

Development of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Predict Mass Transfer Kinetics during Osmotic-Ultrasound Dehydration of Apple

Fakhreddin Salehi^{1*}, Rana Cheraghi²

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

² M.Sc student, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: ranaacheraghi18@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2022-08-03
Revised: 2022-09-07
Accepted: 2022-09-23

Keywords:
ANFIS
Apple
Kinetics
Mass transfer
Osmotic dehydration
Ultrasound

ABSTRACT

Background and objectives: Osmotic dehydration is a process of soaking products in an aqueous solution containing salt or sugar, which is normally applied to fruits and vegetables. The osmotic-ultrasound dehydration method can improve the quality of dehydrated products by increasing mass transfer rate and maintaining appearance properties. Although there are many statistical and mathematical methods for predicting mass transfer kinetics in the process of osmotic dehydration of agricultural products, but, the use of intelligent algorithms with desirable features has made significant progress in recent years. The main goal of this research is to predict the weight reduction percentage, solids gain percentage and water loss percentage of apple slices dehydrated by osmosis-ultrasound method using the adaptive neuro-fuzzy inference system or ANFIS.

Materials and methods: The osmotic-ultrasound process was performed using the ultrasonic bath equipment (vCLEAN1-L6, Backer, Iran). The apple slices were immersed in the ultrasonic bath containing sucrose solutions of 30, 40, and 50 °Brix. The applied ultrasound powers were 0, 75, and 150 W, the ultrasound treatment time was 10, 20, 30, 40, 50, and 60 minutes, the device frequency was 40 kHz, and also, the system temperature was 50 °C. The moisture content of apple slices was calculated by oven at 105°C, for 5 hours. The ANFIS model with 3 inputs of ultrasonic power (at three levels of 0, 75, and 150 W), sucrose solution concentration (at three levels of 30, 40, and 50 °Brix), and ultrasound treatment time (at six times of 10, 20, 30, 40, 50, and 60 min) was developed to predict mass transfer kinetics during osmotic-ultrasound dehydration of apple slices.

Results: The results of this research showed that with increasing the ultrasound power, ultrasound treatment time and osmotic solution concentration, the weight reduction percentage of the samples increased, which these changes were due to high moisture removal from the apple slices. The optimal ANFIS network structure includes three inputs (ultrasonic power, ultrasonic treatment time, and osmotic solution concentration), 48 input membership

functions, 16 rules in the middle layer, 16 output membership functions, and an output response (weight reduction percentage, solids gain percentage, or water loss percentage). The coefficient of determination (r) values calculated for predicting weight reduction percentage, solids gain percentage and water loss percentage parameters using the ANFIS-based subtractive clustering algorithm were equal to 0.952, 0.927 and 0.961, respectively.

Conclusion: The ANFIS system accurately estimated the output parameters of osmotic dehydration process of apple well; therefore, it is recommended to use this method in design and development of intelligent control systems for dehydration processes in agricultural products.

Cite this article: Salehi, F., Cheraghi, R. 2022. Development of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Predict Mass Transfer Kinetics during Osmotic-Ultrasound Dehydration of Apple. *Food Processing and Preservation Journal*, 14 (4), 73-90.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.20484.1713

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



توسعه سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی در پیش‌بینی سینتیک انتقال جرم طی آب‌زدایی اسمزی - فراصوت سیب

فخرالدین صالحی^{۱*}، رعنا چراغی^۲

^۱دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: f.salehi@basu.ac.ir
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، رایانامه: ranaaacheraghi18@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱</p> <p>واژه‌های کلیدی: آب‌زدایی اسمزی انتقال جرم انفیس سیب سینتیک فراصوت</p>	<p>سابقه و هدف: آب‌زدایی اسمزی فرآیند خیس‌اندن محصولات در محلول آبی حاوی نمک یا قند است که معمولاً برای میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده می‌شود. روش آب‌زدایی اسمزی-فراصوت می‌تواند کیفیت محصولات آب‌زدایی شده را با افزایش سرعت انتقال جرم و حفظ ویژگی‌های ظاهری بهبود بخشد. با وجود اینکه روش‌های آماری و ریاضی بسیاری برای پیش‌بینی سینتیک انتقال جرم در فرآیند آب‌زدایی اسمزی محصولات کشاورزی وجود دارد، اما استفاده از الگوریتم‌های هوشمند با ویژگی‌های مطلوب در سال‌های اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. هدف اصلی در این تحقیق پیش‌بینی درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب برش‌های سیب آب‌زدایی شده به روش اسمزی-فراصوت با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی یا انفیس است.</p> <p>مواد و روش‌ها: فرآیند اسمزی-فراصوت با استفاده از دستگاه حمام فراصوت (vCLEAN1-L6، بکر، ایران) انجام شد. برش‌های سیب در حمام فراصوت حاوی محلول‌های ساکارز با بریکس ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه غوطه‌ور شدند. توان‌های اعمال شده فراصوت برابر ۰، ۷۵ و ۱۵۰ وات، زمان تیمار فراصوت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه، فرکانس دستگاه ۴۰ کیلوهرتز، و دمای سیستم نیز ۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد. رطوبت برش‌های سیب توسط آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ ساعت محاسبه گردید. مدل انفیس با ۳ ورودی توان فراصوت (در سه سطح ۰، ۷۵ و ۱۵۰ وات)، غلظت محلول ساکارز (در سه سطح ۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه بریکس) و زمان اعمال فراصوت (در شش زمان ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه) برای پیش‌بینی سینتیک انتقال جرم طی آب‌زدایی اسمزی-فراصوت برش‌های سیب، توسعه یافت.</p> <p>یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش توان فراصوت، زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی، درصد کاهش وزن نمونه‌ها افزایش یافت که این تغییرات به دلیل خروج بیشتر رطوبت از برش‌های سیب مشاهده گردید. ساختار شبکه انفیس بهینه شامل سه ورودی</p>

(توان فراصوت، زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی)، ۴۸ تابع عضویت ورودی، ۱۶ قانون در لایه میانی، ۱۶ تابع عضویت خروجی و یک پاسخ خروجی (درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و یا درصد کاهش آب) بود. مقادیر ضریب تبیین (r^2) برای پیش‌بینی پارامترهای درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی کاهش مبتنی بر انفیس نیز به ترتیب برابر با ۰/۹۵۲، ۰/۹۲۷ و ۰/۹۶۱ محاسبه شد.

نتیجه‌گیری: سیستم انفیس به‌درستی پارامترهای خروجی فرآیند آب‌زدایی اسمزی سیب را تخمین زد؛ لذا استفاده از این روش در ساخت و توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل فرآیندهای آب‌زدایی از محصولات کشاورزی توصیه می‌شود.

استناد: صالحی، ف.، چراغی، ر. (۱۴۰۱). توسعه سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی در پیش‌بینی سینتیک انتقال جرم طی آب‌زدایی اسمزی-فراصوت سیب. *فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، ۱۴ (۴)، ۹۰-۷۳.

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.20484.1713



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خشک کردن و آبزدایی میوه‌ها از عملیات واحد معمول در صنعت غذا است. فرآیند آبزدایی اسمزی یک عملیات واحد انرژی بر در نگهداری محصولات کشاورزی (میوه‌ها و سبزی‌ها) محسوب می‌شود که رطوبت اضافی را با استفاده از محلول آبی حاوی نمک یا قند حذف می‌کند و ماندگاری محصول را افزایش می‌دهد (۱، ۲). این فرآیند با کاهش فعالیت آبی، موجب حداقل سازی تغییرات فیزیکی و شیمیایی طی انبارش می‌گردد. از طرفی، تجاری سازی و دسترسی به میوه‌ها و سبزی‌ها به صورت اسنک و به عنوان محصولات آماده مصرف اهمیت زیادی دارد. سیب نیز ماده‌ای فسادپذیر است و اتلاف زیاد این میوه در صورت اشباع بودن فصلی بازار مشاهده می‌شود. خشک کردن و کاهش رطوبت مناسب این محصول به ماندگاری و حفظ خصوصیات کیفی و همچنین کاربرد آن در فرآوری سایر محصولات غذایی کمک می‌کند (۳، ۴). همچنین، فرآیند ترکیبی^۱ روش آبزدایی اسمزی با امواج فراصوت^۲ می‌تواند کیفیت میوه را با افزایش سرعت انتقال جرم و حفظ ویژگی‌های بافتی بهبود بخشد (۵).

