۲۰۱۴). دویماز (۲۰۰۷) اثر پیش تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به‌صورت تجربی را بررسی کرد. در این پژوهش خشک کردن لایه‌نازک آلبالو در دو دمای هوای ۵۵ و ۶۵ درجه

سلسیوس انجام شد. در پژوهش دیگری نیز وجدیلو و همکاران (۲۰۱۴) اثر خشک کردن همرفتی و خلاء-مایکروویو بر سینتیک خشک شدن آلبالو را بررسی کردند.

از نظر هزینه، فناوری فراصوت نسبت به سایر فناوری‌ها ارزان‌تر است و هزینه اصلی استفاده از سیستم فراصوت مربوط به انرژی الکتریکی است که آن را نسبت به سایر روش‌ها مقرون به‌صرفه‌تر و سازگار با محیط‌زیست می‌کند (جلیل‌زاده و همکاران ۲۰۱۸). فراصوت با انرژی بالا به‌عنوان پیش تیمار قبل از فرآوری مواد غذایی و فرآیند خشک کردن، جهت بهبود خصوصیات کیفی محصول خشک‌شده از طریق بهبود پدیده انتقال جرم و حرارت به کار می‌رود (آواد و همکاران ۲۰۱۲؛ قربانی و همکاران ۲۰۱۳). وانگ و همکاران (۲۰۱۹) از پیش تیمار فراصوت برای افزایش سرعت خشک شدن برش‌های کیوی استفاده کردند. نتایج آنها تأیید کرد که این روش پیش تیمار می‌تواند فرآیند خشک کردن را بهبود بخشد و مقدار زیادی از فنل‌ها را حفظ کند.

آلبالو را می‌توان به‌صورت تازه، خشک یا فرآوری شده در بسیاری از محصولات استفاده کرد. با انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که به کمک آن بتوان سینتیک خشک شدن یک محصول را پیش‌بینی کرد، می‌توان یک خشک‌کن جدید طراحی یا کارایی آن را ارزیابی نمود (قادری و همکاران ۱۳۹۰). لذا در این پژوهش اثر پیش تیمار فراصوت در چهار سطح ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دقیقه بر سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد آلبالو بررسی و مدل‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

تهیه آلبالو

این پژوهش در محدوده زمانی بهار تا تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تخصصی دانشکده صنایع غذایی انجام شد. برای این پژوهش، آلبالو تازه رقم اردی جولیبوم^۱ از شهر همدان تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. آلبالوهای

مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (صالحی و همکاران ۲۰۲۳b).

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

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

مدل‌سازی سینتیکی

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن و لگاریتمی برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن آلبالو و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (صالحی و ساترابی ۲۰۲۱). به‌منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

آبگیری مجدد آلبالوهای خشک شده

برای محاسبه درصد آبگیری مجدد^۴ (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 (صالحی، ۲۰۲۳a). نسبت باز جذب آب توسط معادله ۲ محاسبه و گزارش شد.

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (2)$$

در این معادله، RR نسبت باز جذب آب، M وزن آلبالوها بعد از باز جذب آب و M_0 وزن آلبالوهای 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 خشک کردن در سه تکرار انجام و

نارس و فاسد به‌طور دستی جدا و نمونه‌های یک شکل و یکنواخت برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شدند.

درصد رطوبت اولیه آلبالو

برای تعیین رطوبت اولیه، آلبالوهای سالم و عاری از هرگونه آلودگی و لهیدگی جدا و سپس از بین آنها به‌صورت تصادفی چند آلبالو انتخاب شد. آلبالوهای انتخاب شده به دو گروه تقسیم شدند. یک گروه با هسته (سالم) و یک گروه بدون هسته (بخش خوراکی میوه). رطوبت هر دو گروه توسط آون (شیماز، ایران) در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و مدت زمان ۵ ساعت اندازه‌گیری شد.

اعمال تیمار فراصوت

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 فراصوت و فرآیند خشک کردن از آلبالوهای سالم (هسته‌دار) استفاده شد. پیش تیمار فراصوت توسط دستگاه حمام فراصوت (مدل vCLEAN1-L6، بکر، ایران) بر آلبالوها اعمال گردید. برای این منظور، آلبالوهای سالم داخل دستگاه حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۵۰ وات به مدت ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دقیقه قرار گرفتند.

