

# Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system to estimate mass transfer during convective drying of microwave-treated quinoa sprouts

Sepideh Vejdaniwahid<sup>1</sup>, Fakhreddin Salehi<sup>2\*</sup>

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

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

(Received: 20 February 2025, Revised: 27 February 2025, Accepted: 3 March 2025)

**Introduction:** Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is an advanced method for modeling and studying mass and heat transfer kinetics during food processing. Sprouting is an effective way to enhance the nutritional value of quinoa seeds, and quinoa sprouts are a rich source of protein, essential amino acids, vitamins, phenolic compounds, and antioxidants. Convection drying is the most widely used method for preserving agricultural crops and food materials, helping to extend their shelf life. Recently, extensive research has been focused on the use of microwave pretreatment to improve mass transfer rates and reduce processing time during the convective drying of agricultural products. Modeling the drying process serves as a valuable tool for process optimization and dryer design. The aim of this study was to employ kinetic models and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) method to predict mass transfer during the convective drying of microwave-treated quinoa sprouts.

**Materials and methods:** To prepare quinoa sprouts, quinoa seeds were soaked for 1 hour and then left at 25°C for 72 hours to sprout. This study investigated the effects of microwave treatment time on the moisture loss rate, effective moisture diffusivity coefficient, and rehydration of quinoa sprouts. The mass transfer rate was modeled using both kinetic models and the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). For the pretreatment, quinoa sprouts were placed in a microwave device for 0, 30, 60, and 90 seconds. After microwave treatment, the sprouts were dried in a thin layer in a hot air dryer at 70°C until a constant weight was reached. To model the effect of microwave treatment time on the moisture removal rate from quinoa sprouts, the ANFIS toolbox in MATLAB software was used.

---

\* correspondence author: F.Salehi@Basu.ac.ir

**Results and discussion:** The results of this study indicate that microwave pretreatment for 30 seconds enhances the moisture removal rate, increases the effective moisture diffusivity coefficient, and reduces the drying time of fresh quinoa sprouts. After microwave pretreatment for 30 seconds, the effective moisture diffusivity coefficient significantly increased from  $5.73 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  to  $10.49 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  ( $p < 0.05$ ). Based on the findings from the analysis of various kinetic models, the logarithmic kinetic model is recommended for studying the drying process of microwave-pretreated quinoa sprouts. With microwave pretreatment of quinoa sprouts for 30 seconds, the rehydration of dried sprouts significantly increased from 196.27% to 253.86% ( $p < 0.05$ ). The overall structure of the ANFIS network in this study included two inputs (microwave pretreatment time and heating time), 20 input membership functions, 10 rules in the middle layer, 10 output membership functions, and one output response (moisture loss of quinoa sprouts). The Gaussian membership function was found to be suitable for modeling the data in this study, and good results were achieved using this function. The results from the ANFIS modeling method demonstrated that, by employing the optimal ANFIS structure, the moisture loss percentage of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying can be predicted with high accuracy.

**Conclusion:** Increasing the microwave treatment time to 60 and 90 seconds reduces the mass transfer rate, lowers the effective moisture diffusivity coefficient, and prolongs the drying time for fresh quinoa sprouts, while also reducing the rehydration capacity of dried quinoa sprouts. In general, the optimal condition for drying fresh quinoa sprouts is a 30-second microwave pretreatment followed by hot air drying. The ANFIS modeling method effectively predicts the moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during hot air drying with low error and a coefficient of determination ( $R^2$ ) of approximately 0.99.

**Keywords:** ANFIS, Gaussian membership function, Hot-air dryer, Logarithmic model, Modeling, Rehydration.

**How to cite this article:** Vejdaniwahid. S., Salehi. F. (2025). Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system to estimate mass transfer during convective drying of microwave-treated quinoa sprouts, *Innov. Food Technol.*, 356-372., <https://doi.org/10.22104/IFT.2025.7407.2202>

## مقاله پژوهشی

# استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی برای تخمین انتقال جرم هنگام خشک کردن همرفتی جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو

سپیده وجدانی وحید<sup>۱</sup>، فخرالدین صالحی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۲. دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳)

## چکیده

سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی (انفیس) یک روش جدید برای مدل‌سازی و مطالعه سینتیک انتقال جرم و حرارت هنگام فراوری مواد غذایی است. در این پژوهش اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر سرعت افت رطوبت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد جوانه‌های کینوا هنگام خشک‌شدن بررسی و سرعت انتقال جرم با استفاده از مدل‌های سینتیکی و انفیس مدل‌سازی شد. برای اعمال پیش‌تیمار، جوانه‌های کینوا به مدت ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند؛ سپس با خشک‌کن هوای داغ خشک شدند. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث افزایش سرعت خروج رطوبت، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و کاهش زمان خشک‌کردن جوانه‌های تازه کینوا می‌گردد. با پیش‌تیمار جوانه‌های کینوا توسط مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت معنی‌داری از  $10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  به  $5/73 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  افزایش یافت ( $p < 0/05$ ). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بخش بررسی مدل‌های سینتیک مختلف، استفاده از مدل سینتیکی لگاریتمی برای بررسی فرآیند خشک‌کردن جوانه‌های کینوا توصیه می‌شود. با پیش‌تیمار جوانه‌ها توسط مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه مشاهده شد که آبگیری مجدد جوانه‌های خشک‌شده به صورت معنی‌داری از ۱۹۶/۲۷ درصد به ۲۵۳/۸۶ درصد افزایش یافت ( $p < 0/05$ ). ساختار کلی شبکه انفیس در این مطالعه شامل دو ورودی (زمان پیش‌تیمار مایکروویو و زمان حرارت‌دهی)، ۲۰ تابع عضویت ورودی، ۱۰ قانون در لایه میانی، ۱۰ تابع عضویت خروجی و یک پاسخ خروجی (افت رطوبت جوانه‌های کینوا) بود. نتایج انفیس نشان داد با استفاده از ساختار بهینه انفیس می‌توان درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. در مجموع، شرایط مناسب برای خشک‌کردن جوانه‌های تازه کینوا، ۳۰ ثانیه پیش‌تیمار با مایکروویو؛ سپس استفاده از خشک‌کن همرفتی بود. روش مدل‌سازی انفیس توانست افت رطوبت جوانه‌های کینوا را با خطای پایین و ضریب تبیین حدود ۰/۹۹ پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: آبگیری مجدد، انفیس، تابع عضویت گاوسی، خشک‌کن هوای داغ، مدل لگاریتمی، مدل‌سازی.

## ۱. مقدمه

دانه‌ها برای تهیه انواع سوپ، غلات صبحانه، کوکی، نان، بیسکویت، نودل، تورتیلا<sup>۲</sup> (نوعی نان گرد، نازک و مسطح)، کیک و پنکیک نیز استفاده می‌شود. برگ‌های کینوا مشابه اسفناج خوراکی است و جوانه‌های آن نیز به سالادهای مختلف اضافه و یا برای تهیه سالادهای مخصوصی استفاده می‌شوند [۲]. همچنین، کل گیاه کینوا به‌عنوان یک منبع غذایی غنی برای تغذیه دام، از جمله گاو، خوک و طیور استفاده می‌شود [۳].

