Iranian Journal of Biosystem Engineering ISNN: 2423-7841
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in predicting quality characteristics of stored apple fruit

Behshad Tahani [1] | Babak Beheshti [2]✉ | Mohsen Heidarisoltanabadi [3] | Ehsan Hekmatian[4]

1. Biosystems Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: behshad_t@yahoo.com
2. Corresponding Author, Biosystems Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: beheshti.babak@gmail.com
3. Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran. E-mail: mheisol@gmail.com
4. Department of Oral and Maxillofacial Radiology Department, School of Dentistry, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran; Member of Dental Implants Research Center, School of Dentistry, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran. E-mail: hekmatian@dnt.mui.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 23, 2024

Revised: June. 11, 2024

Accepted: July. 6, 2024

Published online: Winter 2024

Keywords:
ANFIS,
Apple fruit,
Golden delicious variety,
CT number,
Physicochemical properties,
Storage.

ABSTRACT

Quality evaluations of apple fruit during storage can help producers to choose and optimize suitable storage conditions. The internal changes of this product during the storage period will be caused change in the quality characteristics of the fruit. Prediction of these changes and creating suitable storage conditions are important steps towards maintaining the nutritional and economic value of the product. In this research, some physicochemical characteristics of Golden Delicious apples were measured during storage at two temperatures of 0 and 4 °C for 0, 45, 90 and 135 days. These characteristics included CT number obtained by X-ray imaging, pH, firmness, density, total soluble solids index and fruits moisture content. Then, using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) the mentioned characteristics changes during storage were determined and compared with the actual values. The ANFIS model inputs were color components L*, a* and b*, storage temperature and storage duration, and the outputs were the mentioned physicochemical characteristics. According to the results, in the best selected models, the values of R2, RMSE, MAPE and EF statistical parameters for CT number were 0.909, 24.331, 11.319% and 0.899, for fruit firmness were 0. 950, 1.862 N, 3.298% and 0.904, for pH value were 0.912, 0.134, 1.134% and 0.839, for density were 0.910, 0.045 g/cm3, 7.223% and 0.828, for soluble solids were 0.884, 0.537% Brix, 2.340% and 0.781 and for fruit moisture content were 0.945, 0.008, 0.729% and 0.893, respectively. These results show that it is possible to predict the characteristics of apple fruit under storage conditions with high accuracy. This prediction will be useful to determine and maintain the quality of the product during storage.

Cite this article: Tahani, B., Beheshti, B., Heidarisoltanabadi, M., Hekmatian, E., (2024) Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in predicting quality characteristics of stored apple fruit, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54 (4),47-64. https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375506.665545

© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375506.665545

مجله مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۵۴، شماره ۴ شاپا: ۷۸۴۱-۲۴۲۳
Homepage: http://ijbse.ut.ac.ir

کاربرد استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) در پیش‌بینی خصوصیات کیفی میوه سیب در طی انبارداری

بهشاد طحانی[۱] | بابک بهشتی[۲]✉ | محسن حیدری سلطان آبادی[۳] | احسان حکمتیان[۴]

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: behshad_t@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: beheshti.babak@gmail.com

۳. بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران. رایانامه: mheisol@gmail.com

۴. گروه آموزشی رادیولوژی دهان، فک و صورت، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، ایران؛ عضو مرکز تحقیقات ایمپلنت‌های دندانی، دانشکده دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، ایران. رایانامه: hekmatian@dnt.mui.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۶

تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:
ANFIS،
میوه سیب،
رقم گلدن دلیشز،
عدد سی‌تی،
خواص فیزیکو شیمیایی،
انبارداری.

چکیده

ارزیابی‌های کیفی میوه سیب در طول انبارداری می‌تواند تولیدکنندگان سیب را در انتخاب و بهینه‌سازی شرایط مناسب انبارداری یاری نماید. تغییرات داخلی ایجادشده این محصول در طول مدت انبارداری، موجب تغییر در خصوصیات کیفی میوه می‌شود. پیش‌بینی این تغییرات و ایجاد شرایط مناسب نگهداری، گام مهمی در جهت حفظ ارزش تغذیه‌ای و اقتصادی محصول محسوب می‌شود. در این تحقیق خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیب رقم گلدن دلیشز طی انبارداری در دو دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس و مدت انبارداری در سردخانه شامل صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز ثبت گردید. این خصوصیات شامل عدد سی‌تی حاصل از تصویربرداری اشعه ایکس، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول میوه بود. در مرحله بعدی با کمک سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و بر اساس ورودی‌های مؤلفه‌های رنگی L^*، a^* و b^*، دمای انبارداری و طول مدت انبارداری، خصوصیات یادشده استخراج و با مقادیر واقعی مقایسه شد. طبق نتایج، در بهترین مدل‌های انتخابی، مقادیر پارامترهای آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و شاخص کارایی مدل (EF) به ترتیب برای پیش‌بینی عدد سی‌تی برابر ۰/۹۰۹، ۲۴/۳۳۱ ، ۱۱/۳۱۹ درصد و ۰/۸۹۹، مقدار pH برابر ۰/۹۱۲، ۰/۱۳۴ ، ۰/۱۳۴ درصد و ۰/۸۳۹، سفتی میوه برابر ۰/۹۵۰، ۱/۸۶۲ نیوتن، ۳/۲۹۸ درصد و ۰/۹۰۴، رطوبت میوه برابر ۰/۹۴۵، ۰/۰۰۸، ۰/۷۲۹ درصد و ۰/۸۹۳، چگالی برابر ۰/۹۱۰، ۰/۰۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۷/۲۲۳ درصد و ۰/۸۲۸ و مواد جامد محلول برابر ۰/۸۸۴، ۰/۵۳۷ درصد بریکس، ۲/۳۴۰ درصد و ۰/۷۸۱ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که با تقریب و دقت بالا می‌توان خصوصیات کیفی میوه سیب را در تحت شرایط انبارداری پیش‌بینی نمود. این پیش‌بینی جهت حفظ کیفیت محصول در طول انبارداری بسیار مفید خواهد بود.

استناد: طحانی؛ بهشاد، بهشتی؛ بابک، حیدری سلطان آبادی؛ محسن، حکمتیان؛ احسان، (۱۴۰۲) کاربرد استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) در پیش‌بینی خصوصیات کیفی میوه سیب در طی انبارداری، *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۴ (۴)،۶۴-۴۷. https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375506.665545

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2024.375506.665545

مقدمه

سطح زیر کشت باغ‌های سیب ایران، حدود ۲۳۷ هزار هکتار بوده که از این سطح حدود ۴ میلیون تن سیب تولید می‌شود و سهم قابل ملاحظه‌ای در بخش تجارت محصولات کشاورزی کشور را به خود اختصاص می‌دهد (بی‌نام، ۱۴۰۱). سیب از جمله میوه‌هایی است که برای مدت زمان نسبتاً طولانی در شرایط انبارداری قابل نگهداری است. تغییرات داخلی ایجادشده این محصول در طول مدت انبارداری، موجب تغییر در خصوصیات کیفی میوه می‌شود. پیش‌بینی این تغییرات و ایجاد شرایط مناسب نگهداری، گام مهمی در جهت حفظ ارزش تغذیه‌ای و اقتصادی محصول محسوب می‌شود. پژوهش‌های متعددی در زمین بررسی تغییرات کیفی میوه سیب در طی زمان انبارداری انجام‌شده است. در تحقیقی به بررسی تأثیر شرایط مختلف نگهداری سیب رقم گرانی اسمیت در دوره انبارمانی بر کیفیت آن پرداخته شد. طبق نتایج، در پایان دوره نگهداری، نرخ تنفس و مقادیر pH افزایش و اسیدیته کاهش یافت (Akdemir and Bal, 2020). در پژوهشی تغییرات کیفی دو رقم سیب گلدن دلیشز و رد دلیشز، طی ۱۳۵ روز انبارداری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش زمان انبارداری، محتوای پروتئین، قندهای محلول، قندهای احیاکننده و pH عصاره میوه افزایش یافت، ولی محتوای قندهای احیاکننده، اسیدیته قابل عیارسنجی، مواد جامد محلول و هدایت الکتریکی عصاره کاهش معنی‌دار داشت (یاوری و همکاران، ۱۳۹۳). سفتی بافت میوه یکی از معیارهای مهم در تعیین مدت زمان ماندگاری میوه در سردخانه و بازارپسندی آن است، تاجایی که سیب‌های ترد و سفت نزد مصرف‌کنندگان از مقبولیت بیشتری برخوردار هستند (Peng and Lu, 2006؛ Harker et al., 2008). تغییرات فیزیولوژیکی میوه در طول دوره نگهداری منجر به کاهش سفتی آن می‌شود (Peng and Lu, 2007؛ Lu, 2004). همچنین ارقام مختلف میوه سیب دارای میزان سفتی متفاوت هستند. به‌عنوان مثال در تحقیقی میزان سفتی سه رقم سیب گلدن دلیشز، رد دلیشز و گرانی اسمیت به ترتیب، ۱۴/۷۶، ۱۸/۶۹ و ۲۶ نیوتن به دست آمد (مسعودی و همکاران، ۱۳۸۵). نتایج تحقیقی بیانگر کاهش معنی‌دار شاخص سفتی سیب در طول دوره انبارداری بود. مقدار میانگین سفتی برای نمونه‌های سیب در روز آغاز انبارداری ۸۲/۸۳ نیوتن به دست آمد که پس از ۵ ماه انبارداری به ۴۸/۰۵ نیوتن کاهش پیدا کرد (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۶). محققان نشان دادند که طی ۵ ماه انبارمانی سیب، pH میوه افزایش و اسیدیته کاهش یافت. از جمله دلایل این روند، مصرف اسید مالیک طی دوره انبارمانی به دلیل فعالیت‌های تنفسی بیان شده است (محمدپور و همکاران، ۱۴۰۱). در تحقیقی با بررسی تغییرات کیفیت میوه سیب رقم گالا در مرحله رسیدگی و مدت انبارمانی این نتیجه گرفته شد که صفات مختلفی چون سفتی بافت میوه، کاهش وزن، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون، طعم و قابلیت پذیرش (بازارپسندی) میوه به‌شدت تحت تأثیر زمان برداشت و مدت انبارمانی قرار می‌گیرد، به‌طوری که با طولانی شدن مدت انبارمانی (ماه پنجم) سفتی بافت و اسیدیته قابل تیتراسیون میوه کاهش معنی‌دار نشان داده، همچنین میزان مواد جامد محلول و درصد کاهش وزن در طی مدت انبارمانی افزایش یافته است (دامیار و دستجردی، ۱۳۹۳). علاوه بر خصوصیات ذکر شده میوه، تعیین شاخص‌های رنگی محصولاتی مانند سیب، به‌عنوان یکی از آزمون‌های غیر مخرب در تعیین کیفیت محصول مطرح است. پارامترهای رنگی معمولاً در فضای رنگ L^*,a^*,b^* با استفاده از رنگ‌سنج یا دستگاه‌های پردازش تصویر اندازه‌گیری می‌شوند (León et al., 2006). به‌عنوان مثال طبق نتایج پژوهشی مقدار شاخص رنگی L^* سطح سیب تا روز دوم ذخیره‌سازی اندکی کاهش یافت. اما پس از آن تا روز شانزدهم ذخیره‌سازی به دلیل افزایش شدت قرمزی افزایشی و بعداً تا روز آخر دوباره کاهشی شد (Ahmad et al., 2021).

