



Influence of ultrasonic pretreatment on the drying rate of lentil sprouts in hot-air and infrared dryers

Fakhreddin Salehi¹✉, Helia Razavi Kamran² and Kimia Goharpour²

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

Article type:

Research Article

Article history:

Received: June 11, 2023

Accepted: August 24, 2023

Published: July 4, 2024

Keywords:

Effective moisture diffusivity coefficient, Hot-air, Infrared, Lentil sprout

ABSTRACT

Background: Lentils contain a good amount of protein, carbohydrates, lysine, arginine, minerals, and fiber. In many of the developing countries, lentil is considered as a stable source of protein due to its higher dietary protein and complex carbohydrate content. Sprouting process involves changes in the nutritional, biochemical, and sensory characteristics which improve the quality of legumes.

Aims: In this research, the effect of sonication and dryer type (hot-air and infrared) on drying time, effective moisture diffusivity, and rehydration of lentil sprouts were investigated and drying kinetics was modeled.

Methods: To apply ultrasound pre-treatment, the sprouts were placed inside the ultrasonic bath machine for 0, 3, 6, and 9 minutes, and after leaving the machine and removing extra moisture, the samples in thin layers were placed in the hot-air (with a temperature of 70°C) and infrared (power of 250 W) dryers.

Results: The results showed that sonication treatment, causes an increase in moisture removal rate from the sprouts, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing sonication time from zero to 9 min, the average drying time of sprouts in the hot-air and infrared dryers decreased from 156.7 min to 103.3 min, and from 32.7 min to 24.3 min, respectively ($p < 0.05$). The average drying time of the samples in the hot-air dryer was 134.2 min and in the infrared dryer was 28.8 min. Also, the average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot-air dryer was equal to $3.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and for the infrared dryer it was equal to $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The time of ultrasound and drying treatment had significant effects on the rehydration of samples, and the value of this parameter was higher for samples dried in the hot-air dryer.

Conclusion: Generally, 9 minutes pre-treatment by ultrasound and then using an infrared dryer is the best condition for drying lentil sprouts.



Extended Abstract

Introduction: Lentil is one of the five major pulses produced in the world, and the annual production is around 4.5 million tonnes (Chelladurai and Erkinbaev 2020). Lentils have a relatively higher protein, carbohydrate, and energy content than other legumes. Lentil seeds are composed of about two-thirds carbohydrates and 24–30% protein. In addition, lentils are also a good source of certain amino acids, such as lysine and arginine (Lee et al. 2007). In many of the developing countries, lentil is considered as a stable source of protein due to its higher dietary protein and complex carbohydrate content (Chelladurai and Erkinbaev 2020). Sprouting process involves changes in the nutritional, biochemical, and sensory characteristics which improve the quality of legumes (El-Adawy et al. 2003). Ultrasound pre-treatment as 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). One of the best methods for the preservation of agricultural product is drying, which consists in removing water from the manufactured goods. One of the best ways to decreasing in drying time is to provide heat by infrared radiation. Infrared heating has many advantages including a high heat transfer rate, uniform heating, low processing time, high efficiency, low energy consumption, low energy costs, and improving final product structure, porosity and quality (Salehi 2020). We found no report on the effects of ultrasound pretreatment on the hot-air and infrared drying kinetics of sprouted lentils in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of ultrasound pretreatment and drying approaches on the drying time, mass transfer

kinetic, effective moisture diffusivity (D_{eff}), and rehydration of sprouted lentils. In addition, the moisture ratio changes of sprouted lentils during drying were modeled.

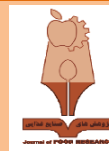
Material and methods: Lentil seeds were washed and soaked in tap water for 24 hr at room temperature ($25\pm 1^\circ\text{C}$). Soaked seeds were kept inside a polyethylene container covered with a clean kitchen towel and allowed to germinate for 48 hr in the dark at room temperature ($25\pm 1^\circ\text{C}$). In this research, the effect of ultrasound time and dryer type (hot-air and infrared) on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of lentil sprouts were investigated and drying kinetics were modeled. To apply the sonication treatments on the germinated lentils, 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 to 25°C , the germinated lentils were placed directly in the bath. To apply ultrasound pre-treatment, the sprouts were placed inside the ultrasonic bath machine for 0, 3, 6, and 9 minutes, and after leaving the machine and removing extra moisture, the samples in thin layers were placed in the hot-air (with a temperature of 70°C) and infrared (power of 250 W) dryers. The dehydration kinetics of sprouted lentils has been explained using 4 simplified drying equations (Henderson and Pabis, Newton, Page, and Wang and Singh). Fick's second law of diffusion using spherical coordinates was used to calculate the moisture diffusivity of germinated lentils at various hot-air and infrared drying conditions. The rehydration tests were conducted with a water bath (R.J42, Pars Azma Co. , Iran). Dried sprouted lentils were weighed and immersed for 30 min in distilled water in a 250 ml glass beaker at 50°C .