جوانه‌زنی، روشی ساده برای افزایش ارزش غذایی دانه‌های کینوا است. این جوانه‌ها، منبع غنی از پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، ویتامین‌ها، آنتوسیانین‌ها، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها هستند [۵-۸]. تأثیر فرایند جوانه‌زدن بر تغییرات کمی و کیفی اسیدهای آمینه و کیفیت پروتئین کینوا زرد و قرمز توسط برکت و همکاران (۲۰۲۴) بررسی شد. نتایج نشان داد که فرایند جوانه‌زنی منجر به افزایش ۷/۴۳ درصد (در کینوای زرد) تا ۱۴/۳۶ درصد (در کینوای قرمز) در کل اسیدهای آمینه می‌شود. اسیدهای آمینه غیرضروری و ضروری، از جمله لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تیروزین به‌صورت معنی‌داری افزایش یافتند. مقدار اسیدهای آمینه غیرضروری نیز به مقادیر استاندارد موجود در تخم‌مرغ رسید [۷]. لن و همکاران (۲۰۲۴) اثرات دوره‌های مختلف جوانه‌زنی (۰ تا ۷۲ ساعت) بر خواص مورفولوژیکی، پروفایل اسید آمینه، ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای پلی‌فنل و ترکیبات فرار کینوا را ارزیابی کردند. فرایند جوانه‌زنی به مدت ۳۶ تا ۷۲ ساعت به‌طور معنی‌داری محتوای فیبر، اسیدهای آمینه، پلی‌فنل‌ها و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی را در کینوا افزایش داد [۸].

خشک کردن یک عملیات واحد برای حذف آب از یک محصول و در نتیجه کاهش فعالیت آبی آن است. از سایر مزایای خشک کردن می‌توان به مهار رشد میکروارگانیسم‌ها و کاهش واکنش‌های فساد توسط کاهش فعالیت آب و همچنین کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی،

کینوا (*Chenopodium quinoa willd.*) هزاران سال است که در آمریکای جنوبی کشت می‌شود. این گیاه محصول اصلی غذایی در برخی کشورها از جمله بولیوی و پرو است، اما اخیراً علاقه به این محصول در سایر مناطق جهان مانند ایالات متحده، اروپا و آسیا افزایش یافته است. کینوا گیاهی یک‌ساله و پهن‌برگ به ارتفاع ۱ تا ۲ متر با ریشه‌های عمیق از تیره تاج‌خروس<sup>۱</sup> و مقاوم به تنش (یخبندان، شوری و خشکی) است که در ۷۰۰۰ سال گذشته در امتداد رشته‌کوه‌های آند کشت شده و در شرایط محیطی بسیار متفاوتی را از بولیوی تا ارتفاع ۴۵۰۰ متری تا سطح دریا در شیلی رشد می‌کند. کینوا به دلایل گیاه‌شناسی و همچنین به دلیل ترکیبات غیرمعمول و تعادل استثنایی بین پروتئین و روغن، جزء شبه غلات طبقه‌بندی می‌شود [۱-۳].

دانه‌های کینوا ارزش غذایی بالاتری نسبت به سایر غلات دارند و یک‌شبه غله مناسب برای مصرف و تغذیه انسان هستند. ارزش غذایی این دانه‌ها به درصد بالای پروتئین (حاوی تمام اسیدهای آمینه ضروری مانند لیزین و متیونین)، اسیدهای چرب غیراشباع و فیبر مربوط می‌شود. پروتئین آن فاقد گلوتن بوده و برای افراد مبتلا به بیماری سلپاک، مناسب است [۴، ۵]. علاوه بر این، دانه‌های کینوا دارای مواد معدنی، ویتامین‌ها، اسیدهای چرب، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها هستند که می‌توانند کمک زیادی به بهبود تغذیه انسان، افزایش سلامتی به‌ویژه برای محافظت از غشای سلولی و بهبود عملکردهای عصبی مغز، داشته باشند. مواد معدنی دانه‌های کینوا به‌عنوان کوفاکتور در آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی عمل می‌کنند و ارزش بیشتری به پروتئین‌های غنی آن می‌دهد. کینوا همچنین حاوی هورمون‌های گیاهی یا فیتوهورمون‌ها<sup>۳</sup> است که یک مزیت نسبت به سایر غذاهای گیاهی برای تغذیه انسان محسوب می‌شود [۱، ۶]. محصولات غذایی متعددی از کینوا تهیه می‌شود. در برخی از کشورها، دانه‌های کینوا مشابه برنج، پخته‌شده مصرف می‌شود. از این

<sup>۱</sup> Amaranthaceae<sup>۲</sup> Phytohormones<sup>۳</sup> Tortilla

بر زمان خشک‌شدن، سرعت جوانه‌زنی و بنیه گیاهچه را بررسی کردند. سرعت جوانه‌زنی بذر کینوا به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر خشک‌کردن میکروویو قرار گرفت و درصد جوانه‌زنی کمتر از ۲۵ درصد گزارش شده است. برای افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر کینوا، پس از فرایند خشک‌کردن، لازم است از توان کمتر از ۱/۷۵ وات بر گرم استفاده شود [۱۶].

اثرات حرارت‌دادن با میکروویو، بخارپزکردن، جوشاندن و پخت بر ساختار و ویژگی‌های عملکردی ایزوله پروتئین کینوا توسط ونگ و همکاران (۲۰۲۱) بررسی شد. حرارت‌دادن با میکروویو و جوشاندن اثرات منفی برای ماریچ الف و اثرات مثبت برای ورق بتا نشان داد، که به این معنی است که ساختار مولکولی از مرتب به نامرتب تبدیل و ساختار ثانویه سست شد. عملیات حرارتی به‌طور قابل توجهی بر ساختار و ویژگی‌های عملکردی ایزوله پروتئین کینوا تأثیر گذاشت و نتایج این پژوهش نشان داد که حرارت‌دهی با میکروویو و جوشاندن ممکن است روش‌های عملیات حرارتی بهتری برای تولید این ایزوله باشد و به توسعه محصولات حاوی پروتئین کینوا کمک کنند [۱۷].

مدل‌سازی و شبیه‌سازی ابزار مناسبی برای مقابله با پیچیدگی فرایندهای خشک‌کردن محصولات کشاورزی است. همچنین امکان دستیابی به شرایط عملیاتی مناسب را از طریق بهینه‌سازی فراهم می‌کند [۱۱]. استفاده از مدل‌های ریاضی، هم نظری و هم تجربی، برای تخمین فرایندهای خشک‌کردن رایج است. منظور از مدل‌سازی ریاضی در فرایند خشک‌کردن، استفاده از معادلات ریاضی برای پیش‌بینی سینتیک تغییرات هم‌زمان با عملیات حرارت‌دهی است [۱۳]. استفاده از مدل‌های ریاضی برای مدل‌سازی روش‌های مختلف فراوری مواد غذایی از جمله خشک‌کردن دارای محدودیت‌هایی است. محدودیت‌های احتمالی شامل تحلیل ناقص انتقال هم‌زمان حرارت و جرم، وجود مفروضات نظری متعدّد، حساسیت شرایط مدل ریاضی، خطاهای آزمایشی و تغییرات اساسی در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد غذایی در طول فرایند خشک‌کردن است [۱۸]. در نتیجه، محققان روش‌های جایگزینی را برای تخمین سینتیک خشک‌کردن بررسی کرده‌اند که می‌تواند بر

به دلیل کاهش وزن و حجم محصول، اشاره کرد [۹، ۱۰]. خشک‌کردن همرفتی فرایند حذف آب با هوا از طریق انتقال هم‌زمان گرما و جرم است. گرمای مورد نیاز توسط جریان هوای گرم به غذا منتقل می‌شود. انرژی از طریق جابه‌جایی به سطح محصول منتقل؛ سپس بسته به ساختار محصول از طریق انتشار یا همرفت به داخل محصول منتقل می‌شود. این شار حرارتی، افزایش دمای محصول و تبخیر آب را در پی دارد [۱۱]. زلوتک و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر دمای خشک‌کردن (۳۰°C تا ۶۰°C) بر ترکیب اسیدهای فنولیک و فعالیت آنتی‌اکسیدانی جوانه و برگ کینوا سفید و قرمز را بررسی کردند. همه جوانه‌ها حاوی مقادیر قابل توجهی از ترکیبات فنلی بودند. ترکیبات فنلی جوانه‌های کینوای سفید در محدوده دمایی مورد مطالعه پایداری حرارتی داشتند، در حالی که محتوای فنل کل جوانه‌های کینوای قرمز پس از خشک‌شدن در دمای ۶۰°C به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. جوانه‌های خشک‌شده در دمای ۳۰°C توانایی بالاتری در از بین بردن رادیکال‌های هیدروکسیل داشتند [۶].

