

Effect of Microwave-Treatment Time on the Drying Rate of Sprouted Lentil in Different Dryers

Fakhreddin Salehi^{1*}, Kimia Goharpour², Helia Razavi Kamran²

¹ Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,
Email: f.salehi@Basu.ac.ir

² MSc student, Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 28-05-2023
Revised: 15-06-2023
Accepted: 22-07-2023

Keywords:
Hot-air
Infrared
Microwave
Page model
Sprouted lentil

ABSTRACT

Background and objectives: In the food drying industry, it is especially important to use various pretreatments to reduce drying time and improve nutritional properties. As a fast and effective heating source with together thermal and non-thermal impacts, microwave can directly affect the food material, thereby speed up physicochemical reactions, and drying rate, and produce high-quality dried products. Using new methods such as infrared reduces drying time and improves the quality of the dried product. Sprouting is one of the most traditional methods used for reducing most of the anti-nutritional constituents in legumes. In addition, sprouting is considered to enhance the nutritional and quality characteristics of legumes.

Materials and methods: For the preparation of sprouts, lentils were purchased from a market, cleaned, soaked for 24 hours, and then germinated at 25°C for 48 hours. In this study, the effects of microwave time and dryer type (hot-air and infrared) on drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of sprouted lentils were studied to model drying kinetics. To apply microwave pretreatment, sprouted lentils were placed in a microwave oven for 0, 20, 40, and 60 seconds, and after exiting from device, they were placed in a hot-air (with a temperature of 70°C) and an infrared (power of 250 W) dryers in a thin layer.

Results: The results of this research showed that microwave pretreatment increases the outflow rate of moisture from the sprouts, increases the effective moisture diffusivity coefficient, and shortens the drying time. By increasing the microwave treatment time from 0 to 60 s, the sprouts drying time in hot-air and infrared dryers decreased by 38.46% and 25.53%, respectively. The average drying time for the samples was 130.8 minutes for the hot air dryer and 26.3 minutes for the infrared dryer. The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for the samples placed in the hot air dryer was $2.82 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and for the infrared dryer it was $1.76 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Microwave exposure time and drying method had a significant effect on samples rehydration, with higher values for this parameter in microwave-treated and hot-air dried samples. To study the drying kinetics of sprouted lentils, the Page model was selected

as the best model because a mathematical model was fitted to the laboratory data and had the highest accuracy.

Conclusion: In general, the optimal conditions for drying sprouted lentils were pretreatment in a microwave oven for 60 seconds followed by the use of an infrared dryer.

Cite this article: Salehi, F., Goharpour, K., Razavi Kamran, H. 2023. Effect of Microwave-Treatment Time on the Drying Rate of Sprouted Lentil in Different Dryers. *Food Processing and Preservation Journal*, 15(2), 69-82.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/FPPJ.2023.21435.1765

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر زمان تیماردهی با امواج مایکروویو بر سرعت خشک شدن عدس جوانه زده در خشک کن های مختلف

فخرالدین صالحی^{۱*}، کیمیا گوهرپور^۲، هلیا رضوی کامران^۲

^۱دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: F.Salehi@Basu.ac.ir

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: استفاده از پیش تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک کردن مواد غذایی دارد. مایکروویو به عنوان یک منبع گرمایش سریع و مؤثر با اثرات حرارتی و غیرحرارتی می‌تواند مستقیماً بر مواد غذایی تأثیر بگذارد و در نتیجه واکنش‌های فیزیکوشیمیایی و سرعت خشک شدن را تسریع کند و محصولات خشک شده با کیفیت بالا تولید کند. استفاده از روش‌های جدید مانند فرسوخ باعث کاهش زمان خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک شده می‌شوند. جوانه زدن یکی از سنتی‌ترین روش‌هایی است که برای کاهش ترکیبات ضد تغذیه‌ای حبوبات استفاده می‌شود. علاوه بر این، جوانه زدن برای افزایش ویژگی‌های تغذیه‌ای و کیفی حبوبات در نظر گرفته می‌شود.
واژه‌های کلیدی: عدس جوانه زده فرسوخ، مایکروویو مدل پیچ هوای داغ	مواد و روش‌ها: برای تهیه جوانه‌ها، عدس از بازار تهیه و بعد از حذف ناخالصی‌ها، به مدت ۲۴ ساعت خیس‌انده شد و سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس جهت جوانه زنی قرار گرفت. در این پژوهش اثر زمان مایکروویو و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرسوخ) بر زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد عدس جوانه زده بررسی و سینتیک خشک شدن مدل‌سازی شد. برای اعمال پیش تیمار مایکروویو، عدس‌های جوانه زده به مدت ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ثانیه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه به صورت لایه نازک داخل خشک‌کن‌های هوای داغ (با دمای ۷۰ درجه سلسیوس) و فرسوخ (توان ۲۵۰ وات) قرار گرفتند.
	یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که پیش تیمار مایکروویو، سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از جوانه‌ها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک کردن می‌گردد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، زمان خشک شدن جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسوخ به ترتیب ۳۸/۴۶ درصد و ۲۵/۵۳ درصد کاهش یافت. متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۳۰/۸ دقیقه و در خشک‌کن فرسوخ ۲۶/۳ دقیقه بود. متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه شده برای نمونه‌های قرار

گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $2/82 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ و برای خشک‌کن فرسرخ برابر $1/76 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ بود. زمان اعمال امواج مایکروویو و روش خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر آبیگری مجدد نمونه‌ها داشتند و مقدار این پارامتر برای نمونه‌های تیمار شده با مایکروویو و همچنین نمونه‌های خشک‌شده توسط خشک‌کن هوای داغ بیشتر بود. جهت بررسی سینتیک خشک شدن عدس جوانه‌زده، مدل‌های ریاضی بر داده‌های آزمایشگاهی برآزش و در مجموع مدل پیچ بر اساس بالاترین صحت به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، بهترین شرایط برای خشک‌کردن عدس جوانه‌زده، ۶۰ ثانیه پیش‌تیمار با مایکروویو و سپس استفاده از خشک‌کن فرسرخ بود.

استناد: صالحی، ف.، گوهرپور، ک.، رضوی کامران، ه. (۱۴۰۲). اثر زمان تیماردهی با امواج مایکروویو بر سرعت خشک شدن عدس جوانه‌زده در خشک‌کن‌های مختلف. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۵ (۲)، ۶۹-۸۲

DOI: 10.22069/FPPJ.2023.21435.1765



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

عدس (*Lens culinaris* L) یکی از با ارزش ترین حبوبات و از مهم ترین منابع پروتئینی گیاهی برای غذای انسان است. عدس نسبتاً عاری از عوامل ضد تغذیه ای، دارای نفخ کم و شاخص گلیسمی پایین است. اگرچه عدس متیونین و سیستین کمی دارد، اما منبع عالی پروتئین و اسیدهای آمینه برای مکمل پروتئین غلات است که اغلب در کشورهای در حال توسعه با آن مصرف می شود (۱). فرآیند جوانه زنی باعث افزایش ارزش غذایی حبوبات و غلات می شود. همچنین در طی این فرآیند مقدار ترکیبات فنلی و ظرفیت آنتی اکسیدانی محصول افزایش می یابند (۲). کریمی و صارم نژاد (۲۰۲۰) تأثیر فرآیند جوانه زدن بر برخی از ویژگی های فراسودمند ارقام عدس ایرانی را بررسی کردند. تمامی آزمون ها روی آرد عدس ارقام ایرانی کیمیا و گچساران در حالت های جوانه زده (شاهد) و جوانه زده به مدت ۲۴ و ۴۸ ساعت صورت پذیرفت. بر اساس نتایج این پژوهش، جوانه زدن سبب افزایش غلظت گاما آمینو بوتیریک اسید در هر دو رقم مورد بررسی گردید در حالی که دارای اثر کاهشی بر غلظت آهن بود (۳). عسگری و همکاران (۲۰۰۶) خواص فیزیکی شیمیایی غذایی کمکی تهیه شده از گندم و عدس معمولی و جوانه زده را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که مخلوط آرد گندم و عدس جوانه زده با ارزش تغذیه ای بالاتری که دارد می تواند به عنوان یک پایه مناسب جهت تهیه غذای کمکی مورد استفاده قرار گیرد (۴).

امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس با فرکانس حدود ۳۰۰۰۰۰ - ۳۰۰ مگاهرتز و طول موج ۱ - ۰/۰۰۱ متر در هوا هستند و لذا در طیف بین امواج دی الکتریک و فروسرخ قرار گرفته اند. هر چه فرکانس تشعشع بالاتر رود، طول موج آن کمتر می شود و به همین علت به آن مایکروویو

یعنی امواج کوتاه می گویند. از امواج مایکروویو برای اهداف صنعتی، علمی، طبی و ارتباطات استفاده می شود. این امواج به دلیل دارا بودن فرکانس کم، برخلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب رسانی به مولکول های مواد غذایی نیستند (۵). مایکروویو از طریق ایجاد اصطکاک مولکولی به خصوص بین مولکول های آب، در غذا تولید حرارت می کند. حرارت تولید شده در سیستم مایکروویو به میزان آب موجود در مواد غذایی بستگی دارد و به عمق غذا نفوذ می کند. از روش مایکروویو برای خشک کردن، بلانچ کردن و پاستوریزاسیون مواد غذایی و محصولات کشاورزی استفاده می شود (۵ و ۶). شارما و پراساد (۲۰۰۶) برای خشک کردن سیر از مایکروویو آزمایشگاهی استفاده کرد. آنها تأیید کردند که خشک کردن حبه های سیر در مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک شدن در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم می شود و ویژگی های کیفی محصول خشک شده با روش مایکروویو نیز بالاتر است (۷). آزاد بخت و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو سبب افزایش مقدار فنل کل و ترکیبات فلاونوئیدی در هویج خشک شده می شود (۸). کریمی و همکاران (۲۰۲۱) اثر روش ترکیبی امواج مایکروویو - هوای گرم تحت پیش تیمار مایکروویو بر سینتیک خشک کردن میوه مورد (*Myrtus communis* L) را مطالعه کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش توان ترکیبی امواج مایکروویو در یک دمای مشخص و همچنین افزایش دمای هوای گرم در یک توان ترکیبی مشخص، باعث کاهش چشمگیر زمان و افزایش قابل توجه سرعت خشک کردن می شود. همچنین با افزایش توان ترکیبی امواج مایکروویو در یک دمای مشخص، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت میوه

مورد افزایش و انرژی فعال‌سازی کاهش یافته است (۹).