فرکانس موج صوتی، همان تعداد انقباض‌ها و انبساط‌ها (تعداد ارتعاشات) در یک ثانیه است. محدوده فرکانسی ۲۰ الی ۲۰۰۰۰ هرتز را صوت، فرکانس‌های پایین‌تر از آن را مادون صوت و بالاتر از آن را فراصوت یا اولتراسوند می‌نامند. عبور موج صوتی از سیالات موجب ارتعاش مولکول‌های آن‌ها، ایجاد انقباض و انبساط در آن‌ها و شکل‌گیری نقاط پرفشار (در فاز انقباض) و کم‌فشار (در فاز انبساط) شده و می‌تواند باعث بروز کاویتاسیون در سیالات شود (۲).

استفاده از فراصوت در تیماردهی بافت‌های گیاهی می‌تواند منجر به بهبود سینتیک انتقال جرم شود. بررسی نتایج مقالات منتشر شده در زمینه استفاده ترکیبی از روش‌های آبزدایی اسمزی و امواج فراصوت حاکی از این است که استفاده ترکیبی از این دو روش به‌عنوان پیش‌تیمار قبل از فرآیند خشک کردن، باعث افزایش کیفیت محصول نهایی خشک‌شده و همچنین باعث افزایش سرعت فرآیند خشک کردن می‌شود (۶-۱۰). صالحی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر توان و زمان اعمال فراصوت بر کارایی فرآیند آبزدایی اسمزی برش‌های موز را بررسی کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، اعمال تیمار فراصوت موجب افزایش مقدار رطوبت خارج‌شده از برش‌های موز شد و در نتیجه کاهش زمان فرآیند آبزدایی را به همراه داشت (۱۰). در پژوهش دیگری، منا و همکاران (۲۰۲۲) بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند آبزدایی اسمزی برش‌های آناناس به کمک فراصوت را مطالعه کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که استفاده از امواج فراصوت در حین آبزدایی اسمزی به دلیل اثر هم‌افزایی^۳ شیب فشار اسمزی و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی ناشی از کاویتاسیون (اثر فراصوت)، باعث افزایش خروج آب و سرعت آبزدایی گردید (۱۱). در پژوهش دیگری، کروهنکه و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر امواج فراصوت بر سینتیک فرآیند آبزدایی اسمزی و خشک کردن کیوی را بررسی کردند. براساس نتایج این مطالعه، استفاده از امواج فراصوت باعث کاهش زمان خشک کردن کیوی شد (۱۲).

سیستم استنتاج تطبیقی فازی-عصبی^۴ (انفیس) به دلیل توانایی عالی و مقدار خطای ناچیز در پیش‌بینی متغیرهای وابسته هنگام فرآوری مواد غذایی، کاربرد

3. Synergistic effect

4. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

1. Hybrid process

2. Ultrasound

بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی رطوبت سیب‌زمینی شیرین با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸ و ۰/۰۲۲۵ نشان داد؛ بنابراین استفاده از آن در توسعه سیستم‌های کنترل مقاوم برای خشک‌کردن صنعتی سیب‌زمینی شیرین با گوشت نارنجی توصیه شده است (۱۹).

روش آب‌زدایی اسمزی- فراصوت می‌تواند کیفیت سیب آب‌زدایی شده را به دلیل افزایش سرعت انتقال جرم و در نتیجه کاهش زمان فرآیند بهبود بخشد (۲۰). در این پژوهش استفاده از روش مدل‌سازی انفیس برای بررسی اثرات تیماردهی با توان‌های مختلف فراصوت، غلظت‌های مختلف محلول اسمزی حاوی ساکارز و شش زمان اعمال فراصوت بر درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب برش‌های سیب تیمار شده توسط فرآیند آب‌زدایی اسمز-فراصوت مطالعه شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی برش‌های سیب: برای انجام این پژوهش سیب تازه واریته گلدن دلشز^{۱۰} از شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی تهیه شد. ابتدا برش‌های سیب با ضخامت ۵ میلی‌متر توسط چاقوی تیز و با دقت برش خوردند. رطوبت برش‌های سیب مطابق روش AOAC (۲۰۱۰) و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس محاسبه شد (۲۱). برش‌های سیب مورد استفاده به‌طور میانگین دارای رطوبت اولیه ۸۵/۷ درصد بر مبنای وزن مرطوب بودند.

فرآیند آب‌زدایی اسمزی: برای تهیه محلول‌های اسمزی از ساکارز استفاده شد. برای اعمال تیمار اسمز-فراصوت روی برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی

زیادی پیدا کرده است. انفیس نوعی شبکه عصبی مصنوعی^۵ (ANN) است که بر اساس سیستم فازی تاکاگی-سوغنو^۶ می‌باشد و این سیستم می‌تواند شبکه‌های عصبی و مفاهیم منطق فازی^۷ (FL) را ترکیب نماید و از خصوصیات هر دو آنها در یک قاب بهره‌مند گردد (۱۳). انفیس، مزایای شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی را به‌گونه‌ای ترکیب می‌کند که قوانین و توابع عضویت سیستم‌های فازی توسط شبکه عصبی مصنوعی تعیین می‌شود. بنابراین انفیس یک ابزار متنوع و مؤثرتر از شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی به‌تنهایی است (۱۴). این روش توسط پژوهشگران برای مدل‌سازی رفتار خشک شدن محصولات مختلفی مانند پاپایا (۱۵)، موز (۱۶)، سیب‌زمینی (۱۷) و برش‌های زردآلو پوشش داده شده (۱۸) استفاده شده است. برای مثال توانایی روش انفیس برای تخمین محتوی رطوبت پاپایا در طول خشک‌کردن با هوای گرم توسط یوسفی (۲۰۱۷) مورد ارزیابی قرار گرفت. یک سیستم انفیس با سه ورودی زمان خشک‌کردن (۰ تا ۳۲۰ دقیقه)، دمای خشک‌کردن (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) و ضخامت برش‌های پاپایا در سه اندازه ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر برای پیش‌بینی نسبت رطوبت^۸ استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل انفیس بهینه بهترین مطابقت را با داده‌های تجربی دارد که برای پیش‌بینی نسبت رطوبت با دقت بالا مناسب بود (۱۵). اوکونکو و همکاران (۲۰۲۲) از روش‌های شبکه عصبی و انفیس برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن سیب‌زمینی شیرین با گوشت نارنجی^۹ توسط هوای گرم استفاده کردند. روش انفیس توانایی مدل‌سازی

5. Artificial neural network (ANN)
6. Takagi-Sugeno
7. Fuzzy logic (FL)
8. Moisture ratio
9. Orange-fleshed sweet potato

10. Golden delicious

$$SG = \frac{S_t - S_0}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

$$WL = \frac{W_0 - W_t}{A_0} \times 100 = \frac{W_0 - (A_t - S_t)}{A_0} \quad (3)$$

در رابطه (۱)، WR درصد کاهش وزن برش‌های سیب در مرحله اسمز، A_0 جرم اولیه نمونه برش‌های سیب (g) و A_t جرم برش‌های سیب بعد از اسمز (g) می‌باشند. در رابطه (۲)، SG درصد جذب مواد جامد، S_t مقدار ماده جامد نمونه بعد از اسمز (g) و S_0 مقدار ماده جامد نمونه اولیه (g) نشان می‌دهند. در رابطه (۳)، WL درصد کاهش آب در مرحله اسمز، W_0 رطوبت اولیه نمونه (g) و W_t رطوبت نمونه بعد از اسمز (g) می‌باشند (۱۰).