Data are presented as mean \pm standard deviation for triplicate measurements. Statistical analysis was performed by one-way analysis of variance (ANOVA) at 95% level of significance, using SPSS software (version 21). In addition, means were compared with

Duncan's multiple range test at 95% level of significance.

Results and discussion: As the ultrasonic wave propagates, creating cycles of contraction and expansion causes bubbles to form in the solution and cavitation as a result. This phenomenon, combined with an increase in the temperature of the sample, causes cell wall destruction, accelerated diffusion, and mass transfer, and ultimately the release of more and more intracellular compounds (Salehi et al. 2023). The results showed that sonication treatment, causes an increase in moisture removal rate from the sprouts, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and as a result, reduces the drying time. By increasing sonication time from zero to 9 min, the average drying time of sprouts in the hot-air and infrared dryers decreased from 156.7 min to 103.3 min, and from 32.7 min to 24.3 min, respectively. The average drying time of the samples in the hot-air dryer was 134.2 min and in the infrared dryer was 28.8 min. Also, the average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot-air dryer was equal to $3.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and for the infrared dryer it was equal to $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. The time of ultrasound and drying treatment had significant effects on the rehydration of samples, and the value of this parameter was higher for samples dried in the hot-air dryer. Page equation illustrated an appropriate fit with the maximum r-value (more than 0.9986) and the minimum SSE (sum of squared errors), and RMSE (root mean squared error) values (lower than 0.006 and 0.016, respectively) for all conditions compared to that of the other models. The experimental moisture ratio was satisfactorily compared with the theoretical moisture ratio. The relationship was shown in maximum value of the coefficient of multiple determinations (closer to 1) obtained at various infrared drying durations.

Conclusion: Kinetic modeling of lentil sprouts 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. Generally, 9 minutes pre-treatment by ultrasound and then using an infrared dryer is the best condition for drying lentil sprouts.



تأثیر پیش تیمار فراصوت بر سرعت خشک شدن جوانه‌های عدس در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ

فخرالدین صالحی✉، هلیا رضوی کامران^۲ و کیمیا گوهرپور^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

مشخصات مقاله

نوع مقاله:

علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

انتشار: ۱۴۰۳/۴/۱۴

کلید واژگان:

جوانه عدس، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، فروسرخ، هوای داغ

چکیده

زمینه مطالعاتی: عدس حاوی مقدار مناسبی از پروتئین، کربوهیدرات، لیزین، آرژنین، مواد معدنی و فیبر است. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، عدس به دلیل داشتن پروتئین زیاد و محتوای کربوهیدرات پیچیده به عنوان منبع پایدار پروتئین در نظر گرفته می‌شود. فرآیند جوانه زدن شامل تغییراتی در ویژگی‌های تغذیه‌ای، بیوشیمیایی و حسی است که باعث بهبود کیفیت حبوبات می‌شود.
هدف: در این پژوهش اثر زمان فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فروسرخ) بر زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد جوانه‌های عدس بررسی و سینتیک خشک شدن مدل‌سازی شد.

روش کار: برای اعمال پیش تیمار فراصوت، جوانه‌ها به مدت ۰، ۳، ۶ و ۹ دقیقه داخل دستگاه حمام فراصوت قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه و حذف رطوبت اضافی، نمونه‌ها به صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن‌های هوای داغ (با دمای ۷۰ درجه سلسیوس) و فروسرخ (توان ۲۵۰ وات) قرار گرفتند.
نتایج: نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار فراصوت، سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از جوانه‌ها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک‌کردن می‌گردد. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فروسرخ به ترتیب از ۱۵۶/۷ دقیقه به ۱۰۳/۳ دقیقه و ۳۲/۷ دقیقه به ۲۴/۳ دقیقه کاهش یافت ($p < 0.05$). متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۳۴/۲ دقیقه و در خشک‌کن فروسرخ ۲۸/۸ دقیقه بود. همچنین متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای نمونه‌های قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $3.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و برای خشک‌کن فروسرخ برابر $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. زمان اعمال امواج فراصوت و روش خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر آبگیری مجدد نمونه‌ها داشتند و مقدار این پارامتر برای نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر بود.
نتیجه‌گیری نهایی: به‌طور کلی، بهترین شرایط برای خشک‌کردن جوانه‌های عدس، ۹ دقیقه پیش تیمار با فراصوت و سپس استفاده از خشک‌کن فروسرخ بود.

