

مقایسه مدل‌های ریاضی، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (انفیس) در پیش‌بینی منحنی خشک شدن لایه نازک ورقه‌های سیب‌زمینی

هادی عظیمی نژادیان^{۱*} و مهدی مرادی حسن آباد^۲

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
تاریخ دریافت: ۹۸/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۱

چکیده

هدف اصلی این پژوهش، مقایسه دقت عملکرد سه روش پرکاربرد شبیه‌سازی شامل مدل‌های ریاضی لایه نازک، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (انفیس) در تخمین نسبت رطوبت لحظه‌ای ورقه‌های سیب‌زمینی در فرآیند خشک کردن با توان مایکروویو است. برای پیش‌بینی نسبت رطوبت، از هفت مدل ریاضی استفاده شد. بر اساس داده‌های تجربی، توان مایکروویو، ضخامت نمونه‌ها و زمان فرآیند به عنوان پارامترهای ورودی و نسبت رطوبت به عنوان پارامتر خروجی شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در نظر گرفته شدند. شبکه‌های عصبی بر اساس ساختار پس‌انتشار پیش‌خور چند لایه (MFFBP) و پس‌انتشار پیش‌رو زنجیره‌ای (CFBP)، توابع فعال‌سازی خطی (Lin)، تانژانت هایپربولیک سیگموئید (Tan) و لگاریتمی (Log) و الگوریتم‌های یادگیری لونیگ-مارکوارت (LM) و تنظیم بیزی (BR) طراحی شد. برای شبیه‌سازی با استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، سیستم فازی از نوع تاکاگی-سوگنو انتخاب، ساختار سیستم استنتاج فازی (FIS) به روش خوشه‌بندی شبکه‌ای (Grid partitioning) ایجاد و از توابع عضویت ANFIS در جعبه‌ابزار منطق فازی نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. در میان روش‌های مدل‌سازی مورد مطالعه، مدل میدیلی (Midilli)، شبکه CFBP با توپولوژی ۱-۱-۱+۱-۱، الگوریتم آموزش LM و تابع Tan-Tan-Lin و مدل ANFIS با تابع عضویت سیگموئید در ورودی و قوانین فازی ۴×۳×۳ بهترین مدل‌ها شناخته شدند. با توجه به نتایج به دست آمده، هر سه روش مدل‌سازی با دقت مطلوبی قادر به برآورد نسبت رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها بودند. با این حال، مدل ANFIS با ضریب تبیین ۰/۹۹۹۷ و میانگین مربعات خطای $10^{-5} \times 4/53$ در برآورد داده‌های تجربی عملکرد بهتری داشت.

واژه‌های کلیدی

شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن، مدل‌های رگرسیونی، هوش مصنوعی، نسبت رطوبت لحظه‌ای

مقدمه

استفاده از فرآیندها و فناوری‌های پس از برداشت مناسب ضروری است (Joardder et al., 2015). خشک کردن از دیرباز یکی از مهمترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی مورد توجه و استفاده بوده است. با کاهش فعالیت آبی و تحدید

اغلب میوه‌ها و سبزی‌های تازه به دلیل رطوبت بالا مستعد فسادند و در دسته محصولات فسادپذیر طبقه‌بندی می‌شوند. بنابراین، به منظور افزایش قابلیت انبارمانی و حفظ کیفیت این محصولات،

قرار دارند. بر خلاف سیستم‌های گرمایشی جابه‌جایی و هدایتی که در آنها حرارت از طریق سطح ماده به درون آن نفوذ می‌کند، روش مایکروویو مبتنی بر گرمایش دی‌الکتریک است و توده ماده با جذب امواج الکترومغناطیسی به صورت حجمی گرم می‌شود (Wang & Xi, 2005). در روش مایکروویو، در واقع انرژی ساطع شده با چرخش مولکول‌های دو قطبی درون ماده به حرارت تبدیل و باعث افزایش سرعت و یکنواختی گرمایش ماده می‌شود (Motevalli *et al.*, 2011).

معمولاً، خشک کردن یک فرآیند عملیات واحد پیچیده است که در آن دو پدیده همزمان انتقال جرم و حرارت رخ می‌دهد و منجر به تبخیر رطوبت از ماده می‌شود. برای پیش‌بینی سینتیک خشک شدن، کنترل فرآیند و دستیابی به بهترین شرایط عملیاتی برای رسیدن به کیفیت مشخصی از محصول نهایی، طراحی سیستم‌های خشک‌کن جدید و بهینه‌سازی سیستم موجود، شبیه‌سازی فرآیند راهکاری ارزان، مؤثر و کاربردی است (Torki-Harchegani *et al.*, 2016b).