طراحی سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی: یکی از تکنیک‌های مناسب برای حل مسائل مهندسی جهت پیش‌بینی متغیرها و نیز سیستم‌هایی که دارای پیچیدگی زیاد هستند و یا داده‌های کافی درمورد آن‌ها موجود نیست، استفاده از روش انفیس است. در این مطالعه، برای مدل‌سازی اثر توان فراصوت، زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی بر درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب برش‌های سیب تیمار شده توسط فرآیند آب‌زدایی اسمز-فراصوت از جعبه‌ابزار انفیس^{۱۴} نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد. مدل انفیس معمولاً یک سیستم فازی تاکاگی-سوگنو را در یک ساختار عصبی که به صورت ساختار شبکه‌ای پیش‌رونده و دارای پنج لایه است، اجرا و برای آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس انتشار و کمینه مربعات خطا (روش هیبرید) استفاده می‌کند. از سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو و روش خوشه‌بندی کاهشی^{۱۵} برای ایجاد ساختار سامانه انفیس استفاده شد. در روش خوشه‌بندی کاهشی، توابع عضویت بعد از تولید

اسمزی، از دستگاه حمام فراصوت (مدل vCLEAN1-L6، ساخت شرکت بکر ایران) با فرکانس کاری ۴۰ کیلوهرتز استفاده شد (۱۰). در این پژوهش، اثر توان فراصوت در (سه سطح ۰، ۷۵ وات و ۱۵۰ وات)، اثر زمان اعمال فراصوت یا مدت زمان تماس محصول و محلول اسمزی (در شش سطح ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه) و اثر غلظت محلول اسمزی حاوی ساکارز (در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه بریکس) بر کارایی فرآیند آب‌زدایی اسمزی برش‌های سیب بررسی شد. در آزمایش‌ها دمای دستگاه برابر با ۵۰ درجه سلسیوس بود.

اندازه‌گیری رطوبت و مواد جامد: بعد از پایان زمان آب‌زدایی اسمزی، برش‌های سیب از داخل دستگاه خارج شدند. بعد از حذف رطوبت سطحی توسط دستمال کاغذی، مجدداً نمونه‌ها توزین گردید. سپس جهت تعیین میزان کاهش رطوبت و جذب مواد جامد، در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شدند. در مجموع، برای اندازه‌گیری درصد کاهش وزن^{۱۱}، درصد جذب مواد جامد^{۱۲} و درصد کاهش آب^{۱۳} برش‌های سیب، نمونه‌ها در مراحل مختلف فرآیند یعنی قبل از آب‌زدایی اسمزی، بعد از اسمز و بعد از خشک‌کردن در آون، توزین شدند. توزین نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال (ساخت شرکت کیا مدل SL1000) با دقت یک صدم گرم انجام شد.

محاسبه پارامترهای فرآیند اسمزی: درصد کاهش وزن (WR)، درصد جذب مواد جامد (SG) و درصد کاهش آب (WL) برش‌های سیب به ترتیب از طریق رابطه (۱)، رابطه (۲) و رابطه (۳) محاسبه شدند (۱۰).

$$WR = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

11. Weight reduction
12. Solids gain
13. Water loss

14. ANFIS toolbox
15. Subtractive clustering

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - F_i)^2}{N} \quad (4)$$

$$NMSE = \frac{1}{\sigma^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - F_i)^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - F_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i - F_i| \quad (7)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N [A_i - F_i]^2}{\sum_{i=1}^N [A_i - F_m]^2}} \quad (8)$$

در این روابط A و F به ترتیب مقدار واقعی^{۲۵} (مشاهده شده در آزمایشگاه) و مقدار پیش‌بینی شده^{۲۶} برای داده نام توسط انفیس است. N تعداد مشاهده و σ^2 واریانس داده‌ها می‌باشد. در رابطه (۸)، F_m میانگین مقادیر مشاهده است که از (۹) محاسبه شد:

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \quad (9)$$

نتایج و بحث

ساختار و قوانین انفیس: در این پژوهش برای آموزش ساختار انفیس از روش هیبرید که ترکیب روش حداقل مربعات خطا و روش پس انتشار می‌باشد، استفاده شد. حد خطا که برای ایجاد یک معیار توقف آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد بر روی صفر تنظیم و تعداد سیکل‌های یادگیری هم ۱۰۰ در نظر گرفته شد. مقادیر خطا به‌عنوان تابعی از تعداد سیکل‌های یادگیری در طول آموزش انفیس برای پیش‌بینی کاهش وزن (A-۱)، جذب مواد جامد (B-۱) و یا کاهش آب (C-۱) در شکل ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این سه نمودار

خوشه‌ها به‌صورت خودکار به دست می‌آیند. ساختار انفیس با دامنه تأثیر^{۱۶} برابر ۰/۵، فاکتور اسکواش^{۱۷} برابر ۱/۲۵، نسبت پذیرش^{۱۸} برابر ۰/۵ و نسبت رد شدن^{۱۹} برابر ۰/۱۵ آموزش دید. بر اساس روش آزمون و خطا مشخص شد در صورتی که ۴۰ درصد داده‌ها برای آموزش استفاده گردد، شبکه به‌خوبی قادر به یادگیری روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها بود. ۲۰ درصد داده‌ها هم برای آزمون شبکه آموزش دیده استفاده گردید. به‌منظور ارزیابی شبکه نیز از باقی‌مانده داده‌ها (۴۰ درصد) استفاده شد. روند آموزش نیز بعد از ۱۰۰ دوره آموزش یا رسیدن به سطح خطای صفر متوقف می‌شد (۱۴).

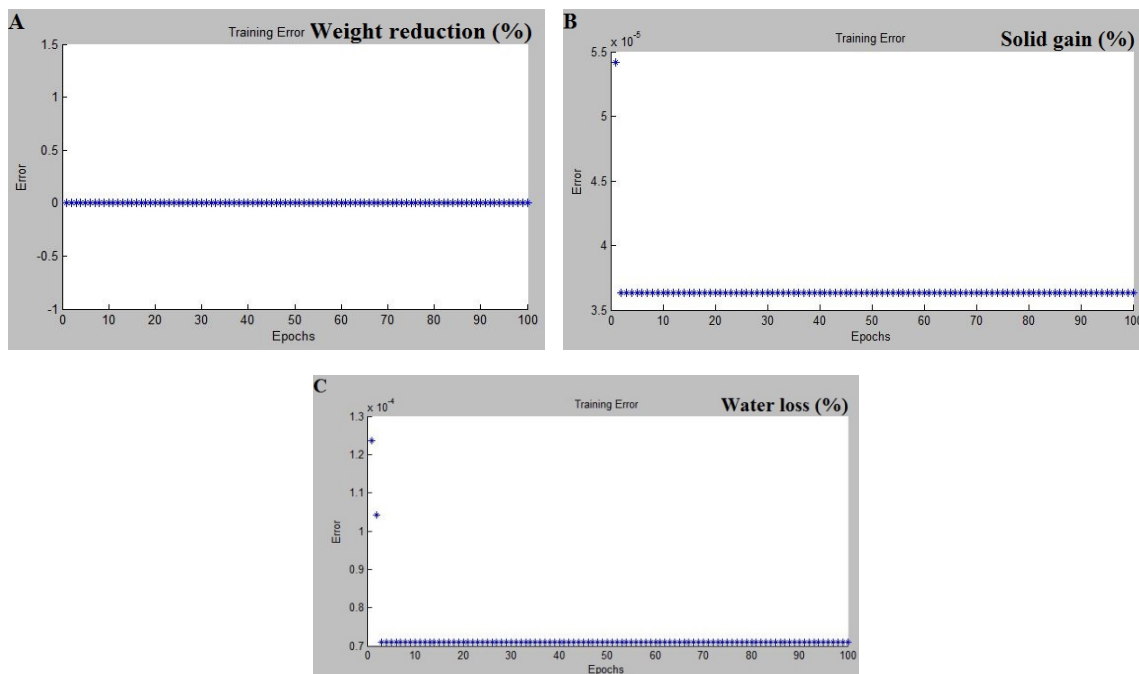
به‌منظور ارزیابی کارایی و کیفیت پیش‌بینی مدل انفیس برای پارامترهای درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب، شاخص‌های میانگین مربعات خطا^{۲۰} (MSE)، میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده^{۲۱} (NMSE)، جذر میانگین مربعات خطا^{۲۲} (RMSE)، میانگین خطای مطلق^{۲۳} (MAE) و ضریب تبیین^{۲۴} (r) به‌ترتیب از طریق رابطه (۴)، رابطه (۵)، رابطه (۶)، رابطه (۷) و رابطه (۸) محاسبه شدند. دلیل استفاده از جذر میانگین مربعات خطا، یکسان بودن بُعد و مقیاس آن با پارامتر مورد نظر بود. ضریب تبیین مقداری بین -۱ تا ۱ دارد که اطلاعاتی درباره آموزش شبکه می‌دهد. هر چه عدد ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که آموزش به‌خوبی انجام شده است (۱۴).

