مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال هفتم، شماره ۵، ویژه‌نامه زمستان ۱۳۹۱، صفحات ۴۰۷-۳۹۹

مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن پیاز در یک خشک کن بستر سیال مجهز به کنترل کننده رطوبت با استفاده از روش‌های رگرسیونی، منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمد گنجه[۱]، سید مهدی جعفری[۲]، وحید قنبری[۱]، مسعود دزیانی[۳]، رقیه عزتی[۳]، مریم سلیمانی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- نویسنده مسئول: استادیار گروه صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. پست الکترونیکی: jafarism@hotmail.com

۳- عضو هیات علمی گروه صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد صوفیان

۴- کمیته تحقیقات دانشجویان، انستیتو تحقیقات تغذیه‌ای و صنایع غذایی کشور، دانشکده علوم تغذیه و صنایع غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: مدل سازی سینتیک خشک شدن با استفاده از روشهای جدید مدل سازی از جمله منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی می تواند به بهینه سازی فرایند و کاهش انرژی مصرفی کمک کند. در این پژوهش علاوه بر مدل سازی رگرسیونی، در رویکردی جدید اصول منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی به صورت ترکیبی و مکمل هم به کار برده شده و مدلی فازی – عصبی ارائه ودر نهایت توپولوژی بهینه شبکه های عصبی مصنوعی برای خشک کردن پیاز معرفی شده و ماتریس های ضرایب وزنی آن داده شد.

مواد و روش ها: در این پژوهش ورقه های نازک پیاز در یک خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی با سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و دو سرعت هوای ۲ و ۳ متر بر ثانیه در رطوبت هوای ثابت خشک گردید و جهت بررسی سینیتیک خشک کردن آن از سه روش مدلسازی رگرسیونی، منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی استفاده شد.

یافته ها: در روش مدلسازی تجربی با برازش داده های آزمایشگاهی حاصل با معادلات جبری شناخته شده مربوط به سینتیک خشک کردن، با استفاده از ابزار برازش منحنی نرم افزار MATLAB و تکنیک رگرسیون غیر خطی، مدل تقریب دیفوزیون با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۹، ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۴۱۵۷ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۰۰۵۷۰۲ از بین ۹ مدل موجود به عنوان بهترین معادله جبری بین متغیرها تعیین گردید. برای شبیه سازی، درون یابی و افزایش نسبت های رطوبت اندازه گیری شده، از ابزار منطق فازی در نرم افزار MATLAB با بکارگیری مدل ممدانی در قالب قواعد اگر-آنگاه و توابع عضویت مثلثی استفاده شد و با وارد کردن نتایج مستخرج از مدل فازی در ابزار شبکه های عصبی مصنوعی، شبکه پس انتشار پیشخور با توپولوژی ۲-۵-۱، و ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۵۶ و میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۰۰۳۹۳۸۵ با بکارگیری تابع فعال سازی تانژانت سیگموئید هیپربولیکی، الگوی یادگیری لونبرگ – مارکوات و چرخه یادگیری ۱۰۰۰ اپچ به عنوان بهترین مدل عصبی ارائه گردید.

نتیجه گیری: در مجموع می توان گفت ترکیب اصول منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی روشی مناسب و قابل اطمینان برای مدل سازی و پیش بینی سینیتیک خشک کردن پیاز و محصولات مشابه می باشد.

واژه های کلیدی: خشک کن بستر سیال، رگرسیون، شبکه های عصبی مصنوعی، مدلسازی، منطق فازی

مقدمه

خشک‌کردن به روش بستر سیال یکی از روش‌های جدید و کاربردی است که توسط آن امکان خشک‌کردن مواد غذایی به طور پیوسته و در مقادیر زیاد، بدون این‌که از حد خشک‌کردن مطلوب فراتر رویم فراهم می‌شود (۲، ۱). در این روش خشک کردن، عواملی مانند دما و سرعت هوای ورودی رطوبت اولیه و نهایی محصول، رطوبت نسبی و دمای هوای محیط و عمق ماده غذایی بر روی میزان تغییرات رطوبت نسبت به زمان یا همان سینتیک خشک‌کردن مؤثرند (۳).

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

توسعهٔ یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی متغیرهای وابستهٔ این فرآیند در ارتباط با همهٔ متغیرهای مستقل بسیار مشکل است. اگر چه امروزه روش‌های متعددی برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن توسعه یافته است ولی اکثراً از دقت بالایی در پیش‌بینی افت رطوبت در زمان‌های مختلف خشک‌کردن برخوردار نیستند(۴).

روش متداول برای پیش‌بینی افت رطوبت در طی زمان خشک کردن، روش مدل‌سازی تجربی یا رگرسیونی است که به‌طور معمول با انجام آزمایشات تجربی متغیرهای مختلف را اندازه‌گیری کرده و بهترین معادله جبری بین متغیرها براساس برازش داده‌های اندازه‌گیری شده با معادلات جبری شناخته شده مربوط به سینتیک خشک شدن انتخاب می‌شود. از مقالات علمی در این زمینه می‌توان به مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن برگه‌های نعناع توسط اتمان (۴)، ورقه‌های هویج توسط دویماز (۵) و فلفل قرمز توسط دی اسکالا و ارنتورک (۷، ۶) اشاره نمود. در یک تحقیق، اسلام (۸) به مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌کردن لایه نازک پسته در چهار دمای ۴۵، ۵۰، ۵۵ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سه سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه پرداختند و از بین مدل‌های به‌کار رفته مدل پیج بهترین برازش را با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد.