مدل‌های ریاضی را محققانی چند برای شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن به کار برده‌اند. به دلیل کاهش زمان فرآیند و حفظ کیفیت محصول، اغلب محصولات کشاورزی به صورت لایه نازک خشکانده می‌شوند. مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای توصیف رفتار خشک شدن این محصولات معمولاً به سه دسته اصلی مدل‌های تئوری، نیمه تئوری و تجربی تقسیم‌بندی می‌شوند (Demiray & Tulek, 2012). مدل‌های تئوری مبتنی بر معادله انتشار یا معادله‌های انتقال همزمان جرم و حرارت هستند. اگر چه این مدل‌ها واقع‌گرایانه‌اند و قادر به توصیف پدیده‌های موجود در فرآیند خشک کردن

فعالیت‌های میکروبیولوژیکی و آنزیمی، کاهش رطوبت به سطحی مشخص باعث پیشگیری از فساد و کاهش ضایعات محصولات زیستی در دوره پس از برداشت می‌شود (Beigi, 2019). حمل و نقل محصولات خشک شده آسان‌تر و تنوع در مصرف آنها بیشتر است. این مزایای برجسته باعث گسترش صنعت خشک کردن و افزایش اقبال عمومی به این محصولات شده است.

به‌رغم مزیت‌های مهم خشکاندن در فرآوری و نگهداری مواد کشاورزی و غذایی، روش‌ها و شرایط نامطلوب می‌تواند منجر به مصرف زمان و انرژی زیاد و کاهش کیفیت محصول نهایی شود. در واقع، کاهش هزینه‌های تولید محصول با کیفیت از مهمترین چالش‌های صنعت خشک کردن به شمار می‌رود (Torki-Harchegani *et al.*, 2016a). در میان خشک‌کن‌های متعدد توسعه داده شده در دهه‌های اخیر، خشک‌کن‌های جابه‌جایی هوای گرم به صورت گسترده در صنایع مختلف به کار گرفته شده‌اند. به‌رغم مزیت‌های ویژه مانند سادگی ساختار و هزینه‌های سرمایه‌گذاری کم، خشک‌کن‌های هوای گرم معیار مهمی نیز دارند که از میان آن‌ها می‌توان به راندمان کم انرژی، مدت زمان طولانی فرآیند و اثرهای منفی زیست محیطی اشاره کرد (Darvishi *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2004).

به عنوان جایگزین مناسب برای خشک‌کن‌های هوای گرم، استفاده از توان مایکروویو برای خشکاندن مواد مختلف از جمله محصولات کشاورزی و غذایی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. علاوه بر مطالعات پژوهشی، خشک‌کن‌های مایکروویو به صورت گسترده و در صنایع مختلف به کار گرفته شده‌اند. امواج مایکروویو در محدوده بسامدی ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز از طیف الکترومغناطیس

مستقل در محدوده یادگیری هستند. این شبکه‌ها از نرون‌های زیستی الهام گرفته‌اند و مانند مغز انسان با ترکیب ویژگی‌هایی مانند قدرت آموزش، تعمیم‌دهی، پردازش موازی و تصمیم‌گیری، ابزاری قدرتمند در حل مسائل پیچیده با ماهیت خطی یا غیرخطی هستند (Kaveh *et al.*, 2019a). در ارتباط با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده، پژوهش‌های متعددی گزارش شده است از جمله: پیش‌بینی زمان و شاخص‌های مصرف انرژی در فرآیند خشکاندن شلتوک در یک خشک‌کن هوای گرم (Beigi *et al.*, 2017)، پیش‌بینی سینتیک خشک شدن سیر و موسیر در خشک‌کن بستر سیال (Kaveh *et al.*, 2019a)، مدل‌سازی بارش-رواناب (Dehghani *et al.*, 2016) و پیش‌بینی صادرات آبزیان دریایی (Khodaparast Shirazi & Sadeghi, 2012).

سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، شبکه عصبی تطبیقی بر پایه استنتاج فازی است که روند آموزش با بهینه‌سازی پارامترهای بخش مقدم و تالی آن طی می‌شود (Behmanesh & Mohammadi, 2017). این سیستم با استفاده از قدرت آموزش شبکه‌های عصبی و مزیت سیستم‌های فازی در تحلیل مسائل پیچیده بسیار موفق عمل می‌کند. به علت پویایی ANFIS، استفاده از آن مورد توجه و علاقه پژوهشگران قرار گرفته است. ستاری و همکاران (Sattari *et al.*, 2016) عملکرد ANFIS در برآورد ضریب دبی جریان سرریز کرامپ از داده‌های آزمایشگاهی را موفقیت‌آمیز گزارش کردند. نصیری و همکاران (Nasiri *et al.*, 2015) از ANFIS برای پیش‌بینی سینتیک خشک شدن نعنا فلفلی در یک خشک‌کن هوای گرم استفاده کردند. مدل‌سازی استخراج روغن بادام‌زمینی با پیش‌تیمار مایکروویو با