فرآیند آبیگری یا خشک‌کردن یکی از روش‌های نگهداری مواد غذایی می‌باشد که با حذف رطوبت از طریق انتقال همزمان حرارت و جرم صورت می‌گیرد. استفاده از تابش فروسرخ یکی از روش‌های نوین خشک‌کردن محصولات کشاورزی است که باعث افزایش سرعت خشک‌کردن، حفظ کیفیت محصول نهایی و کاهش هزینه‌های فرآیند تولید به دلیل کاهش مصرف انرژی می‌شود (۱۰). پژوهشگران برای خشک‌کردن محصولات مختلفی شامل خرما (۱۱)، سیب (۱۲)، کدو حلوایی (۱۳)، سیب‌زمینی (۱۴)، شلتوک (۱۵) و غیره از خشک‌کن فروسرخ استفاده کرده‌اند.

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش‌تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (۱۶). نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب کمترین آسیب به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود (۱۷). بررسی منابع منتشرشده نیز نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی اثر زمان اعمال مایکروویو بر سینتیک خشک‌شدن عدس جوانه‌زده با تابش فروسرخ و هوای داغ انجام نشده است. لذا در این پژوهش اثر امواج مایکروویو و روش‌های خشک‌کردن شامل هوای داغ و فروسرخ بر سینتیک افت رطوبت، زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبیگری مجدد جوانه عدس بررسی و مدل‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

تهیه عدس جوانه‌زده: برای تهیه عدس جوانه‌زده، ابتدا عدس بسته‌بندی شده از شرکت سحر (سبدچین، همدان، ایران) تهیه و با دقت تمیز و ضایعات آنها جدا گردید. سپس دانه‌ها شسته و در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خیس‌انده شدند. در ادامه، 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 (هر ۶ ساعت آب نمونه‌ها تعویض می‌شد).

اعمال تیمار مایکروویو: بعد از تکمیل فرآیند جوانه‌زنی دانه‌های عدس، جوانه‌ها به مدت ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ثانیه توسط دستگاه مایکروویو خانگی (داتیس، مدل DTM-928، ایران) تیماردهی شدند.

فرآیند خشک‌کردن با هوای داغ: جوانه‌های تیمار شده با مایکروویو، به صورت لایه‌نازک داخل آون فن‌دار (فن‌آزما گستر، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک‌شدن تا دستیابی به وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتال (لوترون^۱، تایوان) با دقت ± 0.01 گرم، ثبت گردید.

فرآیند خشک‌کردن با فروسرخ: جوانه‌های تیمار شده با مایکروویو جهت خشک‌شدن با پرتو فروسرخ (با توان ۲۵۰ وات) به صورت لایه‌نازکی داخل دستگاه قرار داده شدند. برای پرتودهی از لامپ فروسرخ ۲۵۰ وات ساخت شرکت نور (ایران) استفاده گردید. فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک‌شدن توسط ترازوی دیجیتال با دقت ± 0.01 گرم که در زیر

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

خشک کردن و با استفاده از معادله ۳ محاسبه می شود (۲۰).

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (3)$$

در این معادله، r متوسط شعاع عدس جوانه زده (m)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2s^{-1})، n اعداد صحیح مثبت و Slope شیب خط می باشد.

مدل سازی سینتیکی: معادلات لایه نازک به منظور درک بهتر پدیده انتقال جرم و با هدف طراحی و بهبود تجهیزات خشک کردن محصولات کشاورزی ارائه می شوند (۱۵). در این مطالعه، به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن عدس جوانه زده، با کمک داده های تجربی و با استفاده از مدل های تجربی مختلف خشک کردن، مدل سازی سینتیکی انجام گردید. معادله های ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، برای مدل سازی فرآیند خشک کردن جوانه ها و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (۱۲). به منظور مدل کردن داده های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت های مدل ها نیز از نرم افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

آبگیری مجدد جوانه های خشک شده: برای محاسبه پارامتر آبگیری مجدد عدس جوانه زده، جوانه های خشک شده توزین و درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه ور شدند. نمونه ها بعد از گذشت ۳۰ دقیقه از آب خارج شده و توزین شدند. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۴ محاسبه و گزارش شد.

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

در این معادله M وزن نمونه بعد از باز جذب آب و M_0 وزن نمونه خشک می باشد.