امروزه با توسعهٔ سریع فنّاوری‌های پردازش رایآن‌های و ایجاد نرم‌افزارهای مربوطه، از مزایای فناوری هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی و منطق فازی برای حل مسائل مربوط به مدل‌سازی سیستم‌ها و فرآیندها استفاده می‌شود. بنیاد منطق فازی بر شالوده تئوری مجموعه‌های فازی استوار است.(۹) این تئوری که تعمیمی از تئوری کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات است بر مبنای محاسبات عددی بر روی مقادیر تولید شده توسط تابع عضویت برای هریک از متغیرهای زبان شناختی (مثلاً اختصاص دادن سه اصطلاح کم، متوسط، زیاد به متغیر دما) عمل می‌نماید. قواعد فازی و استدلال فازی، ستون فقرات مدل‌های استنتاج فازی را تشکیل می‌دهند. مدل‌های استنتاج فازی (مانند مدل‌های فازی ممدانی (Mamdani Fuzzy Model) و سوگنو (Sugno Fuzzy Model))، مهم‌ترین ابزار مدل‌سازی بر مبنای تئوری مجموعه‌های فازی هستند (۱۰). در زمینه مدل‌سازی فازی فرآیند خشک‌کردن موادغذایی تحقیقات بسیار کمی انجام گرفته است که می‌توان به کارهای آلوارس لوپز و همکاران (۱۰) در زمینه خشک‌کردن برگه‌های تنباکو بوسیله یک کنترل کننده فازی، وکویرو و ساکیلیک (۱۲، ۱۱) در کاربرد منطق فازی در مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن طغرلا و منگو و آتاجاریاکول و لفاکپریدا (۱۴، ۱۳) در خشک‌کردن بستر سیال شلتوک برنج در شرایط بهینه، تحت کنترل منطق فازی اشاره کرد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌هایی الهام گرفته از سیستم‌های عصبی زیستی هستند که برای مدل‌سازی ریاضی میان یک سری از متغیرهای مستقل (گره‌های ورودی) و متغیرهای پاسخ (گره‌های خروجی) به‌کار برده می‌شوند. در واقع این شبکه‌ها مجموعه‌ای از روابط ریاضی را بین گره‌های ورودی، مجموعه‌ای از گره‌های مخفی و یک گره خروجی برقرار می‌کنند. طی الگوهای یادگیری (مانند الگوهای لونبرگ-مارکوات (Levenberg-Marquardt) و مومنتوم (Momentum)) به هر ورودی، وزنی اختصاص داده می‌شود که مشابه ضرایب متغیرهای مستقل در روابط رگرسیونی هستند. هم‌چنین مقادیر بایاس به مقادیر وزن دار خروجی اضافه می‌شوند، که این‌ها نیز مشابه عرض از مبدأ رگرسیونی هستند. در فرایند مدل‌سازی مقادیر ورودی و خروجی به شبکه داده شده و خطای ارزیابی و سپس وزن‌ها برای به حداکثر رساندن ضریب همبستگی میان خروجی‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه تنظیم می‌شود. سایر عوامل مدل‌سازی مانند تعداد چرخه‌های یادگیری، تعداد لایه‌های پنهان، تعداد گره‌ها در لایه پنهان و سرعت تربیت ایده آل نیازمند آزمون می‌باشند (۱۵). تحقیقات انجام گرفته در این زمینه نیز چندان زیاد نیست. موقرنژاد و نیکزاد (۳) درمدل‌سازی خشک‌کردن ورقه‌های نازک گوجه فرنگی، ارنتورک (۷) برای مدلسازی خشک‌کردن دینامیکی لایهٔ نازک گیاه اکناسهآ آنگوستیفولیا (یک گیاهی دارویی)، آتاجاریاکول (۱۴) در تخمین ضریب تبدیل شلتوک در یک خشک کن بستر سیال واندوود(۱۵) در شبیه سازی سینتیک خشک‌کردن پرتقال تامسون از شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفته‌اند.

به‌طور کلی باتوجه به مزیت‌های اقتصادی خشک‌کن‌های بستر سیال و محدودیت کاربرد این خشک کن‌ها به مواد دآن‌های و گرانولی (مثل غلات و حبوبات)، استفاده از این خشک کن برای سایر محصولات (مثل سبزیجات و میوه‌جات) نیز می‌تواند سودمند باشد و مدل سازی سینتیک خشک شدن در این خشک‌کن‌ها با استفاده از روش‌های جدید مدل‌سازی از جمله منطق فازی و شبکه‌های عصبی

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

مصنوعی می‌تواند بـه بهینـه‌سـازی فراینـد و کـاهش انـرژی مصرفی کمک کند. در ایـن پـژوهش عـلاوه بـر مـدل‌سـازی رگرسـیونی، در رویکـردی جدیـد اصـول منطـق فـازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت ترکیبـی و مکمـل هـم به‌کار بـرده شـده و مـدلی فـازی- عصـبی ارائـه ودر نهایـت توپولوژی بهینه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای خشک‌کردن پیـاز معرفـی شـده و مـاتریس‌هـای ضـرایب وزنـی آن داده می‌شود.