هستند، ولی نیاز به زمان زیاد برای حل معادلات پیچیده انتشار حاکم بر فرآیند دارند. همچنین، مدل‌های تئوری دقت بالایی ندارند. مدل‌های تجربی به داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها وابسته‌اند و استفاده از آنها بسیار آسان است. مدل‌های تجربی، بدون در نظر گرفتن اصول حاکم بر فرآیند، فقط ارتباط مستقیم بین مقدار رطوبت میانگین محصول و زمان خشک شدن را ارائه می‌کنند. مدل‌های نیمه تئوری بر اساس معادلات تقریبی تئوری توسعه داده شده‌اند و معمولاً با در نظر گرفتن برخی از فرضیات ساده‌سازی، از حل قانون دوم فیک منتج شده‌اند و رهیافتی بین مدل‌های تئوری و سادگی استفاده از مدل‌های تجربی عرضه می‌کنند (Torki-Harchegani *et al.*, 2016b). استفاده از مدل‌های نیمه تئوری به صورت گسترده برای توصیف سینتیک خشک شدن محصولات مختلف توسط پژوهشگران گزارش شده است (Mosavi Baygi *et al.*, 2015; Ghorbanpour & Yousefi, 2019; Hafezi *et al.*, 2016b).

در دهه اخیر، استفاده از هوش مصنوعی با بهره‌گیری از قابلیت آموزش و تولید نتایج بدون نیاز به فرضیات قبلی، در مسائلی که روابط بین پارامترهای وابسته و مستقل پیچیده است به شدت مورد توجه قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (انفیس)، دو روش مبتنی بر هوش مصنوعی، به طور گسترده برای مدل کردن سیستم‌های پیچیده به کار گرفته شده‌اند (Khoshnevisan *et al.*, 2015). شبکه عصبی مصنوعی به عنوان روشی غیر الگوریتمی، با استفاده از داده‌های موجود آموزش داده می‌شود و قادر به پیش‌بینی پارامترهای وابسته بر اساس پارامترهای

استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی را شیرازی و همکاران (Shirazi et al., 2018) بررسی کردند. خوشنویسان و همکاران (Khoshnevisan et al., 2015) با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مصرف انرژی را در گلخانه تولید گوجه‌فرنگی شبیه‌سازی کردند.

با توجه به اهمیت خشک‌کن‌های مایکروویو و گسترش روزافزون استفاده از آنها در صنایع مختلف و با در نظر گرفتن ضرورت پیش‌بینی دقیق نمودارهای خشک شدن، در این پژوهش تأثیر ضخامت نمونه‌ها و توان مایکروویو بر روند خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی بررسی شده است. همچنین از مدل ریاضی، شبکه‌های عصبی و سیستم‌های استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در برآورد نسبت رطوبت محصول استفاده و دقت روش‌های مختلف مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های تازه

سیب‌زمینی‌های تازه برداشت شده از فروشگاه محلی در شهر شیراز خریداری و تا شروع آزمایش‌های خشک کردن در سردخانه در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. به منظور تعیین مقدار رطوبت اولیه، چهار نمونه تقریباً ۵ گرمی از سیب‌زمینی‌های تازه پوست کنده شده درون آون در دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس قرار داده شد و فرآیند خشکاندن آنها تا رسیدن به وزن ثابت ادامه یافت (Beigi, 2016). میانگین مقدار رطوبت اولیه با استفاده از رابطه ۱ تعیین و حدود ۵/۶۷ بر پایه خشک به دست آمد.

$$M_0 = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که در آن

M_0 = مقدار رطوبت اولیه نمونه‌های تازه (بر پایه خشک)؛ W_0 = جرم اولیه نمونه‌های تازه (گرم)؛ و W_d = جرم نهایی نمونه‌های خشک (گرم).

آزمایش‌های خشک کردن

برای شروع آزمایش‌های خشک کردن از یک دستگاه اجاق مایکروویو خانگی تجاری (LG MG-4012، ساخت کشور کره) استفاده شد. قبل از هر آزمایش، حدود دو کیلوگرم از نمونه‌های تازه از سردخانه خارج و پس از شست و شو با آب به منظور دستیابی به تعادل دمایی، به مدت دو ساعت در محیط آزمایش قرار داده شد. پس از پوست‌گیری، به کمک یک اسلایسر دست‌ساز نمونه‌ها به صورت ورقه‌هایی با ضخامت دلخواه در آورده شدند. حدود ۱۵۰ گرم از ورقه‌های آماده شده به صورت لایه‌ای یکنواخت روی سینی و درون محفظه اجاق مایکروویو قرار داده شد. در حین فرآیند خشک شدن، نمونه‌ها در فاصله‌های زمانی منظم ۲۰ ثانیه‌ای از درون دستگاه خارج و با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (Shimadzu UW6200H، ساخت ژاپن) وزن شدند. مقدار رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Ghanbarian et al., 2016):

$$M = \left(\frac{M_0 + 1}{W_0} \times W_i \right) - 1 \quad (2)$$

که در آن،

M = مقدار رطوبت لحظه‌ای (بر پایه خشک)؛ و W_i = جرم لحظه‌ای نمونه‌ها (گرم) طی فرآیند خشک کردن.