خشک کن قرار گرفته بود تا زمان رسیدن به ثبات وزن، ثبت گردید.

محاسبه پارامتر نسبت رطوبت: کاهش محتوای رطوبت جوانه ها، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک کردن رسم و تأثیر تیمارهای مختلف خشک کردن بر آن مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر نسبت رطوبت^۱ (MR) از طریق معادله ۱، محاسبه گردید (۱۸).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

در این معادله، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبت بر مبنای خشک در هر زمان t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 محتوای رطوبت اولیه بر مبنای خشک و M_e محتوای رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) است. برای زمان های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می باشد؛ بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت معادله ۲ ساده نمود و برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه گیری رطوبت تعادلی نمی باشد (۱۹).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت: برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۲ عدس جوانه زده هنگام خشک شدن توسط هوای داغ و فروسرخ، 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 داده های تجربی در مقابل زمان

1. Moisture ratio (MR)
2. Effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff})
3. Spherical coordinate
4. Fick's second law of diffusion

خشک شدن و افزایش کیفیت محصولات خشک شده می شود. نتایج حاصل از تجزیه واریانس زمان اعمال مایکروویو و نوع خشک کن (هوای داغ و فرسرخ) بر زمان خشک شدن عدس جوانه زده در جدول ۱ گزارش شده است. همان گونه که در این جدول مشاهده می شود اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال مایکروویو و نوع خشک کن در سطح ۱ درصد معنی دار شده است ($p < 0/01$). همچنین اثرات متقابل آن ها نیز در سطح ۱ درصد معنی دار شده است ($p < 0/01$).

آنالیز آماری

این پژوهش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمون های خشک کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵٪ استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی زمان خشک شدن: استفاده از روش های جدید مانند مایکروویو و فرسرخ باعث کاهش زمان

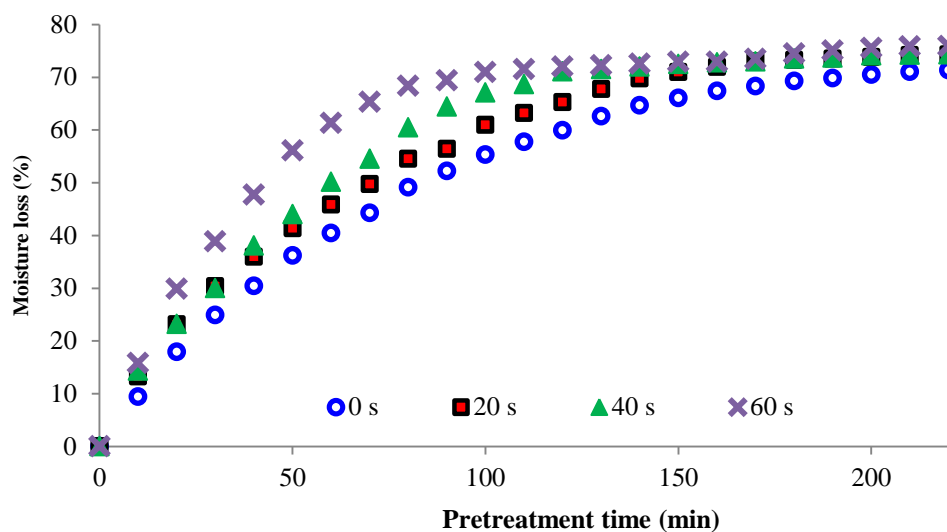
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس برای پارامتر زمان خشک شدن جوانه های عدس

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

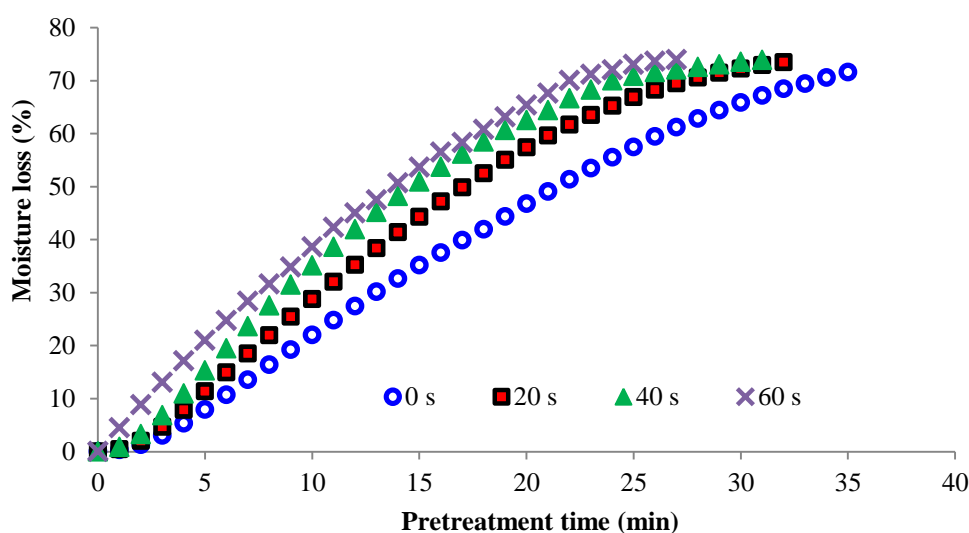
Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer	1	65626	65626	0.000
Time	3	5046	1682	0.000
Dryer × Time	3	3157	1052	0.001
Error	16	1825	114	
Total	23	75654		