خشک‌کردن با هوای گرم دارای معایبی است از جمله: طولانی‌بودن زمان خشک‌کردن، کاهش کیفیت حسی، کاهش ارزش غذایی در محصول نهایی و سخت‌شدن سطحی است [۱۲]؛ لذا استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف قبل از خشک‌کردن مواد غذایی توسط هوای گرم باعث تسریع فرایند خشک‌کردن، کاهش مصرف انرژی و تولید محصولی با کیفیت‌تر می‌شود. امروزه پژوهش‌های زیادی در زمینه استفاده از پیش‌تیمار میکروویو برای بهبود سرعت انتقال جرم و کاهش زمان فرایند هنگام خشک‌کردن همرفتی محصولات کشاورزی، انجام شده است [۱۳، ۱۴]. عقیلی‌ناطق و دالوند (۲۰۲۳) بازده میکروویو هنگام خشک‌کردن برگ‌های سیب را مطالعه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار انرژی جذب‌شده توسط سیب در طول فرایند خشک‌کردن در میکروویو، به‌شدت به مقدار جرم بستگی دارد. بیشترین و کمترین بازده میکروویو به ترتیب در توان ۶۰۰ وات و جرم ۱۰۰ گرم و کمترین بازده در زمان ۱۸۰ ثانیه و توان ۱۰۰ گزارش شده است [۱۵]. هرناندز ماکودا و همکاران (۲۰۱۸) اثر خشک‌کردن دانه‌های کینوا با میکروویو

بررسی مقالات منتشرشده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای درخصوص بررسی اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم و خروج رطوبت از جوانه‌های تازه کینوا هنگام خشک کردن توسط هوای داغ انجام نشده است؛ لذا در این پژوهش به دلیل مزایایی که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو دارد، اثر پیش‌تیمار مایکروویو بر سرعت افت رطوبت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آگیری مجدد کینوا جوانه‌زده بررسی شد. همچنین سرعت انتقال جرم هنگام خشک شدن جوانه‌های کینوا با استفاده از مدل‌های سینتیکی و روش انفیس مدل‌سازی شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. تهیه جوانه‌های کینوا

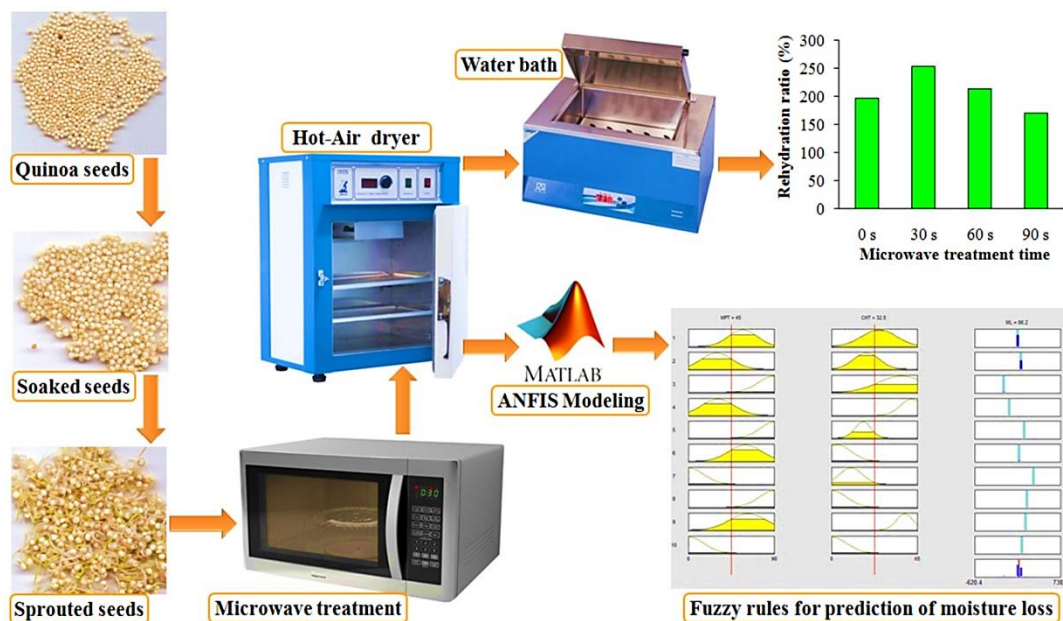
در این پژوهش، بذر کینوای سفید، برداشت‌شده از مزارع کشور پرو و بسته‌بندی شده در ایران (ا.آ.ب، ایران)، تهیه شد. بذرها به مدت ۱ ساعت در آب شهری با دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس، خیسانده شدند. سپس با انتقال به ظرفی مسطح، با حوله‌ای نازک پوشانده شدند. رطوبت بذرها نیز با آب‌پاشی متناوب آن‌ها در هر ۶ ساعت فراهم شد. در مجموع، بذرها کینوا به مدت ۷۲ ساعت در دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس جهت جوانه‌زنی قرار گرفتند. جوانه‌های تهیه‌شده در این مرحله، ابتدا توسط دستگاه مایکروویو تیماردهی شدند؛ سپس توسط خشک‌کن هوای داغ، خشک شدند (شکل ۱).

این محدودیت‌ها غلبه کند. یکی از این روش‌ها، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی<sup>۱</sup>، مانند شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> و سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی (انفیس)<sup>۳</sup> است که در پیش‌بینی رفتار خشک کردن در مواد غذایی مختلف و شرایط خشک کردن متفاوت، نتایج دقیق و خوبی را ارائه کرده‌اند. این روش‌ها مزیتی دارند که می‌توانند روابط پیچیده بین متغیرهای ورودی و سینتیک خشک کردن را بدون تکیه بر فرضیات خاص یا مدل‌های ریاضی، پیدا کنند [۱۹، ۲۰]. مفتون آزاد و همکاران (۲۰۲۳) از شبکه عصبی مصنوعی و روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی پارامترهای انتقال جرم هنگام خشک کردن اسمزی میوه‌های انجیر در محلول سه‌تایی آب، ساکارز و کلرید سدیم در غلظت‌های مختلف محلول، دما و مدت زمان‌های مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی که به‌درستی آموزش داده شده است، در مقایسه با مدل روش سطح پاسخ پیش‌بینی دقیق‌تری را انجام می‌دهد [۲۱]. در پژوهش عقیلی‌ناطق و دالوند (۲۰۲۳)، از سه روش مختلف هوش مصنوعی برای مدل‌سازی انرژی جذب شده و اتلاف انرژی سیب همراه با پیش‌بینی بازده مایکروویو در طول فرایند خشک کردن استفاده شد. این روش‌ها عبارت بودند از: شبکه عصبی مصنوعی، انفیس و ماشین بردار پشتیبان همراه با الگوریتم کرم شبتاب. در مجموع، روش انفیس و ماشین بردار پشتیبان، نتایج خوبی نسبت به شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی انرژی جذب‌شده، اتلاف انرژی و بازده مایکروویو از خود نشان دادند [۱۵].

<sup>۱</sup>.Artificial intelligence techniques

<sup>۲</sup>.Artificial Neural Network (ANN)

<sup>۳</sup>.Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)



شکل (۱) مراحل تیماردهی با مایکروویو و خشک‌کردن جوانه‌های کینوا و مدل‌سازی فرایند به روش انفیس

Fig 1. Microwave-treatment and drying steps of quinoa sprouts, and process modeling using the ANFIS method

به یک وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتالی (کیا<sup>۱</sup>، SL1000، ایران) با دقت  $\pm 0.1\%$  گرم، ثبت شد.