16. Range of influence
17. Squash factor
18. Accept ratio
19. Reject ratio
20. Mean squared error
21. Normalized Mean squared error
22. Root mean square error
23. Mean absolute error
24. Coefficient of determination

25. Actual value
26. Forecast value

توانسته رابطه بین متغیرهای ورودی و پاسخ مورد نظر را با حداقل خطا پیدا کند.

مشخص است، در همان سیکل‌های یادگیری ابتدایی انفیس قوانین و فرآیند آموزش خود را کامل کرده و

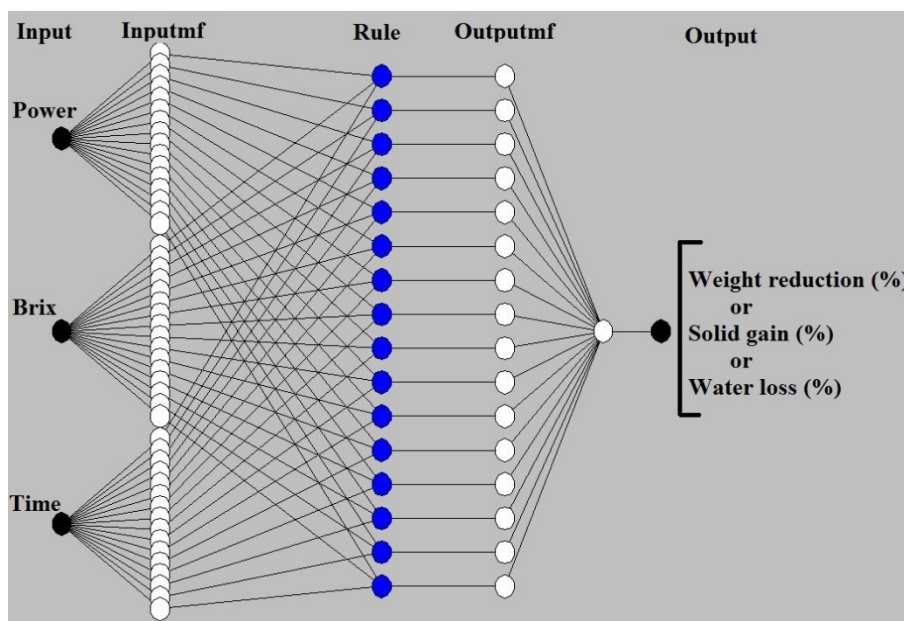


شکل ۱- مقادیر خطا به‌عنوان تابعی از تعداد سیکل‌های یادگیری در طول آموزش انفیس برای پیش‌بینی کاهش وزن (A)، جذب مواد جامد (B) و یا کاهش آب (C).

Figure 1- Error values as a function of the learning iterations number during training of ANFIS to estimation of the weight reduction (A), solids gain (B), and or water loss (C).

کلی شبکه انفیس در این مطالعه شامل سه ورودی (توان فراصوت، زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی)، ۴۸ تابع عضویت ورودی، ۱۶ قانون در لایه میانی، ۱۶ تابع عضویت خروجی و یک پاسخ خروجی (درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و یا درصد کاهش آب) است. با استفاده از این ساختار بهینه می‌توان درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و یا درصد کاهش آب برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی به روش ترکیبی اسمز-فراصوت را پیش‌بینی نمود.

در شکل ۲ ساختار مدل انفیس برای پیش‌بینی پارامترهای فرآیند آب‌زدایی اسمزی برش‌های سیب به نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است شبکه انفیس از پنج لایه تشکیل شده که به ترتیب ورودی‌ها، توابع عضویت مربوط به ورودی‌ها، قوانین، توابع عضویت مربوط به خروجی‌ها و خروجی‌ها را شامل می‌شود (۲۲). در سیستم انفیس، خروجی هر قانون ترکیب خطی متغیرهای ورودی به‌علاوه یک عدد ثابت است و خروجی نهایی میانگین وزنی خروجی قوانین است (۱۷). ساختار



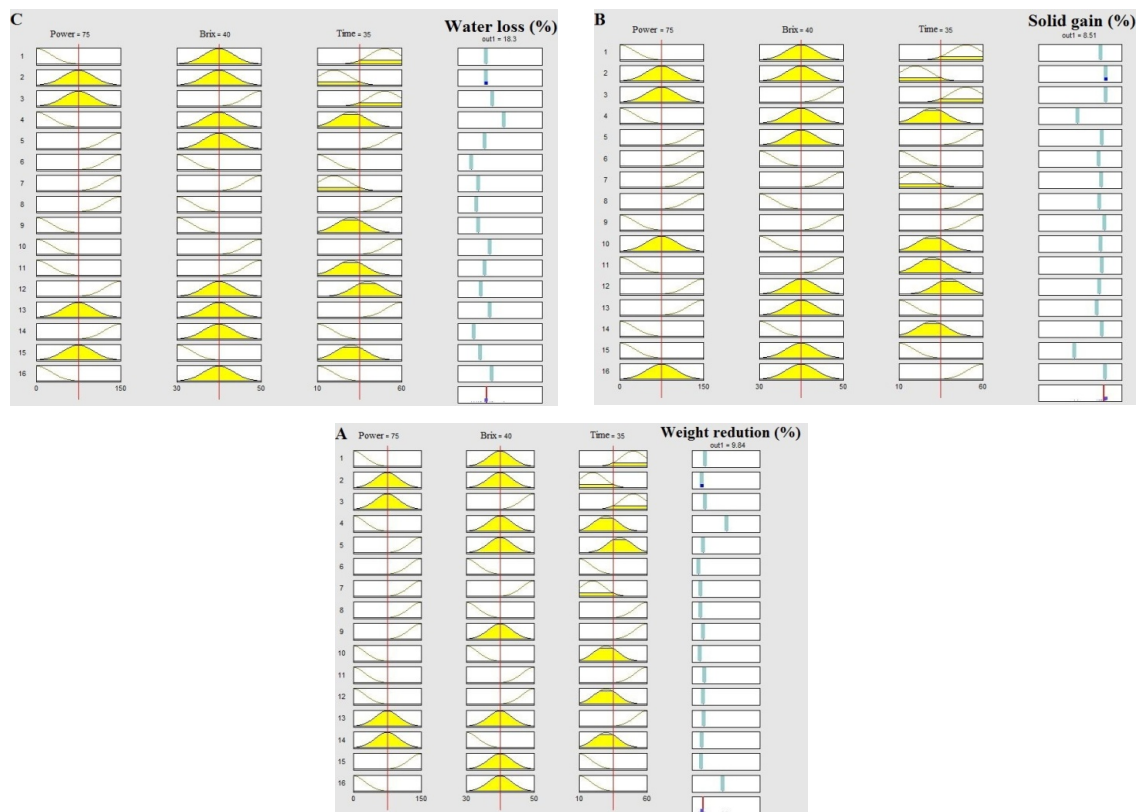
شکل ۲- ساختار مدل انفیسی برای پیش‌بینی کاهش وزن، جذب مواد جامد و یا کاهش آب برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی
 Figure 2- The ANFIS model structure to estimation of the weight reduction, solids gain, and or water loss of apple slices during osmotic dehydration.