زمان خشک شدن نمونه ها در خشک کن فرسرخ کوتاه تر بود. متوسط زمان خشک شدن نمونه ها در خشک کن هوای داغ ۱۳۰/۸ دقیقه و در خشک کن فرسرخ ۲۶/۳ دقیقه بود. کریمی و همکاران (۲۰۲۱) بیشترین زمان خشک کردن میوه مورد در توان ترکیبی مایکروویو- هوای گرم ۱۸۰ وات و دمای ۶۰ درجه سلسیوس را برابر ۴۶ دقیقه و کمترین زمان خشک کردن آن که مربوط به توان ترکیبی ۴۵۰ وات و دمای ۸۰ درجه سلسیوس بود، برابر ۱۹ دقیقه گزارش کردند.

شکل های ۱ و ۲ به ترتیب افت رطوبت عدس جوانه زده تیمار شده با مایکروویو طی خشک شدن در خشک کن های هوای داغ و فرسرخ را نشان می دهند. همان طور که در این شکل ها دیده می شود، تیماردهی عدس جوانه زده با امواج مایکروویو باعث تسریع در خروج رطوبت و در نتیجه افزایش سرعت خشک شدن نمونه ها شده است. با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن جوانه های عدس در خشک کن های هوای داغ و فرسرخ به ترتیب از ۱۷۳/۳ دقیقه به ۱۰۶/۷ دقیقه و ۳۱/۳ دقیقه به ۲۳/۳ دقیقه کاهش یافت. همچنین،



شکل ۱- افت رطوبت جوانه‌های عدس طی خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ.
Figure 1- Moisture loss of sprouted lentils during drying in the hot-air dryer



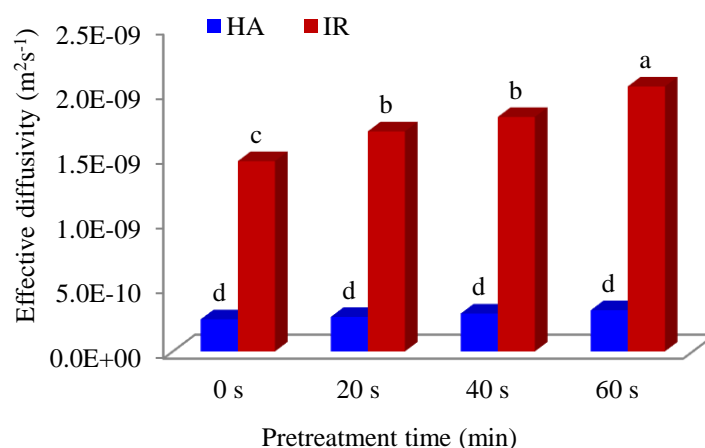
شکل ۲- افت رطوبت جوانه‌های عدس طی خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ.
Figure 2- Moisture loss of sprouted lentils during drying in the infrared dryer.

افزایش یافته است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای عدس جوانه‌زده قرار گرفته در خشک‌کن فرسرخ از $1/47 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ به $1/05 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ افزایش یافت ($p < 0/05$). همچنین با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای عدس جوانه‌زده قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ از $1/0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت: از خشک‌کن‌های مایکروویو جهت خشک کردن محصولات کشاورزی مختلف استفاده می‌شود. در این خشک‌کن‌ها، امواج مایکروویو به عمق مواد غذایی نفوذ می‌کند، بنابراین ابعاد ماده غذایی عامل محدودکننده نیست و کل ماده غذایی به صورت یکنواخت تیمار می‌شود (۵). همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

رطوبت دانه‌های عدس با در نظر گرفتن قانون دوم انتشار فیک در یک جهت در یک کره با شرایط مرزی همرفتی و همچنین مقاومت خارجی ناچیز در برابر انتقال جرم را برابر $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 0.44$ برای هوای داغ (در 50°C درجه سلسیوس) و برابر $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ برای 10×0.63 برای روش ترکیبی گزارش کردند (۲۱). کریمی و همکاران (۲۰۲۱) نیز روش ترکیبی امواج میکروویو- هوای گرم تحت پیش‌تیمار مایکروویو بر سینتیک خشک‌کردن میوه مورد را بررسی کردند. این پژوهشگران بیشترین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را برابر $10^{-8} \times 11.59$ مترمربع بر ثانیه گزارش کردند (۹).