#### ۴.۲ محاسبه پارامتر نسبت رطوبت

کاهش مقدار رطوبت جوانه‌های کینوا، بر مبنای خشک در برابر زمان خشک‌شدن رسم و تأثیر زمان تیماردهی با مایکروویو بر سرعت انتقال جرم بررسی شد. پارامتر نسبت رطوبت<sup>۲</sup> (MR) از طریق رابطه ۱، محاسبه شد [۲۲، ۲۳].

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (1)$$

در این رابطه، MR: نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  مقدار رطوبت جوانه‌های کینوا بر مبنای خشک در هر زمان  $t$  و  $M_o$  مقدار رطوبت اولیه جوانه‌های کینوا بر مبنای خشک هستند.

#### ۲.۲ اعمال پیش تیمار مایکروویو

جوانه‌های کینوا به مدت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه به وسیله دستگاه مایکروویو با توان ۴۴۰ وات (جی پلاس، GMW-440، ایران) تیماردهی شدند. انتخاب توان ۴۴۰ وات براساس بررسی مقالات منتشرشده و آزمون و خطا بود. توان‌های کمتر تأثیر زیادی بر جوانه‌ها نداشتند و توان‌های بیشتر باعث آسیب به بافت دانه می‌شدند.

#### ۳.۲ خشک‌کردن همرفتی

جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو، به صورت لایه‌نازک داخل دستگاه آون دارای دمنده (شیماز، ایران) با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و خشک شدند. تغییرات وزن جوانه‌های کینوا هنگام خشک‌شدن، هر ۵ دقیقه، تا رسیدن

<sup>۱</sup>.Kia Laboratory Weighing, model SL1000

<sup>۲</sup>.Moisture ratio (MR)

۳۰ دقیقه از آب خارج و توزین گردیدند. نسبت باز جذب آب توسط رابطه ۳ محاسبه و میانگین آنها گزارش شد.

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه،  $M$  وزن جوانه‌های کینوا بعد از باز جذب آب و  $M_0$  وزن جوانه‌های کینوا خشک است.

## ۸.۲. آنالیز آماری

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

## ۹.۲. مدل‌سازی به روش سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی

برای مدل‌سازی اثر زمان تیماردهی با مایکروویو و زمان خشک کردن همرفتی، بر سرعت انتقال جرم (افت رطوبت) جوانه‌های کینوا از جعبه‌ابزار انفیس نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد. برای یافتن بهترین ساختار شبکه، تعداد توابع عضویت، انواع توابع عضویت، روش‌های بهینه‌سازی و همچنین تعداد تکرارها بررسی شد. انواع مختلفی از توابع عضویت مانند مثلثی، دوزنقه‌ای، زنگی‌شکل، گوسی و سیگموئیدی برای ایجاد بهترین ساختار شبکه فازی بررسی شدند. در نهایت، از روش هیبرید (ترکیب حداقل مربعات و پس انتشار)، استنتاج فازی سوگنو و خوشه‌بندی کاهشی برای ایجاد ساختار انفیس استفاده شد. ساختار انفیس با دامنه تأثیر<sup>۴</sup> برابر ۰/۵، فاکتور اسکواش<sup>۵</sup> برابر ۱/۲۵، نسبت پذیرش<sup>۶</sup> برابر ۰/۵ و نسبت رد شدن<sup>۷</sup> برابر ۰/۱۵

## ۵.۲. محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت<sup>۱</sup> جوانه‌های کینوا هنگام خشک شدن همرفتی، ابتدا مختصات نمونه کروی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد؛ سپس از قانون دوم انتشار فیک<sup>۳</sup> استفاده شد. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک شدن و با کمک رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۲۴].

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

در این رابطه،  $r$  میانگین شعاع جوانه‌های کینوا ( $m$ )،  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ( $m^2 s^{-1}$ )، و  $Slope$  شیب خط است.

## ۶.۲. مدل‌سازی سینتیکی

در این مطالعه، برای بررسی سرعت انتقال جرم و پیش‌بینی روند خشک شدن جوانه‌های کینوا، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های سینتیکی مختلف، مدل‌سازی ریاضی انجام شد. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی، برای مدل‌سازی فرایند خشک کردن جوانه‌های کینوا و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند [۲۵]. برای مدل‌سازی داده‌های آزمایشگاهی و محاسبه ثابت‌های مدل‌ها از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

## ۷.۲. آنگیری مجدد جوانه‌های کینوا

برای تخمین پارامتر آنگیری مجدد جوانه‌های کینوا خشک شده، ابتدا جوانه‌های خشک توزین و درون آب با دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شدند. نمونه‌ها بعد از گذشت

<sup>۱</sup>. Effective moisture diffusivity coefficient ( $D_{eff}$ )

<sup>۲</sup>. Spherical coordinate

<sup>۳</sup>. Fick's second law of diffusion

<sup>۴</sup>. Range of influence

<sup>۵</sup>. Squash factor

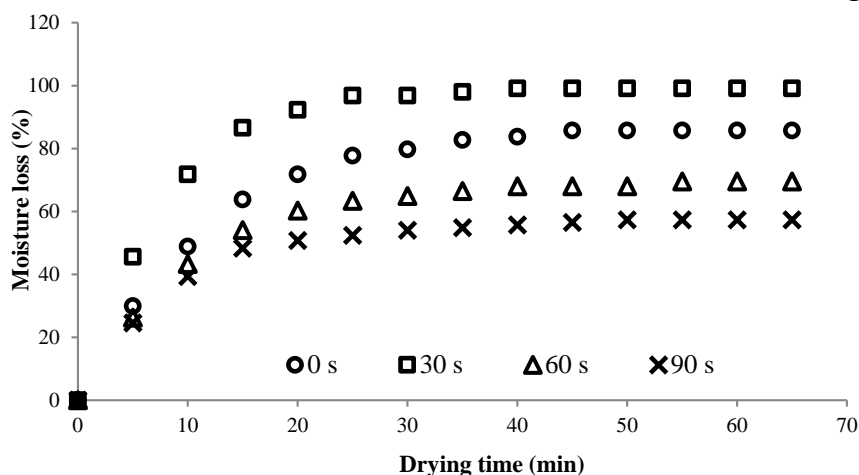
<sup>۶</sup>. Accept ratio

<sup>۷</sup>. Reject ratio



افزایش سرعت انتقال جرم و خروج رطوبت شده است که این موضوع باعث کوتاه‌تر شدن زمان خشک‌شدن جوانه‌های کینوا می‌شود. با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو به مدت ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه، سرعت انتقال جرم کاهش و در نتیجه زمان خروج رطوبت از نمونه کاهش یافته است که می‌تواند باعث طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن جوانه‌های کینوا شود. این موضوع می‌تواند به دلیل تخریب بافت و از بین رفتن منافذ خروج رطوبت از جوانه‌ها، با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو باشد.

شکل ۲ نشان می‌دهد که با تیماردهی جوانه‌های کینوا با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه می‌توان زمان خشک‌کردن آنها را کوتاه‌تر کرد و در نتیجه هزینه‌های فرایند را کاهش داد.



شکل (۲) افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

Fig 2. Moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying

افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه کوتاه‌تر شدن زمان خشک‌شدن جوانه‌های کینوا می‌شود. با پیش‌تیمار جوانه‌های کینوا توسط مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت معنی‌داری از  $5/73 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  به  $10/49 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت ( $p < 0/05$ ).

با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو به مدت ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه، شاهد کاهش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه افزایش

آموزش دید. ۳۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد نیز برای آزمون شبکه آموزش دیده استفاده شد. برای ارزیابی شبکه هم از ۵۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها استفاده شد. حد خطا که برای ایجاد یک معیار توقف آموزش استفاده می‌شود، روی صفر تنظیم و تعداد سیکل‌های یادگیری هم ۱۰۰۰ بود [۲۶].