از جمله روش‌های مورد استفاده در ارزیابی کیفیت میوه‌ها تصویربرداری اشعه ایکس و تعیین ارتباط خواص جذبی پرتو با پارامترهای کیفی محصولات است. در حوزه توموگرافی محاسباتی، تضعیف پرتو ایکس توسط عدد توموگرافی کامپیوتری[1](CT) بیان می‌شود. تحقیقات متعددی در زمینه استفاده از تصویربرداری اشعه ایکس و محاسبه عدد سی‌تی در بررسی کیفی محصولات کشاورزی به ثبت رسیده است. در پژوهشی به‌طور موفقیت‌آمیز وابستگی مقدار سی‌تی به ترکیبات شیمیایی گوشت مشخص گردید همچنین روابط بین کلرید سدیم (نمک طعام) و مقدار سی‌تی مدل‌سازی شد (Haseth et al., 2007). در مطالعه‌ای ارتباط تغییرات خواص میوه سیب در فرآیند خشک‌کردن و عدد سی‌تی به‌دست‌آمده از تصویربرداری اشعه ایکس بررسی گردید. نتایج آزمایش‌ها وجود همبستگی مثبت رطوبت میوه با مقدار عدد سی‌تی (R^2= ۰/۶۴) را نشان داد (Jingping et al., 2003). محققان دیگر از جذب اشعه ایکس به‌عنوان شاخصی برای تشخیص کیفیت انبه بر اساس ارتباط آن با چگالی، رطوبت، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و pH استفاده کردند. آنها یک معادله رگرسیون بین عدد CT و خواص فیزیکوشیمیایی بر اساس ظرفیت جذب اشعه ایکس میوه به دست آوردند. عدد CT انبه سالم همبستگی مثبت با چگالی،

1 -Computed tomography

محتوای رطوبت و اسیدیته قابل تیتراسیون و همچنین همبستگی معکوس با مواد جامد محلول و pH داشت (Barcelon et al., 1999). در تحقیقی از تصویربرداری سی‌تی اسکن به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای تخمین برخی شاخص‌های کیفی میوه انار استفاده شد. رابطه مقادیر شاخص‌های کیفی و عدد سی‌تی که بیان‌گر مقدار جذب اشعه ایکس است در قالب مدل‌های رگرسیون خطی بررسی گردید. مطابق نتایج، همبستگی بین عدد سی‌تی و شاخص‌های کیفی در تمامی مدل‌ها بیش از ۰/۹ به دست آمد. عدد سی‌تی همبستگی مثبتی با اسیدیته قابل تیتراسیون و همبستگی منفی با میزان آنتوسیانین‌ها، pH و مواد جامد محلول نشان داد (سلمانی زاده و همکاران، ۱۳۹۲).

منطق فازی و سیستم استنتاج فازی تکنیک‌های جدید و کارآمدی هستند که در سال‌های اخیر برای شناسایی، طبقه‌بندی و مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی پیچیده استفاده می‌شوند (Ligus and Peternek, 2018). از این روش می‌توان برای پیش‌بینی و مدل‌سازی خصوصیات کیفی مواد غذایی بهره برد. سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی یا انفیس (ANFIS) یک شبکه تغذیه‌ای چندلایه است که در آنها از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و سیستم‌های استنتاج فازی برای مدل‌سازی و تعیین روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده می‌شود (Abbaspour-Gilandeh et al., 2020; Al-Mahasneh et al., 2016). فرایند استنتاج فازی شامل سه مفهوم مهم توابع عضویت، عملیات مجموعه فازی و قوانین استنتاج است. این سیستم تطبیق غیرخطی، ارتباط بین یک یا چند متغیر ورودی و یک متغیر خروجی را مشخص می‌کند و شامل سه مرحله فازی سازی، استنتاج و غیر فازی‌سازی است (Birle et al. 2013). در پژوهشی از منطق فازی برای طبقه‌بندی کیفی لیموشیرین پوشش‌دهی، شده با بهره‌گیری از دو الگوریتم، یکی با پنج ورودی (سفتی بافت، مواد جامد محلول، درصد رنگ سبز، حجم و رنگ پوست) و دیگری با سه ورودی حاصل از تصویر (درصد رنگ سبز، حجم و رنگ پوست) استفاده گردید. نتایج نشان داد که میانگین دقت الگوریتم طبقه‌بندی برای توابع عضویت گوسی، مثلثی و ذوزنقه‌ای به ترتیب ۰/۹۷۵، ۰/۹۳۱ و ۰/۹۶۰ بود. مدل بر مبنای شاخص‌های استخراجی از تصویر نیز عملکرد بسیار خوبی داشت (صحت ۰/۹۶۶). بهترین پیش‌بینی برای شاخص رسیدگی و سفتی بافت با مدل منطق فازی به‌ترتیب با توابع عضویت مثلثی (ضریب تبیین ۰/۹۹۹۶) و گوسی (ضریب تبیین ۰/۹۹۹۲) قابل‌دستیابی بود (زندی و همکاران، ۱۴۰۰). در تحقیقی روند تغییرات رطوبت سیر و موسیر در طی فرآیند خشک‌کردن توسط خشک‌کن بسترسیال با استفاده از روش‌های مدل‌سازی ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی مطالعه شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا در منطق فازی کمتر از شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های ریاضی بود (کاوه و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی، یک روش کارآمد برای تخمین رسیدگی میوه‌ها قبل از برداشت و بر اساس خصوصیات رنگی مبتنی بر استفاده از استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) پیشنهاد شد. سه مرحله اصلی روش پیشنهادی شامل پردازش داده، انتخاب ویژگی و پیاده‌سازی منطق فازی بود. نتایج نشان داد که دقت روش ANFIS از روش‌های شبکه عصبی، درخت تصمیم بیشتر بود (Kaur et al., 2021). در مطالعه‌ای برای پیش‌بینی و ارزیابی سریع و دقیق میزان آسیب‌دیدگی گلابی معطر، از روش‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی، شبکه عصبی رگرسیون تعمیم یافته و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان رسیدگی یا تغییر شکل میوه، میزان آسیب گلابی معطر به تدریج افزایش می‌یابد. مقایسه روش‌های پیش‌بینی نشان داد که ANFIS با مقادیر ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۹ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۴۶/۶ دقیق‌ترین روش تخمین صدمات میوه محسوب شد (Li et al., 2023). در یک بررسی خصوصیات رنگی، عطر و بو، طعم و احساس دهانی و همچنین pH، اسیدیته، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و میزان فنل کل نمونه‌های میوه شاه‌توت منجمد اندازه‌گیری و با استفاده از منطق فازی داده‌ها تحلیل شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل منطق فازی، نمونه‌های شاه‌توت در طی نگهداری انجمادی دچار کاهش pH و افزایش اسیدیته شدند (Aryaee et al., 2020). در تحقیقی سیستم استنتاج فازی تطبیقی با شبکه عصبی (ANFIS) برای پیش‌بینی حجم ضرب‌دیدگی ناشی از ضربات در سیب‌ها مورد استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی حجم ضرب‌دیدگی نسبت به مدل‌های رگرسیون بهتر عمل کردند. در میان مدل‌های ANFIS مختلف، مدل مبتنی بر تقسیم‌بندی شبکه، بهترین نتایج را نسبت به مدل زیر خوشه‌بندی نشان داد (Fazel et al., 2020). محققان خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میوه زالزالک را طی نگهداری در شرایط مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی پیش‌بینی کردند. مقادیر R^2 بالا و RMSE کم در نتایج، گویای کارایی بالای مدل شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی در پیش‌بینی خصوصیات کیفی زالزالک در شرایط مختلف بود (زندی و همکاران، ۱۳۹۸).

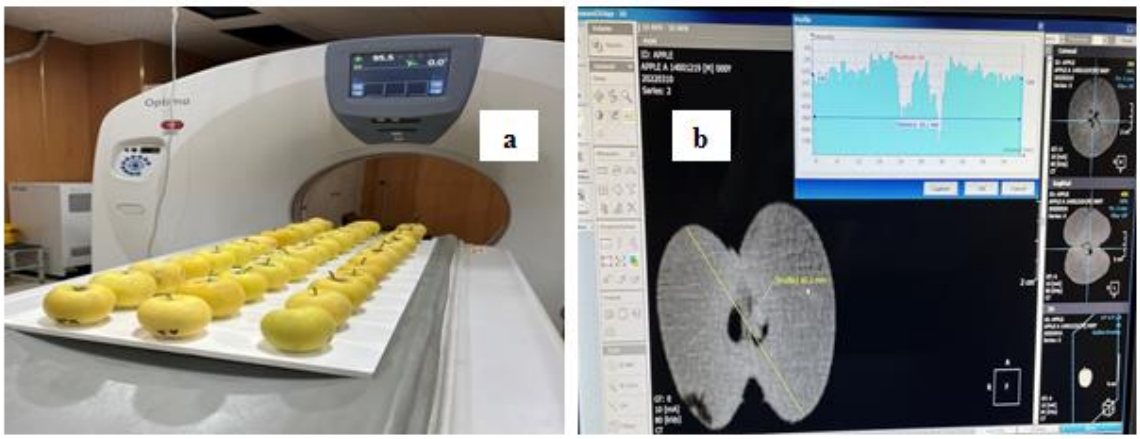
هدف اصلی در این تحقیق، بررسی امکان استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) در پیش‌بینی خصوصیات کیفی میوه سیب در فرایند انبارداری تحت شرایط کنترل دما بوده است. در صورت کسب نتایج قابل قبول، می‌توان تغییرات کیفی میوه در طی

انبارداری را بدون آزمون‌های مخرب و با صرف زمان و هزینه کم‌تر ارزیابی نمود. به این منظور خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیب رقم گلدن دلیشز طی شرایط انبارداری استخراج گردید. سپس با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) خصوصیات یادشده مدل‌سازی و پیش‌بینی شده و با مقادیر واقعی مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین خواص فیزیکوشیمیایی و عدد سی‌تی سیب رقم گلدن دلیشز، تعداد ۲۸۰ عدد سیب رقم گلدن دلیشز (از ارقام غالب منطقه) از یکی از باغات سیب شهرستان سمیرم اصفهان برداشت و جمع آوری شد. سپس سیب‌ها در دو گروه مساوی تقسیم و هر گروه به دو سردخانه یکی با دمای صفر و دیگری با دمای ۴ درجه سلسیوس منتقل شد. رطوبت هر دو سردخانه روی مقدار ۵±۸۵ درصد تنظیم گردید. در سردخانه‌های مذکور با توجه به تجهیز آنها به دستگاه‌های دماسنج و رطوبت‌سنج، امکان تنظیم این دو پارامتر فراهم بود. در پایان بازه‌های زمانی صفر (آغاز انبارداری)، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز پس از انبارداری، از هر انبار ۳۵ عدد سیب انتخاب و خصوصیات فیزیکوشیمیایی هرکدام شامل عدد سی‌تی، pH، سفتی یا مقاومت به نفوذ، رطوبت، چگالی یا جرم حجمی و مواد جامد محلول اندازه‌گیری شد.