10×0.49 به $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 3.19$ افزایش یافت. از نظر آماری اختلاف معناداری بین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت نمونه‌های خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ مشاهده نشد ($p > 0.05$). متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت محاسبه‌شده برای نمونه‌های قرار گرفته در خشک‌کن هوای داغ برابر $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 2.82$ و برای خشک‌کن فرورسرخ برابر $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 1.76$ بود. همراستا با نتایج این پژوهش، طاهری و همکاران (۲۰۲۰) سینتیک خشک شدن دانه‌های عدس قرمز توسط خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-بستر سیال را مطالعه کردند. این پژوهشگران ضریب نفوذ مؤثر



شکل ۳- اثر پیش‌تیمارهای مختلف مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های عدس

(HA=خشک‌کن هوای داغ؛ IR=خشک‌کن فرورسرخ). حروف مختلف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$).

Figure 3- Effect of different microwave pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of sprouted lentils (HA=Hot-air dryer; IR=Infrared dryer)

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

و لگاریتمی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل می‌بایست دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین (r^2) و حداقل مقادیر خطا باشد. نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها، مدل پیچ است. در جدول ۲ مجموع مربعات خطا^۱ (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و همچنین

انتخاب بهترین مدل سینتیکی: استفاده از مدل‌های لایه‌نازک با تعداد جملات و متغیرهای زیاد یک روند مشخصی را تحت شرایط مختلف آزمایش ارائه نمی‌کنند (۱۵). با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه در طی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌ها (با استفاده از معادله شماره ۲) و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی

1- Sum of squares due to error (SSE)

2- Root mean square error (RMSE)

(برای هوای داغ)، لگاریتمی (برای توان‌های پایین فرسرخ) و دوجمله‌ای (برای توان‌های بالای فرسرخ) بود (۱۱). نصرتی و همکاران (۲۰۱۸) خشک کردن شلتوک در یک خشک‌کن آزمایشگاهی هوای گرم-فرسرخ بستر ارتعاشی را مدل‌سازی کردند. در این مطالعه با بررسی مدل‌های ارائه شده و ارتباط بین جملات و ضرایب آنها دو مدل تک متغیره پیچ و ورما به منظور پیش‌بینی فرآیند خشک شدن شلتوک ارائه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد ثابت هر دو مدل یک روند قابل پیش‌بینی را تحت شرایط مختلف آزمایش نشان می‌دهند (۱۵).

ضرایب ثابت مدل پیچ (n و k) ارائه شده است. لذا استفاده از مدل پیچ برای بررسی فرآیند خشک کردن عدس جوانه‌زده تیمار شده با مایکروویو توصیه می‌شود. همراستا با نتایج این پژوهش، طاهری و همکاران (۲۰۲۰) نیز استفاده از مدل پیچ برای بررسی سینتیک خشک شدن دانه‌های عدس قرمز توسط خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-بستر سیال را توصیه کردند (۲۱). موسوی‌بایگی و همکاران (۲۰۱۵) خشک کردن لایه‌نازک خرما لوبه دو روش هوای داغ و فرسرخ را مدل‌سازی کردند. طبق نتایج گزارش شده توسط این پژوهشگران، بهترین معادلات جهت برازش داده‌های خشک کردن خرما لوبه دو مدل‌های ونگ و سینگ

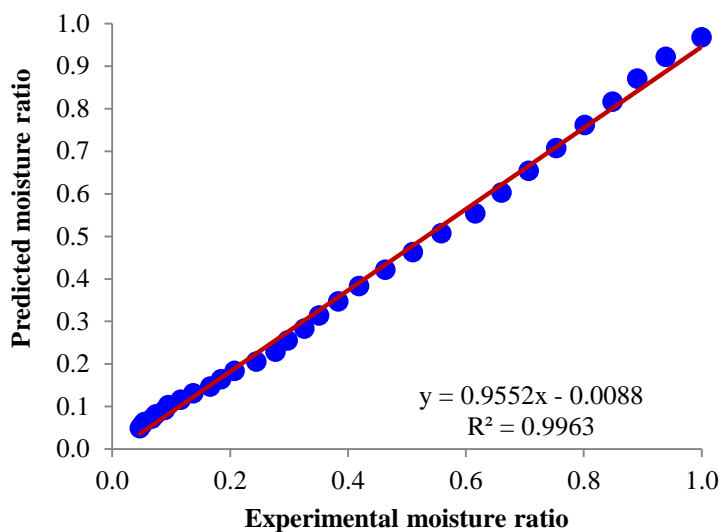
جدول ۲- ثابت‌ها و ضرایب مدل تأییدشده (پیچ)

Table 2- The constants and coefficients of the approved model (Page)

Dryer type	Pretreatment time (s)	k	n	SSE	r	RMSE
Hot-air dryer	0	0.0128	1.0126	0.0018	0.9995	0.0092
	20	0.0292	0.9006	0.0058	0.9981	0.0165
	40	0.0163	1.0407	0.0073	0.9979	0.0185
	60	0.0213	1.0211	0.0055	0.9983	0.0155
Infrared dryer	0	0.0136	1.5123	0.0023	0.9996	0.0080
	20	0.0158	1.5227	0.0029	0.9993	0.0096
	40	0.0201	1.4727	0.0015	0.9997	0.0072
	60	0.0277	1.4020	0.0068	0.9987	0.0147