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱. اثر تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم

خشک‌کردن همرفتی کاربردی‌ترین روش خشک‌کردن برای تثبیت محصولات کشاورزی و مواد غذایی و افزایش ماندگاری آنها است [۱۱]. شکل ۲ افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تیماردهی جوانه‌های کینوا با امواج مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث

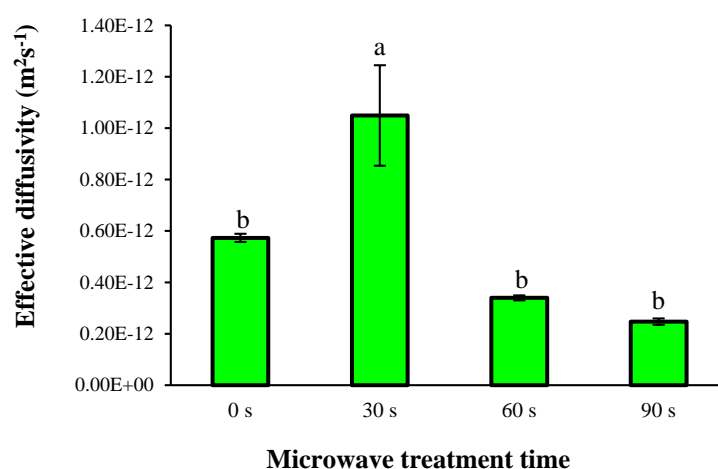
#### ۳.۲. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

افزایش راندمان و کاهش زمان فراوری و مصرف انرژی در خشک‌کردن ضروری است. صرفه‌جویی در زمان و انرژی از مزایای تیماردهی و استفاده از روش مایکروویو است [۱۵]. شکل ۳ ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تیماردهی جوانه‌های کینوا با امواج مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث

شکل ۳ نشان می‌دهد که با پیش‌تیمار جوانه‌های کینوا با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه می‌توان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را افزایش و زمان خشک کردن محصول را کوتاه کرد.

هرناندز ماکودا و همکاران (۲۰۱۸) خشک کردن دانه‌های کینوا با مایکروویو را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که بذر کینوا به توان حرارت‌دهی با مایکروویو حساس است و هنگام خشک کردن دمای فرایند باید به‌دقت کنترل شود [۱۶].

مدت‌زمان خشک‌شدن جوانه‌های کینوا بودیم. این موضوع با تخریب بافت و از بین رفتن منافذ خروج رطوبت از جوانه‌های کینوا، در پی افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو، مرتبط باشد. از نظر آماری بین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار نشده و تیمار شده با مایکروویو به مدت ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه، اختلاف معناداری مشاهده نشد ( $p > 0.05$ ).



شکل (۳) ضریب نفوذ مؤثر رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

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

Fig 3. Effective moisture diffusivity coefficient of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying

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

خطا بود. نتایج مدل‌سازی سینتیکی نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش در مورد فرایند خشک‌کردن جوانه‌های کینوا پیش‌تیمار شده با مایکروویو، مدل لگاریتمی است. در جدول ۱ مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup> (SSE)، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و همچنین ضرایب مدل لگاریتمی ارائه شده است؛ لذا استفاده از مدل لگاریتمی برای بررسی فرایند خشک‌کردن جوانه‌های کینوا پیش‌تیمار شده با مایکروویو توصیه می‌شود.

### ۳.۳. انتخاب بهترین مدل سینتیکی

با محاسبه مقدار نسبت رطوبت با استفاده از رابطه ۱ برای تمامی داده‌های به‌دست‌آمده طی خشک‌کردن جوانه‌های کینوا پیش‌تیمار شده با مایکروویو و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به‌وسیله مدل‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی و درجه دوم، نتایج برای هر مدل بررسی شد. بهترین مدل دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین ( $r^2$ ) و کمترین مقدار

<sup>۱</sup>.Sum of squares due to error (SSE)

<sup>۲</sup>.Root means square error (RMSE)

جدول (۱) ضرایب و خطاهای مدل لگاریتمی برای برازش داده‌های آزمایشگاهی

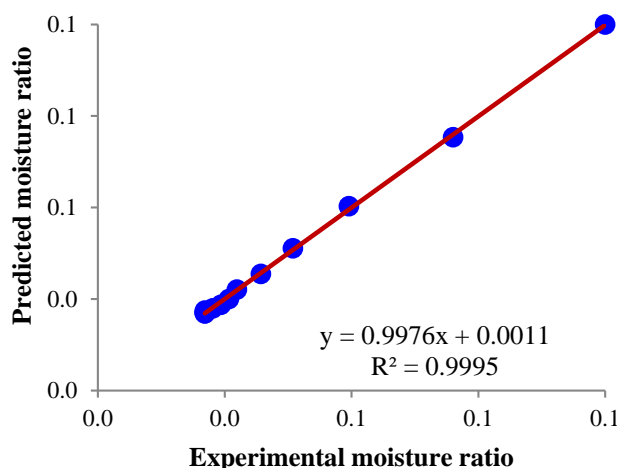
Table 1. Coefficients and errors of the Logarithmic model for fitting experimental data

Microwave treatment time	a	k	c	SSE <sup>1</sup>	r <sup>2</sup>	RMSE <sup>3</sup>
0	0/8552	0/0948	0/1496	0/0006	0/9996	0/0074
30 s	0/9471	0/1149	0/0548	0/0009	0/9995	0/0090
60 s	0/6920	0/0909	0/3043	0/0011	0/9990	0/0094
90 s	0/5931	0/1026	0/4051	0/0009	0/9988	0/0084

1- SSE: Sum of squares due to error; 2- r: Coefficient of determination; 3- RMSE: Root means square error

آب، رنگ، شاخص نوری و اسیدهای چرب فرار پوره سیر بررسی شد. با افزایش دمای خشک کردن (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و توان مایکروویو (۱۸۰، ۳۶۰ و ۵۴۰ وات)، زمان خشک شدن از ۸/۵ ساعت به ۴ دقیقه کاهش یافت. به منظور تعیین پارامترهای سینتیکی، داده‌های آزمایشگاهی خشک کردن با مدل‌های نیمه تجربی مختلف و معادله قانون دوم انتشار فیک برازش شدند. در میان آنها، مدل پیچ تناسب بهتری برای خشک کردن با مایکروویو ارائه داد، درحالی که مدل لگاریتمی برای خشک کردن با هوای گرم مناسب‌تر بود [۱۲].

برای بررسی توانایی مدل لگاریتمی، مقادیر تغییرات نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل لگاریتمی و مقادیر نسبت رطوبت آزمایشگاهی به دست آمده در شکل ۴ در کنار یکدیگر قرار داده شدند. همان طوری مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نسبت رطوبت آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل لگاریتمی وجود دارد؛ بنابراین مدل لگاریتمی برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت جوانه‌های کینوا پیش‌تیمار شده با مایکروویو مناسب است. در پژوهشی توسط ایلتر و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر خشک کردن با هوای گرم و مایکروویو بر سینتیک خشک کردن و برخی ویژگی‌های کیفی مانند فعالیت



شکل (۴) مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل لگاریتمی با نتایج آزمایشگاهی نسبت رطوبت

Fig 4. Comparison of fitted data by Logarithmic model with experimental results of moisture ratio

شکل درمی‌یابیم که تیماردهی جوانه‌های تازه کینوا با امواج مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث افزایش آگیری مجدد آنها بعد از فرایند خشک شدن شده است. با پیش‌تیمار جوانه‌های کینوا توسط مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه مشاهده شد که آگیری مجدد