به‌منظور اندازه‌گیری عدد سی‌تی و تهیه تصاویر سی‌تی اسکن از نمونه‌های سیب (آزمون غیر مخرب X-ray) از دستگاه سی‌تی اسکن مولتی اسلایس GE Healthcare مدل 12-5122080 با ولتاژ ۸۰ کیلو ولت و جریان ۱۰ میلی‌آمپر استفاده شد (شکل ۱a). برای این کار، اسکن‌های تهیه‌شده با این دستگاه، در محیط نرم‌افزار OnDemand فراخوانی و با استفاده از گزینه Draw Profile Line هیستوگرام اعداد سی‌تی رسم شد (شکل b ۱). در هیستوگرام رسم شده از هر نمونه، با انتخاب ۳۰ نقطه (برای افزایش دقت اندازه‌گیری و بر اساس تجربیات قبلی)، اعداد سی‌تی قرائت و میانگین این اعداد به‌عنوان عدد سی‌تی نمونه ثبت گردید.



شکل ۱- تصویربرداری سیب با دستگاه سی‌تی اسکن

برای تعیین رطوبت نمونه‌های سیب، در هر آزمایش بر اساس دما و زمان نگهداری، ۳۵ عدد سیب قبل و بعد از خشک‌کردن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت وزن گردید. رطوبت نمونه‌ها از رابطه (۱) به دست آمد (AOAC, 2005).

$$M.C=((m_1-m_2)/m_0)\times 100$$ رابطه ۱)

که در آن M.C درصد رطوبت، m_0 وزن نمونه اولیه، m_1 وزن ظرف و نمونه قبل از خشک‌کردن و m_2 وزن ظرف و نمونه بعد از خشک‌کردن می‌باشد. اندازه‌گیری pH، بر اساس مرجع AOAC (1999) انجام شد. در این روش ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده با آبمیوه‌گیری از ۳۵ عدد سیب، توسط کاغذ صافی صاف‌شده و به‌وسیله آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس با قرار دادن پروب دستگاه pH متر دیجیتالی داخل آن، pH اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سفتی سیب‌ها لایه نازکی از پوست ۳۵ عدد سیب در دو سمت مقابل هم کمی بالاتر از خط استوایی با قطر ۱ سانتی‌متر مربع جدا و سپس با استفاده از نفوذسنج (شکل ۲) با قطر ۱۱ میلی‌متر مربع و فشار عمود به گوشت میوه میزان سفتی بافت برحسب کیلوگرم بر سانتی مترمربع تعیین گردید (آزادشهرکی و کفاشان، ۱۳۹۶). از اعداد به‌دست‌آمده برای هر میوه در نهایت با گرفتن میانگین یک عدد به دست آمد.

شکل ۰۲- دستگاه نفوذسنج مورد استفاده در آزمایش‌ها

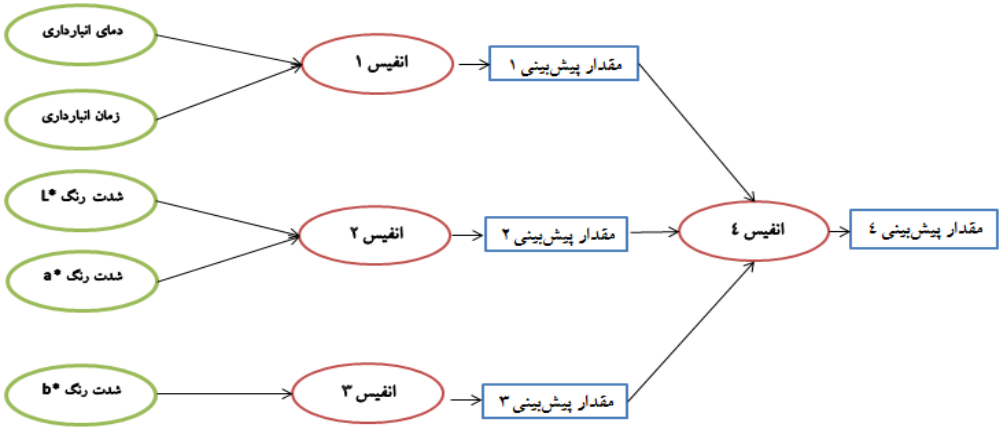
به‌منظور اندازه‌گیری چگالی میوه‌ها ابتدا وزن ۳۵ عدد میوه با استفاده از یک ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سپس حجم هر میوه از طریق میزان جابجایی آب یک استوانه مدرج در زمان غوطه‌ور شده سیب در آن ثبت گردید. با تقسیم وزن هر میوه بر حجم آن، چگالی میوه به دست آمد. مواد جامد محلول ۳۵ عدد سیب توسط دستگاه رفرکتومتر دستی مدل آتاگو ۱۲، ساخت ژاپن اندازه‌گیری و برحسب درصد بریکس گزارش گرفته شد (Anon, 2004). به این صورت که چند قطره از عصاره حاصل از میوه بر روی منشور دستگاه قرار داده و جلوی نور گرفته شد تا شکست نور و عدد حاصل از آن‌که معرف درصد کل املاح جامد محلول است، به دست آید.

شاخص‌های رنگی نمونه‌های ۳۵ عددی سیب قبل از انجام آزمون‌های مخرب، پس از انبارداری در دماهای صفر و ۴ درجه سلسیوس و طی بازه‌های زمانی صفر، ۴۵، و ۱۳۵ روز با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج دیجیتال لاترون مدل RGB-1002 در فضای RGB اندازه‌گیری شده و سپس به مؤلفه‌های فضای رنگ $L^* a^* b^*$ در فضای رنگ CIELAB تبدیل گردید (Dobrzanski and Rybczynski, 2002). L^* مؤلفه روشنایی یا درخشندگی (۰ تا ۱۰۰)، a^* دامنه سبز تا قرمز (۱۲۰- تا ۱۲۰+) و b^* دامنه آبی تا زرد (۱۲۰- تا ۱۲۰+) هستند (Liu et al., 2014). پس از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکو شیمیایی و شاخص‌های رنگی میوه، به منظور بررسی اثر شرایط نگهداری بر خصوصیات میوه سیب از طرح آماری کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات) در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در ۴ تکرار استفاده شد که در آن‌ها تیمارهای کرت‌های اصلی شامل دو سطح دمای انبار صفر و ۴ درجه سلسیوس و تیمارهای کرت‌های فرعی چهار سطح زمان انبارداری سیب شامل صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز بود. تجزیه واریانس داده‌های حاصل با استفاده از نرم افزار SPSS و مقایسه و گروه بندی میانگین‌ها با استفاده از روش چند دامنه‌ای دانکن توسط نرم افزار Mstatc انجام شد.

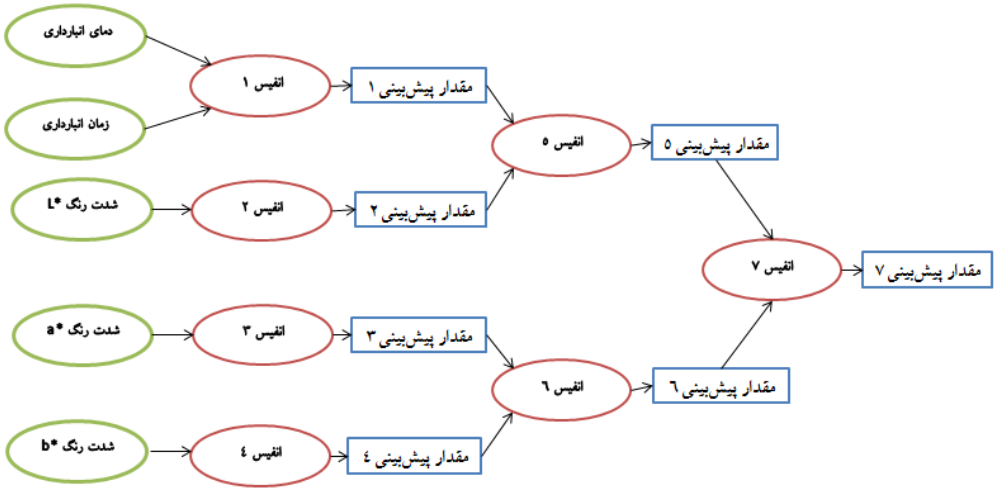
به‌منظور مدل‌سازی خصوصیات فیزیکوشیمیایی میوه سیب، سه شاخص رنگی L^* ، a^* و b^*، دمای انبارداری و طول مدت انبارداری، مجموعاً ۵ ورودی، در نظر گرفته شد و به کمک روش ANFIS، خصوصیات میوه شامل عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول مدل‌سازی گردید. با توجه به المان‌های یک مدل انفیس شامل تعداد انفیس‌ها (۴تا ۸ انفیس)، ترکیب ورودی انفیس‌ها، نوع تابع عضویت ورودی (مثلثی، گوسی، زنگوله‌ای و ذوزنقه)، نوع تابع عضویت خروجی (ثابت و خطی نوع ذوزنقه‌ای و مثلثی)، تعداد توابع عضویت، اپوک (تعداد اجرای برنامه تا رسیدن به کمترین مقدار خطا) و الگوریتم یادگیری یا آموزش (هیبرید، شیب پس انتشار و روش حداقل مربعات)، ترکیب و انتخاب این موارد بر اساس اجرای مدل‌های مختلف و به دست آوردن حداقل خطاها حاصل شد. بر این اساس بهترین مدل‌ها در حالت ۴ و ۷ انفیس به دست آمد. برای انتخاب بهترین ساختار سیستم انفیس (بالاترین دقت و کمترین خطا)، برای هر خصوصیت کیفی میوه، ۵۴ مدل اجرا گردید که این تعداد مدل از حالات متفاوت تعداد انفیس‌ها شامل چهار و هفت انفیس (شکل ۳ و ۴)، نوع توابع عضویت ورودی (مثلثی، زنگوله‌ای، گوسی)، درصد داده‌های آموزش (۷۵٪، ۸۰٪ و ۸۴٪) و همچنین تعداد متغیر دوره (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ اپوک) حاصل شد. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های انفیس و مقایسه آن‌ها با یکدیگر از شاخص‌های (R^2)[1]، (RMSE)[2]، (MAPE)[3] و (EF)[4] طبق روابط زیر استفاده شد (Pahlavan et al., 2012؛ Marzban et al., 2021):

---

[1]. Coefficient of determination
[2]. Root means square error
[3]. Mean absolute percentage error
[4]. Efficiency factor



شکل ۳- آرایش مدل ۴ انفیسی پیشنهادی برای پیش‌بینی خصوصیات کیفی سیب



شکل ۴- آرایش مدل ۷ انفیسی پیشنهادی برای پیش‌بینی خصوصیات کیفی سیب

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} t_i^2}\right] \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_i - z_i)^2} \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$MAPE(\%) = \frac{100}{n}\sum_{t=1}^{n}\left|\frac{(t_i - z_i)}{t_i}\right| \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(t_i - \overline{z_i})^2}\right] \quad \text{رابطه ۴)}$$

که t_i و z_i، به ترتیب مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده برای بردارهای آموزش، $\overline{z_i}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n، تعداد کل بردارهای آموزش می‌باشد. کد نویسی مربوط به عملیات مدل‌سازی در مدل‌های انفیس، توسط نرم‌افزار MATLAB V7.14-R2017 انجام گرفت. بهترین عملکرد مدل‌ها زمانی به دست می‌آید که معیارهای خطا شامل MAPE و RMSE حداقل و معیارهای عملکردی شامل EF و R^2 حداکثر و نزدیک به یک باشند.

نتایج و بحث

خلاصه مقایسه میانگین‌های خواص فیزیکو شیمیایی سیب شامل عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول طی نگهداری در دو دمای انبار صفر و ۴ درجه سلسیوس و طی زمان‌های صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ روز انبارداری در جدول ۱ و خلاصه مقایسه میانگین‌های شاخص رنگی میوه در جدول ۲ ارائه‌شده است. در ادامه، بهترین مدل‌های پیش‌بینی خواص مذکور با استفاده از سامانه استنتاج

فازی–عصبی تطبیقی بررسی می‌گردد. (برای تمامی خواص، از ارائه نتایج مدل‌هایی که مقادیر آماری R^2 آنها کمتر از بهترین مدل بوده صرف‌نظر شده است).