دیگر از مزایای این روش این است که در هنگام استفاده از مایکروویو بر شرایط فرآیند مانند دما و اثرات آن روی محصول کنترل وجود دارد (۲۲). نتایج حاصل از تجزیه واریانس زمان اعمال مایکروویو و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرسرخ) بر آبگیری مجدد عدس جوانه‌زده خشک‌شده در جدول ۳ گزارش شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که اثر متغیرهای مستقل زمان اعمال مایکروویو و نوع خشک‌کن در سطح ۱ درصد بر تغییر آبگیری مجدد معنی‌دار شده است ($p < 0.01$)؛ اما اثرات متقابل آنها در سطح ۵٪ نیز معنی‌دار نشده است ($p > 0.05$).

رطوبت تجربی به دست آمده (زمان پیش تیمار مایکروویو برابر ۵ دقیقه و در خشک‌کن فرسرخ) در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد؛ بنابراین، مدل پیچ پیشنهادی برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های جوانه عدس تیمار شده با مایکروویو مناسب می‌باشد. آبگیری مجدد: کاهش زمان برای انجام آزمون، افزایش سرعت و کمترین میزان تخریب در نمونه از مزیت‌های اصلی مایکروویو می‌باشند. همچنین یکی



شکل ۴- مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیچ با نتایج آزمایشگاهی نسبت رطوبت (زمان پیش تیمار=۶۰ ثانیه و در خشک‌کن فرسرخ).

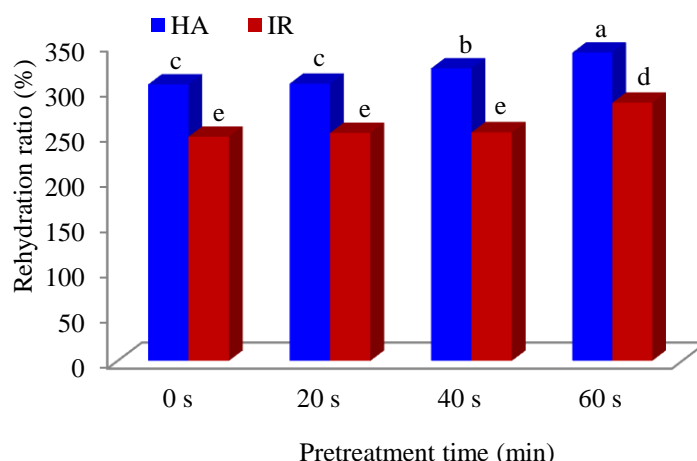
Figure 4- Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio (Pretreatment time=60 s and at infrared dryer).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس برای آبگیری مجدد جوانه‌های عدس خشک‌شده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ.

Sources of changes	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	P
Dryer	1	21328.9	21328.9	0.000
Time	3	4983.3	1661.1	0.000
Dryer × Time	3	256.2	85.4	0.332
Error	16	1111.7	69.5	
Total	23	27680.0		

از نظر پارامتر آبگیری مجدد اختلاف معناداری مشاهده شد ($p < 0.05$). میانگین آبگیری مجدد عدس جوانه‌زده خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر از خشک‌کن فرسرخ بود (به ترتیب برابر ۳۱۸/۹۸ درصد و ۲۵۹/۳۶ درصد). همراستا با نتایج این پژوهش، دهقانی‌خیاوی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که بیشترین میزان بازجذب آب برای سیب‌زمینی خشک‌شده به روش‌های مختلف، مربوط به نمونه‌های تهیه شده توسط خشک‌کن هوای داغ- مایکروویو بوده است. همچنین، بیشترین میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت مربوط به روش‌های ترکیبی هوای داغ- مایکروویو و هوای داغ- مایکروویو- فرسرخ بوده است (۱۴).

در شکل ۵ اثر زمان اعمال مایکروویو و نوع خشک‌کن (هوای داغ و فرسرخ) بر آبگیری مجدد عدس جوانه‌زده گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال مایکروویو، آبگیری مجدد نمونه‌ها، افزایش یافته است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، میانگین آبگیری مجدد جوانه‌ها در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ به ترتیب از ۳۰۵/۵۴ به ۳۴۰/۸۱ درصد و از ۲۴۷/۳۳ به ۲۸۵/۲۹ درصد افزایش یافت. از نظر پارامتر آبگیری مجدد بین نمونه شاهد و جوانه‌های تیمار شده با مایکروویو به مدت ۶۰ ثانیه اختلاف معناداری مشاهده شد ($p < 0.05$). همچنین از نظر آماری بین جوانه‌های خشک‌شده توسط خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ



شکل ۵- اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر آبیگری مجدد جوانه‌های عدس خشک شده (HA=خشک‌کن هوای داغ؛ IR=خشک‌کن فرسرخ).

حروف مختلف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$)

Figure 5- Effect of microwave-treatment time on the rehydration of dried sprouted lentils (HA=Hot-air dryer; IR=Infrared dryer).