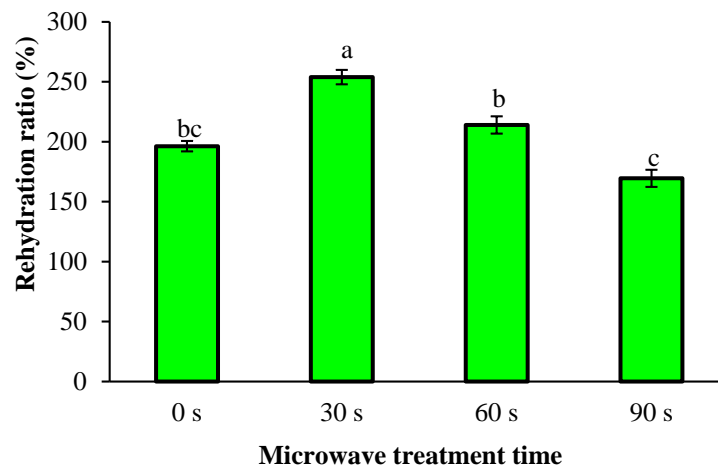
### ۴.۳. آگیری مجدد

شکل ۵ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر آگیری مجدد جوانه‌های کینوا خشک شده را نشان می‌دهد. با توجه به این

آب مجدد توسط جوانه‌های خشک، با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو باشد. کمترین مقدار آبیگری مجدد جوانه‌های کینوا خشک مربوط به نمونه پیش تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود که اختلاف معناداری با نمونه‌های تیمارشده به مدت ۳۰ و ۶۰ ثانیه داشت ( $p < 0.05$ ).

جوانه‌های کینوا خشک شده به صورت معنی داری از ۱۹۶/۲۷ درصد به ۲۵۳/۸۶ درصد افزایش یافت ( $p < 0.05$ ).

با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو به مدت ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه، آبیگری مجدد جوانه‌های کینوا خشک کاهش یافت. این موضوع می‌تواند به دلیل تخریب بافت و کاهش ظرفیت جذب



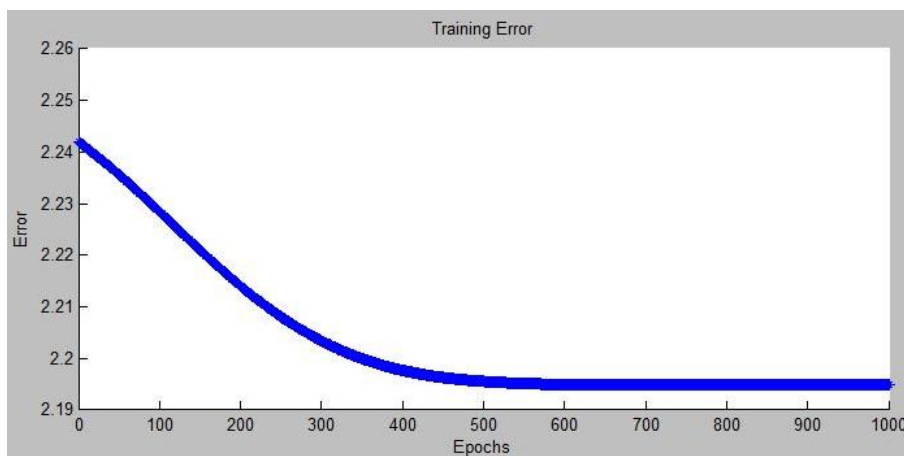
شکل (۵) اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر آبیگری مجدد جوانه‌های کینوا خشک شده  
حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ( $p < 0.05$ )

Fig 5. Effect of microwave-treatment time on the rehydration of dried quinoa sprouts  
Different letters above the columns indicate significant difference ( $p < 0.05$ )

جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک شدن همرفتی در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که این نمودار نشان می‌دهد، بعد از حدود ۴۵۰ سیکل‌های یادگیری، انفیس قوانین و فرایند آموزش خود را کامل کرده و توانسته است رابطه بین متغیرهای ورودی و پاسخ مورد نظر را با حداقل خطا پیدا کند.

### ۳.۵. نتایج مدل‌سازی به روش سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی

در این پژوهش برای آموزش ساختار انفیس، از روش هیبرید که ترکیب روش‌های حداقل مربعات خطا و پس انتشار است استفاده شد. مقادیر خطا به عنوان تابعی از سیکل‌های یادگیری در طول آموزش انفیس برای پیش‌بینی افت رطوبت

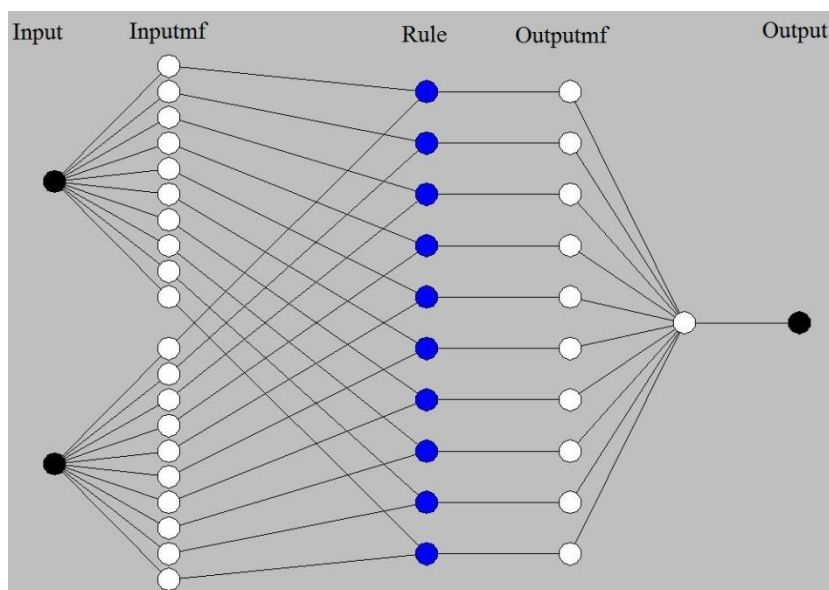


شکل (۶) مقادیر خطا به‌عنوان تابعی از تعداد سیکل‌های یادگیری در طول آموزش انفیس برای پیش‌بینی افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

Fig 6. Error values as a function of the learning cycles during training of ANFIS for prediction of the moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying

(زمان پیش‌تیمار مایکروویو و زمان حرارت‌دهی)، ۲۰ تابع عضویت ورودی، ۱۰ قانون در لایه میانی، ۱۰ تابع خروجی و یک پاسخ خروجی (افت رطوبت جوانه‌های کینوا) بود. با استفاده از این ساختار بهینه می‌توان درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی را با دقت بالایی پیش‌بینی کرد.

شکل ۷ ساختار بهینه مدل انفیس برای پیش‌بینی درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی را ترسیم کرده است. این شکل نشان می‌دهد که شبکه انفیس از پنج لایه تشکیل شده که به ترتیب ورودی‌ها، توابع عضویت مربوط به ورودی‌ها، قوانین، توابع عضویت مربوط به خروجی و خروجی را شامل می‌شود [۲۷]. ساختار کلی شبکه انفیس در این مطالعه شامل دو ورودی

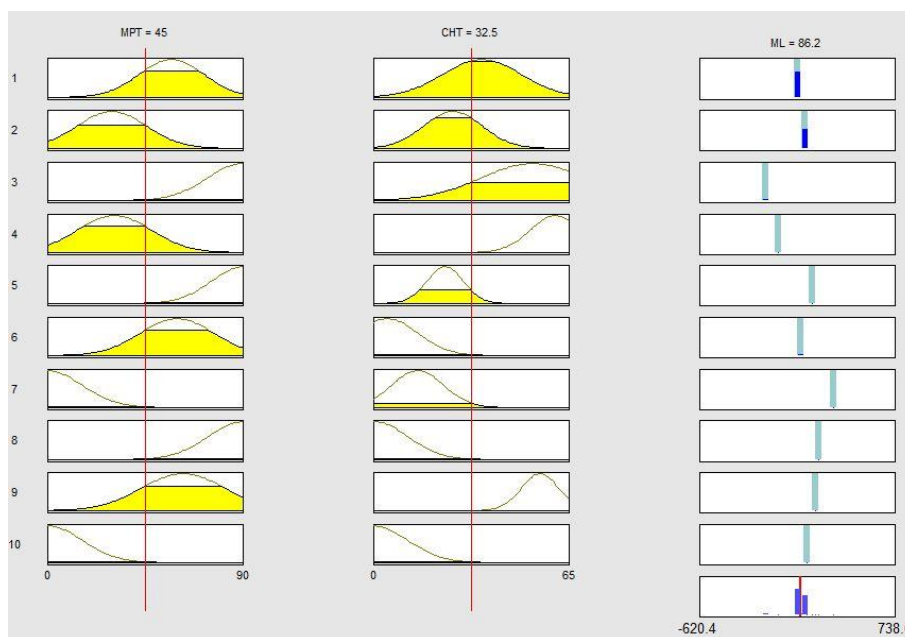


شکل (۷) ساختار مدل انفیس برای پیش‌بینی افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمار شده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