جدول ۱- مقادیر میانگین و انحراف معیار خواص فیزیکوشیمیایی سیب در شرایط انبارداری

طول مدت انبارداری (روز)	دمای انبار (°C)	خواص فیزیکوشیمیایی سیب					
		عدد سی‌تی	میزان pH	سفتی سیب (نیوتن)	رطوبت (درصد)	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مواد جامد محلول (درصد بریکس)
۰	۰ °C	-۸۷/۱۸±۶۲/۲۸c	۳/۰±۷۰/۱۰b	۴۰/۴±۹۰/۳۲a	۸۲/۰±۸۱/۰۱۶a	۰/۰±۸۰۶/۰۶۱a	۱۴/۰±۹۵/۴۱c
	۴ °C	-۸۷/۵۱±۶۲/۴۱c	۳/۰±۶۹/۱۰b	۴۰/۴±۹۱/۳۲a	۸۲/۰±۶۴/۰۱a	۰/۰±۸۰۵/۰۶a	۱۴/۰±۹۶/۴۱c
۴۵	۰ °C	-۹۸/۵±۴۸/۸۷c	۳/۰±۷۷/۰۵b	۳۷/۱±۱۱/۰۴ab	۸۲/۰±۷۳/۰۰۳a	۰/۰±۷۸۳/۰۱ab	۱۵/۰±۱۵/۳۰bc
	۴ °C	-۱۵۶/۲۷±۷۰/۹۵b	۳/۰±۷۸/۱۰b	۳۴/۰±۹۵/۹۸b	۸۱/۰±۵۰/۰۱ab	۰/۰±۷۴۲/۰۳ab	۱۵/۰±۲۲/۳۵bc
۹۰	۰ °C	-۱۲۸/۳۳±۶۰/۵۰b	۳/۰±۷۸/۳۵b	۳۷/۰±۵۱/۴۳ab	۸۱/۰±۸۵/۰۰۷b	۰/۰±۷۶۰/۰۶b	۱۵/۰±۴۰/۷۳bc
	۴ °C	-۲۰۵/۶±۳۰/۵۶a	۳/۰±۸۱/۰۲b	۳۳/۱±۷۳/۱۸b	۷۹/۰±۷۷/۰۰۵c	۰/۰±۶۹۵/۰۲bc	۱۵/۱±۷۰/۱۸b
۱۳۵	۰ °C	-۱۴۵/۲۵±۳۹/۵۶b	۴/۰±۱۳/۱۰a	۳۵/۱±۵۴/۲۸b	۸۰/۰±۸۴/۰۱c	۰/۰±۷۲۰/۰۶b	۱۵/۰±۷۰/۵۳b
	۴ °C	-۲۱۷/۷±۸۲/۸۶a	۴/۰±۲۴/۰۱a	۲۳/۲±۸۷/۱۶c	۷۸/۰±۳۳/۰۰۹d	۰/۰±۶۴۱/۰۳c	۱۷/۰±۳۰/۱۴a

در هر ستون، اعداد دارای حرف مشترک، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

جدول ۲- مقادیر میانگین و انحراف معیار شاخص‌های رنگی سیب

طول مدت انبارداری (روز)	شاخص‌های رنگی سیب					
	شدت رنگی L*		شدت رنگی a*		شدت رنگی b*	
	۰ °C	۴ °C	۰ °C	۴ °C	۰ °C	۴ °C
۰	۵۸/۲±۸۶/۷۴ab	۵۷/۱±۸۷/۳۵ab	۱/۱±۲۸/۴۱b	۱/۱±۰۱/۵۴b	۳۵/۱±۱۴/۵۸bc	۳۵/۱±۶۴/۵۵bc
۴۵	۵۷/۴±۱۷ab	۵۹/۲±۸۸/۱۷a	۱/۱±۰۱/۱۰bc	-۱/۱±۸۲/۵۵d	۳۵/۲±۹۷/۳۶bc	۳۷/۱±۱/۵۷abc
۹۰	۵۵/۱±۴۷/۱۱c	۵۲/۳±۹/۰۵c	۱/۱±۴۹/۱۰b	۴/۰±۰۶/۷۴b	۳۵/۱±۵۹/۱۵bc	۳۸/۴±۴۸/۱۷ab
۱۳۵	۵۴/۰±۳۴/۸۵c	۵۴/۱±۹۶/۷۷c	۲/۰±۶۴/۹۳b	۶/۰±۳۶/۳۱a	۳۴/۱±۱۵/۲۸c	۳۹/۱±۸۹/۵۰a

در هر شاخص رنگی، اعداد دارای حرف مشترک، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

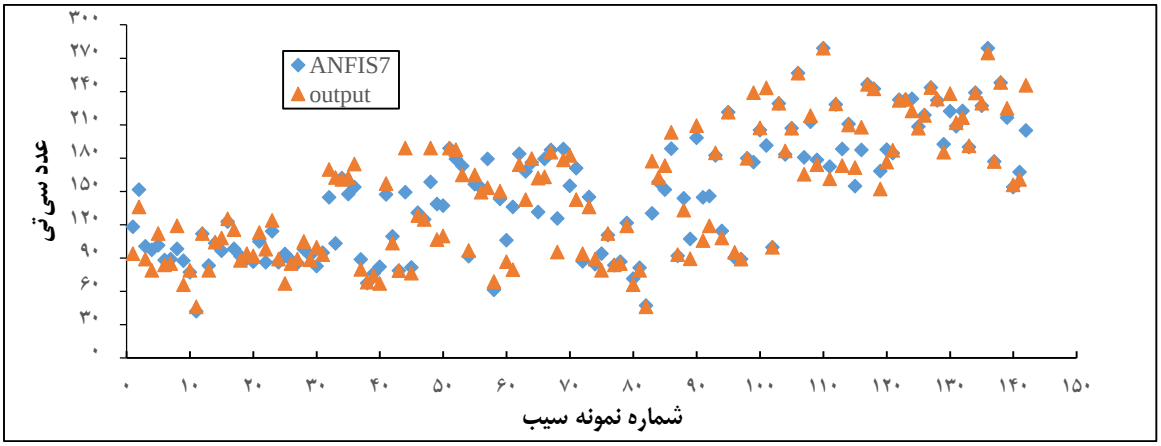
مدل‌سازی عدد سی‌تی میوه سیب

در تحقیقات متعددی ارتباط مشخصه‌های تصاویر اشعه ایکس منجمله عدد سی‌تی با خواص کیفی محصولات غذایی به ثبت رسیده است (سلمانی زاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ Barcelon et al., 1999; Jingping et al., 2003). به‌این‌ترتیب می‌توان با تهیه تصاویر اشعه ایکس از محصولات مختلف و محاسبه عدد سی‌تی، برخی از خواص کیفی محصول را پیش‌بینی نمود. در تحقیق حاضر عدد سی‌تی مانند سایر خواص کیفی سیب، مدل‌سازی گردید. مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عدد سی‌تی محصول در جدول ۳ آمده است. مطابق نتایج جدول ۳، بهترین مدل در پیش‌بینی عدد سی‌تی، تابع عضویت ورودی از نوع گوسی، تابع خروجی از نوع خطی، الگوریتم یادگیری از نوع هیبرید، درصد داده آموزشی ۸۴ درصد و دوره اجرای برنامه در اپوک ۱۰۰ بوده است. شکل ۵ توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط بهترین مدل پیشنهادی نمایش داده‌شده است. این شکل (و شکل‌های مشابه بعدی) روند تغییرات و میزان اختلاف داده‌های واقعی (نقاط قرمز) از داده‌های پیش‌بینی شده (نقاط آبی) در بهترین حالت انفیس نهایی (انفیس هفتم) را مشخص می‌نماید. هر چه پراکنش این داده‌ها کمتر باشد، میزان دقت مدل بالاتر و اطمینان به آن بیشتر است.

طبق نتایج حاصل، با برآورد مقدار عدد سی‌تی با استفاده از مدل انفیس و بدون نیاز به تصویربرداری اشعه ایکس، می‌توان سایر خصوصیات کیفی میوه را تخمین زد. محققان دیگر از جذب اشعه ایکس به‌عنوان شاخصی برای تشخیص کیفیت انبه بر اساس ارتباط آن با چگالی، رطوبت، مواد جامد محلول، اسیدیته قابل تیتراسیون و pH استفاده کردند. آنها یک معادله رگرسیون بین عدد توموگرافی کامپیوتری (CT) و خواص فیزیکوشیمیایی میوه به دست آوردند. بر اساس نتایج، عدد سی‌تی انبه سالم همبستگی مثبت با چگالی، محتوای رطوبت و اسیدیته قابل تیتراسیون و همچنین همبستگی منفی با مواد جامد محلول و pH داشت. نتایج آنها نشان داد که اندازه‌گیری عدد سی‌تی میوه سالم می‌تواند به‌عنوان یک شاخص غیر مخرب در تعیین کیفیت انبه استفاده شود (Barcelon et al., 1999).

جدول ۳- مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عدد سی‌تی محصول

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		الگوریتم یادگیری	آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک		R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۸۷	۳۵/۷۴۳	۲۳/۷۲۲	۰/۶۱۹
انفیس۲	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۵۰	۵۱/۶۸۷	۳۶/۰۵۰	۰/۲۲۸
انفیس۳	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۷۷	۵۰/۸۶۰	۳۴/۷۴۴	۰/۱۹۸
انفیس۴	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۴۶	۵۱/۸۱۸	۳۴/۷۸۵	۰/۷۲۱
انفیس ۵	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۵۳	۳۰/۶۰۷	۱۸/۴۵۵	۰/۹۴۶
انفیس ۶	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۷۴	۳۶/۶۶۵	۲۲/۵۰۳	۰/۸۲۳
انفیس۷	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۹۰۹	۲۴/۳۳۱	۱۱/۳۱۹	۰/۸۹۹



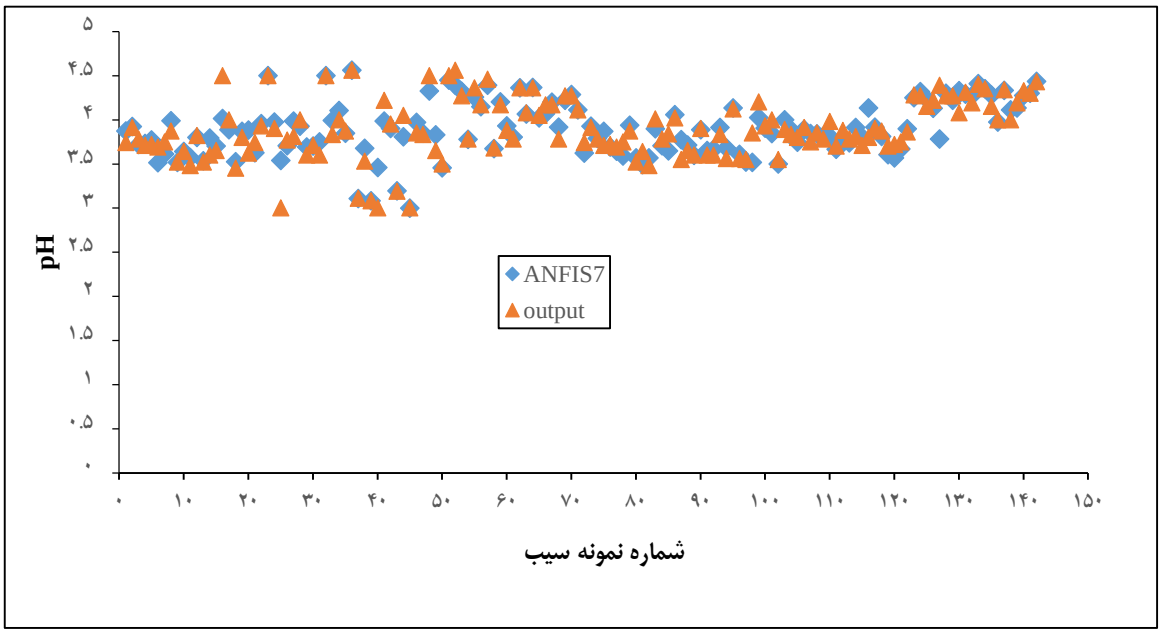
شکل ۵- نمودار پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده عدد سی‌تی سیب در بهترین مدل انفیس