در خلال آزمایش‌ها، ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت‌های مختلف (۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر) در

از آنجا که رطوبت تعادلی برای سیبزمینی در مقایسه با رطوبت اولیه و رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها در فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو بسیار کوچک‌تر است، در این تحقیق رطوبت تعادلی صفر در نظر گرفته شد و رابطه ۳ به صورت زیر خلاصه و استفاده شد:

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (4)$$

که در آن،

M = مقدار رطوبت لحظه‌ای نمونه؛ و M_0 = مقدار رطوبت اولیه نمونه‌های تازه (بر پایه خشک).

برازش مدل‌های ریاضی

مدل‌های ریاضی نیمه تئوری نشان داده شده در جدول (۱) انتخاب و از نرم‌افزار MATLAB و روش رگرسیون غیر خطی برای برازش مدل‌ها بر داده‌های آزمایشگاهی سینتیک خشک شدن نمونه‌ها استفاده شد.

چهار سطح توان مایکروویو ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ وات تا رسیدن به رطوبت نهایی حدود ۰/۲۰ (بر پایه خشک) خشکانده شدند. هر یک از تیمارهای آزمایش سه بار تکرار و مقادیر میانگین محاسبه و برای تحلیل‌های بعدی استفاده شدند.

مدل‌سازی سینتیک خشک شدن

برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن بستر نازک ورقه‌های سیبزمینی، از نسبت رطوبت نمونه‌ها در خلال فرآیند خشکاندن استفاده شد. به طور کلی، نسبت رطوبت با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

که در آن،

MR = نسبت رطوبت؛ و M_e = رطوبت تعادلی (بر پایه خشک).

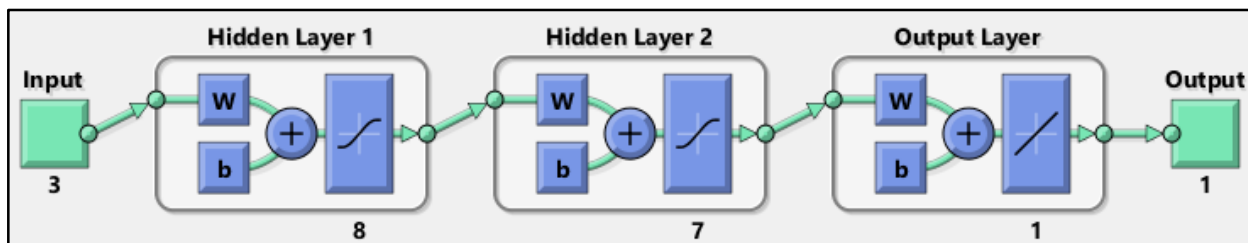
جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای برازش نمودارهای خشک شدن تجربی ورقه‌های سیبزمینی

نام مدل	توصیف مدل
نیوتن (Newton)	$MR = \exp(-kt)$
پیج (Page)	$MR = \exp(-kt^n)$
هندرسون و پابیس (Henderson and Pabis)	$MR = a \exp(-kt)$
میدیلی (Midilli)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
نمایی دو جمله‌ای (Two-term exponential)	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
انتشار (Diffusion approach)	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
لگاریتمی (Logarithmic)	$MR = a \exp(-kt) + bt$

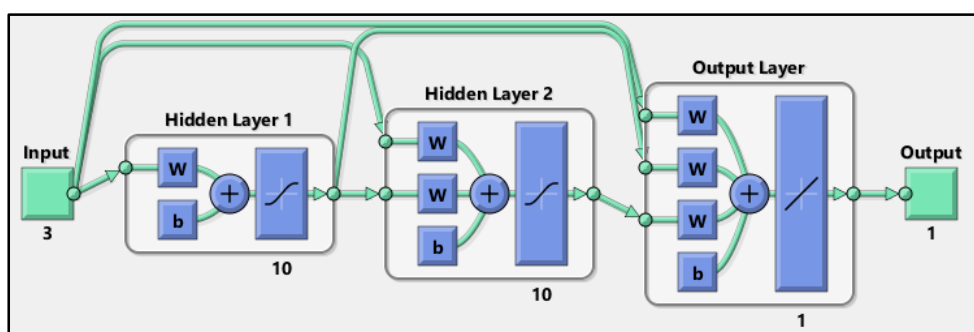
روند شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

برای مدل‌سازی و پیش‌بینی لحظه‌ای نسبت رطوبت نمونه‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، از شبکه‌های پس‌انتشار پیش‌خور چند لایه (MFFBP) و پس‌انتشار پیش‌رو زنجیره‌ای (CFBP) استفاده شد. طرح‌واره جریان داده در این دو شبکه به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده

شده است. در هر دو نوع شبکه مورد استفاده، نرون‌ها در سه لایه اصلی شامل ورودی (لایه ابتدایی)، پنهان (لایه یا لایه‌های میانی) و خروجی (لایه انتهایی) دسته‌بندی شدند. سه ورودی (شامل زمان فرآیند، توان مایکروویو و ضخامت نمونه‌ها) و یک خروجی (شامل نسبت رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها) در نظر گرفته شد.