توابع ریاضی در مدل‌سازی و تشخیص و به‌کارگیری الگوها، نقش مهم و بسزایی دارند. یکی از معروف‌ترین توابع ریاضی که بخصوص در آمار و مدل‌سازی بسیار محبوب است، تابع گاوسی^{۲۷} است. در این پژوهش نیز نوع تابع عضویت استفاده شده توسط نرم‌افزار متلب برای هر سه متغیر ورودی، تابع گاوسی بود. تابع گاوسی برای مدل‌سازی داده‌های این پژوهش مناسب بود و نتایج خیلی خوبی هم هنگام استفاده از این تابع عضویت به دست آمد که در ادامه به صورت نمودارهای سطح پاسخ گزارش شده است. **درصد کاهش وزن**: در شکل ۵، اثرات توان فراصوت و غلظت محلول اسمزی یا بریکس (شکل ۵-A)، اثرات توان فراصوت و زمان اعمال فراصوت (شکل ۵-B) و اثرات زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی (شکل ۵-C)، بر درصد کاهش وزن برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی نشان داده شده است. همان‌طور که در این سه نمودار مشخص است، با

انفیسی برای ایجاد قوانین فازی از پارامترهای خطی و غیرخطی استفاده می‌کند، که با تغییر تعداد توابع عضویت این پارامترها نیز تغییر می‌کند. در شکل ۳ قوانین مدل انفیسی و فرآیند فازی برای پیش‌بینی کاهش وزن (۳-A)، جذب مواد جامد (۳-B) و یا کاهش آب (۳-C) برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی نشان داده شده است. این شکل‌ها نوع و شکل توابع عضویت ایجاد شده و تعداد قوانین نمایش داده شده است. در این بخش از جعبه‌ابزار فازی نرم‌افزار متلب می‌توان مقادیر مختلف را برای متغیرهای مستقل وارد نرم‌افزار کرد و نرم‌افزار براساس قوانین تعریف شده، پاسخ مورد نظر را برای هر پارامتر خروجی پیش‌بینی نموده و نمایش می‌دهد. در شکل ۴ نیز قوانین فازی برای پیش‌بینی پارامتر کاهش وزن (WR) برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی نشان داده شده است. برای دو پارامتر دیگر یعنی جذب مواد جامد و کاهش آب نیز قوانین مشابهی توسط نرم‌افزار ایجاد شد.

27- Gaussian function

افزایش توان فراصوت، درصد کاهش وزن نمونه‌ها بیشتر شد که به دلیل خروج بیشتر رطوبت از نمونه‌ها بوده است.



شکل ۳- نمایش گرافیکی قوانین فازی برای پیش‌بینی کاهش وزن (A)، جذب مواد جامد (B) و یا کاهش آب (C) برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی

Figure 3- Graphical representation of fuzzy rules to estimation of the weight reduction (A), solids gain (B), and or water loss (C) of apple slices during osmotic dehydration.

1. If (Power is in1cluster1) and (Brix is in2cluster1) and (Time is in3cluster1) then (WR is out1cluster1) (1)
2. If (Power is in1cluster2) and (Brix is in2cluster2) and (Time is in3cluster2) then (WR is out1cluster2) (1)
3. If (Power is in1cluster3) and (Brix is in2cluster3) and (Time is in3cluster3) then (WR is out1cluster3) (1)
4. If (Power is in1cluster4) and (Brix is in2cluster4) and (Time is in3cluster4) then (WR is out1cluster4) (1)
5. If (Power is in1cluster5) and (Brix is in2cluster5) and (Time is in3cluster5) then (WR is out1cluster5) (1)
6. If (Power is in1cluster6) and (Brix is in2cluster6) and (Time is in3cluster6) then (WR is out1cluster6) (1)
7. If (Power is in1cluster7) and (Brix is in2cluster7) and (Time is in3cluster7) then (WR is out1cluster7) (1)
8. If (Power is in1cluster8) and (Brix is in2cluster8) and (Time is in3cluster8) then (WR is out1cluster8) (1)
9. If (Power is in1cluster9) and (Brix is in2cluster9) and (Time is in3cluster9) then (WR is out1cluster9) (1)
10. If (Power is in1cluster10) and (Brix is in2cluster10) and (Time is in3cluster10) then (WR is out1cluster10) (1)
11. If (Power is in1cluster11) and (Brix is in2cluster11) and (Time is in3cluster11) then (WR is out1cluster11) (1)
12. If (Power is in1cluster12) and (Brix is in2cluster12) and (Time is in3cluster12) then (WR is out1cluster12) (1)
13. If (Power is in1cluster13) and (Brix is in2cluster13) and (Time is in3cluster13) then (WR is out1cluster13) (1)
14. If (Power is in1cluster14) and (Brix is in2cluster14) and (Time is in3cluster14) then (WR is out1cluster14) (1)
15. If (Power is in1cluster15) and (Brix is in2cluster15) and (Time is in3cluster15) then (WR is out1cluster15) (1)
16. If (Power is in1cluster16) and (Brix is in2cluster16) and (Time is in3cluster16) then (WR is out1cluster16) (1)

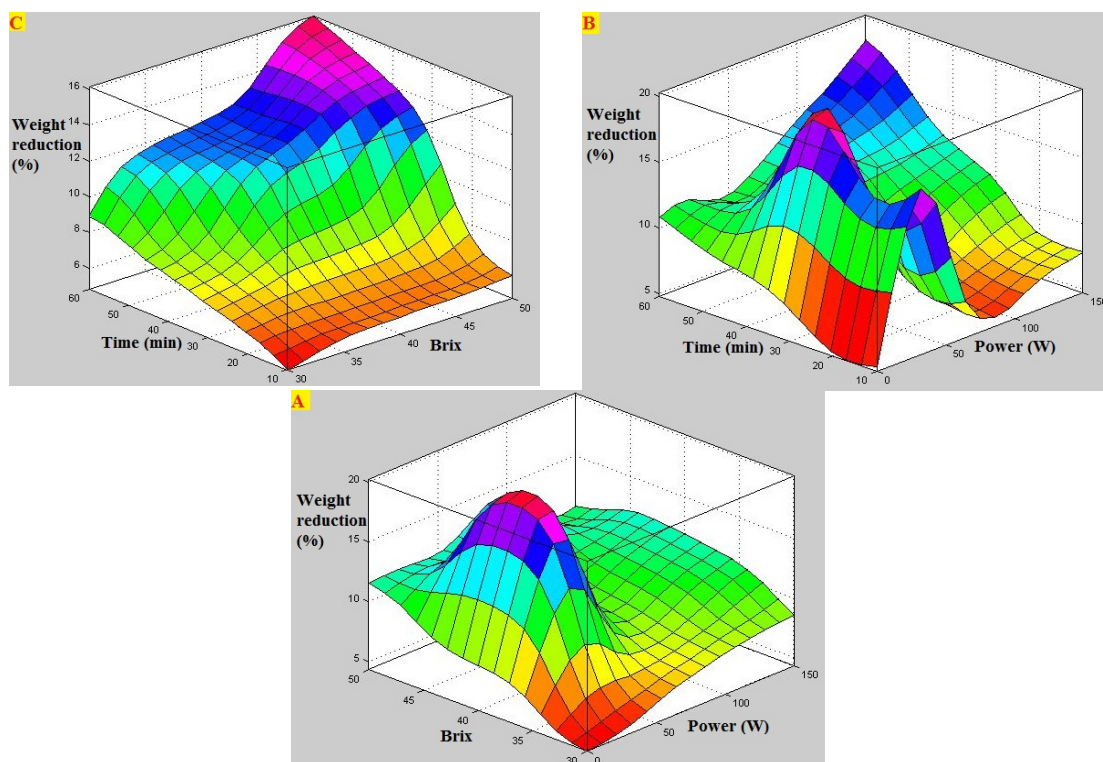
شکل ۴- قوانین فازی برای پیش‌بینی پارامتر کاهش وزن (WR) برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی

Figure 4- Fuzzy rules to estimation of the weight reduction (WR) of apple slices during osmotic dehydration.

آبزدایی اسمزی به روش انفیس و پیاده‌سازی آسان آن در نرم‌افزارهای مدل‌سازی با استفاده از مجموعه‌ای از معادلات، استفاده از این روش را برای طراحی و کنترل فرآیند بسیار مفید و کاربردی کرده است. در شکل ۶ نیز بخش سوم داده‌های آزمایشگاهی درصد کاهش وزن (داده‌هایی که برای آموزش و ارزیابی استفاده نشده بودند) در برابر داده‌های پیش‌بینی شده توسط این ساختار بهینه قرار گرفته است تا توانایی مدل‌سازی این شبکه انفیس بهتر دیده شود. ضریب تبیین (R^2) محاسبه شده برای این دوسری داده برابر ۰/۹۵۲ است که نشان دهنده توانایی این روش برای پیش‌بینی درصد کاهش وزن برش‌های سیب هنگام آبزدایی اسمزی است.