مقدمه

امروزه مصرف محصولات غذایی خام بیولوژیکی و گیاهی، به‌ویژه بر پایه جوانه‌های حبوبات، به دلیل ارزش غذایی بهبود یافته در مقایسه با دانه‌ها، روند رو به افزایشی دارد (سانتوس و همکاران ۲۰۲۰). عدس (*Lens culinaris L.*) یکی از پنج حبوبات عمده تولید شده در جهان است و میزان تولید سالانه آن حدود ۴/۵ میلیون تن است (چلادورای و ارکینبایف ۲۰۲۰). مانند بیشتر حبوبات، دانه‌های عدس از حدود دو سوم کربوهیدرات و ۲۴ تا ۳۰ درصد پروتئین تشکیل شده‌اند. عدس منبع خوبی از لیزین و آرژینین است که در متعادل کردن کمبود این اسیدهای آمینه ضروری در رژیم‌های غذایی مبتنی بر غلات مهم است (لی و همکاران ۲۰۰۷). دانه‌های عدس سرشار از فیبرهای غذایی، مواد معدنی و فاقد کلسترول بوده و مقدار چربی اشباع و قندهای ساده آنها نیز ناچیز است (پری و همکاران ۲۰۲۱). در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، عدس به دلیل داشتن پروتئین زیاد و محتوای کربوهیدرات پیچیده به‌عنوان منبع پایدار پروتئین در نظر گرفته می‌شود. ترکیب آرد عدس با آردهای غلات برای تولید فرآورده‌های نانوائی و اسنک نیز به دلیل اشتیاق مصرف‌کنندگان به فرآورده‌های سالم و خوش طعم، روزبه‌روز در حال افزایش است (چلادورای و ارکینبایف ۲۰۲۰).

فرآیند جوانه زدن شامل تغییراتی در ویژگی‌های تغذیه‌ای، بیوشیمیایی و حسی است که باعث بهبود کیفیت حبوبات می‌شود. از فرآیند جوانه‌زنی در فرآوری حبوبات برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای استفاده می‌شود، زیرا باعث بهبود قابلیت هضم می‌شود. همچنین طی این فرآیند مقدار ترکیبات فنلی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی محصول افزایش می‌یابد (ال-آدوی و همکاران ۲۰۰۳؛ عقبایی و پراکاش ۲۰۱۶؛ کریمی و صارم‌نژاد ۲۰۲۰). سلیمان و همکاران (۲۰۰۷) اثر جوانه‌زنی بر تغییر ترکیبات شیمیایی، فیتات، فعالیت فیتاز و قابلیت استخراج مواد معدنی ارقام عدس را بررسی کردند. در پژوهش ابتدا بذرها را جوانه‌زده خشک و آسیاب شدند. نتایج نشان داد که در طول جوانه‌زنی درصد چربی و فیبر افزایش یافت، درحالی‌که انرژی غذا کاهش یافت. همچنین محتوای اسید فیتیک با افزایش

زمان جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و جوانه‌زنی منجر به افزایش قابل‌توجهی در فسفر غیر فیتات شد. مقدار مواد معدنی کل و قابل‌استخراج (فسفر، کلسیم، آهن و منیزیم) با طول مدت جوانه‌زنی همبستگی مثبت داشتند. سانتوس و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که جوانه‌زنی وارته‌های مختلف عدس منجر به افزایش مقدار پروتئین در آنها می‌شود.

هدف اصلی از خشک‌کردن، افزایش زمان ماندگاری مواد غذایی (انواع میوه و سبزی) بر اساس کاهش میزان رطوبت، کاهش فعالیت آبی (a_w)، کاهش فعالیت آنزیمی، جلوگیری از رشد میکروب‌ها و کاهش فعالیت‌های شیمیایی نامطلوب است. در اکثر موارد خشک‌کردن باعث بهبود ویژگی حسی محصول می‌گردد (دلگادو و داسیلوا ۲۰۱۴). در گذشته برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی، به‌طور عمده از روش‌های غیرمکانیزه مانند انرژی خورشیدی استفاده می‌شد. اما چنین سیستم‌هایی دارای معایبی از جمله کاهش کیفیت، غیر قابل کنترل بودن شرایط محیطی، خشک شدن غیریکنواخت و افزایش زمان خشک شدن هستند (قربانی و همکاران ۲۰۱۳). متداول‌ترین روش خشک‌کردن محصولات کشاورزی استفاده از جریان هوای داغ و به روش انتقال حرارت جابه‌جایی است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در محصول می‌باشد. خشک‌کردن با خشک‌کن هوای داغ علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند دارای معایبی مانند زمان طولانی‌تر برای خشک‌کردن محصولات در مقایسه با سایر روش‌های نوین و همچنین افت کیفیت محصول است (موجودار ۲۰۱۴). یکی از روش‌های کاهش زمان خشک شدن و بهبود خصوصیات کیفی محصول خشک‌شده، استفاده از پرتو فروسرخ است. استفاده از تابش فروسرخ باعث افزایش سرعت خشک‌کردن، حفظ کیفیت محصول نهایی و کاهش هزینه‌های فرآیند تولید به دلیل کاهش مصرف انرژی می‌شود (صالحی ۲۰۲۰؛ صالحی و ساترابی ۱۴۰۱).