مواد و روش‌ها

دستگاه خشک کن بسـتر سـیال آزمایشـگاهی: بـرای خشک‌کردن پیاز در این تحقیـق از یـک خشـک کـن بسـتر سیال آزمایشگاهی دارای سیرکولاسیون بسته جریـان هـوا و قابلیت کنترل دما، سرعت و رطوبـت هـوای ورودی اسـتفاده شد. این دستگاه شامل یک دمنده سانتریفوژ پره‌ای با موتـور به قدرت ۲ اسب بخار ساخت تبریز مجهز به انورتور فرکانسی (مدل SVO 15IC5 ساخت کره) جهـت تنظـیم دبـی هـوای ورودی است. سیستم رطوبت‌گیر شامل کمپرسور، کندانسـور و اواپراتور (همگی ساخت داخل) است. محفظه خشک کن از جنس پلکسی گلاس و بـه قطـر ۲۰ و طـول ۶۰ سـانتی‌متـر مـی‌باشـد. در قسـمت ورودی، وسـط و انتهـای محفظـه سنسورهای دقیـق رطوبـت (رطوبـت‌سـنج دیجیتـال، مـدل K 200، ساخت تایوان)، درجه حرارت (ترموستات دیجیتـال ATBIN، مـدل ۹۱۵۰۵۵، سـاخت ایـران) و سـرعت هـوا (سرعت سنج دیجیتالTESTO ،مدل V1۴۰۵-، ساخت کره) نصب شده است که مجهز به برنامه پس‌خور می‌باشد کـه در صورت هر گونه تغییـر ناگهـانی شـرایط را تنظـیم و تعـدیل می‌کند. مزیت آن نسبت به سیستم‌های متداول امروزی کـه دارای سیرکولاسیون باز جریان هـوا هسـتند ایـن اسـت کـه اتلاف حرارتی به حداقل می‌رسد و برای گرم کردن هـوا نیـز نیاز به صرف زمان و انرژی خیلی کم‌تری می‌باشد.

مواد و روش خشک کردن: پیاز تازه و رسیده از بازار محلی واقع در شهر گرگان خریداری شده و پس از بسته بندی در یخچال نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه‌ها طبق روش استاندارد برابر ۹۵/۴ درصد بر مبنای وزن مرطوب تخمین زده شد. برای انجام آزمایشات خشک‌کردن پیاز، در هر بار آزمایش تعدادی پیاز از نایلون خارج شده و پس از جداسازی ضایعات، توسط یک چاقوی تیز به ورقه‌هایی با ابعاد طول ۱۰ mm، عرض ۱۰ mm، و ضخامت متوسط ۱/۵mm تبدیل شدند. هر بار ۵۰ گرم از نمونه‌ها به سینی یا بستر نمونه واقع در محفظه سیال سازی خشک‌کن منتقل شد و عملیات خشک‌کردن انجام گرفت.

در طول آزمایش هر ۵ دقیقه ورقه‌های پیاز از دستگاه خارج شده و توسط ترازوی دیجیتال توزین می‌شدند و زمان خشک‌کردن تا جایی ادامه پیدا می‌کرد که اختلاف دو وزن متوالی کمتر از ۰/۱ گرم می‌شد و وزن‌های به دست آمده طبق رابطه ۱ به نسبت رطوبت تبدیل می‌شد.

$$MR = \frac{M-M_e}{M-M_0} \qquad [۱]$$

در این معادله MR نسبت رطوبت که بدون بعد است، M محتوای رطوبتی بر پایه وزن خشک، M0 محتوای رطوبت اولیه بر پایه وزن خشک و Me محتوای رطوبت تعادلی بر پایه وزن خشک می‌باشد.

طرح آزمایشات: سه سطح دمای هوای خشک‌کن (۴۰-۵۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد) و دو سطح سرعت هوای خشک‌کن (۲ و ۳ متر بر ثانیه) در ابعاد ثابت نمونه (mm ۱/۵×۱۰×۱۰) با توجه به مطالعات قبلی، نتایج محققین و آزمون و خطا برای خشک‌کردن نمونه‌ها در خشک کن بستر سیال آزمایشگاهی تعیین شد و آزمایشات در سه تکرار در قالب طرح فاکتوریل کامل و بصورت کاملاً تصادفی انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون چند دامنه دانکن در سطح P>۰/۰۵ انجام گرفت. از نرم افزار EXCEL برای رسم شکل‌ها استفاده شد.

مدل سازی رگرسیونی: برای مدل‌سازی سینتیکی خشک شدن این ماده بر اساس مدل‌های ریاضی شناخته شده از ابزار برازش منحنی نرم افزار MATLAB و تکنیک رگرسیون غیر خطی برای برازش نسبت‌های رطوبت آزمایشگاهی با نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریاضی استفاده شد. ضرایب ثابت و فاکتورهای ارزیابی مدل‌های ریاضی به‌کار رفته به خوبی برآورد شدند و در نهایت بهترین مدل انتخاب شد. تمام مدل‌های ریاضی خشک شدن بر اساس سه فاکتور ارزیابی آماری معروف یعنی ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE)، که به ترتیب از روابط ۲، ۳ و ۴ به دست می‌آیند با هم مقایسه شدند.