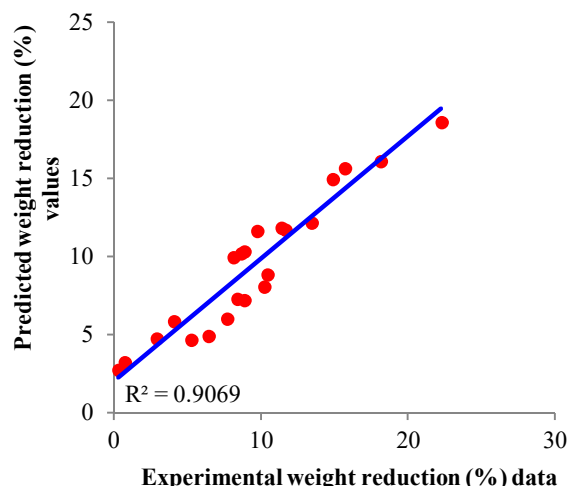
همچنین، با افزایش غلظت محلول اسمزی، به دلیل افزایش فشار اسمزی، رطوبت بیشتری از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه تغییرات وزن برای نمونه‌هایی که در معرض محلول‌های اسمزی غلیظ‌تر بودند، به میزان بیشتری مشاهده شد. با افزایش زمان اعمال تیمارهای اسمزی نیز رطوبت بیشتر از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه تغییرات وزن برای این نمونه‌ها بیشتر شده است. جیانگ و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که تیمار اسمز-فراصوت باعث افزایش سرعت خروج رطوبت از توت‌فرنگی شد و منجر به کاهش حداقل ۱۰ درصدی در زمان خشک‌کردن محصول نهایی گردید (۲۳).

طیف وسیع متغیرهای موجود در پایش فرآیند



شکل ۵- نمودارهای سطح پاسخ برای اثرات توان فراصوت و غلظت محلول اسمزی (بریکس) (A)، توان فراصوت و زمان تیماردهی (B)، و زمان تیماردهی و بریکس (C) بر کاهش وزن برش‌های سیب هنگام آبزدایی اسمزی.

Figure 5- Response surface diagrams for ultrasound power & osmotic solution concentration (Brix) (A), ultrasound power & treatment time (B) and treatment time & Brix (C) effects on the weight reduction of apple slices during osmotic dehydration.



شکل ۶- مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل انفیس در برابر داده‌های تجربی کاهش وزن برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی.
Figure 6- Predicted values by ANFIS model versus experimental data of weight reduction of apple slices during osmotic dehydration.

مقادیر میانگین مربعات خطا، میانگین مربعات خطا نرمالیزه شده، میانگین خطا مطلق و ضریب تبیین در پیش‌بینی داده‌های آموزش توسط مدل انفیس در جدول ۱ گزارش شده است. مقادیر خطا برای هر سه پارامتر بررسی شده در این پژوهش کم بود که حاکی از توانایی مدل انفیس در مدل‌سازی فرآیند آب‌زدایی از سیب به روش اسمز- فراصوت است.

جدول ۱- مقادیر خطا در پیش‌بینی داده‌های آموزش توسط مدل انفیس

Table 1- The error values in prediction of testing data by ANFIS model

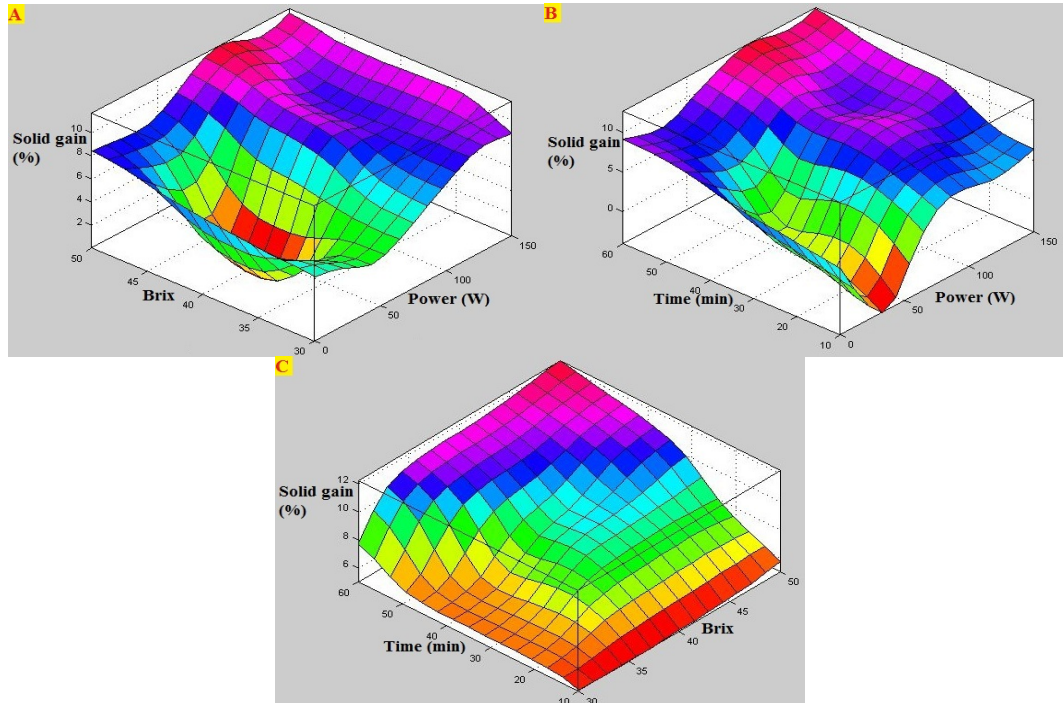
Error خطا	Weight reduction (%) کاهش وزن (%)	Solids gain (%) جذب مواد جامد (%)	Water loss (%) کاهش آب (%)
Mean squared error میانگین مربعات خطا	2.992	1.841	6.969
Normalized mean squared error میانگین مربعات خطای نرمالیزه شده	0.110	0.166	0.097
Mean absolute error میانگین خطای مطلق	1.509	1.001	2.130
Coefficient of determination (r) ضریب تبیین (r)	0.952	0.927	0.961
Root mean square error جذر میانگین مربعات خطا	1.730	1.357	2.640

فراصوت (شکل ۷-B) و اثر زمان اعمال فراصوت و بریکس محلول (شکل ۷-C)، بر درصد جذب مواد جامد برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش توان فراصوت، درصد جذب مواد جامد نمونه‌ها بیشتر شده که این موضوع نشان دهنده افزایش جذب ساکارز توسط نمونه‌های آب‌زدایی شده است. با

درصد جذب مواد جامد: از میان روش‌های موجود برای مدل‌سازی، سیستم استنتاج تطبیقی فازی- عصبی (انفیس) ابزاری قدرتمندی برای پیش‌بینی خصوصیات محصولات غذایی مختلف و شبیه‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین خواص مواد غذایی و فاکتورهای فرآوری می‌باشد. در شکل ۷، اثر توان فراصوت و بریکس (شکل ۷-A)، اثر توان فراصوت و زمان اعمال

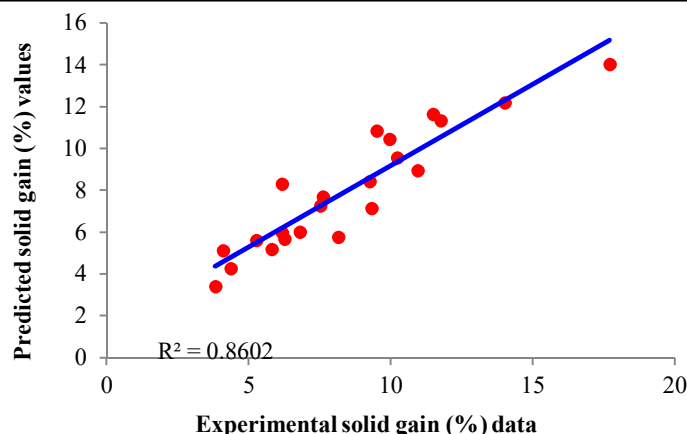
نشان دهنده کارایی و دقت مدل انفیس ارائه شده برای پیش‌بینی پارامتر مورد نظر بود. روش انفیس نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی مانند شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره کارایی بیشتری داشت و نتایج بهتری ارائه می‌کند. در مقایسه با نتایج این پژوهش، می‌توان به مطالعه اوچوا-مارتینز و آیالا-آپونته (۲۰۰۷) اشاره کرد که سیتیک انتقال جرم در حین آب‌زدایی اسمزی سیب را با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌بینی نمودند (۲۴). شبکه عصبی بهینه در این پژوهش شامل یک لایه پنهان با چهار نرون بود. این مدل توانست افت رطوبت و جذب مواد جامد را در طیف وسیعی از متغیرهای فرآیند با میانگین مربعات خطای ۱۳/۹ و ۴/۴ و ضریب رگرسیون به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۸۹ در مرحله آزمون پیش‌بینی کند. آنها بیان کردند که این مدل شبکه عصبی در مقایسه با رگرسیون چند متغیره خطی بهتر عمل کرد.