تکنولوژی فراصوت بر پایه امواج مکانیکی و صوتی (فرکانس‌های بالاتر از محدوده شنوایی انسان) تولید و این امواج در فرآوری، آنالیز و کنترل کیفیت مواد غذایی بر اساس

بعد از جوانه‌زنی دانه‌های عدس، پیش‌ تیمار فراصوت توسط دستگاه حمام فراصوت (مدل vCLEAN1-L6، بکر، ایران) بر جوانه‌ها اعمال گردید. برای این منظور، در هر مرحله، حدود ۱۰ گرم از جوانه‌های عدس به مدت ۰، ۳، ۶ و ۹ دقیقه داخل دستگاه حمام فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۵۰ وات، قرار گرفتند (صالحی و همکاران ۲۰۲۳).

فرآیند خشک کردن جوانه‌های تیمار شده

برای خشک کردن جوانه‌های عدس از دو روش هوای داغ و فرورسرخ استفاده شد. برای انجام عملیات خشک کردن جوانه‌های تیمار شده با فراصوت با هوای داغ از آن فن‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (شیماز، ایران) استفاده شد. در این روش تغییرات وزن نمونه‌ها طی فرآیند خشک شدن تا رسیدن به یک رطوبت یکسان در هر خشک‌کن، توسط ترازوی دیجیتال (لوترون، تایوان^۱) با دقت $\pm 0/01$ گرم، ثبت شد (امین‌اخلاص و همکاران ۱۴۰۲).

در روش فرورسرخ، جوانه‌های تیمار شده با فراصوت جهت خشک شدن با پرتو فرورسرخ با توان ۲۵۰ وات داخل خشک‌کن فرورسرخ قرار گرفتند. برای پرتودهی از لامپ فرورسرخ ساخت شرکت نور (ایران) استفاده گردید. فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها طی خشک شدن توسط ترازوی دیجیتال با دقت $\pm 0/01$ گرم که در زیر خشک‌کن قرار گرفته بود تا زمان رسیدن به ثبات وزن، ثبت شد (امین‌اخلاص و همکاران ۱۴۰۲).

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۲ عدس جوانه‌زده هنگام خشک شدن توسط هوای داغ و فرورسرخ، ابتدا مختصات نمونه کروی^۳ در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک^۴ استفاده شد. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های

محدوده فرکانس به دو دسته فراصوت با انرژی پایین (فرکانس بالا و توان پایین) و فراصوت با انرژی بالا (فرکانس پایین و توان بالا) تقسیم‌بندی می‌شود. 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؛ صالحی و چراغی ۱۴۰۲). شهیدی و مالکی‌آیسک (۲۰۱۷) تأثیر فراصوت (صفر تا ۲۰ دقیقه) بر آبگیری اسمزی از برش‌های شلغم را بررسی و بهترین شرایط خشک کردن این محصول با هوای داغ را تعیین کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش زمان تیماردهی با فراصوت تا ۲۰ دقیقه بر آبگیری زدایی از برش‌های شلغم تأثیر معنی‌داری دارد که این افزایش به دلیل ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار شلغم بوده است.

استفاده از روش‌های جدید مانند فراصوت و فرورسرخ باعث کاهش زمان خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک‌شده می‌شود. لذا در این پژوهش اثر پیش‌ تیمار فراصوت و روش‌های خشک کردن شامل هوای داغ و فرورسرخ بر سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد جوانه عدس بررسی و مدل‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

تهیه جوانه عدس

در این پژوهش، ابتدا دانه‌های عدس از شرکت سحر با برند سبدچین تهیه و بعد از شستشو، در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خیسانده شدند. سپس، آب اضافی آنها کاملاً گرفته شده و جوانه‌زنی بذرها درون ظرفی که روی آن با حوله نازک پوشانده شده بود، طی مدت ۴۸ ساعت و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام گردید. طی فرآیند جوانه‌زنی هر ۶ ساعت آب نمونه‌ها تعویض گردید.

اعمال تیمار فراصوت

¹- Digital balance, LutronGM-300p (Taiwan)

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

³- Spherical coordinate

⁴- Fick's second law of diffusion

نتایج و بحث

زمان خشک شدن جوانه‌های عدس

در جدول ۱ نتایج حاصل از تجزیه واریانس زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرسرخ) بر زمان خشک شدن جوانه‌های عدس گزارش شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است ($p < 0/01$). همچنین اثرات متقابل آن‌ها نیز در سطح ۱٪ معنی‌دار شده است ($p < 0/05$).