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi}-\overline{MR_{pi}})^2}{\sum_{i=1}^{N}(MR_{ei}-\overline{MR_{ei}})^2}} \qquad [۲]$$

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi} \quad MR_{ei})} \qquad [۳]$$

$$SSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi} - MR_{ei})^2 \qquad [۴]$$

که در این روابط MRei نسبت رطوبت آزمایشگاهی، MRpi نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل و N تعداد مشاهدات را نشان می‌دهد.

مدل سازی با استفاده از منطق فازی: برای شبیه سازی، درون‌یابی و افزایش داده‌های نسبت رطوبت آزمایشگاهی از ابزار منطق فازی در نرم افزار MATLAB استفاده شد. با استفاده از روش مدل‌سازی ممدانی برای دو ورودی و یک خروجی تحت قاعده اگر- آن‌گاه فازی، نسبت‌های رطوبت در فواصل زمانی معین در طی خشک شدن (هر ۵ دقیقه) بر اساس انتخاب دمای هوای خشک‌کردن در سه سطح با اصطلاح کم برای دمای ۴۰، متوسط برای دمای ۵۰ و زیاد برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای خشک‌کردن در دو سطح با اصطلاح کم برای سرعت ۲ و زیاد برای سرعت ۳ متر بر ثانیه و نسبت‌های رطوبت اندازه‌گیری شده حاصل از ۶ تیمار اعمال شده دما- زمان (۴۰-۲،۴۰-۳،۵۰-۲،۵۰-۳،۶۰-۲،۶۰-۳) با اصطلاحات خیلی خیلی کم (VVL)، خیلی کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH)، به ترتیب افزایش مقدار در ابزار منطق فازی نرم افزار MATLAB شبیه سازی شدند. از توابع عضویت مثلثی برای تنظیم تغییرات سه متغیر دما، سرعت و نسبت رطوبت بهره گرفته شد. یک تابع عضویت مثلثی با سه پارامتر {a,b,c} به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$triangle\,(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \qquad [۵]$$

شکل (۱) مدل ممدانی با دو ورودی دما (tem) و سرعت (spe) و یک خروجی نسبت رطوبت (MR) در قالب شش قاعده اگر-آن‌گاه که برای فواصل زمانی معین در طی خشک‌کردن پیاز به‌کار برده شده را نشان می‌دهد.

If (tem is low) and (spe is low) then (MR is VH)
If (tem is low) and (spe is high) then (MR is H)
If (tem is medium) and (spe is low) then (MR is M)
If (tem is medium) and (spe is high) then (MR is L)
If (tem is high) and (spe is low) then (MR is VL)
If (tem is high) and (spe is high) then (MR is VVL)

شکل۱. مدل ممدانی با دو ورودی (دما و سرعت) و یک خروجی (نسبت رطوبت) در قالب شش قاعده اگر- آن‌گاه

با استفاده از نتایج حاصل از این مدل، درون یابی نسبت‌های رطوبت به ازای هر ۱ درجه تغییر در دما از رنج ۴۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و برای همه دفعات انجام آزمایشات در طی خشک‌کردن (فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای) در دو سرعت مجزای ۲ و ۳ متر بر ثانیه انجام شد.

نتایج حاصل از درون یابی در دو ماتریس به عنوان ورودی (input)و خروجی یا هدف (target) برای وارد کردن به ابزار شبکه‌های عصبی در MATLAB مرتب شدند .

مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی: نتایج درون یابی مستخرج از مدل‌سازی منطق فازی در قالب یک ماتریس ورودی دو سطری شامل زمان‌ها و دماهای خشک‌کردن و یک ماتریس خروجی شامل نسبت‌های رطوبت متناظر با درایه‌های ماتریس ورودی به جعبه ابزار شبکه عصبی مصنوعی موجود در نرم افزار MATLAB انتقال داده شد و شبکه عصبی مصنوعی برای دو سرعت هوای مجزای ۲ و ۳ متر بر ثانیه طراحی شد.

بر اساس ارزیابی‌های انجام شده، شبکه عصبی با خصوصیات: شبکه پس انتشار پیش‌خور، تابع فعال سازی تانژانت سیگموئید هیپربولیکی، الگوی یادگیری لونبرگ-مارکوات، چرخه یادگیری ۱۰۰۰ اپچ و دو معیار ارزیابی ضریب همبستگی (R2) و میانگین مربعات خطا (MSE) که به ترتیب از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آیند، برای شبکه تعریف شد. در ضمن در این فرآیند ۶۰ درصد داده‌ها جهت آموزش، ۱۵ درصد به منظور اعتبار سنجی و ۲۵ درصد نیز به برای تست شبکه طراحی شده به کار گرفته شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi} - MR_{ei})^2}{\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi} - \overline{MR})^2} \qquad [۶]$$

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pi} - MR_{ei})^2 \qquad [۷]$$