افزایش غلظت محلول اسمزی نیز به دلیل افزایش غلظت محیط، برش‌های سیب ساکارز بیشتری را جذب کردند و در نتیجه درصد جذب مواد جامد برای این نمونه‌ها افزایش یافت. همچنین، با افزایش زمان فرآیند آب‌زدایی اسمزی نیز درصد جذب مواد جامد برش‌های سیب افزایش یافت. فونگ-ین و همکاران (۲۰۲۱) آب‌زدایی اسمزی میوه لیچی (سرخالو) به کمک فراصوت را بررسی کردند. نتایج گزارش شده در این پژوهش نشان می‌دهد که پیش‌تیمار فراصوت به‌طور مؤثری باعث افزایش کاهش آب (۲۸/۷۳ درصد) و جذب مواد جامد (۴۵/۴۴ درصد) در میوه لیچی شده است (۵). ضریب رگرسیون مقادیر محاسبه شده برای پارامتر درصد جذب مواد جامد و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل انفیس در شکل شماره ۸ آورده شده است. ضریب تبیین محاسبه شده برای این داده‌ها برابر ۰/۹۲۷ است. مقدار ضریب تبیین بالا در این مطالعه،



شکل ۷- نمودارهای سطح پاسخ برای اثرات توان فراصوت و غلظت محلول اسمزی (بریکس) (A)، توان فراصوت و زمان تیماردگی (B) و زمان تیماردگی و بریکس (C) بر جذب مواد جامد برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی.

Figure 7- Response surface diagrams for ultrasound power & osmotic solution concentration (Brix) (A), ultrasound power & treatment time (B) and treatment time & Brix (C) effects on the solids gain of apple slices during osmotic dehydration.



شکل ۸- مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل انفیس در برابر داده‌های تجربی جذب مواد جامد برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی.
Figure 8- Predicted values by ANFIS model versus experimental data of solids gain of apple slices during osmotic dehydration.

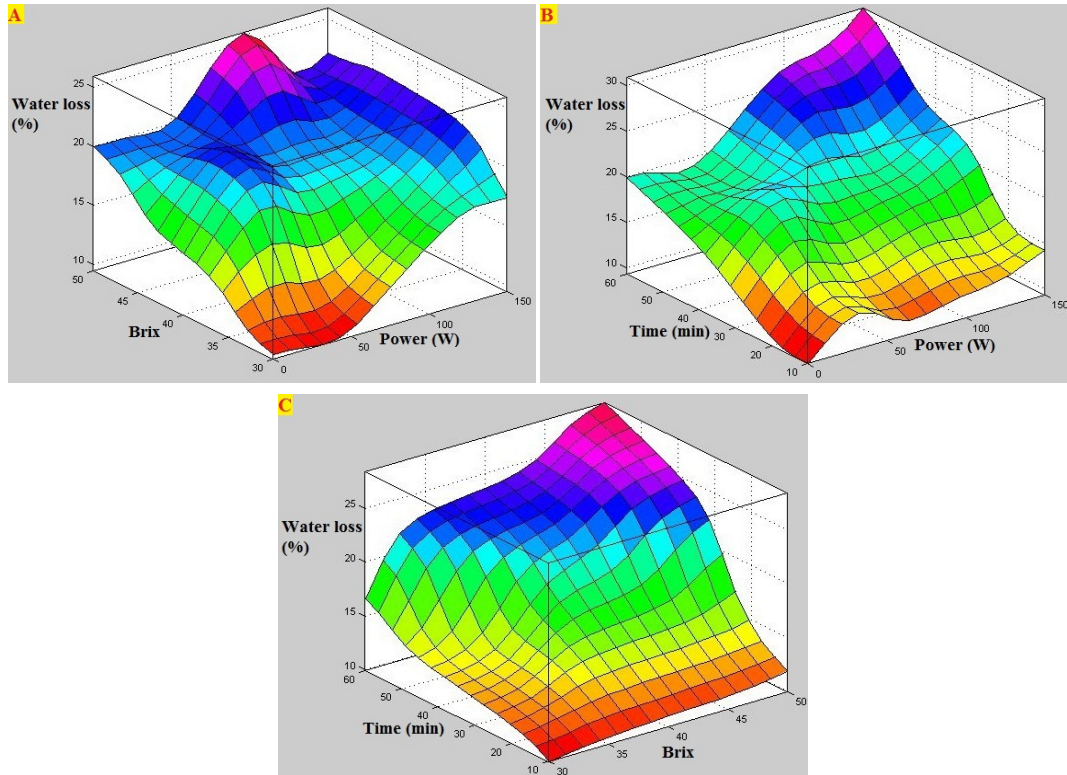
آناناس هنگام فرآیند آب‌زدایی اسمزی شده است. همچنین این فرآیند حدود ۲۶/۶ درصد از آب آناناس تازه را در ۲۶/۶ دقیقه زمان فراصوت با استفاده از فروکتوز به‌عنوان عامل اسمزی با غلظت ۵۰ درجه بریکس و دمای ۳۰ درجه سلسیوس حذف کرد (۱۱). در پژوهش دیگری، کروهنکه و همکاران (۲۰۲۱)، تأثیر امواج فراصوت بر سینتیک فرآیند آب‌زدایی اسمزی و کیفیت کیوی را بررسی کردند. این پژوهشگران هم گزارش کردند که استفاده از فراصوت باعث بهبود انتقال جرم در هنگام آب‌زدایی اسمزی کیوی می‌شود (۱۲).

در شکل ۱۰ داده‌های واقعی درصد کاهش آب که برای آموزش و ارزیابی استفاده نشده بودند، در برابر داده‌های پیش‌بینی شده توسط این ساختار بهینه قرار گرفته است تا توانایی مدل‌سازی روش انفیس بهتر دیده شود. نتایج به دست آمده نشان داد روش انفیس ابزار مفیدی برای پیش‌بینی و یافتن ارتباط غیرخطی میان پارامترهای فرآیند اسمز- فراصوت است. ضریب تبیین محاسبه شده برای این دوسری داده برابر ۰/۹۶۱ است. در پژوهشی، صالحی و همکاران (۲۰۲۲) از روش انفیس برای مدل‌سازی فرآیند آب‌زدایی از برش‌های موز به روش اسمز- فراصوت استفاده

درصد کاهش آب: روش انفیس نسبت به سایر روش‌ها در زمان نسبتاً کوتاه‌تری به بررسی داده‌ها و کشف الگوی نهفته در آن جهت پیش‌بینی و یا تأثیرگذاری آن بر پاسخ‌های فرآیند دارد. در شکل ۹، اثر توان فراصوت و غلظت محلول اسمزی (شکل ۹-A)، اثر توان فراصوت و زمان اعمال فراصوت (شکل ۹-B) و اثر زمان اعمال فراصوت و غلظت محلول اسمزی (شکل ۹-C)، بر خروج رطوبت از برش‌های سیب (درصد کاهش آب) هنگام آب‌زدایی اسمزی به نمایش در آمده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش توان فراصوت، درصد کاهش آب نمونه‌ها بیشتر شد. با افزایش غلظت محلول اسمزی نیز به دلیل افزایش فشار اسمزی، رطوبت بیشتری از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه درصد کاهش آب برای نمونه‌هایی که در معرض محلول‌های اسمزی غلیظ‌تر بوده‌اند، بیشتر بود. با افزایش زمان اعمال تیمارهای اسمزی نیز رطوبت بیشتر از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه درصد کاهش رطوبت برای این نمونه‌ها بیشتر شد. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، منا و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که استفاده از امواج فراصوت باعث افزایش خروج آب از برش‌های

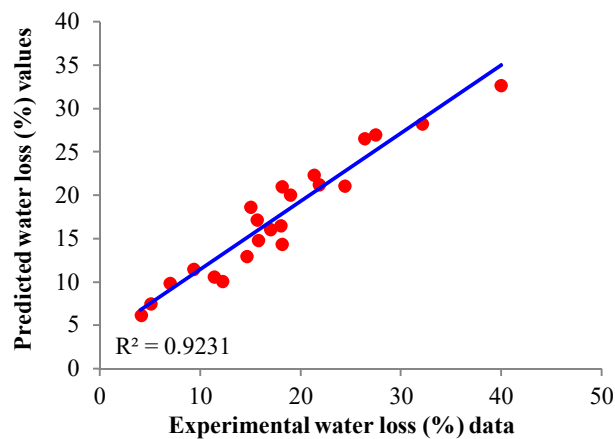
جذب مواد جامد و کاهش آب برش‌های موز با استفاده از روش انفیس را به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۰/۹۵ و ۰/۹۴ گزارش کرده‌اند (۱۶).