- فرآیند خشک کردن آلبالوهای تیمار شده

برای خشک کردن آلبالوهای تیمار شده از خشک کردن همرفتی (هوای داغ) استفاده شد. برای انجام عملیات خشک کردن 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 دیجیتال (کیا، مدل SL1000، ایران) با دقت ۰/۰۱ ± گرم، ثبت شد.

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

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

1- Effective moisture diffusivity coefficient

2- Spherical coordinate

3- Fick's second law of diffusion

4- Rehydration ratio (RR)

و در سطح ماده غذایی، باعث ایجاد تنش‌های شدید و تخریب جداره سلولی بافت محصول شده و در نتیجه باعث افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می‌گردد (دهقان‌نیا و همکاران ۱۳۹۷). شکل ۱ افت رطوبت آلبالوهای تیمار شده با فراصوت طی فرآیند خشک شدن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تیماردهی آلبالو توسط امواج فراصوت باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است.

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

Ultrasound time	Drying time (min)
0 min	465.0±21.21 ^a
4 min	415.0±7.07 ^{ab}
8 min	385.0±39.37 ^{bc}
12 min	340.0±7.07 ^c

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

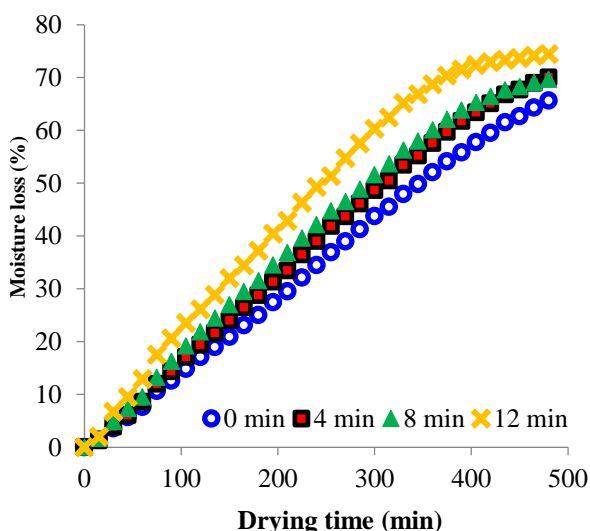


Figure 1- Impact of ultrasound pretreatment on the moisture loss of sour cherry during drying process

اثر فراصوت بر نفوذ مؤثر رطوبت

در جدول ۲ اثر زمان تیماردهی با فراصوت بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو طی خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش زمان اعمال فراصوت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت

برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر فراصوت بر زمان خشک شدن

میانگین رطوبت اولیه آلبالوها به صورت کامل (با هسته) و بدون هسته به ترتیب برابر ۷۳/۸۰ درصد و ۸۷/۲۵ درصد برپایه مرطوب بود.

در این پژوهش، همه آلبالوها تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌شدند و هر ۱۵ دقیقه هم تغییرات وزن آنها ثبت می‌گردید. با توجه به اینکه میانگین رطوبت آلبالوها با هسته ۷۳/۸ درصد بود (اندازه‌گیری شده در ۱۰۳ درجه سلسیوس)، در دمای ۷۰ درجه سلسیوس (دمای خشک کردن نمونه‌ها)، آلبالوها حداقل ۶۵ درصد از رطوبت خود را طی فرآیند خشک کردن از دست می‌دادند؛ لذا خروج ۶۵ درصد رطوبت از آلبالوها به عنوان زمان خشک شدن در نظر گرفته شد. در جدول ۱ اثر زمان اعمال فراصوت بر زمان خشک شدن آلبالوها گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال فراصوت، زمان خشک شدن نمونه‌ها به صورت معنی‌داری کاهش یافته است ($p < 0/05$). با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۱۲ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن هوای داغ به صورت معنی‌داری از ۴۶۵ دقیقه به ۳۴۰ دقیقه کاهش یافت ($p < 0/05$). صالحی و همکاران (۱۴۰۲) اثر پیش تیمار فراصوت بر سرعت خشک شدن گیلان را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار فراصوت تا ۳ دقیقه، سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از گیلان‌ها و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک شدن این میوه شد. دویماز (۲۰۰۷) 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.

امواج فراصوت باعث انقباض و انبساط‌های متوالی در محیط مایع اطراف ماده غذایی و در نتیجه منجر به پدیده کاویتاسیون یا تشکیل حباب می‌شود. ترکیدن این حباب‌ها در محیط مایع

از آلبالوها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول می‌شود.