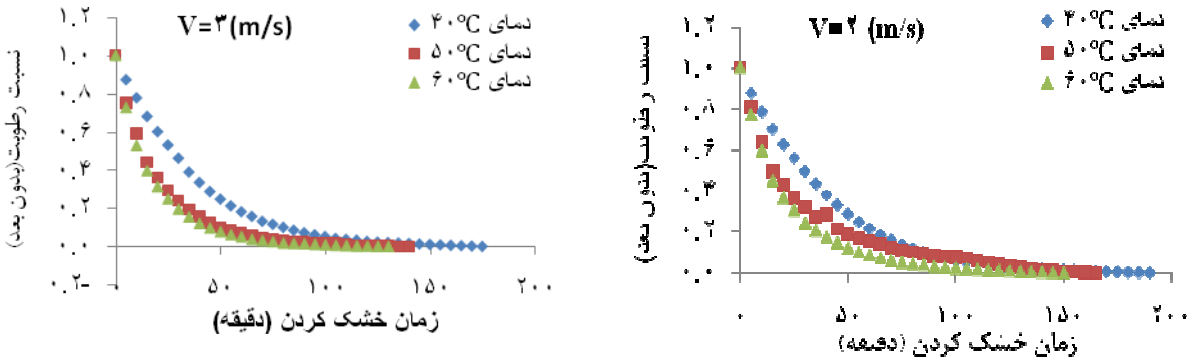
[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

در این معادلات MR_{pi}نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط شبکه MR_{ei} نسبت رطوبت واقعی حاصل از انجام آزمایشات و $\overline{MR}$ میانگین نسبت‌های رطوبت آزمایشگاهی وN تعداد کل مشاهدات است.

یافته‌ها

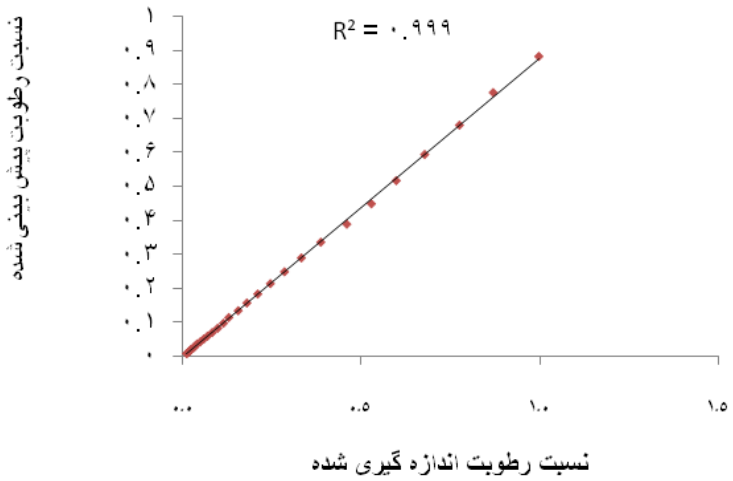
مدل سازی رگرسیونی سینتیک خشک‌کردن پیاز: برای بررسی سینتیک خشک شدن لایه نازک و مکانیسم‌های غالب انتقال رطوبت، منحنی‌های نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن در شرایط مختلف خشک‌کردن رسم شدند (شکل ۲). همان‌طور که منحنی‌های شکل ۲ نشان می‌دهند با افزایش دمای هوای خشک‌کردن از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد شیب منحنی‌های تغییرات نسبت رطوبت به زمان شدیدتر شده است، یا به عبارت دیگر سرعت فرایند با افزایش دمای هوای خشک‌کن افزایش چشم‌گیری پیدا کرده است. این تغییر با افزایش سرعت هوای خشک‌کردن از ۲ به ۳ متر بر ثانیه نیز مشاهده می‌شود و از نظر آماری اثر هر دو بر سرعت خشک‌کردن معنی‌دار است ($P< ۰/۰۵$). ولی در مقایسه با اثر دما ناچیزتر است و تغییرات آن چندان چشم‌گیر نیست، به عبارت دیگر مهم‌ترین پارامتر در خشک‌کردن این ماده غذایی دمای هوای خشک‌کردن است. در جدول ۱ ضرایب و فاکتورهای ارزیابی حاصل از برازش نسبت‌های رطوبت آزمایشگاهی و مدل‌های ریاضی شناخته شده سینتیک خشک‌کردن لایه نازک در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سانتی‌گراد و دو سرعت ثابت ۲ و ۳ متر بر ثانیه ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده مدل تقریب دیفوزیون با R= ۹۹۹۹/۰، RMSE= ۰/۰۰۴۱۵۷ و SSE=۰/۰۰۰۵۷ به عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک شدن لایه نازک پیاز معرفی می‌شود. جهت نشان دادن تطابق داده‌های حاصل از مدل سازی با داده‌های تجربی، این داده‌ها بر روی یک نمودار و در مقابل هم ترسیم شدند (شکل ۳). از ضریب همبستگی بالای نمودار (R2=۰/۹۹۹) می‌توان نتیجه گرفت که مدل تقریب دیفوزیون جهت پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن لایه نازک پیاز مناسب بوده و با اطمینان بالایی انتخاب شده است. همانند نتایج این پژوهش مدل تقریب دیفوزیون به عنوان مناسب‌ترین مدل خشک‌کردن لایه نازک برخی محصولات کشاورزی مثل ورقه‌های زرد الو و انجیر توسط تغرل (۱۳)، هویج (۵) و فلفل قرمز (۶) معرفی شده است.

مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن پیاز با ابزار منطق فازی: جهت شبیه سازی فرآیند خشک شدن پیاز، توابع عضویت مثلثی برای تنظیم تغییرات دما، سرعت و نسبت رطوبت در فواصل زمانی ۵ دقیقه توسط جعبه ابزار منطق فازی در MATLAB طراحی شدند و با استفاده از روش مدل‌سازی ممدانی، شبیه سازی نسبت‌های رطوبت در طی خشک‌کردن پیاز به ازای هر یک درجه افزایش دما (از ۴۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس) به منظور به دست آوردن میزان تغییرات نسبت رطوبت محصول در این شرایط در فواصل زمانی معین و یک سرعت ثابت هوا انجام شد.



شکل ۲. تغییرات نسبت رطوبت به زمان خشک شدن پیاز در دماهای مختلف و دو سرعت ثابت

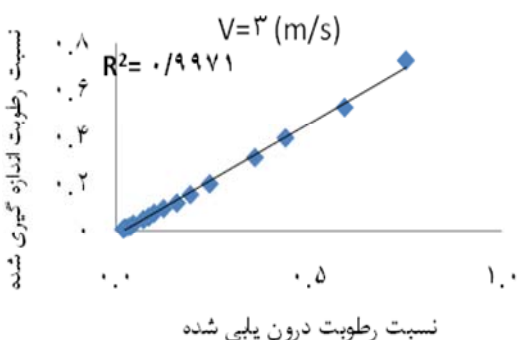
[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

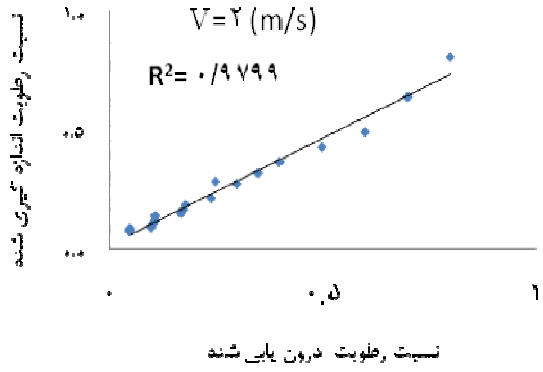


شکل ۳. نمودار همبستگی نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل تقریب دیفوزیون با نسبت‌های رطوبت اندازه‌گیری شده خشک‌کردن پیاز دردمای ۴۰ ℃ وسرعت ۳ متر بر ثانیه

جهت بررسی صحت درون یابی و شبیه سازی انجام شده نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل فازی برای دمای ۵۰ ℃ در مقابل مقادیر آزمایشگاهی آن در همین دما رسم شده و میزان همبستگی آن‌ها با هم مقایسه شد (شکل ۴). ضریب همبستگی بالای هر دو نمودار در شکل ۴ برای دو سرعت ۲ و ۳ متر بر ثانیه نشان دهنده‌ی مناسب بودن درون یابی انجام شده برای نسبت رطوبت در دماهای ۴۰ تا ۶۰ درجه می‌باشد. از جمله محققین دیگر که مدل‌های فازی ممدانی (تحت قواعد اگر- آن‌گاه) را بهترین مدل‌های شبیه سازی و درون یابی خشک‌کردن مواد غذایی معرفی کرده‌اند می‌توان به Vaquiro و همکاران و موقرنژاد و همکاران اشاره کرد (۳، ۱۱).

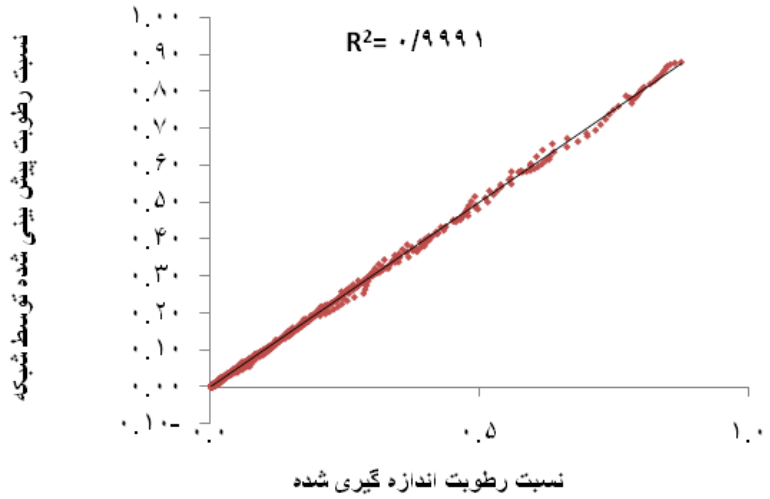
مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن پیاز با شبکه‌های عصبی مصنوعی: جدول ۲ مقایسه اثر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌های هر لایه پنهان بر دقت پیش‌بینی نسبت‌های رطوبت پیاز در زمان‌ها و دماهای مختلف خشک‌کردن در دو سرعت هوای ثابت ۲ و ۳ متر بر ثانیه را ارائه می‌دهد. با توجه به مقادیر MSE و R ارائه شده در این جدول در توپولوژی‌های مختلف، برای پیاز توپولوژی ۱-۵-۲ (یک لایه ورودی با دو نورون- یک لایه پنهان با پنج نورون- یک لایه خروجی با یک نورون) با حداکثر ضریب همبستگی (R=۰/۹۹۹۵۶) و حداقل میانگین مربعات خطا (MSE=۰/۰۰۰۰۳۹۳۸۵) به عنوان توپولوژی بهینه انتخاب می‌شود.