مدل‌سازی میزان pH میوه سیب

محققان نشان داده‌اند که طی انبارمانی، pH سیب افزایش می‌یابد. از جمله دلایل این روند، فعالیت‌های بیوشیمیایی داخل میوه است که طی آن مواد اسیدی موجود به فرآیندهای قندی تبدیل می‌شود (Park et al., 2006). مقایسه مدل‌های مختلف اجراشده نشان داد که بهترین مدل مربوط به تابع عضویت ورودی از نوع مثلثی و عضویت خروجی از نوع خطی با ۱۰۰ اپوک و ۸۴ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده آموزشی بوده است (جدول ۴). در شکل ۶ توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مقادیر pH سیب توسط بهترین مدل پیشنهادی نمایش داده‌شده است. در تحقیقی با هدف تعیین برخی خصوصیات میوه انگور مانند شاخص طعم، pH، سفتی، تعداد کپک و پذیرش عمومی در محدوده زمان ۰ تا ۶۰ روز نگهداری در سردخانه، از منطق فازی به عنوان یک سیستم خبره استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل به دست آمده با ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۹۶ و سرعت بسیار بالا بر اساس زمان ذخیره میوه می‌توانست این ویژگی‌های محصول را پیش‌بینی و تعیین کند (Ebrahimi et al., 2024).

جدول ۴- مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان pH سیب

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		الگوریتم یادگیری	آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک		R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۵۸۶	۰/۲۶۶	۴/۸۰۴	۰/۳۴۳
انفیس۲	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۱۷۸	۰/۳۲۳	۰/۳۱۶	۰/۰
انفیس۳	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۲۴	۰/۲۹۸	۰/۲۹۸	۰/۲۶۵
انفیس۴	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۱۵	۰/۲۹۹	۰/۲۹۹	۰/۲۳۲
انفیس ۵	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۶۴۰	۰/۲۵۲	۰/۲۵۲	۰/۳۷۰
انفیس ۶	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۲۱	۰/۱۸۸	۰/۱۸۸	۰/۶۴۵
انفیس۷	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۹۱۲	۰/۱۳۴	۰/۱۳۴	۰/۸۳۹



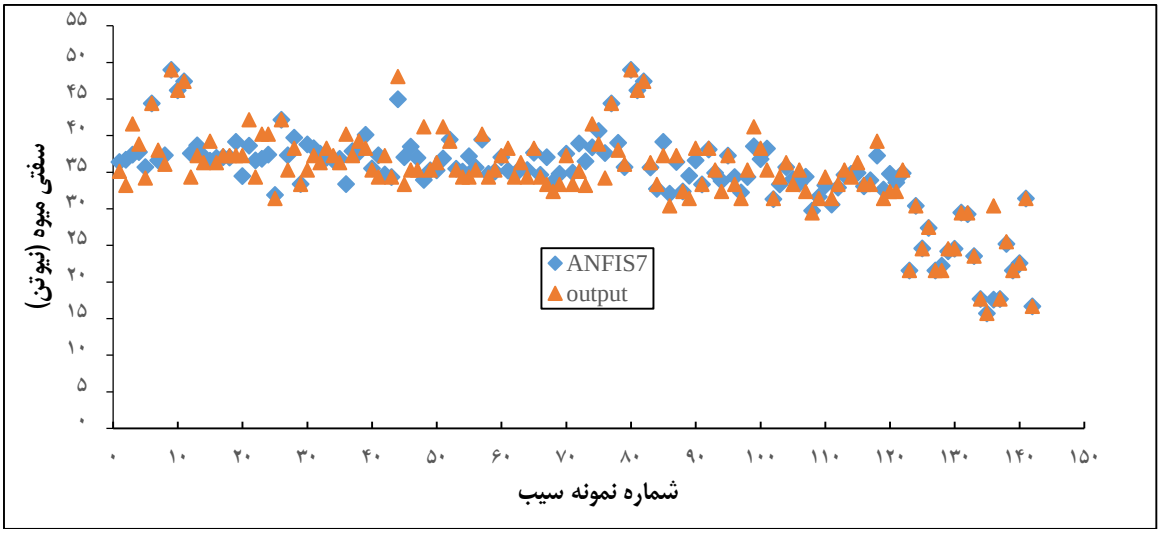
شکل ۶- نمودار پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده میزان pH سیب در بهترین مدل انفیس

مدل‌سازی میزان سفتی میوه سیب

تغییرات فیزیولوژیکی میوه در طول دوره نگهداری منجر به کاهش سفتی آن می‌شود (Lu, 2004 ؛Peng and Lu, 2007). مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان سفتی محصول در جدول ۵ نمایش داده‌شده است. بهترین مدل شامل تابع عضویت ورودی از نوع گوسی، تابع خروجی از نوع خطی، الگوریتم یادگیری از نوع هیبرید، درصد داده آموزشی ۸۴ درصد و دوره اجرای برنامه در اپوک ۱۰۰ بوده است. شکل ۷ توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط بهترین مدل پیشنهادی نمایش داده‌شده است. در تحقیقی از یک سیستم استنتاج فازی (FIS) و یک سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) برای طبقه‌بندی کیفیت کلی سیب بر اساس برخی ویژگی‌های کیفیت میوه، مثل وزن میوه، سفتی، جامدات محلول و رنگ پوست استفاده شد. مدل FIS طی سه سال آزمایش به ترتیب ۸۳/۵۴، ۹۲/۷۳ و ۹۶/۳۶ درصد مطابقت با نتایج کارشناس انسانی را نشان داد، درحالی‌که دقت ANFIS کمتر بود (Papageorgiou et al., 2018). در مطالعه‌ای برای پیش‌بینی انتشار حجم کوفتگی گلابی در طول انبارداری از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی ۵ لایه با تابع عضویت گوسی استفاده شد. طبق نتایج، ضریب تبیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۰/۹۳۳۶ و $۱۰^{-۹} \times ۸۳۴/۵۱$ متر مکعب به دست آمد (Razavi et al., 2020).

جدول۵- مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان سفتی محصول

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		الگوریتم یادگیری	آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک		R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۰۷	۳/۵۵۶	۸/۵۳۲	۰/۶۵۲
انفیس۲	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۳۷۰	۵/۵۹۳	۱۲/۵۸۵	۰/۱۸۵
انفیس۳	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۵۷۴	۴/۹۳۸	۱۱/۲۱۴	۰/۳۲۷
انفیس۴	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۳۲	۵/۴۳۳	۱۲/۷۳۸	۰/۲۲۶
انفیس ۵	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۷۸	۲/۸۸۳	۶/۲۰۶	۰/۷۷۰
انفیس ۶	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۱۱	۳/۵۳۲	۷/۳۲۱	۰/۶۵۷
انفیس۷	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۹۵۰	۱/۸۶۲	۳/۲۹۸	۰/۹۰۴



شکل ۷ - نمودار پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده میزان سفتی سیب در بهترین مدل انفیس

مدل‌سازی رطوبت میوه سیب

کاهش وزن میوه در زمان انبارداری، عمدتاً ناشی از کاهش رطوبت و از دست دادن آب میوه در اثر تغییر خصوصیات پوشش میوه و تسهیل خروج آب است (Veravrbeke et al., 2003). بهترین آرایش انفیس چندلایه در پیش‌بینی میزان رطوبت سیب، یک مدل هفت انفیسی با تابع ورودی زنگوله‌ای شکل، ۸۴ درصد میزان داده‌های آموزشی و تابع خروجی از نوع خطی در ۱۰۰ اپوک (جدول ۶) می‌باشد. در شکل ۸، توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط بهترین مدل پیشنهادی نمایش داده‌شده است. در مطالعه‌ای قابلیت روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج عصبی فازی تطبیقی در مدل‌سازی و پیش‌بینی کاهش رطوبت در خشک‌کردن برش‌های Cocoyam (Colocasia taro) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های روش سطح پاسخ، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج عصبی فازی تطبیقی به ترتیب با مقادیر ضریب تبیین ۰/۹۵۸۳، ۰/۹۵۱۹ و ۰/۹۹۷۱ توانایی مدل‌سازی و پیش‌بینی مقدار رطوبت را نشان دادند (Onu et al., 2022).

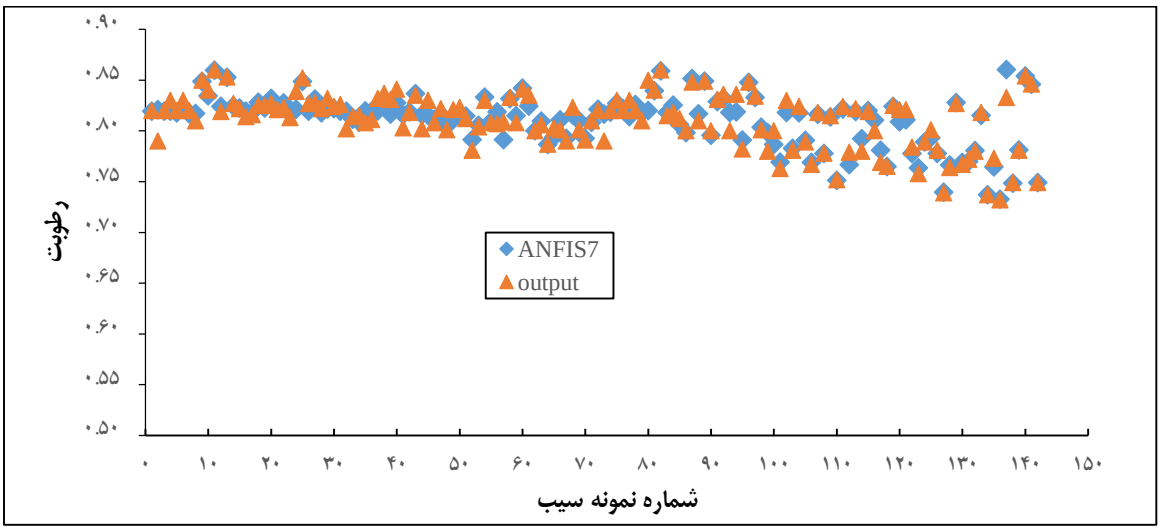
جدول ۶- مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش¬بینی رطوبت محصول سیب