شکل ۱- ساختار شبکه عصبی پیش‌خور پس‌انتشار خطای چند لایه (MFBP)



شکل ۲- ساختار شبکه عصبی شبکه پیش‌خور پس‌انتشار خطای زنجیره‌ای (CFBP)

از ورودی‌ها انتخاب می‌شود. اگر شبکه به جواب مطلوب همگرا نشود تعداد نرون‌های لایه پنهان افزایش داده می‌شود و اگر شبکه همگرا شد و از قدرت تعمیم خوبی هم برخوردار بود، در صورت امکان، تعداد نرون‌های کمتری آزمایش می‌شود. برای رسیدن به ترکیبی مناسب در هر لایه پنهان با حداقل خطا، فرآیند بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک پی گرفته شد. جمعیت اولیه برای تولید نسل‌ها ۱۰۰ و حداکثر تعداد نسل‌ها نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شد. احتمال آمیزش و جهش نیز به ترتیب ۰/۹ و ۰/۱ اعمال شد. ضمناً، تعداد نرون‌های لایه میانی از ۳ تا ۲۰ تغییر داده شد.

نرون‌ها می‌توانند از توابع محرک مختلفی برای تولید خروجی استفاده کنند. سه تابع فعال‌سازی خطی (Lin)، تانژانت هایپربولیک سیگموئید (Tan) و لگاریتمی (Log) که از متداول‌ترین توابع فعال‌سازی هستند، در لایه میانی به کار گرفته شدند. دو تابع یادگیری لئونبرگ-مارکوارت (LM) و تنظیم بی‌زی

برای مدل‌سازی و ارزیابی شبکه‌های مختلف، پایگاه داده‌ها به سه دسته آموزش، آزمون و ارزیابی تقسیم شد. با انتخاب تصادفی، حدود ۷۰ درصد کل داده‌ها برای آموزش، حدود ۱۵ درصد آنها برای آزمون و بقیه برای ارزیابی شبکه‌ها استفاده شدند. به منظور دستیابی به شبکه‌ای با بهترین عملکرد در پیش‌بینی سینتیک خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی، تعداد لایه‌های میانی، تعداد نرون‌ها در هر لایه میانی، توابع یادگیری و توابع محرک مختلف استفاده و ارزیابی شدند. پیشنهاد شده است که تعداد لایه‌های پنهان تا حد امکان باید کم باشد و ثابت شده است که هر تابع می‌تواند حداکثر با سه لایه پنهان تقریب زده شود (Sheela & Deepa, 2013). در این تحقیق، حداکثر تا دو لایه میانی در نظر گرفته شد.

اندازه یک لایه پنهان معمولاً به صورت تجربی به دست می‌آید. برای یک شبکه عصبی با تعداد منطقی تعداد نرون‌های پنهان با یک نسبت کوچکی

مدل ANFIS مرتبه اول تاکاگی-سوگنو با دو ورودی (x و y)، یک خروجی (f) و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها را نشان می‌دهد. در این صورت، قوانین فازی اگر-آنگاه به صورت رابطه ۵ خواهد بود:

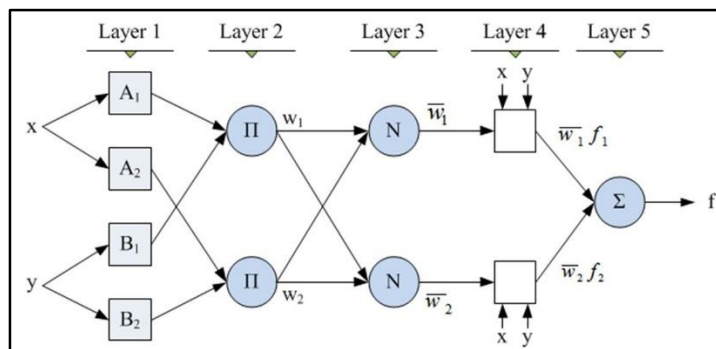
$$\begin{aligned} \text{Rule 1: If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1 \text{ then } f_1 \\ = a_1x + b_1y + c_1 \\ \text{Rule 2: If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2 \text{ then } f_2 \\ = a_2x + b_2y + c_2 \end{aligned} \quad (5)$$

همان‌گونه که مشخص است، در این سیستم استنتاج فازی، خروجی هر قانون ترکیب خطی متغیرهای ورودی به‌علاوه یک عدد ثابت است و خروجی نهایی میانگین وزنی خروجی قوانین است.

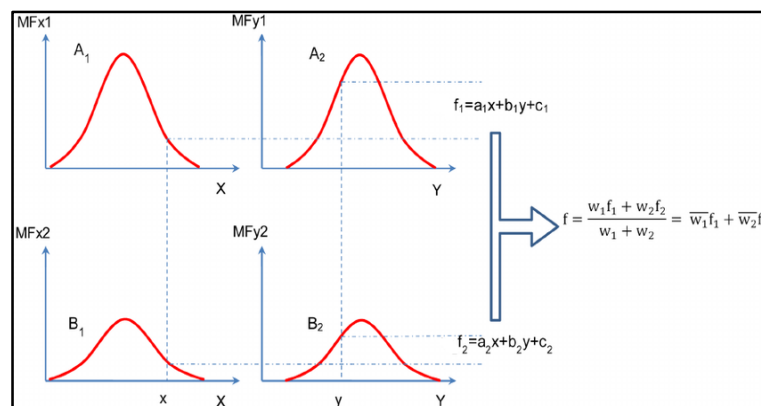
(BR) برای به‌هنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد نظر استفاده شد.