Table 1- Results of analysis of variance for drying time parameter of lentil sprouts.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer type	1	66571	66571	0.000
Sonication	3	3264	1088	0.000
Dryer type × Sonication	3	1747	582	0.000
Error	16	425	27	
Total	23	72006		

در جدول ۲ اثر زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرسرخ) بر زمان خشک شدن جوانه‌های عدس گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال فراصوت، زمان خشک شدن نمونه‌ها، کاهش یافته است. زمان تیماردهی با فراصوت تأثیر معنی‌داری در کاهش زمان خشک شدن جوانه‌های عدس در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ داشت ($p < 0/05$). با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ به ترتیب از ۱۵۶/۷ دقیقه به ۱۰۳/۳ دقیقه و از ۳۲/۷ دقیقه به ۲۴/۳ دقیقه کاهش یافت ($p < 0/05$). زمان خشک شدن جوانه‌های عدس در خشک‌کن فرسرخ کوتاه‌تر از خشک‌کن هوای داغ بود. متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۳۴/۲ دقیقه و در خشک‌کن فرسرخ ۲۸/۸ دقیقه بود. نجیب و همکاران (۲۰۲۲) زمان خشک شدن دو رقم عدس در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-فرسرخ را بسته به توان سیستم در محدوده ۵/۵ تا ۱۰۰ دقیقه گزارش

تجربی در مقابل زمان خشک‌کردن و با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (امین‌اخلاص و همکاران ۱۴۰۲).

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

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

مدل‌سازی سینتیکی

آگاهی از روابط بین متغیرهای مختلف طی فرآیند خشک‌کردن محصولات غذایی از طریق انجام مدل‌سازی، می‌تواند راه مناسبی برای کنترل بهینه شرایط فرآیند و در نتیجه، افزایش کیفیت محصول خشک‌شده نهایی باشد. به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌های عدس، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های هندرسون و پابیس، ونگ و سینگ، پیچ و نیوتن برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (صالحی و ساترابی ۲۰۲۱). برای محاسبه مقادیر ثابت مدل‌ها از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

آبگیری مجدد جوانه‌های خشک‌شده

برای محاسبه درصد آبگیری مجدد، جوانه‌های خشک‌شده عدس توزین، سپس درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از آب خارج شده و توزین شدند. درصد باز جذب آب بر اساس "نسبت وزن نمونه بعد از آبگیری به وزن نمونه خشک (قبل از آبگیری) ضرب در ۱۰۰"، محاسبه و گزارش شد (صالحی و چراغی ۱۴۰۲).

آنالیز آماری

آنالیز آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد. آزمون‌های خشک‌کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌ها، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

Table 2- Impact of sonication pretreatment and drying method on the drying time (min) of lentil sprouts.

Sonication time	Hot-air dryer	Infrared dryer
0 min	156.67 ^a	32.67 ^a
3 min	146.67 ^a	30.67 ^{ab}
6 min	130.00 ^b	27.67 ^b
9 min	103.33 ^c	24.33 ^c

Different letters indicate significant differences within columns by Duncan's test at $p < 0.05$

دادند که با افزایش توان مایکروویو و فرسرخ، زمان خشک کردن کاهش می‌یافت.

شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب افت رطوبت جوانه‌های عدس تیمار شده با فراصوت طی خشک شدن در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ را نشان می‌دهند. با توجه به این دو شکل، تیماردهی جوانه‌های عدس توسط امواج فراصوت باعث تسریع در خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است.

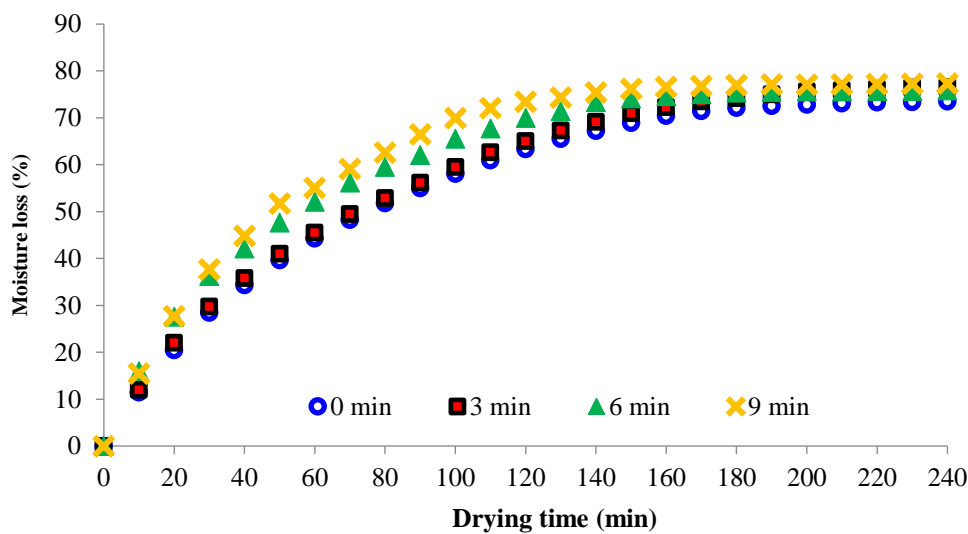


Figure 1- Impact of sonication pretreatment on the moisture loss of lentil sprouts during drying in the hot-air dryer