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		الگوریتم یادگیری	آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک		R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۵۷۱	۰/۰۲۱	۲/۰۵۱	۰/۳۲۶
انفیس۲	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۱۰	۰/۰۲۳	۲/۲۶۵	۰/۱۶۸
انفیس۳	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۳۳	۰/۰۲۳	۲/۳۱۷	۰/۱۸۷
انفیس۴	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۵۴۵	۰/۰۲۲	۲/۰۵۵	۰/۲۹۷
انفیس ۵	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۲۴	۰/۰۱۸	۱/۶۷۸	۰/۵۲۴
انفیس ۶	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۳۵	۰/۰۱۴	۱/۲۸۸	۰/۶۹۷
انفیس۷	زنگوله‌ای	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۹۴۵	۰/۰۰۸	۰/۷۲۹	۰/۸۹۳

مدل‌سازی میزان چگالی محصول سیب

تغییرات عمده چگالی با توجه به تغییرات اندک حجم میوه در زمان انبارداری، مربوط به کاهش وزن میوه است. از دست دادن آب و کاهش رطوبت میوه در طول انبارداری در اثر تغییر خصوصیات پوشش میوه، عامل کاهش وزن آن است. بهترین آرایش انفیس چندلایه در پیش‌بینی میزان چگالی سیب، یک مدل هفت انفیسی با تابع ورودی گوسی شکل، ۸۴ درصد میزان داده‌های آموزشی و تابع خروجی از نوع خطی در ۱۰۰ اپوک (جدول ۷) بود. در شکل ۹، توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط بهترین مدل پیشنهادی (هفت انفیس-تابع ورودی زنگوله‌ای، تابع خروجی خطی، ۱۰۰ اپوک و ۸۴ درصد داده‌ی آموزشی) نمایش داده‌شده است. در مطالعات دیگر از تکنیک فازی برای درجه‌بندی سیب استفاده شد. نتایج درجه‌بندی به‌دست‌آمده، ۸۹ درصد تطابق کلی را با نتایج درجه‌بندی کارشناس انسانی نشان داد

(Kavdir and Guyer, 2003). در تحقیقی به تعیین برخی ویژگی‌ها از جمله ابعاد فیزیکی، مساحت سطح، کرویت، چگالی و انرژی گسیختگی دانه‌های کدو تنبل با استفاده از روش‌های پرسپترون چندلایه و سیستم‌های استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) پرداخته شد. برای ارزیابی عملکرد روش‌های یاد شده از پارامترهای آماری مختلف مانند ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. نتایج از برتری مدل‌سازی ANFIS حکایت داشت (Yildirim et al., 2024).



شکل ۸- پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده رطوبت سیب در بهترین مدل انفیس

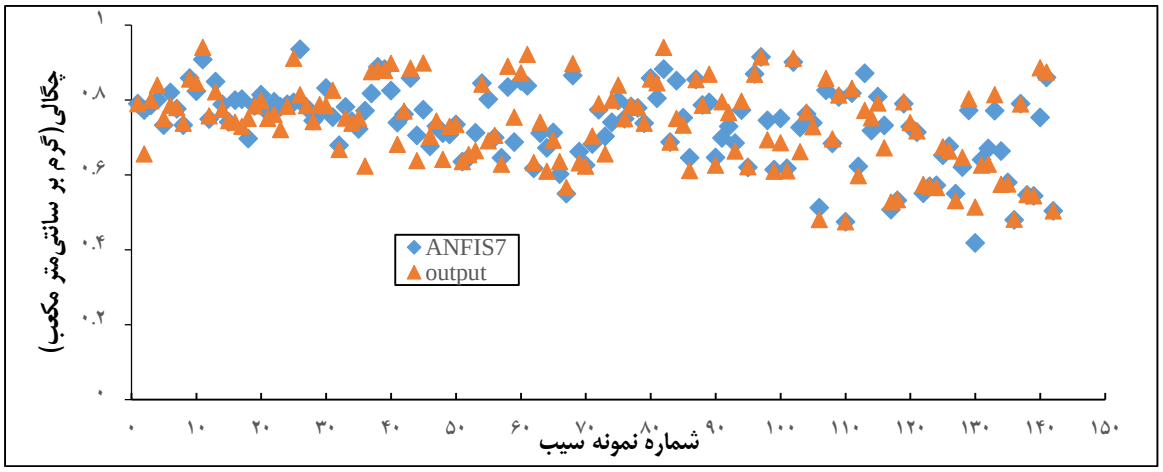
جدول۷- مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان چگالی سیب

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت			آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک	الگوریتم یادگیری	R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۶۲	۰/۰۹۶	۱۰/۹۳۶	۰/۲۱۲
انفیس۲	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۳۵۷	۰/۱۰۱	۱۱/۶۹۶	۰/۱۲۴
انفیس۳	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۳۵۳	۰/۱۰۲	۱۱/۸۰۶	۰/۱۸۸
انفیس۴	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۳۴	۰/۰۹۸	۱۱/۴۲۰	۰/۲۰۵
انفیس ۵	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۶۵۲	۰/۰۸۳	۸/۹۰۰	۰/۴۲۵
انفیس ۶	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۹۲	۰/۰۶۶	۶/۷۴۶	۰/۶۲۷
انفیس۷	گوسی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۹۱۰	۰/۰۴۵	۷/۲۲۳	۰/۸۲۸

مدل‌سازی میزان مواد جامد محلول میوه سیب

میزان مواد جامد محلول یکی از شاخص‌های اصلی رسیدگی میوه‌ها به شمار می‌آید. افزایش مواد جامد محلول به دلیل تبدیل نشاسته به قندهای محلول رخ می‌دهد. نشاسته از ترکیبات ذخیره‌ای سیب به شمار می‌آید که طی رشد میوه انباشته می‌شود و تجزیه آن پیش از بلوغ میوه، منبع عمده قندهای میوه است که منجر به شیرینی میوه می‌شود (هادیان دلجو و ساری‌خانی، ۱۳۹۱). در مدل‌سازی این شاخص مشخص شد که بهترین نتایج در مدل هفت انفیسی با تابع عضویت ورودی مثلثی و تابع عضویت خروجی خطی، ۸۴ درصد داده آموزشی و در ۱۰۰ اپوک اتفاق افتاد (جدول ۸). توزیع داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی برای انفیس هفتم در شکل ۱۰ نمایش داده‌شده است. در تحقیقی از مدل‌های رگرسیون چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مواد جامد محلول میوه هلو با استفاده از خصوصیات رنگ، وزن میوه و حجم آب میوه استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نسبت به رگرسیون چندگانه به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۸۴ دقت بیشتری داشت (Abdel-Sattar et al., 2021). در مطالعه‌ای به بررسی درجه آسیب

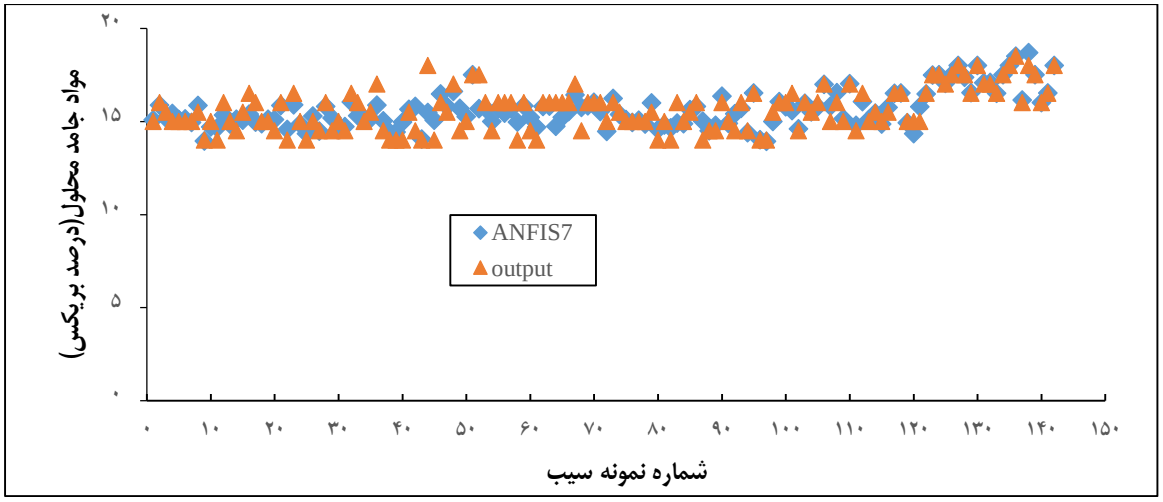
و اثرات زمان نگهداری بر کیفیت داخلی گلابی معطر در طول ذخیره‌سازی پرداخته شد و کیفیت داخلی گلابی معطر را با استفاده از استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) پیش‌بینی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که سختی و محتوای مواد جامد محلول گلابی معطر با افزایش زمان نگهداری کاهش می‌یابد. با توجه به زمان نگهداری یکسان، سختی و محتوای مواد جامد محلول گلابی‌های معطر با درجه آسیب همبستگی منفی داشت. بهترین عملکردهای پیش‌بینی برای سختی و محتوای مواد جامد محلول گلابی‌های معطر توسط ANFIS با استفاده از تابع عضویت ورودی مثلثی به دست آمد (Liu et al., 2023).



شکل ۹- پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده میزان چگالی سیب در بهترین مدل انفیس

جدول ۸ - مشخصات بهترین مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی میزان مواد جامد سیب

عنوان	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		الگوریتم	آزمون			
	ورودی	خروجی	ورودی	اپوک	یادگیری	R^2	RMSE	MAPE (%)	EF
انفیس۱	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۶۴۹	۰/۸۴۲	۴/۴۰۳	۰/۴۲۱
انفیس۲	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۳۵۹	۱/۰۳۷	۵/۳۵۱	۰/۱۲۸
انفیس۳	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۶۴	۰/۹۸۳	۵/۱۱۴	۰/۲۱۵
انفیس۴	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۴۴۵	۰/۹۹۳	۵/۰۲۴	۰/۱۹۸
انفیس ۵	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۲۳	۰/۷۶۶	۳/۸۱۵	۰/۵۲۲
انفیس ۶	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۷۷۹	۰/۶۹۵	۳/۳۱۲	۰/۶۰۶
انفیس۷	مثلثی	خطی	۷،۷	۱۰۰	هیبرید	۰/۸۸۴	۰/۵۳۷	۲/۳۴۰	۰/۷۸۱



شکل ۱۰- پراکنش مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده میزان مواد جامد محلول سیب در بهترین مدل انفیس

خلاصه بهترین مدل‌های ذکر شده در جدول ۹ درج‌شده است. در این جدول میزان ضریب تبیین پس از اجرای مدل‌های متعدد در مورد هر یک از خصوصیات کیفی، در بالاترین مقدار خود ارائه شد. به دلیل تعداد کم بودن ورودی‌ها (سه شاخص رنگی، دما و طول انبارداری) نمی‌توان انتظار مقادیر بالاتری برای ضریب تبیین داشت. در اکثر مطالعات مربوط به تحلیل خواص محصولات کشاورزی، تعداد متغیرها بیشتر از ۸ مورد است و طبیعتاً میزان دقت نزدیک به عدد یک به دست می‌آید. به منظور افزایش دقت نتایج مدل‌سازی باید تا حد ممکن چند متغیر ورودی دیگر به پنج ورودی مورد بررسی، اضافه گردد.