روند شبیه‌سازی ANFIS

سیستم‌های عصبی-فازی از ترکیب منطق فازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی به وجود آمده‌اند. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی-فازی که در سال‌های اخیر توسعه یافته و به‌کاررفته است، سیستم ANFIS است. این مدل معمولاً یک سیستم فازی تاکاگی-سوگنو را در یک ساختار عصبی که به صورت ساختار شبکه‌ای پیش‌رونده و دارای پنج لایه است (شکل ۳) اجرا و برای آموزش از ترکیبی از روش‌های آموزش پس‌انتشار خطا و کمینه مربعات خطا استفاده می‌کند. شکل ۴ سیستم استنتاج فازی نمونه‌ای از



شکل ۳- ساختار یک نمونه از مدل ANFIS دو ورودی (x و y)، یک خروجی (f) و دو تابع عضویت برای هر ورودی



شکل ۴- سیستم استنتاج فازی معادل

الگوریتم خوشه‌بندی کاهشی (Subtractive clustering)، الگوریتم خوشه‌بندی c میانگین فازی (Fuzzy C-means) و الگوریتم خوشه‌بندی شبکه‌ای (Grid partitioning) (Nasiri et al., 2015).

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن بستر نازک ورقه‌های سیب‌زمینی با استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS)، از سیستم فازی تاکاگی-سوگنو و از توابع عضویت ANFIS در جعبه‌ابزار منطق فازی نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. برای مدل‌سازی و ارزیابی مدل‌های مختلف ANFIS، داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش‌های خشک کردن به صورت تصادفی به دو گروه آموزشی (۸۰ درصد از کل داده‌ها) و آزمایشی (۲۰ درصد کل داده‌ها) تقسیم و استفاده شدند. زمان فرآیند، توان مایکروویو (در سطح ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ وات) و ضخامت نمونه‌ها (۳/۵، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر) متغیرهای ورودی و نسبت رطوبت نمونه‌ها پارامتر خروجی مدل‌ها بودند. به منظور ایجاد ساختار سیستم استنتاج فازی (FIS)، از روش خوشه‌بندی شبکه‌ای استفاده شد. در این روش، فضای داده‌ها بر اساس تعداد و نوع توابع عضویت به یک فضای مستطیلی تقسیم می‌شود به طوری که بر هر یک از این فضاها یک قانون اگر-آنگاه حاکم است. شش تابع عضویت مختلف موجود در نرم‌افزار MATLAB شامل تابع عضویت گاوسی (Gaussian)، زنگوله‌ای (Bell shaped)، دوزنقه‌ای (Trapezoidal)، مثلثی (Triangular)، منحنی دو طرفه گاوسی (Gaussian 2) و سیگموئیدی (Sigmoid) در لایه ورودی و از تابع عضویت خطی (Linear) در لایه خروجی استفاده شد.

در تمامی مدل‌ها، برای آموزش سیستم استنتاج فازی روش بهینه‌سازی هیبرید به کار گرفته شد که

در شکل ۳، لایه اول دارای گره‌های قابل تنظیم است که توابع عضویت مربوط به آنها به طور معمول به صورت گاوسی یا زنگوله‌ای، مثلثی و دوزنقه‌ای است. مقدار بیشینه و کمینه این توابع به ترتیب برابر یک و صفر است. در لایه دوم، گره‌ها ثابت هستند و دو سیگنال ورودی را در هم ضرب می‌کنند و نتیجه را به عنوان خروجی تحویل شبکه می‌دهند. میزان سازگاری ورودی با هر یک از توابع عضویت سیگنال‌های ورودی این گره‌هاست و خروجی آنها وزن مربوط به هر یک از قوانین است. گره‌های لایه سوم نیز ثابت هستند و وظیفه آنها نرمال کردن وزن هر یک از قوانین است. در لایه چهارم، گره‌ها وزن نرمالیزه هر یک از قوانین فازی را در خروجی بخش مؤخره آن قانون ضرب می‌کنند. تنها گره موجود در لایه پنجم تمامی سیگنال‌های خروجی از گره‌های لایه چهارم را جمع و به عنوان خروجی شبکه تحویل می‌دهد.