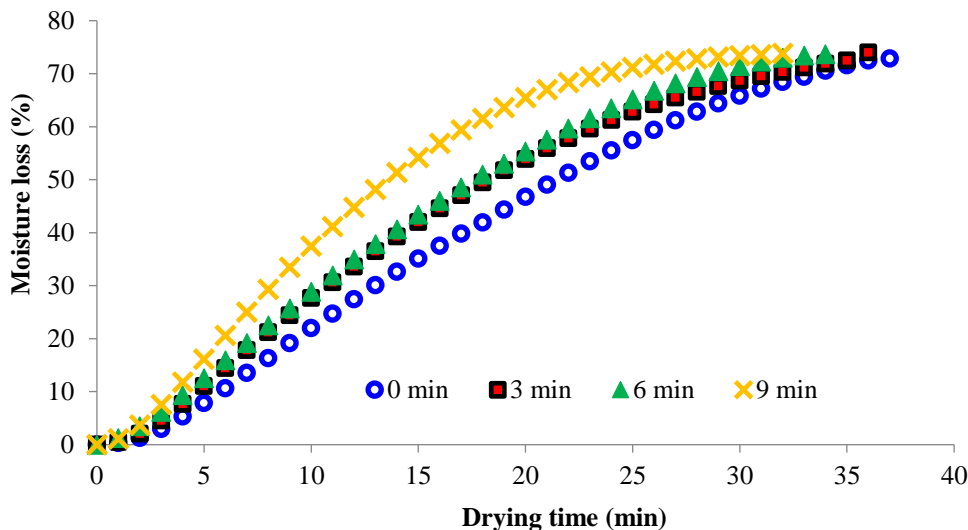


Figure 2- Impact of sonication pretreatment on the moisture loss of lentil sprouts during drying in the infrared dryer

و همکاران (۱۴۰۲) اثر تیماردهی با فراصوت بر سینتیک خشک‌کردن گندم جوانه‌زده را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که با اعمال ۵ دقیقه فراصوت ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های گندم قرار گرفته در خشک‌کن فرسرخ از $9/5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $10/5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی فرآیند خشک شدن

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۴ ضرایب و مقدار خطا برای مدل‌های استفاده شده در این پژوهش گزارش شده است. در این جدول مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط هر مدل برای یک سری از داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده است (زمان پیش‌تیمار برابر ۹ دقیقه و سپس خشک‌کردن توسط هوای داغ). برای تمامی تیمارها این مقادیر محاسبه و نتایج آنها با هم مقایسه شد. بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r^2) و حداقل مقادیر خطا باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک‌کردن جوانه‌های عدس، مدل پیچ است.

در جدول ۵ مجموع مربعات خطا^۱ (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (k و n) برای شرایط مختلف خشک‌کردن جوانه‌های عدس گزارش شده است. مدل پیچ انطباق خوبی با داده‌های نسبت رطوبت آزمایشگاهی داشت. لذا این مدل برای بررسی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌های عدس تیمار شده با فراصوت مناسب است.

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های عدس

برای بررسی و ارائه روش خشک‌کردن مناسب با رویکرد ایجاد یکنواختی در عملیات خشک‌کردن و کاهش زمان خشک‌کردن جوانه‌های عدس، در این مطالعه از دو خشک‌کن هوای داغ و فرسرخ استفاده شد. در جدول ۳ اثر زمان تیماردهی با فراصوت بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های عدس طی خشک شدن در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ 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 از جوانه‌ها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول می‌شود. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های عدس قرار گرفته در خشک‌کن فرسرخ به‌صورت معنی‌داری از $1/39 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ به $1/94 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p < 0/05$). همچنین با افزایش زمان تیماردهی با امواج فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های عدس قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ به‌صورت معنی‌داری از $2/78 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به $4/95 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p < 0/05$).

Table 3- Impact of sonication pretreatment and drying method on the effective moisture diffusivity coefficient (m^2/s) of lentil sprouts.

Sonication time	Hot-air dryer	Infrared dryer
0 min	2.78E-10 ^b	1.39E-09 ^c
3 min	3.54E-10 ^b	1.48E-09 ^{bc}
6 min	3.77E-10 ^b	1.59E-09 ^b
9 min	4.95E-10 ^a	1.94E-09 ^a

Different letters indicate significant differences within columns by Duncan's test at $p < 0.05$

مقدار عددی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های عدس طی خشک شدن با فرسرخ بیشتر از هوای داغ بود. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه‌شده برای نمونه‌های قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $3/76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و برای خشک‌کن فرسرخ برابر $1/60 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. امین‌اخلاص

¹- Sum of squares due to error (SSE)

²- Root mean square error (RMSE)