با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۱۲ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای آلبالوهای قرار گرفته در خشک‌کن همرفتی به صورت معنی‌داری از $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $3/26 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p < 0/05$). زو و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که پیش‌تیمار فراصوت ریزساختار برش‌های آناناس را تغییر می‌دهد و ترکیب فراصوت و فرآیند خشک‌کردن، اثربخشی فرآیند را بهبود بخشیده، زمان خشک‌کردن را کاهش داده و محصولی با

کیفیت بالاتر تولید می‌کند. دویماز (۲۰۰۷) اثر پیش‌تیمار 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 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $4/75 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش کرده است. فرناندز و همکاران (۲۰۰۸) از روش فراصوت برای بهبود انتقال جرم پایا قبل از خشک شدن با هوای گرم استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت پس از تیماردهی با فراصوت افزایش یافته و باعث کاهش حدود ۱۶ درصدی در زمان خشک شدن پایا می‌شود.

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

Ultrasound time	moisture diffusivity coefficient (m^2/s)
0 min	$3.26 \times 10^{-10} \pm 2.23 \times 10^{-11} \text{ c}$
4 min	$3.71 \times 10^{-10} \pm 3.62 \times 10^{-12} \text{ bc}$
8 min	$3.96 \times 10^{-10} \pm 3.24 \times 10^{-11} \text{ b}$
12 min	$4.52 \times 10^{-10} \pm 2.02 \times 10^{-11} \text{ a}$

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

مدل‌سازی فرآیند خشک شدن آلبالو

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک‌کردن آلبالوها و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (جدول ۳). بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r) و حداقل مقادیر خطا باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک‌کردن آلبالوها، مدل پیچ است. در جدول ۴ مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (k و n) برای شرایط مختلف خشک‌کردن آلبالوها گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۱۰، ۰/۹۹۸ تا ۰/۹۹۹ و ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۱۸ به دست آمد. در شکل ۲ نیز مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیچ با نتایج تجربی نسبت رطوبت برای زمان‌های پیش‌تیمار 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 خشک‌کردن آلبالوهای تیمار شده با فراصوت توصیه می‌شود. قادری و همکاران (۱۳۹۰) سینتیک خشک‌کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ را بررسی کردند. براساس نتایج این پژوهش، توان ماکروویو و میزان خلأ روی سرعت خشک شدن آلبالو اثرات مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، این پژوهشگران استفاده از مدل‌های سینتیکی را بررسی و مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن آلبالو توصیه کرده‌اند.

Table 3- Calculated statistical parameters to verify the agreement of each mathematical model with the moisture ratio (MR) data (sonication time=8 min)

Model name	Page	Wang and Singh	Newton	Henderson and Pabis	Approximation of diffusion	Logarithmic
Model equation	$MR=\exp(-kt^n)$	$MR=1+at+bt^2$	$MR=\exp(-kt)$	$MR=a\exp(-kt)$	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	$MR=a\exp(-kt)+c$
Model constants	k=0.00058 n=1.289	a=-0.00228 b=1.15E-6	k=0.00294	a=1.067 k=0.0032	a=1.001 k=0.0029 b=0.4715	a=1.612 k=0.0016 c=-0.5895
SSE ¹	0.0029	0.0052	0.0502	0.0281	0.0501	0.0044
r	0.9993	0.9987	0.9880	0.9933	0.9881	0.9989
RMSE ²	0.0096	0.0129	0.0396	0.0301	0.0409	0.0121

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 parameter

Ultrasound time	k	n	SSE ¹	r	RMSE ²
0 min	0.0003	1.3643	0.0052	0.9986	0.0128
4 min	0.0003	1.3883	0.0061	0.9985	0.0139
8 min	0.0007	1.3000	0.0058	0.9987	0.0134
12 min	0.0008	1.2757	0.0077	0.9984	0.0156