شکل ۴. مقایسه رون یابی انجام شده با استفاده از بزار منطق فازی در مای ۵۰ ℃ برای پیاز در دو سرعت ثابت ۲ و۳ متر بر ثانیه

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]



شکل ۵. نمودار تغییرات نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده توسط شبکه در مقابل نسبت‌های رطوبت اندازه‌گیری شده برای بهترین توپولوژی خشک شدن پیاز (۱-۵-۲)

بحث

آکپینار نیز اثر معنی دار دما بر سرعت خشک‌کردن لایه نازک برخی از میوه‌ها و سبزی‌ها را بیش‌تر از سایر فاکتورها بیان کردند (۲، ۱). هم‌چنین از روی روند تغییرات افت رطوبت نسبت به زمان می‌توان پی برد که پیاز قسمت عمده رطوبت خود را در دوره سرعت نزولی از دست داده است و این دوره مهم‌ترین دوره خشک‌کردن این ماده است پس مکانیسم غالب انتقال رطوبت در طی خشک‌شدن این ماده مکانیسم انتشار بخار آب است (۸). آتاجاریوکال (۱۴) شبکه پس انتشار پیش‌خور و الگوریتم آموزش لونبرگ- مارکوات را بهترین شبکه عصبی خشک‌کردن بستر سیال شلتوک برنج در نظر گرفتند. اسلام (۸) از بین مدل‌های موجود، شبکه عصبی پس انتشار پیشخور با الگوریتم آموزش لونبرگ- مارکوات با توپولوژی‌های دارای یک لایه پنهان (۱-۵-۳، ۱-۶-۳، ۱-۷-۳) را بهترین مدل عصبی خشک‌کردن لایه نازک پرتقال معرفی کردند. اسلام و همکاران (۸) نیز بیان کردند توپولوژی‌های دارای یک لایه پنهان بهترین برازش را در خشک‌کردن ورقه‌های گوجه فرنگی نشان می‌دهند. وان دود (۱۵) نیز شبکه عصبی با الگوریتم آموزش لونبرگ- مارکوات و توپولوژی یک لایه ۳-۶-۳ را بهترین مدل برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی محصول نهایی در طی فرایند خشک‌کردن انگور با هوای گرم معرفی کردند. بنابراین می‌توان با استناد به نتایج سایر محققین و هم‌چنین نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نتیجه گرفت شبکه‌های عصبی مصنوعی پس انتشار پیشخور با الگوریتم آموزش لونبرگ- مارکوات و اکثرا توپولوژی‌های دارای یک لایه پنهان بهترین مدل‌های عصبی برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن لایه نازک انواع مختلف سبزی‌ها و میوه‌ها مانند پیاز می‌باشند.

با توجه به توپولوژی شبکه عصبی انتخاب شده که به صورت ۱-۵-۲ می‌باشد، ماتریس وزن برای لایه ورودی به لایه پنهان یک ماتریس هسین ۵×۲ (اتصال دو نورون لایه ورودی به پنج نورون لایه پنهان) و برای لایه پنهان به لایه خروجی یک ماتریس هسین ۱×۵ (اتصال پنج نورون لایه پنهان به یک نورون لایه خروجی) به ترتیب به صورت ماتریس‌های A و B خواهند بود :

$$A=\begin{pmatrix} -0/050715 & 2/4492 \\ 0/27608 & 3/3157 \\ 0/19645 & -5/5767 \\ -1/7652 & \\ 2/242 & \\ 1/0326 & 4/9543 \end{pmatrix} \qquad B=\begin{pmatrix} -0/2830 \\ 1/9464 \\ -6/7152 \\ 1/1826 \\ 4/844 \end{pmatrix}$$

در ضمن ماتریس بایاس برای لایه ورودی به لایه پنهان به صورت یک ماتریس هسین ۱×۵ (ماتریس C) و برای لایه

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

پنهان به لایه خروجی به صورت یک ماتریس هسین ۱×۱ (ماتریس D) خواهد بود.

C= [-0/12641 -0/35859 3/5872 0/067015 -0/3475]

D=[۳/۳۴۹۱]

جهت تائید توپولوژی ۱-۵-۲ به‌عنوان بهترین توپولوژی توصیف کننده خشک‌کردن پیاز نمودار تغییرات نسبت‌های رطوبت پیش‌بینی شده توسط شبکه در مقابل نسبت‌های رطوبت آزمایشگاهی رسم شد (شکل۵). همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود همه نقاط حول یک خط راست ۴۵ درجه با ضریب همبستگی بسیار بالا (R^2=۰/۹۹۹) قرار گرفته‌اند که تائیدی بر توپولوژی انتخاب شده است.

نتیجه‌گیری

مدل رگرسیونی صرفاً یک رابطه ریاضی نه چندان پیچیده است که تنها تغییرات نسبت رطوبت را به عنوان تابعی از زمان بر اساس یک سری ضرایب نشان می‌دهد و هرگز نمی‌تواند رابطه پیچیده غیر خطی میان متغیرهای ورودی و خروجی فرآیندهای پیچیده‌ای مانند خشک‌کردن مواد غذایی را مشخص کند. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان مدل فازی- عصبی ارائه شده را به عنوان مدلی قابل قبول برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌کردن محصولات کشاورزی که فرایندی تحت تاثیر متغیرهای مختلف و پیچیده می‌باشند معرفی نمود. این مدل‌ها قادرند علاوه بر ایجاد روابط پیچیده غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی، تمامی برهم کنش‌های میان متغیرهای ورودی را نیز مشخص کنند. در کل می‌توان با اطمینان خیلی بیش‌تری نسبت به مدل‌های رگرسیونی به پیش‌بینی این مدل‌ها اعتماد کرده و از این مدل‌ها برای بهینه‌سازی و کنترل فرایند خشک‌کردن استفاده نمود، که این امر می‌تواند به صرفه جویی در انرژی و زمان منجر شده و از طرف دیگر محصول نهایی مطلوب‌تری را ایجاد کند.