Table 4- The predicted values and statistical parameters obtained in order to verify the fit of each mathematical model to the observed moisture ratio (MR) data during the lentil sprouts drying (sonication time=9 min and at the hot-air dryer)

Drying time	Experimental moisture ratio	Predicted moisture ratio			
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.004
10	0.800	0.813	0.877	0.802	0.804
20	0.642	0.654	0.761	0.643	0.644
30	0.514	0.524	0.652	0.515	0.516
40	0.420	0.419	0.551	0.413	0.413
50	0.331	0.334	0.458	0.331	0.331
60	0.289	0.266	0.371	0.265	0.265
70	0.236	0.211	0.292	0.213	0.212
80	0.192	0.168	0.221	0.171	0.170
90	0.141	0.133	0.157	0.137	0.136
100	0.096	0.105	0.100	0.110	0.109
110	0.068	0.083	0.051	0.088	0.087
120	0.051	0.066	0.009	0.070	0.070
130	0.039	0.052	-0.026	0.056	0.056
140	0.026	0.041	-0.053	0.045	0.045
150	0.016	0.032	-0.073	0.036	0.036
160	0.010	0.026	-0.085	0.029	0.029
170	0.008	0.020	-0.090	0.023	0.023
180	0.005	0.016	-0.087	0.019	0.018
190	0.003	0.013	-0.077	0.015	0.015
200	0.004	0.010	-0.060	0.012	0.012
210	0.003	0.008	-0.035	0.010	0.009
220	0.003	0.006	-0.003	0.008	0.008
230	0.002	0.005	0.036	0.006	0.006
240	0.001	0.004	0.083	0.005	0.005
Model name	Page	Wang and Singh	Newton	Henderson and Pabis	
Model equation	$MR=\exp(-kt^n)$	$MR=1+at+bt^2$	$MR=\exp(-kt)$	$MR=a\exp(-kt)$	
Model constants	k=0.01899 n=1.037	a=-0.0127 b=0.000037	k=0.02211	a=1.004 k=0.0222	
SSE	0.0042	0.1412	0.0048	0.0048	
r	0.9989	0.9612	0.9987	0.9987	
RMSE	0.0134	0.0783	0.0141	0.0144	

Table 5- The constants and coefficients of the Page model to predict the moisture ratio parameter

Dryer type	Sonication time (min)	k	n	SSE	r	RMSE
Hot-air dryer	0	0.0138	1.0116	0.0039	0.9990	0.0129
	3	0.0122	1.0573	0.0057	0.9986	0.0157
	6	0.0159	1.0440	0.0054	0.9987	0.0151
	9	0.0213	1.0078	0.0046	0.9987	0.0141
Infrared dryer	0	0.0111	1.5433	0.0030	0.9995	0.0089
	3	0.0158	1.4623	0.0012	0.9998	0.0061
	6	0.0196	1.4320	0.0020	0.9996	0.0081
	9	0.0193	1.5077	0.0017	0.9997	0.0077

پژوهش امین‌اخلاص و همکاران (۱۴۰۲) گزارش کردند که آبگیری مجدد جوانه‌های گندم خشک‌شده با هوای داغ بیشتر از نمونه‌های خشک‌شده با پرتو فرورسرخ است.

Table 7- Impact of sonication pretreatment and drying method on the rehydration (%) of dried lentil sprouts.

Sonication time	Hot-air dryer	Infrared dryer
0 min	311.65 ^a	239.49 ^a
3 min	303.08 ^a	225.53 ^{ab}
6 min	302.01 ^a	218.29 ^b
9 min	301.33 ^a	221.78 ^b

Different letters indicate significant differences within columns by Duncan's test at $p < 0.05$

نتیجه‌گیری

اثر پیش تیمار فراصوت بر سرعت خشک‌شدن عدس جوانه‌زده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ بررسی شد. زمان تیماردهی با فراصوت تأثیر معنی‌داری در کاهش زمان خشک شدن جوانه‌های عدس در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ داشت ($p < 0.05$). متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۳۴/۲ دقیقه و در خشک‌کن فرورسرخ ۲۸۸/۸ دقیقه بود. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های عدس قرار گرفته در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ افزایش یافت. مقدار عددی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های عدس طی خشک شدن با فرورسرخ بیشتر از هوای داغ بود. علاوه بر این، مدل‌سازی سینتیک تغییرات وزن جوانه‌های عدس در طول خشک شدن، توسط مدل‌های موجود در منابع صورت گرفت و سپس، مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده تغییرات نسبت رطوبت تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، آبگیری مجدد جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ کاهش یافت.

اثر فراصوت بر آبگیری مجدد نمونه‌های خشک‌شده

نتایج تجزیه واریانس زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرورسرخ) بر آبگیری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در جدول ۶ گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن در سطح ۵ درصد بر تغییر آبگیری مجدد معنی‌دار است ($p < 0.05$)؛ اما اثرات متقابل آن‌ها در سطح ۵٪ معنی‌دار نیست ($p > 0.05$).