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

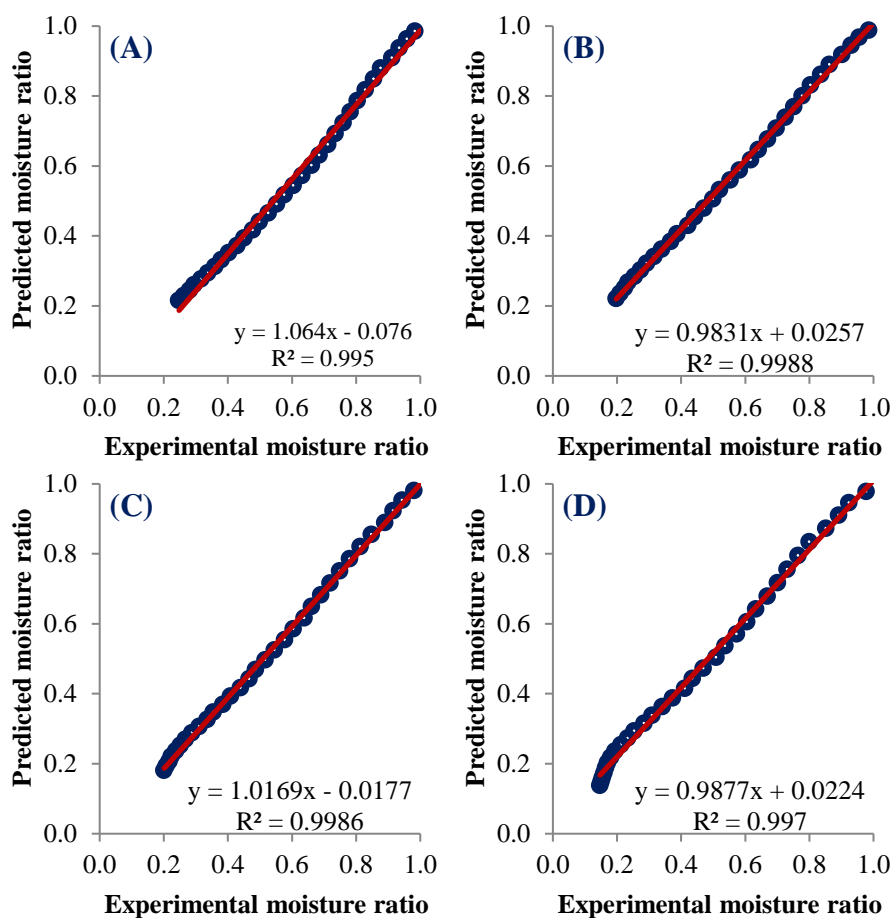


Figure 2- Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio; A: 0 min, B: 4 min, C: 8 min, and D: 12 min.

اثر فراصوت بر شاخص آبگیری مجدد

در جدول ۵ اثر زمان اعمال فراصوت بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده گزارش شده است.

زمان تیماردهی با فراصوت تا ۲۰ دقیقه بر آب‌زدایی از برش‌های شلغم تأثیر معنی‌داری دارد که این افزایش به دلیل ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار شلغم بوده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار فراصوت بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک‌کردن آلبالو در خشک‌کن همرفتی بررسی شد. زمان تیماردهی با فراصوت تأثیر معنی‌داری در کاهش زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن هوای داغ داشت ($p < 0.05$). 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 فراصوت، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۳۸ درصد افزایش یافت که منجر به ۲۷ درصد کاهش در زمان خشک‌شدن آلبالوها شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیچ با دو پارامتر بر اساس بالاترین صحت به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. با افزایش زمان تیمار فراصوت از ۴ به ۱۲ دقیقه، آبگیری مجدد آلبالوها در افزایش یافت. به‌طورکلی، بهترین شرایط برای خشک‌کردن آلبالو، ۱۲ دقیقه پیش‌تیمار با فراصوت بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به خاطر حمایت مالی و معنوی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

Table 5- Impact of ultrasound pretreatment on the rehydration ratio of dried sour cherry.

Ultrasound time	Rehydration ratio(%)
0 min	116.34±1.17 ^a
4 min	110.96±3.27 ^a
8 min	115.05±3.87 ^a
12 min	118.77±9.06 ^a