بر اساس نتایج جدول ۹، برای فاکتورهای عدد سی‌تی، pH و مواد جامد محلول تابع عضویت ورودی از نوع مثلثی، برای میزان سفتی و رطوبت تابع عضویت ورودی از نوع زنگوله‌ای و برای چگالی تابع عضویت ورودی از نوع گوسی به‌عنوان برترین مدل‌های پیش‌بینی شناسایی شدند. برترین مدل‌ها در آرایش‌های هفت انفیسی با تعداد ۱۰۰ اپوک و ۸۴٪ از داده‌ها به‌عنوان آموزش اتفاق افتاد. همچنین طبق نتایج، دو فاکتور میزان سفتی و رطوبت میوه با دقت بالاتری نسبت به فاکتورهای دیگر شناسایی شدند.

جدول ۹- مشخصات و مقایسه بهترین انفیس‌های مربوط به هر فاکتور در سنجش کیفیت محصول سیب

فاکتورهای سنجش	تعداد مدل اجراشده	تعداد مدل‌های برتر (R^2>0.8)	برترین مدل پیشنهادی	تعداد انفیس، تعداد اپوک و درصد آموزش برترین مدل	ضریب تبیین (R^2) برترین مدل	میانگین درصد خطای مطلق برترین مدل (MAPE)
عدد سی‌تی	۵۴	۵	مثلثی	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۹۰۹	۱۱/۳۱۹
میزان سفتی	۵۴	۶	زنگوله‌ای	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۹۵۰	۳/۲۹۸
pH	۵۴	۷	مثلثی	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۹۱۲	۰/۱۳۴
چگالی	۵۴	۶	گوسی	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۹۱۰	۷/۲۲۳
مواد جامد محلول	۵۴	۶	مثلثی	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۸۸۴	۲/۳۴۰
رطوبت	۵۴	۶	زنگوله‌ای	هفت، ۱۰۰، ۸۴٪	۰/۹۴۵	۰/۷۲۹

نتیجه‌گیری کلی

ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات خواص میوه، گام مهمی در جهت ایجاد شرایط مناسب نگهداری برای حفظ ارزش تغذیه‌ای و اقتصادی محصول می‌باشد. طبق نتایج تحقیق حاضر، متوسط مقادیر عدد سی‌تی، pH، سفتی، رطوبت، چگالی و مواد جامد محلول سیب رقم گلدن دلیشز در طی ۱۳۵ روز انبارداری در دو دمای صفر و ۴ درجه سلسیوس، به ترتیب ۱۱۵/۰۳- و۱۶۶/۸۶-، ۳/۸۵ و ۳/۸۸، ۳۷/۷۶ و ۳۳/۳۶ نیوتن، ۸۲/۱۱ و ۸۰/۶۳ درصد، ۰/۷۶۷ و ۰/۷۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب، ۱۵/۳۰ و ۱۵/۸۰ درصد بریکس به دست آمد. همچنین تحت شرایط انبارداری مذکور، مقدار شاخص رنگی L^* ۵۶/۳۹ و ۵۶/۱۵، a^* ۱/۵۵ و ۲/۴۳ و b^* ۳۵/۲۱ و ۳۷/۷۸ اندازه‌گیری شد. استفاده از مدل‌های متفاوت سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) با ورودی‌های سه شاخص رنگی L^* ، a^* و b^* ، دمای انبارداری و طول مدت انبارداری، نشان داد که در بهترین مدل‌های انتخابی مقادیر پارامترهای آماری R^2، RMSE، MAPE و EF به ترتیب برای پیش‌بینی عدد سی‌تی برابر ۰/۹۰۹، ۲۴/۳۳۱ ، ۱۱/۳۱۹ درصد و ۰/۸۹۹، سفتی میوه برابر ۰/۹۵۰، ۱/۸۶۲ نیوتن، ۳/۲۹۸ درصد و ۰/۹۰۴، مقدار pH برابر ۰/۹۱۲، ۰/۱۳۴ ، ۰/۱۳۴ درصد و ۰/۸۳۹، چگالی برابر ۰/۹۱۰، ۰/۰۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۷/۲۲۳ درصد و ۰/۸۲۸ ، مواد جامد محلول برابر ۰/۸۸۴، ۰/۵۳۷ درصد بریکس، ۲/۳۴۰ درصد و ۰/۷۸۱ و رطوبت برابر ۰/۹۴۵، ۰/۰۰۸ ، ۰/۷۲۹ درصد و ۰/۸۹۳ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با تقریب و دقت مناسبی با استفاده از مؤلفه‌های رنگی و مختصات انبارداری و کاربرد سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، برخی از خواص میوه سیب را پیش‌بینی نمود. از جمله این خواص، عدد سی‌تی است که بدون استفاده از دستگاه‌های پرتودهی ایکس به دست آمد. این در حالی است که طبق تحقیقات موجود می‌توان برخی از خصوصیات میوه را به تنهایی با داشتن عدد سی‌تی تخمین زد. از جمله محدودیت‌های موجود در تعمیم نتایج این تحقیق می‌توان به مدل‌های مورد نیاز در شرایط مختلف میوه و انبارداری (رقم میوه، دما، رطوبت، طول انبارداری و ...) و میزان دقت این مدل‌ها اشاره کرد. بنابراین لازم است که برای هر رقم و در شرایط مختلف انبارداری، الگوریتم اجرا شده و نتایج بررسی گردد. همچنین در مطالعات بعدی می‌توان با افزایش تعداد ورودی‌های مدل، دقت پیش‌بینی خصوصیات کیفی میوه را افزایش داد. نتایج کلی این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از مدل‌های انفیس و در اختیار داشتن داده‌های مربوط به شرایط نگهداری میوه در سردخانه (دما و مدت نگهداری) و شاخص‌های رنگی که به سادگی توسط دستگاه‌های پرتال قابل اندازه‌گیری است، برخی از خواص کیفی موثر میوه در بازارپسندی و ارزش‌گذاری اقتصادی آن، قابل تخمین است.

منابع

آزادشهرکی، فرزاد و کفاشان، جلال. (۱۳۹۶). شاخص‌های کیفی محصولات باغی و روش‌های اندازه‌گیری آن‌ها. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی – دفتر شبکه دانش و رسانه‌های ترویجی. نشر آموزش کشاورزی. ۲۴ص.

بی‌نام. (۱۴۰۱). آمارنامه کشاورزی. جلد سوم: گزارش محصولات باغی، قارچ و گلخانه‌ای. وزارت جهاد کشاورزی، مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات، معاونت آمار مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات.

جمشیدی، بهاره؛ عارفی، آرمان و مینایی، سعید. (۱۳۹۶). پیش‌بینی غیر مخرب سفتی سیب در طول دوره انبارداری بر پایه تصاویر نقطه‌ای دینامیکی. نشریه ماشین‌های کشاورزی. ۷(۱)، ۱۴۰– ۱۵۱.

دامیار، سیما و دستجردی، رعنا. (۱۳۹۳). تغییرات کیفیت میوه سیب رقم گالا در مرحله رسیدگی و مدت انبارمانی. یافته‌های تحقیقاتی در گیاهان زراعی و باغی، ۳(۳)، ۱۸۹–۱۷۹.

زندی، محسن؛ گنجلو، علی و بی‌مکر، ماندانا. (۱۴۰۰). به‌کارگیری سیستم استنتاج عصبی–فازی سازگار و شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی و مدل‌سازی تغییرات کیفی زالزالک (Crataegus pinnatifida) طی شرایط مختلف انبارمانی. ماشین‌های کشاورزی، ۱۱(۲)، ۳۵۷–۳۴۳.

زندی، محسن؛ گنجلو، علی؛ بی مکر، ماندانا؛ نیکومنش، نرگس و مرادی، نگار. (۱۴۰۰). کاربرد منطق فازی و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی– فازی جهت پیش‌بینی تغییرات فیزیکی و شیمیایی و طبقه‌بندی کیفی لیموشیرین پوشش‌دار طی مدت نگه‌داری. مجله پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، ۱۷(۲)، ۳۵۱–۳۳۹.

سلمانی‌زاده. فرهاد؛ نصیری، سید مهدی؛ راحمی، مجید و جعفری، عبد العباس. ۱۳۹۲. امکان‌سنجی استفاده از جذب اشعه ایکس به‌عنوان یک روش غیر مخرب برای تعیین برخی از شاخص‌های کیفی میوه انار. نشریه علوم باغبانی. ۲۷(۳)، ۳۴۱– ۳۳۵.

کاوه، محمد؛ عباسپور گیلانده، یوسف؛ امیری چایجان، رضا و محمدی گل، رضا. (۱۳۹۸). مقایسه مدل‌سازی ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی در پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن سیر و موسیر در خشک‌کن بسترسیال. ماشین‌های کشاورزی. ۹(۱)، ۱۱۲–۹۹.

محمدپور، حسین؛ سلاح ورزی، یحیی؛ اورعی گلمکانی، عطیه و تهرانی فر، علی. (۱۴۰۱). بررسی اثرات پایه و پیوندک بر ویژگی‌های انبارمانی سیب (Malus domestica Borkh). فرآیند و کارکرد گیاهی، ۱۱ (۴۸)، ۶۴–۴۹.

مسعودی، حسن؛ طباطبائی‌فر، سید احمد؛ برقعی، علی‌محمد و شاه‌بیک، محمدعلی. (۱۳۸۵). تعیین خواص مکانیکی سه رقم سیب صادراتی پس از پنج ماه انبارداری. *تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۷(۲)، ۷۴–۶۱.*

هادیان دلجو، مریم و ساری خانی، حسن. (۱۳۹۱). ارزیابی اثر سالیسیلیک اسید بر حفظ کیفیت پس از برداشت میوه سیب رقم گلاب کهنز. به زراعی کشاورزی. مجله کشاورزی پردیس ابوریحان، ۱۴، ۸۲–۷۱.

یاوری، بهرام؛ چاپارزاده، نادر؛ نژاوند، سعید؛ قدرتی، مینایه و محمدپور، علیرضا. (۱۳۹۳). تأثیر مدت زمان انبارداری سردخانه‌ای روی برخی خواص فیزیولوژیکی دو رقم سیب. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی، ۳ (۷)، ۱۲۳– ۱۱۵.

References

Abbaspour Gilandeh, Y., Jahanbakhshi, A., & Kaveh, M. (2020). Prediction kinetic, energy and exergy of quince under hot air dryer using ANNs and ANFIS. *Food Science and Nutrition*. 8: 594-611.

Abdel-Sattar, M., Al-Obeed, R.S., Aboukarima, A.M., & Eshra, D.H. (2021). Development of an artificial neural network as a tool for predicting the chemical attributes of fresh peach fruits. *PLoS One*. 30:16(7):e0251185.

Ahmad, F., Zaidi, S., & Arshad, M. (2021). Postharvest quality assessment of apple during storage at ambient temperature. *Heliyon.* 7(8): 1-13.

Akdemir, S., & Bal, E. (2020). Quality Changes in Apple in Evaporative Cooling Store. *Erwerbs-Obstbau.* 62 (1): 61- 67.

Al-Mahasneh, M., Aljarrah, M., Rababah, T., & Alu'datt, M. (2016). Application of hybrid neural fuzzy system (ANFIS) in food processing and technology. *Food Engineering Reviews*. 8: 351-366.

Anon. (2004). Fruits and vegetable products – determination of soluble solids content–refractometric method. International Standard 217.

Anon. (2023). Agricultural statistics. The third volume: Report on garden, mushroom and greenhouse products. Ministry of Agricultural Jihad, Center for Statistics, Information and Communication Technology, Vice President of Statistics, Center for Statistics, Information and Communication Technology. [In Persian].