Table 6- Results of analysis of variance for rehydration of dried lentil sprouts in hot-air and infrared dryers.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer type	1	36735.1	36735.1	0.000
Sonication	3	881.8	293.9	0.019
Dryer type × Sonication	3	103.6	34.5	0.675
Error	16	1064.1	66.5	
Total	23	38784.6		

در جدول ۷ اثر زمان اعمال فراصوت و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرورسرخ) بر آبگیری مجدد جوانه‌های عدس گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، با افزایش زمان اعمال فراصوت، به دلیل آسیب دیدن حفرات سطحی و لوله‌های مویینه موجود در جوانه‌ها، آبگیری مجدد نمونه‌ها کاهش یافته است. با افزایش زمان تیمار فراصوت از صفر به ۹ دقیقه، میانگین آبگیری مجدد جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ به ترتیب از ۳۱۱/۶۵ به ۳۰۱/۳۳ درصد و از ۲۳۹/۴۹ به ۲۲۱/۷۸ درصد کاهش یافت. از نظر پارامتر آبگیری مجدد، بین نمونه‌های تیمار شده با فراصوت و خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ، اختلاف معناداری مشاهده نشد ($p > 0.05$). آبگیری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر از خشک‌کن فرورسرخ بود. متوسط آبگیری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرورسرخ به ترتیب ۳۰۴/۵۲ درصد و ۲۲۶/۲۷ درصد بود. هم‌راستا با نتایج این

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.

References

- امین‌اخلاص س، پژوهی‌الموتی م و صالحی ف، ۱۴۰۲، اثر امواج فراصوت و روش خشک‌کردن بر سیتیک افت رطوبت و آبگیری مجدد گندم جوانه‌زده. مجله علوم و صنایع غذایی ایران، ۲۰(۱۳۵)، ۱۶۸-۱۵۹.
- صالحی ف و چراغی ر، ۱۴۰۲، بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی پارامترهای فرآیند آبگیری به روش اسمزی-فراصوت از کیوی. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۳، ۲، ۱۰۸-۹۵.
- صالحی ف و ساترابی م، ۱۴۰۱، مدل‌سازی فرآیند خشک کردن برش‌های هلو پوشش داده‌شده با صمغ‌های دانه ریحان و گزانتان با سامانه فرسوخ. پژوهش‌های صنایع غذایی، ۳۲(۳)، ۲۸-۱۷.
- 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.
- Chelladurai V, Erkinbaev C, 2020. Lentils, in: Manickavasagan, A., Thirunathan, P. (Eds.), *Pulses: Processing and Product Development*. Springer International Publishing, Cham, pp. 129-143.
- 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.
- El-Adawy TA, Rahma EH, El-Bedawey AA, El-Beltagy AE, 2003. Nutritional potential and functional properties of germinated mung bean, pea and lentil seeds. *Plant Foods for Human Nutrition* 58(3): 1-13.
- Ghorbani R, Dehghannya J, Seiiedlou 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.
- Karimi AS, Saremnezhad S, 2020. The effect of germination process on some functional properties of Iranian lentil cultivars. *Journal of Food Science and Technology (Iran)* 17(101): 167-176.
- Lee HC, Htoon AK, Uthayakumaran S, Paterson JL, 2007. Chemical and functional quality of protein isolated from alkaline extraction of Australian lentil cultivars: Matilda and Digger. *Food Chemistry* 102(4): 1199-1207.
- Mujumdar AS, 2014. *Handbook of industrial drying*. CRC press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London.
- Najib T, Heydari MM, Meda V, 2022. Combination of germination and innovative microwave-assisted infrared drying of lentils: effect of physicochemical properties of different varieties on water uptake, germination, and drying kinetics. *Applied Food Research* 2(1): 100040.
- Oghbaei M, Prakash J, 2016. Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review. *Cogent Food & Agriculture* 2(1): 1136015.
- Perri G, Coda R, Rizzello CG, Celano G, Ampollini M, Gobbetti M, De Angelis M, Calasso M, 2021. Sourdough fermentation of whole and sprouted lentil flours: In situ formation of dextran and effects on the nutritional, texture and sensory characteristics of white bread. *Food Chemistry* 355: 129638.
- S.Santos C, Silva B, M.P.Valente L, Gruber S, W.Vasconcelos M, 2020. The effect of sprouting in Lentil (*Lens culinaris*) nutritional and microbiological profile, *Foods*.
- Salehi F, 2020. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International Journal of Fruit Science* 20(3): 586-602.
- 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.

- 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.
- Sulieman MA, ElTyeb MM, Abbass MA, Ibrahim EE, Babiker EE, ElTinay AH, 2007. Changes in chemical composition, phytate, phytase activity and minerals extractability of sprouted lentil cultivars. *Journal of Biological Sciences* 7(5): 776-780.