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

در خشک‌کن فرسرخ بیشتر از خشک‌کن هوا داغ بود؛ لذا جوانه‌های قرار گرفته در خشک‌کن فرسرخ زودتر خشک می‌شدند. مدل پیچ انطباق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت و برای مدل‌سازی داده‌های نسبت رطوبت مناسب بود. زمان اعمال امواج مایکروویو و روش خشک‌کردن تأثیر معنی‌داری بر آبیگری مجدد نمونه‌ها داشتند. اعمال پیش‌تیمار مایکروویو باعث افزایش درصد آبیگری مجدد جوانه‌زده خشک‌شده گردید. همچنین آبیگری مجدد عدس جوانه‌زده خشک‌شده در خشک‌کن هوای داغ بیشتر از خشک‌کن فرسرخ بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر سیپتیک خشک‌شدن عدس جوانه‌زده در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ مورد مطالعه قرار گرفت. اعمال پیش‌تیمار مایکروویو باعث افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن نمونه‌ها شد. متوسط زمان خشک شدن نمونه‌ها در خشک‌کن هوای داغ ۱۳۰/۸ دقیقه و در خشک‌کن فرسرخ ۲۶/۳ دقیقه بود. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۶۰ ثانیه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای عدس جوانه‌زده قرار گرفته در خشک‌کن‌های هوای داغ و فرسرخ افزایش یافت. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای جوانه‌های قرار گرفته

References

1. Bhatti, R.S. 1988. Composition and quality of lentil (*Lens culinaris* Medik): A review, Canadian Institute of Food Science and Technology Journal. 21: 144-160.
2. El-Adawy, T.A., Rahma, E.H., El-Bedawey, A.A., El-Beltagy, A.E. 2003. Nutritional potential and functional properties of germinated mung bean, pea and lentil seeds, Plant Foods for Human Nutrition. 58: 1-13.

3. Karimi, A.S., Saremnezhad, S. 2020. The effect of germination process on some functional properties of Iranian lentil cultivars, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 17: 167-176.
4. Asgari, I., Rahmani, K., Taslimi, A. 2006. Evaluation of physical and chemical properties supplementary food prepared from germinated wheat and lentil, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 3: 33-39.
5. Salehi, F. 2020 *Food industry machines and equipment*, Bu-Ali Sina University Press, Hamedan, Iran.
6. Wray, D., Ramaswamy, H.S. 2015. Novel concepts in microwave drying of foods, *Drying Technology*. 33: 769-783.
7. Sharma, G.P., Prasad, S. 2006. Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves, *Journal of Food Engineering*. 75: 441-446.
8. 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: 35-56.
9. Karimi, S., Mohammadi, S., Layeghiniya, N., Abbasi, H. 2021. Effect of combined microwave-hot air under microwave pretreatment on drying kinetics of Myrtus fruit, *Journal of Food Processing and Preservation*. 13: 125-138.
10. Salehi, F. 2020. Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review, *International Journal of Fruit Science*. 20: 586-602.
11. Mosavi Baygi, S.F., Farahmand, A., Taghi Zadeh, M., Zia Foroghi, A. 2015. Modeling on hot air and infrared thin layers drying of persimmon slices, *Food science and technology*. 13: 161-171.
12. 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: 519-527.
13. Hosseini Ghaboos, S.H., Production of pumpkin powder with vacuum-infrared system and its use in the formulation of sponge cake, in: *Food science and technology*, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, 2016, pp. 122.
14. Dehghani Khiavi, H., Khakbaz Heshmati, M., Dehghannya, J., Baghban, H. 2020. Drying of potato using hybrid method (microwave-infrared-convective hot air) and study on quality attributes of dehydrated products., *Journal of Food Research*. 30: 143-161.
15. Nosrati, M., Zare, D., Nasiri, M., Jafari, A., Eghtesad, M. 2018. Modeling and optimization of rough rice drying under hot air-infrared radiation in a laboratory scale vibratory bed dryer, *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 49: 423-435.
16. Sahin, M., Doymaz, İ. 2017. Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying, *Heat and Mass Transfer*. 53: 507-517.
17. 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: 47-55.
18. Esmaili Adabi, M., Mosavi Seyedi, S.R., Kalantari, D., Ghavami Adl, B. 2015. Mathematical modelling, kinetics and energy consumption for drying aloe vera gel in hot air dryer with exhaust air recycle, *Journal of food science and technology(Iran)*. 13: 73-83.
19. Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices, *Journal of Food Engineering*. 79: 243-248.
20. Rafiee, S., Keyhani, A., Jafari, A. 2008. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying, *International Journal of Food Properties*. 11: 223-232.
21. Taheri, S., Brodie, G., Gupta, D. 2020. Microwave fluidised bed drying of red lentil seeds: Drying kinetics and reduction of botrytis grey mold pathogen, *Food and Bioproducts Processing*. 119: 390-401.

22. Wang, J., Xiong, Y.-S., Yu, Y. 2004. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato, European Food Research and Technology. 219: 500-506.