AOAC. (1999). *Official Methods of Analysis.* 16th Edition, 5th Revision, Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

AOAC. (2005). *Association of Analytical Chemists*. Method 923.03. In: Official Methods of Analysis, 21st

Edition, AOAC International Publisher, Gaithersburg.
Aryaee, H., Zare, D., Ariaei, P., Mirdamadi, S., & Naghizadeh Raeisi, S. (2020). Sensory evaluation using fuzzy logic model and evaluation of physicochemical properties, antioxidant activity and total phenol of fruit juice prepared from mulberry during frozen storage. *FSCT*. 17 (106):47-61.
Azadshahraki, F., & Kafashan, J. (2016). Quality indicators of garden products and their measurement methods. Agricultural Engineering Research Institute. Knowledge Network and Promotional Media Office. Publication of Agricultural Education. Iran. 24 p. [In Persian].
Barcelon, E.G., Tojo, S., & Watanabe, K. (1999). X-ray computed tomography for internal quality evaluation of peaches. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 73(4): 323-330.
Birle, S., Hussein, M., & Becker, T. (2013). Fuzzy logic control and soft sensing applications in food and beverage processes. *Food Control.* 29: 254-269.
Damyar, S., & Dastjerdi, R. (2014). Evaluation of fruit quality changes in apple cultivar Gala, related to ripening stage and storage time. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops.* 3(3): 179-189. [In Persian].
Dobrzanski, B., & Rybczynski, R. (2002). Color change of apple as a result of storage, shelf-life and bruising. International AgropHysics, 16, 261-268.
Ebrahimi, M., Karimi, R., Daraei Garmakhany, A., Aghajani, N., & Shayeganfar, A. (2024). Development of an expert system to determine the measured characteristics of grape fruit stored in cold storage using fuzzy logic. *Food Science and Technology*. 21 (2):70-83.
Fazel, F., Golmohammadi, A., Shahgholi, G., & Ahmadi, E. (2020). Predictions of the apple bruise volume on the basis of impact energy or maximum contact force using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Acta Technologica Agriculturae.* 23(3): 118-125.
Hadian-Deljou, M., & Sarikhani, H. (2013). Effect of salicylic acid on maintaining post-harvest quality of apple cv. Golabe-Kohanz. *Journal of Crops Improvement.* 14(2): 71-82. [In Persian].
Harker, F. R., Kupferman, E. M., Marin, A. B., Gunson, F. A. & Triggs, C. M. (2008). Eating quality standards for apples based on consumer preferences. Postharvest Biology and Technology. 50 (1): 70–87.
Haseth, T. T., Egelandsdal, B., Bjerke, F. & Sørheim, O. (2007). Computed tomography for quantitative determination of sodium chloride in ground pork and dry cured hams. *Journal of Food Science.* 72(8): 420-427.
Jamshidi, B., Arefi, A., & Minaei, S. (2017). Non-destructive prediction of apple firmness during storage based on dynamic speckle patterns. *Journal of Agricultural Machinery.* 7(1): 140-151. [In Persian].
Jingping, Z., Zheng, P. & Jian, W. (2003). Correlation between moisture of apples and values of CT[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2003, 19(2): 180-182.
Kaur, S., Randhawa, S., & Malhi, A. (2021). An efficient ANFIS based pre-harvest ripeness estimation technique for fruits. *Multimedia Tools and Applications.* 80. 1-31.
Kavdir, I., & Guyer, D. E. (2003). Apple Grading Using Fuzzy Logic.*Turkish Journal of Agriculture*. 27:375-382.
Kaveh, M., Abbaspour Gilandeh, Y., Amiri Chayjan, R., & Mohammadigol, R. (2019). Comparison of Mathematical Modeling, Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic for Predicting the Moisture Ratio of Garlic and Shallot in a Fluidized Bed Dryer. *Journal of Agricultural Machinery*. 9(1): 99-112. [In Persian].
León, K., Mery, D., Pedreschi, F. and León, J. (2006). Color measurement in $L^*a^*b^*$ units from RGB digital images. *Food Research International.* 39(10): 1084–1091.
Li, S., Liu, Y., Niu, X., Tang, Y., Lan, H., & Zeng, Y. (2023). Comparison of Prediction Models for Determining the Degree of Damage to Korla Fragrant Pears. *Agronomy.* 13. 1670.
Ligus, M., & Peternek, P. (2018). etermination of most suitable low-emission energy technologies development in Poland using integrated fuzzy AHP-TOPSIS method. *Energy Procedia.* 153:101-106.
Liu, W., Chen, J. Ji, & Ye, C. (2014). Optimal Color Design of Psychological Counseling Room by Design of Experiments and Response Surface Methodology. *PLoS ONE*. 9(3): e90646.
Liu, Y., Xiyue, N., Yurong, T., Shiyuan, L., Haipeng, L., & Hao, N. (2023). Internal Quality Prediction Method of Damaged Korla Fragrant Pears during Storage. *Horticulturae.* 9(6): 666.
Lu, R. (2004). Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*. 31(2): 147-157.
Marzban, A., Elhami, B., & Bougari, E. (2021). Integration of life cycle assessment (LCA) and modeling

methods in investigating the yield and environmental emissions final score (EEFS) of carp fish (Cyprinus carpio) farms. *Environmental Science and Pollution Research.* 28(15): 19234-19246.

Mohammadpour, H., Selahvarzi, Y., Oraee, A., & Tehranifar, A. (2022). Evaluation of rootstock and scion interactions on apple storage characteristics (Malus domestica Borkh). *Plant Process and Function.* 11(48): 4. [In Persian].

Onu, C. E., Igbokwe, P. K., Nwabanne, J. T., & Ohale, P. E. (2022). ANFIS, ANN, and RSM modeling of moisture content reduction of cocoyam slices. *Journal of Food Processing and Preservation*. 46, e16032.

Pahlavan, R., Omid, M., & Akram, A. (2012). Energy input–output analysis and application of artificial neural networks for predicting greenhouse basil production. *Energy*. 37(1): 171-176.

Papageorgiou, E.I., Aggelopoulou, K., Gemtos, T.A & Nanos, G.D. 2018. Development and Evaluation of a Fuzzy Inference System and a Neuro-Fuzzy Inference System for Grading Apple Quality. *Applied Artificial Intelligence.* 32(3): 253-280.

Park, Y., Jung, S., & Gorinstein, S. (2006). Ethylene treatment of 'Hayward'kiwifruits (Actinidia deliciosa) during ripening and its influence on ethylene biosynthesis and antioxidant activity. *Scientia Horticulturae*. 108:22-28.

Peng, Y., & Lu, R. (2006 Improving apple fruit firmness predictions by effective correction of multispectral scattering images. *Postharvest Biology and Technology*. 31: 147-157.

Peng, Y., & Lu, R. (2007). Prediction of apple fruit firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images. *Journal of Food Engineering.* 82(2):142-152.

Razavi, M. S., Golmohammadi, A., Sedghi, R., & Asghari, A. (2020). Prediction of bruise volume propagation of pear during the storage using soft computing methods. *Food Science & Nutrition*. 8: 884–893.

Salmanizade, F., Nassiri, S., rahemi, M., & Jafari, A. (2013). Feasibility Study of X-ray Absorption Application as a Non-destructive Method for Determining Some Qualitative Parameters of Pomegranate Fruit. *Journal of Horticultural Science.* 27(3): 335-341. [In Persian].

Shinde, K.J., & Pardeshi, I. L. (2014). Fuzzy logic model for sensory evaluation of commercially valuable jam samples. *Journal of Ready to Eat Food*. 1(2): 78-84.

Veravrbeke, E.A., Verboven, P., Oostveldt, P., & Nicolai, B.M. (2003). Predication of moisture loss across the cuticle of apple (Malus sylvestris supsp. Mitis (Wallr.) during storage: part 2. Model simulations and practical applications. *Postharvest Biotechnology.* 30: 89-97.

Yavari, B., chaparzadeh, N., najavand, S., Minaieh, M., & Mohammadpour, A. (2014). The effect of cold storage time on some physiological properties of two apple cultivars. *Plant Process and Function.* 3(7): 115-124. [In Persian].

Yildirim, D., Yesiloghlu Cevher, E. & Gurkan, A.K. (2024). Estimation and Classification of Physical Parameters Pumpkins (Cucurbita pepo L.) Crop S by Soft Computing Tecniques. *BIO Web of Conferences.* 85.

Zandi, M., Ganjloo, A., & Bimakr, M. (2021). Applying Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Artificial Neural Network to the Prediction of Quality changes of Hawthorn Fruit (Crataegus pinnatifida) during Various Storage Conditions. *Journal of Agricultural Machinery.* 11(2): 343-357. [In Persian].

Zandi, M., Ganjloo, A., Bimakr, M., Nikoomanesh, N., & Moradi, N. (2021). Application of fuzzy logic and neural-fuzzy inference system (ANFIS) for prediction of physicochemical changes and quality classification of coated sweet lemon during storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal.* 17(2): 339-351. [In Persian].

Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in predicting quality characteristics of stored apple fruit

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The cultivated area of Iran's apple orchards is about 237,000 hectares, from which about 4 million tons of apples are produced, and it accounts for a significant share in the trade of agricultural products of this country. Apple is one of the fruits that can be stored for a relatively long time. Internal changes created by this product during the storage period cause a change in the quality characteristics of the fruit. Several researches have been conducted on the qualitative changes of apple fruit during storage. Quality evaluations of apple fruit during storage can help apple producers in choosing and optimizing suitable storage conditions. The Anticipating these changes and creating suitable storage conditions is an important step towards maintaining the nutritional and economic value of the product. Among the methods used in evaluating the quality of fruits is X-ray imaging and determining the relationship between the absorption properties of the rays and the quality parameters of the products. Also Fuzzy logic and fuzzy inference system are new and efficient techniques used in recent years to identify, classify and model complex nonlinear systems. This method can be used to predict and model the quality characteristics of food.

Materials and Methods

In this research, the physicochemical characteristics of Golden Delicious apples were recorded during storage at two temperatures of 0 and 4 degrees Celsius and the duration of storage in cold storage included 0, 45, 90 and 135 days. These characteristics included CT number obtained from X-ray imaging, pH, firmness, density, soluble solids and fruit moisture. In order to determine the mentioned physicochemical properties, 280 Golden Delicious apples were stored in temperature conditions of 0 and 4 °C and humidity of 85 ± 5% during four periods of time: zero (beginning of storage), 45, 90 and 135 days. At the end of each storage period, the physicochemical characteristics of apples were measured. In the next step, with the help of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and based on the inputs of color components L*, a* and b*, storage temperature and storage duration, the mentioned characteristics were extracted and compared with the actual values.

Results and Discussion

The implementation and comparison of different models of adaptive neuro-fuzzy inference system showed that in the best selected models, the values of statistical parameters R^2, RMSE, MAPE and EF for predicting CT number were 0.909, 24.331, 11.319% and 0.899, for fruit firmness were 0.950, 1.862 N, 3.298% and 0.904, for pH value were 0.912, 0.134, 0.134% and 0.839, for density were 0.910, 0.045 gr/m^3, 7.223% and 0.828 respectively, for soluble solids were 0.884, 0.537% Brix, 2.340% and 0.781 and for fruit moisture were 0.945, 0.008 0, 0.729% and 0.893 respectively.

Conclusion

These results show that it is possible to predict the characteristics of apple fruit during storage with appropriate approximation and accuracy using color components and storage coordinates and the application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). Among these characteristics is the CT number, which is itself a function of other qualitative properties of apples.