References

1. Akpinar E K. Determination of suitable thin layer drying for some vegetables and fruits. Journal of Food Engineering 2006;73:75– 84.
2. Akpinar E, Bicer Y, Yildiz C. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering 2003, 59(1):99-104.
3. Movagharnejad K, Nikzad M. Modeling of tomato drying using artificial neural network.Journal of Computers and Electronics in Agriculture 2007 59: 78-85.
4. Ethman Kan C S, Sid Ahmed M A O, Kouhila M,. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves (M.pulegium). Jurnal of Revuedes Energies Renouvelables 2009 12(3): 449 – 470.
5. Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering 2004 61: 359–364.
6. Di Scala K, Crapiste G,. Drying kinetics and quality changes during drying of red pepper. Journal of LWT 2008 41: 789-795.
7. Erenturk K, Erenturk S, Lope G. Acomparative study fortheestimationof dynamical drying behavior of Echinacea angustifolia:regression analysis andneural network. Jurnal of Computers and Electronics in Agriculture 2004 45 (3): 71-90.
8. Islam M D R, Sablani S S, Mujumdar A S,. artificial neural network model for prediction of drying rates.Journal of Drying Technology 2003 21(9): 1867–1884.
9. Mota C L, CLuciano A, Dias M, Barroca J, Guine RPF. Conective drying of onion:Kinetics and nutritional evalution. Food and Bioproducts Processing 2010 88:115-123.
10. Alvarez Lopez I, Lianes S, Verdegay J L. Drying process of tobacco leaves by using a fuzzy controller. Journal of Fuzzy Sets and Systems12005 50: 493-506.
11. Vaquiro HA, Bon J, Dies JL,. Fuzzy logic application to drying kinetics modeling. In: Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, 2008 2206-2211.
12. Sacilik K, Keskin R, Konuralp Elicin A. Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. Journal of Food Engineering 2006 73(3):231-238.
13. Toğrul I, pehlivan D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. Journal of Food Engineering 2004 65(3):413-425.
14. Atthajariyakul S, Leephakpreeda T, Fluidized bed paddy drying in optimal condition via adaptive fuzzy logic control. Journal of Food Engineering 2006 75: 104-114.
15. Wan Daud W D,. Fluidized Bed Dryers-Recent Advances. Journal of Advanced Powder Technology 2008 19:403-418.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]

Modeling the drying kinetics of onion in a fluidized bed drier equipped with a moisture controller using regression, fuzzy logic and artificial neural networks methods

*Ganjeh M[1], Jafari SM[*2], Ghanbari V[3], Dezyani M [3], Ezzati R[4], Soleimani M[4]*

1. *MSc. Student in Food Science and Technology, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran*
2. *Assistant Prof., Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: jafarism@hotmail.com*
3. *Academic member, Dept. of Food Science & Technology, Islamic Azad University, Soofian Branch, Iran*
4. *Students' Research Commeettee, National Nutrition and Food Technology Research Institute, Faculty of Nutrition Science and Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.*

Abstract

Background and Objective: Kinetic modeling of drying through novel modeling techniques including fuzzy logic and artificial neural networks can help optimization of the process and reduce energy consumption. Our main goal was to apply combined modeling methods for the drying process of onions.

Materials and Methods: In this research, thin layers of onion were dried in a laboratorial fluidized bed drier using three temperatures of 40, 50 and 60 °C and two airflow speeds of 2 and 3 m/s in a constant air moisture. Three modeling methods including regression, fuzzy logic and artificial neural networks were applied to investigate the drying kinetics of the thin layer of this food.

Results: In the empirical modeling, the curve fitting tool of MATLAB software and nonlinear regression technique were used. According to the obtained results, the Diffusion Approximation with the correlation coefficient of 0.9999, root mean square error of 0.004157 and sum of squares error of 0.0005702 showed the best fit with the experimental data among the 9 fitted model. For simulation, interpolation and increase of the measured moisture ratios, fuzzy logic tool of MATLAB software with the Mamdani fuzzy model in the form of If-Then rules and triangular membership function was used. By entering the obtained results from fuzzy model into the neural network tool, the Feed-Forward-Back-Propagation network with the topology of 2-5-1 and the correlation coefficient of 0.99956 and mean square error of 0.000039385 with application of hyperbolic tangent sigmoid transfer function, Levenberg–Marquardt learning algorithm and 1000 epoch was determined as the best neural model.

Conclusion: In general, we can conclude, the combination of fuzzy logic and neural networks is a suitable and reliable method for modeling and prediction of drying kinetics of onion and similar product.

Keywords: Fluidized bed drier, Regression, Artificial neural networks, Modeling, Fuzzy logic

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-12]