کردند. این پژوهشگران استفاده از این روش را برای کنترل فرایندهای پیچیده صنایع غذایی از جمله فرایندهای آب‌زدایی و خشک‌کردن توصیه کرده و مقادیر ضریب تبیین برای پیش‌بینی کاهش وزن،



شکل ۹- نمودارهای سطح پاسخ برای اثرات توان فراصوت و غلظت محلول اسمزی (بریکس) (A)، توان فراصوت و زمان تیماردهی (B)، و زمان تیماردهی و بریکس (C) بر کاهش آب برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی.

Figure 9- Response surface diagrams for ultrasound power & osmotic solution concentration (Brix) (A), ultrasound power & treatment time (B) and treatment time & Brix (C) effects on the water loss of apple slices during osmotic dehydration.



شکل ۱۰- مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل انفیس در برابر داده‌های تجربی کاهش آب برش‌های سیب هنگام آب‌زدایی اسمزی.

Figure 10- Predicted values by ANFIS model versus experimental data of water loss of apple slices during osmotic dehydration.

نتیجه گیری

خوشه‌بندی کاهشی و الگوریتم آموزش هیبریدی به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای تخمین پارامترهای فرآیند آب‌زدایی اسمز - فراصوت استفاده کرد. مقادیر ضرایب تبیین (r) محاسبه‌شده برای پیش‌بینی درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب برش‌های سیب آب‌زدایی‌شده به روش اسمز - فراصوت استفاده شد. بر اساس نتایج این پژوهش، با افزایش توان فراصوت، درصد کاهش آب نمونه‌ها بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش غلظت محلول اسمز نیز به دلیل افزایش فشار اسمز، رطوبت بیشتری از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه درصد کاهش آب برای نمونه‌هایی که در معرض محلول‌های اسمز غلیظ‌تر بوده‌اند، بیشتر بود. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی شبکه را آموزش و مدل بهینه‌ای برای هر سری از داده‌ها ایجاد کرد و از روش

در این مطالعه از مدل انفیس برای پیش‌بینی درصد کاهش وزن، درصد جذب مواد جامد و درصد کاهش آب برش‌های سیب آب‌زدایی‌شده به روش اسمز - فراصوت استفاده شد. بر اساس نتایج این پژوهش، با افزایش توان فراصوت، درصد کاهش آب نمونه‌ها بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش غلظت محلول اسمز نیز به دلیل افزایش فشار اسمز، رطوبت بیشتری از برش‌های سیب خارج شد و در نتیجه درصد کاهش آب برای نمونه‌هایی که در معرض محلول‌های اسمز غلیظ‌تر بوده‌اند، بیشتر بود. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی فازی - عصبی شبکه را آموزش و مدل بهینه‌ای برای هر سری از داده‌ها ایجاد کرد و از روش

References

1. Alabi, K.P., Olalusi, A.P., Olaniyan, A.M., Fadeyibi, A., Gabriel, L.O. 2022. Effects of osmotic dehydration pretreatment on freezing characteristics and quality of frozen fruits and vegetables, *Journal of Food Process Engineering*. 45: e14037.
2. Salehi, F. 2023. Recent advances in the ultrasound-assisted osmotic dehydration of agricultural products: A review, *Food Bioscience*. 51: 102307.
3. Sabbaghi, H., Ziaifar, A.M., Kashani-Nejad, M. 2020. Textural profile analysis (TPA) of dried apple slices using infrared radiation with intermittent heating method, *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 16: 57-72 (in Persian).
4. Sabbaghi, H., Ziaifar, A.M., Kashaninejad, M. 2021. Estimation of shrinkage and rehydration in apple slices dried by infrared radiation using intermittent heating method, *Journal of Food Research*. 31: 35-49 (in Persian).
5. Fong-in, S., Nimitkeatkai, H., Prommajak, T., Nowacka, M. 2021. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of litchi: effect of pretreatment on mass transfer and quality attributes during frozen storage, *Journal of Food Measurement and Characterization*. 15: 3590-3597.
6. Salehi, F. 2020. Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by ultrasound: A review, *International Journal of Food Properties*. 23: 1748-1765.
7. Azarpazhooh, E., Sharayeei, P., Gheybi, F. 2019. Evaluation of the effects of osmosis pretreatment assisted by ultrasound on the impregnation of phenolic compounds into aloe vera gel and dry product quality, *Food Engineering Research*. 18: 143-154 (in Persian).
8. Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D., Youssef, M.M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review, *Food Research International*. 48: 410-427.
9. Fernandes, F.A., Gallão, M.I., Rodrigues, S. 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration, *LWT-Food Science and Technology*. 41: 604-610.
10. Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2022. Influence of sonication power and time on the osmotic dehydration process efficiency of banana slices, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 19: 197-206 (in Persian).

11. Meena, N., Prince, M.V., Sreeja, R. 2022. Optimization of process parameters for ultrasound-assisted osmotic dehydration of pineapple slices using response surface methodology, *Journal of Food Processing and Preservation*.
12. Kroehnke, J., Szadzińska, J., Radziejewska-Kubzdela, E., Biegańska-Marecik, R., Musielak, G., Mierzwa, D. 2021. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) – The influence of ultrasound on process kinetics and product quality, *Ultrasonics Sonochemistry*. 71: 105377.
13. Salehi, F. 2020. Recent advances in the modeling and predicting quality parameters of fruits and vegetables during postharvest storage: A review, *International Journal of Fruit Science*. 20: 506-520.
14. 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, *Journal of Food Processing and Preservation*. 45: e15258.
15. Yousefi, A.R. 2017. Estimation of papaw (*Carica papaw* L.) moisture content using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and genetic algorithm-artificial neural network (GA-ANN), *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 12: 767-779 (in Persian).
16. Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2022. Application of neuro-fuzzy approach for modeling of dehydration process from banana slices by osmosis-ultrasound method, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 19: 243-253 (in Persian).
17. Azimi-Nejadian, H., Moradi Hassan Abad, M. 2020. Comparison of mathematical models, artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in prediction of instantaneous drying curves of potato slices in a microwave dryer, *Food Engineering Research*. 19: 137-154 (in Persian).
18. Satorabi, M., Salehi, F., Rasouli, M. 2021. The influence of xanthan and balangu seed gums coats on the kinetics of infrared drying of apricot slices: GA-ANN and ANFIS modeling, *International Journal of Fruit Science*. 21: 468-480.
19. Okonkwo, C.E., Olaniran, A.F., Adeyi, A.J., Adeyi, O., Ojediran, J.O., Erinle, O.C., Mary, I.Y., Taiwo, A.E. 2022. Neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system modeling of the hot air-drying process of orange-fleshed sweet potato, *Journal of Food Processing and Preservation*. 46: e16312.
20. Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2022. Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices, *Scientific Reports*. 12: 15392.
21. AOAC 2010. Official methods of analysis, 16th edition, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.
22. Shirazi, R., Bakhshabadi, H., Bazrafshan, M. 2018. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) application in modeling the oil extraction from peanut with microwave pretreatment, *Journal of Food Science and Technology (Iran)*. 15: 61-72 (in Persian).
23. Jiang, J., Zhang, M., Devahastin, S., Yu, D. 2021. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries, *LWT-Food Science and Technology*. 145: 111300.
24. Ochoa-Martinez, C., Ayala-Aponte, A. 2007. Prediction of mass transfer kinetics during osmotic dehydration of apples using neural networks, *LWT-Food Science and Technology*. 40: 638-645.