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

براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال فراصوت تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نداشت ($p > 0.05$). با اعمال ۴ دقیقه فراصوت، به دلیل آسیب دیدن حفرات سطحی آلبالوها، درصد آبگیری مجدد کاهش یافت؛ اما با افزایش زمان اعمال فراصوت، به دلیل ایجاد و گسترش حفرات سطحی و لوله‌های مویینه موجود در آلبالو، آبگیری مجدد نمونه‌ها افزایش یافت. با افزایش زمان تیمار فراصوت از ۴ به ۱۲ دقیقه، میانگین آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده از ۱۱۰/۹۶ به ۱۱۸/۷۷ درصد افزایش یافت. صالحی و همکاران (۱۴۰۲) گزارش کردند که تیماردهی با امواج فراصوت به مدت ۳ دقیقه باعث افزایش آبگیری مجدد گیلان خشک شده می‌شود اما با افزایش زمان تیماردهی به ۶ و ۹ دقیقه، مقدار آبگیری مجدد کاهش می‌یابد. شهیدی و مالکی‌آیسک (۲۰۱۷) تأثیر فراصوت (صفر تا ۲۰ دقیقه) بر آبگیری اسمزی از برش‌های شلغم را بررسی و بهترین شرایط خشک‌کردن این محصول با هوای داغ را تعیین کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش

References

- خاکبازحشمتی م و خوشقدم ح، ۱۳۹۶. بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی و فیزیکی شیمیایی فرمولاسیون جدید آب‌میوه حاصل از ترکیب آلبالو و انگور قرمز غنی‌شده با فیبر رژیمی اینولین به‌عنوان محصولی پری‌بیوتیک. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۷(۴)، ۱۲۱-۱۳۴.
- دهقان‌نیا ج، باقری درویش محمد ح و قنبرزاده ب، ۱۳۹۷. تأثیر فرآوری سیب‌زمینی با پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و مایکروویو روی جذب روغن طی سرخ‌کردن. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۸(۱)، ۱۸۲-۱۶۱.
- صالحی ف، اینانلودوقوز م و قزوینه س، ۱۴۰۲. بررسی اثر پیش‌تیمار فراصوت بر سرعت خشک شدن گیلان و مدل‌سازی فرآیند توسط روش الگوریتم ژنتیک- شبکه عصبی مصنوعی. علوم غذایی و تغذیه، ۲۰(۴)، ۱۴-۵.

قادری ع، عباسی س، متولی ع و مینایی س، ۱۳۹۰. انتخاب مدل ریاضی برای سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک کن مایکروویو-سخت. علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران، ۶ (۲)، ۶۴-۵۵.

- Awad TS, Moharram HA, Shaltout OE, Asker D, Youssef MM, 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International* 48(2): 410-427.
- Delgado JMPQ, da Silva MV, 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.
- Fernandes FAN, Oliveira FIP, Rodrigues S, 2008. Use of ultrasound for dehydration of papayas. *Food and Bioprocess Technology* 1(4): 339-345.
- Ghorbani R, Dehghannya J, Seiedlou Heris SS, Ghanbarzadeh B, 2013. Modeling color parameters during plums drying pretreated with ultrasound and osmotic dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation* 5(1): 27-59.
- Jalilzadeh A, Hesari J, Peighambaroust SH, Javidipour I, 2018. The effect of ultrasound treatment on microbial and physicochemical properties of Iranian ultrafiltered feta-type cheese. *Journal of Dairy Science* 101(7): 5809-5820.
- Mujumdar AS, 2014. *Handbook of industrial drying*. CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London.
- Rani, P, Tripathy, PP, 2019. Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices. *Journal of Food Science and Technology* 56: 4911-4924.
- Salehi F, 2023. Recent advances in the ultrasound-assisted osmotic dehydration of agricultural products: A review. *Food Bioscience* 51: 102307.
- Salehi F, Ghazvineh S, Inanloodoghuz M, 2023a. 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, Inanloodoghuz M, Ghazvineh S, 2023b. Influence of microwave pretreatment on the total phenolics, antioxidant activity, moisture diffusivity, and rehydration rate of dried sweet cherry. *Food Science & Nutrition*.
- Salehi F, 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.
- Shahidi F, Maleki Aysak M, 2017. Studying the influence of ultrasound treatment on osmosis dehydration of turnip and optimization of hot-air drying conditions. *Journal of Food Science and Technology (Iran)* 14(68): 203-2014.
- 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.
- Wang J, Xiao H-W, Ye J-H, Wang J, Raghavan V, 2019. Ultrasound pretreatment to enhance drying kinetics of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices: pros and cons. *Food and Bioprocess Technology* 12(5): 865-876.
- 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.
- Xu B, Sylvain Tiliwa E, Wei B, Wang B, Hu Y, Zhang L, Mujumdar AS, Zhou C, Ma H, 2022. Multi-frequency power ultrasound as a novel approach improves intermediate-wave infrared drying process and quality attributes of pineapple slices. *Ultrasonics Sonochemistry* 88: 106083.