Fig 7. The ANFIS model structure for prediction of the moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying

شایان ذکر است که در پژوهش حاضر نوع تابع عضویت استفاده شده توسط نرم‌افزار متلب برای هر دو متغیر ورودی، تابع گاوسی<sup>۱</sup> بود. تابع عضویت گاوسی برای مدل‌سازی داده‌های این پژوهش مناسب بود و نتایج خیلی خوبی هم هنگام استفاده از این تابع به دست آمد. در شکل ۹ نیز قوانین فازی برای پیش‌بینی درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی گزارش شده است.

انفیس برای ایجاد قوانین فازی از پارامترهای خطی و غیرخطی استفاده می‌کند، که با تغییر تعداد توابع عضویت این پارامترها نیز تغییر می‌کنند. در شکل ۸ قوانین مدل انفیس و فرایند فازی برای پیش‌بینی درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی نشان داده شده است. در این شکل نوع و شکل توابع عضویت ایجادشده و تعداد قوانین نمایش داده شده است.



شکل (۸) نمایش گرافیکی قوانین فازی برای پیش‌بینی افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

Fig 8. Graphical representation of fuzzy rules for prediction of the moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying: Microwave pretreatment time (MPT), convection heating time (CHT), and moisture loss (ML)

1. If (MPT is in1cluster1) and (CHT is in2cluster1) then (ML is out1cluster1) (1)
2. If (MPT is in1cluster2) and (CHT is in2cluster2) then (ML is out1cluster2) (1)
3. If (MPT is in1cluster3) and (CHT is in2cluster3) then (ML is out1cluster3) (1)
4. If (MPT is in1cluster4) and (CHT is in2cluster4) then (ML is out1cluster4) (1)
5. If (MPT is in1cluster5) and (CHT is in2cluster5) then (ML is out1cluster5) (1)
6. If (MPT is in1cluster6) and (CHT is in2cluster6) then (ML is out1cluster6) (1)
7. If (MPT is in1cluster7) and (CHT is in2cluster7) then (ML is out1cluster7) (1)
8. If (MPT is in1cluster8) and (CHT is in2cluster8) then (ML is out1cluster8) (1)
9. If (MPT is in1cluster9) and (CHT is in2cluster9) then (ML is out1cluster9) (1)
10. If (MPT is in1cluster10) and (CHT is in2cluster10) then (ML is out1cluster10)

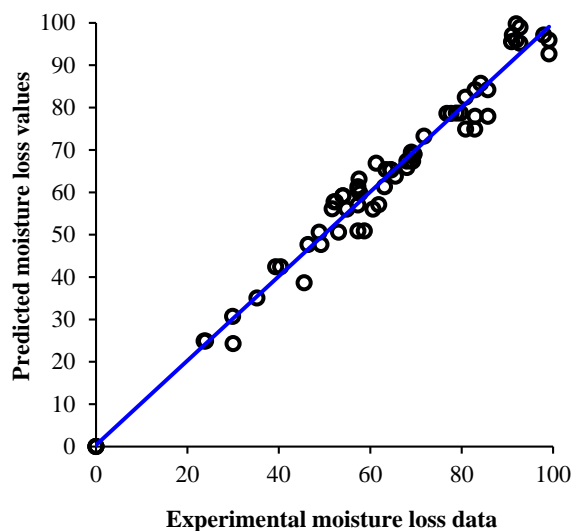
شکل (۹) قوانین فازی برای پیش‌بینی افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک‌شدن همرفتی

<sup>۱</sup>Gaussian function

**Fig 9.** Fuzzy rules for prediction of the moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying: Microwave pretreatment time (MPT), convection heating time (CHT), and moisture loss (ML)

تیمار شده با میکروویو هنگام خشک شدن همرفتی است. آبیویه و همکاران (۲۰۲۴) برای مدل سازی برخی ویژگی های کیفی برش های گوجه فرنگی خشک شده با هوای گرم همرفتی از روش های شبکه عصبی مصنوعی و انفیس استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش انفیس نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی کارایی بیشتری دارد و با خطای کمتری پارامترهای فرایند را پیش بینی می کند [۱۹].

در شکل ۱۰ بخش سوم داده های آزمایشگاهی درصد افت رطوبت جوانه های کینوا هنگام خشک شدن (داده های استفاده نشده) در برابر داده های پیش بینی شده توسط ساختار بهینه انفیس قرار گرفته است تا توانایی مدل سازی این شبکه بهتر دیده شود. ضریب تبیین ( $R^2$ ) محاسبه شده برای این دوسری داده برابر ۰/۹۹ است که نشان دهنده توانایی روش انفیس برای پیش بینی درصد افت رطوبت جوانه های کینوا

**شکل (۱۰)** مقادیر پیش بینی شده توسط مدل انفیس در برابر داده های تجربی افت رطوبت جوانه های کینوا تیمار شده با میکروویو هنگام خشک شدن همرفتی**Fig 10.** Predicted values by ANFIS model versus experimental data of moisture loss of microwave-treated quinoa sprouts during convective drying

#### ۴. نتیجه گیری

فرایند و طراحی خشک کن ها است. هدف این پژوهش استفاده از مدل های سینتیکی و روش انفیس برای پیش بینی انتقال جرم هنگام خشک کردن همرفتی جوانه های کینوا تیمار شده با میکروویو در چهار زمان ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه بود. برای تهیه جوانه های کینوا، بذر کینوا به مدت ۱ ساعت خیسانده شد؛ سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس جهت جوانه زنی قرار گرفت. اعمال پیش تیمار میکروویو به مدت ۳۰ ثانیه، باعث افزایش سرعت خروج رطوبت از جوانه های کینوا و در نتیجه کوتاه تر شدن زمان خشک شدن آنها شد. با پیش تیمار جوانه های کینوا توسط میکروویو به مدت ۳۰ ثانیه مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت معنی داری افزایش یافت ( $p < 0/05$ ). افزایش

جوانه زنی یک روش ساده برای افزایش ارزش غذایی دانه های کینوا است و جوانه های کینوا یک منبع غنی از پروتئین، اسیدهای آمینه ضروری، ویتامین ها، ترکیبات فنلی و آنتی اکسیدان ها هستند. خشک کردن یکی از روش های مناسب برای افزایش ماندگاری محصولات کشاورزی و مواد غذایی است. خشک کردن همرفتی، کاربردی ترین روش خشک کردن برای حفظ محصولات کشاورزی و مواد غذایی و افزایش زمان نگهداری آنها است. در حال حاضر پژوهش های زیادی در زمینه استفاده از پیش تیمار میکروویو برای بهبود سرعت انتقال جرم و کاهش زمان فرایند هنگام خشک کردن همرفتی محصولات کشاورزی، انجام شده است. مدل سازی فرایند خشک کردن ابزار مفید در بهینه سازی

تیماردهی جوانه‌های تازه کینوا با امواج مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه توصیه می‌شود. برای تحقیقات آینده نیز بررسی اثرات پیش تیمارهای مختلف، مانند مایکروویو بر ویژگی‌های تغذیه‌ای و حسی جوانه‌های خشک شده پیشنهاد می‌شود.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### تشکر و قدردانی

هزینه‌های انجام این پژوهش از محل پژوهانه به شماره ۱۰۰۴۴۹۸، تأمین شده از سوی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا، پرداخت شده است؛ لذا نویسندگان از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به خاطر حمایت مالی و معنوی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### منابع

- [1] Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E.A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *J. Sci. Food Agric.*, 90, 2541-2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>
- [2] Graf, B.L., Rojas-Silva, P., Rojo, L.E., Delatorre-Herrera, J., Baldeón, M.E., & Raskin, I. (2015). Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 431-445. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12135>
- [3] Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). *Chenopodium quinoa*—An Indian perspective. *Industrial Crops and Products*, 23, 73-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002>
- [4] Nowak, V., Du, J., & Charrondière, U.R. (2016). Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chem.*, 193, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>
- [5] Paško, P., Bartoń, H., Zagrodzki, P., Gorinstein, S., Fořta, M., & Zachwieja, Z. (2009). Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food Chem.*, 115, 994-998. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.037>

زمان تیماردهی با مایکروویو به ۶۰ ثانیه و ۹۰ ثانیه باعث کاهش سرعت انتقال جرم، کاهش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و طولانی‌تر شدن زمان خشک کردن جوانه‌های تازه کینوا و همچنین کاهش آبگیری مجدد جوانه‌های خشک کینوا شد. مدل لگاریتمی مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی خشک شدن جوانه‌های کینوا داشت و برای مدل سازی نتایج نسبت رطوبت، مناسب بود. تیماردهی جوانه‌های تازه کینوا با امواج مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه باعث افزایش آبگیری مجدد آنها بعد از فرایند خشک شدن، شد. برای مدل سازی اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر سرعت خروج رطوبت از جوانه‌های کینوا از جعبه‌ایز انفیسی نرم افزار متلب استفاده شد. تابع عضویت گاوسی برای مدل سازی داده‌های این پژوهش مناسب بود و نتایج خوبی نیز طی استفاده از این تابع به دست آمد. نتایج مدل سازی به روش سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی نشان داد که با استفاده از ساختار بهینه این روش می‌توان درصد افت رطوبت جوانه‌های کینوا تیمارشده با مایکروویو هنگام خشک شدن همرفتی را با دقت بالایی پیش بینی نمود. جهت تولید انبوه جوانه‌های خشک شده کینوا،

- [6] Złotek, U., Gawlik-Dziki, U., Dziki, D., Świeca, M., Nowak, R., & Martinez, E. (2019). Influence of drying temperature on phenolic acids composition and antioxidant activity of sprouts and leaves of white and red quinoa. *Journal of Chemistry*, 2019, 7125169. <https://doi.org/10.1155/2019/7125169>
- [7] Barakat, H., Al-Qabba, M.M., Algonaiman, R., Radhi, K.S., Almutairi, A.S., Al Zhrani, M.M., & Mohamed, A. (2024). Impact of sprouting process on the protein quality of yellow and red quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Molecules*, 29, 404. <https://doi.org/10.3390/molecules29020404>
- [8] Lan, Y., Wang, X., Wang, L., Zhang, W., Song, Y., Zhao, S., Yang, X., & Liu, X. (2024). Change of physiochemical characteristics, nutritional quality, and volatile compounds of *Chenopodium quinoa* Willd. during germination. *Food Chem.*, 445, 138693. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138693>
- [9] Khodadadi, M., & Masoumi, A. (2025). Recent drying technologies used for drying poultry litter (principles, advantages and disadvantages): A comprehensive review. *Poultry Science*, 104, 104677. [In persian] <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104677>
- [10] Khodadadi, M., Masoumi, A., & Sadeghi, M. (2024). Drying, a practical technology for reduction of poultry litter (environmental) pollution: methods and their effects on important parameters. *Poultry Science*, 103, 104277. [Inpersian] <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104277>



- [11] Castro, A.M., Mayorga, E.Y., & Moreno, F.L. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *J. Food Eng.*, 223, 152-167. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>
- [12] İlter, I., Akyıl, S., Devseren, E., Okut, D., Koç, M., & Kaymak Ertekin, F. (2018). Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. *Heat Mass Transfer.*, 54, 2101-2112. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2294-6>
- [13] Salehi, F., Goharpour, K., & Razavi Kamran, H. (2024). Effects of different pretreatment techniques on the color indexes, drying characteristics and rehydration ratio of eggplant slices. *Results Eng.*, 21, 101690. [In persian] <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101690>
- [14] Salehi, F., Inanloodoghuz, M., Ghazvineh, S., & Moradkhani, P. (2024). Effect of microwave treatment on physicochemical characteristics and efficiency of sour cherry drying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20, 339-350. [In persian] <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272>
- [15] Aghili nategh, N., & Dalvand, M.J. (2023). Measurement and prediction of microwave efficiency during drying of apple leaves. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*, 12, 11-21. [In persian] <https://doi.org/10.22034/jrmam.2023.14049.610>
- [16] Hernández Maqueda, R., Ballesteros Redondo, I., Jiménez Jácome, S., & Moreno, Á.H. (2018). Microwave drying of amaranth and quinoa seeds: effects of the power density on the drying time, germination rate and seedling vigour. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 52, 299-311. <https://doi.org/10.1080/08327823.2018.1534052>
- [17] Wang, L., Dong, J.-l., Zhu, Y.-y., Shen, R.-l., Wu, L.-g., & Zhang, K.-y. (2021). Effects of microwave heating, steaming, boiling and baking on the structure and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein isolates. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 56, 709-720. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14706>
- [18] Oke, M., Hussein, J.B., Olaniyani, S.A., & Adeyanju, J.A. (2017). Applications of artificial neural networks and genetic algorithms in drying of fruits and vegetables: A review. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 11, 1-17.
- [19] Abioye, A.O., Hussein, J.B., Olanrewaju Oke, M., & Bolarinwa, I.F. (2024). Modelling some quality attributes of a convective Hot-Air dried tomato slices using ANN and ANFIS techniques. *Measurement: Food*, 13, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100140>
- [20] Salehi, F. (2020). Recent advances in the modeling and predicting quality parameters of fruits and vegetables during postharvest storage: A review. *Int. J. Fruit Sci.*, 20, 506-520. [In persian] <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1653810>
- [21] Maftoonazad, N., Jokar, A., & Zare, M. (2023). Prediction of mass transfer during osmotic dehydration of black fig fruits (*Ficus carica*) in ternary systems: comparison of response surface methodology and artificial neural network. *Innovative Food Technologies*, 11, 61-75. [In persian] <https://doi.org/10.22104/ift.2023.6155.2136>
- [22] Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J. Food Eng.*, 79, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049>
- [23] 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. [In persian]
- [24] Salehi, F. (2023). Effects of ultrasonic pretreatment and drying approaches on the drying kinetics and rehydration of sprouted mung beans. *Legum. sci.*, 5, e211. [In persian] <https://doi.org/10.1002/leg3.211>
- [25] Salehi, F., & Satorabi, M. (2021). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *Int. J. Fruit Sci.*, 21, 519-527. [In persian] <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
- [26] Amini, G., Salehi, F., & Rasouli, M. (2021). Drying kinetics of basil seed mucilage in an infrared dryer: Application of GA-ANN and ANFIS for the prediction of drying time and moisture ratio. *J. Food Process. Preserv.*, 45, e15258. [In persian] <https://doi.org/10.1111/jfpp.15258>
- [27] Shirazi, R., Bakhshabadi, H., & Bazrafshan, M. (2018). Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) application in modeling the oil extraction from peanut with microwave pretreatment. *J. Food Sci. Technol. (Iran)*, 15, 61-72. [In persian]