انتخاب تعداد مناسب قواعد یکی از نکات بسیار مهم در طراحی سیستم‌های فازی است. انتخاب قواعد زیاد باعث پیچیده شدن سیستم می‌شود و انتخاب تعداد کم از قواعد ممکن است باعث ایجاد سیستم فازی ضعیفی شود که دستیابی به اهداف مورد نظر را دشوار یا حتی ناممکن کند. در خوشه‌بندی، تعداد قواعد پارامتری مهم در سیستم‌های فازی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس زوج‌های ورودی-خروجی و خطای مدلسازی تعیین خواهد شد. علت اصلی خوشه‌بندی، چهار چوب‌بندی قوانین اولیه به منظور گروه‌بندی زوج‌های ورودی-خروجی در دسته‌های مختلف و استفاده از یک قانون فازی برای هر دسته است (Nasiri et al., 2015). در مراجع، الگوریتم‌های مختلفی برای خوشه‌بندی پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از

نتایج و بحث

تأثیر پارامترهای خشک کردن بر زمان فرآیند

مقادیر میانگین مدت زمان فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی از مقدار اولیه ۵/۶۷ (بر پایه خشک) به مقدار نهایی حدود ۰/۲۰ (بر پایه خشک) با استفاده از توان مایکروویو در شرایط مختلف آزمایش از ۱۸۰ تا ۹۲۰ ثانیه متغیر بود. کوتاه‌ترین زمان فرآیند مربوط به آزمایش با توان مایکروویو ۸۰۰ وات و ضخامت نمونه‌های ۳/۵ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن مربوط به شرایط آزمایشی با توان مایکروویو ۲۰۰ وات و ضخامت ۹ میلی‌متر بود. بر اساس گزارش‌های محققان، نوع خشک‌کن، شرایط خشکاندن و ویژگی‌های ذاتی و نیز رطوبت اولیه و نهایی محصول از جمله مهمترین عوامل تعیین کننده مدت زمان مورد نیاز برای خشک کردن محصولات زیستی مانند مواد غذایی و کشاورزی هستند (Torki-Harchegani et al., 2016a). نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد زمان مورد نیاز برای خشکاندن نمونه‌ها با استفاده از توان مایکروویو بسیار کم است. در روش خشک‌کردن به کمک امواج مایکروویو، انرژی به صورت الکترومغناطیسی به محصول منتقل می‌شود و آن را گرم می‌کند. در این روش، چرخش مولکول‌های دوقطبی آب اصلی‌ترین مکانیسم ایجاد گرما در درون محصول هستند. بنابراین، در مقایسه با روش‌های مرسوم انتقال حرارت مانند جابه‌جایی و هدایتی، سرعت و یکنواختی گرمایش به شدت افزایش می‌یابد. آب موجود در محصولات کشاورزی و غذایی، به ویژه برای میوه‌ها و سبزی‌هایی که مقادیر زیادی رطوبت دارند، مهم‌ترین مؤلفه دی‌الکتریک به

ترکیبی از دو روش حداقل مربعات و روش کاهش شیب پس انتشار است، و برای محاسبه خروجی نهایی از میانگین وزنی قواعد استفاده شد. روند آموزش بعد از ۱۰۰ دوره آموزش یا رسیدن به تلورانس خطای صفر متوقف شد (Nasiri et al., 2015).

ارزیابی و مقایسه عملکرد روش‌های مختلف مدل‌سازی

برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و ANFIS در پیش‌بینی لحظه‌ای نسبت رطوبت ورقه‌های سیب‌زمینی در حین فرآیند خشک کردن به روش مایکروویو، از معیارهای آماری شامل ضریب تبیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شد. این معیارها به صورت رابطه‌های ۶، ۷ و ۸ تعریف و محاسبه می‌شوند (Kaveh et al., 2018; Dokoohaki et al., 2014):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR})^2} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (7)$$

$$NRSME = \frac{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{0.5}}{R} \quad (8)$$

که در آنها،

MR_{exp} = نسبت رطوبت واقعی؛ MR_{pre} = نسبت رطوبت پیش‌بینی شده؛ N = تعداد کل مشاهدات؛ \overline{MR} = میانگین کل نسبت رطوبت‌های واقعی؛ و R = دامنه تغییرات داده‌های واقعی.

شمار می‌رود. بنابراین، واکنش این محصولات به امواج مایکروویو بسیار شدید است و به سرعت و با راندمان زیاد انرژی این امواج را جذب می‌کنند (Torki-Harchegani *et al.*, 2016a). در نتیجه، کاربرد توان مایکروویو برای خشک کردن این نوع محصولات منجر به کاهش زمان فرآیند خواهد شد. در مطالعه موردی این تحقیق، به دلیل رطوبت زیاد نمونه‌ها، چرخش مولکول‌های دو قطبی آب باعث ایجاد اصطکاک و گرمای زیاد درون ورقه‌های سیب‌زمینی و در نتیجه باعث دفع رطوبت سریع آب موجود در نمونه‌ها شده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد افزایش توان مایکروویو، در سطوح مورد مطالعه، باعث کاهش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) زمان فرآیند خشک شدن نمونه‌ها شده است. در واقع، در سطوح بالاتر توان مایکروویو، هم انرژی جنبشی و هم انرژی جذب شده توسط محصول افزایش می‌یابد که منجر به افزایش اختلاف فشار بخار در مرکز و سطح نمونه‌ها و در نتیجه باعث افزایش سرعت حذف رطوبت و کاهش زمان فرآیند می‌شود. نتایجی مشابه با این یافته را محققان دیگر مانند زجاجی و همکاران (Zojaji *et al.*, 2016) برای توت سیاه، قربان پور و یوسفی (Ghorbanpour & Yousefi, 2019) برای فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر، و نوری و همکاران (Noori *et al.*, 2013) برای گیاه جعفری گزارش داده‌اند.

نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که افزایش ضخامت نمونه‌های سیب‌زمینی در محدوده مورد مطالعه (۳/۵ تا ۹ میلی‌متر) باعث افزایش معنی‌دار (در سطح احتمال ۵ درصد) زمان مورد نیاز برای خشکاندن نمونه‌ها شده است. در نمونه‌های ضخیم‌تر، فاصله‌ای که آب درون محصول باید طی

کند تا به سطح آن برسد بیشتر است و این خود باعث طولانی‌تر شدن زمان فرآیند دفع رطوبت می‌شود. افزایش مقدار کل آب موجود در نمونه‌های ضخیم‌تر، در مقایسه با نمونه‌های نازک‌تر، می‌تواند یکی دیگر از دلایل افزایش زمان فرآیند باشد. این نتیجه با گزارش‌های دیگر محققان برای خشک کردن محصولات غذایی و کشاورزی در سیستم‌های خشک‌کن مطابقت دارد. طولانی‌تر بودن زمان فرآیند برای نمونه‌های ضخیم‌تر را نقی‌پور زاده ماهانی و آق‌خانی (Naghipur Zadeh Mahani & Aghkhani, 2016) برای خشک شدن ورقه‌های هویج در خشک‌کن آون، درویشی و همکاران (Darvishi *et al.*, 2016) برای ورقه‌های کیوی در خشک‌کن مایکروویو، شوهر و همکاران (Süfer *et al.*, 2016) برای ورقه‌های پیاز در خشک‌کن مایکروویو، و حافظی و همکاران (Hafezi *et al.*, 2016a) برای ورقه‌های سیب‌زمینی در خشک‌کن خلئی-تابشی گزارش داده‌اند.

برازش مدل‌های ریاضی بر منحنی‌های خشک شدن

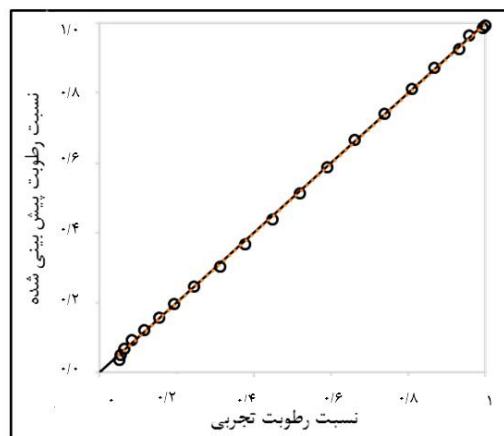
نتایج آماری برازش مدل‌های ریاضی بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌های خشک کردن نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مقدار ضریب تبیین برای همه مدل‌های مورد آزمون بیشتر از ۰/۹۰ و میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب کمتر از ۰/۲۹ و ۰/۱۱ است. این نتایج نشان دهنده توانایی مطلوب مدل‌های دینامیکی در پیش‌بینی سینتیک خشک شدن نمونه‌هاست. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه با دیگر مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، توصیف سینتیک خشک شدن نمونه‌ها توسط مدل میدیلی با دقت بهتری صورت گرفت. همانند نتایج

توسط مدل میدیلی با داده‌های تجربی، این داده‌ها در مقابل هم و روی یک نمودار رسم شدند. شکل ۵، نمونه‌ای از این نمودارها را برای توان ۸۰۰ وات و ضخامت نمونه‌های ۹ میلی‌متر نشان می‌دهد. ضریب همبستگی نمودار (۰/۹۹۷) بیانگر قابلیت بالای مدل میدیلی در توصیف سینتیک خشک شدن نمونه‌هاست.

این پژوهش، مدل ریاضی میدیلی به عنوان مناسب‌ترین مدل برای برازش سینتیک خشک شدن محصولات مختلف مانند لیموترش (Torki- Harchegani *et al.*, 2016b)، فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر (Ghorbanpour & Yousefi, 2019) و موسیر (Kaveh *et al.*, 2019a) معرفی شده است. به منظور نشان دادن تطابق داده‌های پیش‌بینی شده

جدول ۲- نتایج آماری پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن توسط مدل‌های ریاضی.

نام مدل	MSE	NRMSE	R ²
نیوتن	۰/۲۸۲۵	۰/۱۰۰۶	۰/۹۱۵۱
پیچ	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۹۱	۰/۹۹۶۹
هندرسون و پابیس	۰/۱۷۶۳	۰/۰۸۲۴	۰/۹۴۶۰
میدیلی	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۱۰	۰/۹۹۹۱
نمایی دو جمله‌ای	۰/۰۸۴۱	۰/۰۶۳۶	۰/۹۶۹۷
انتشار	۰/۱۰۷۵	۰/۰۷۰۲	۰/۹۶۲۱
لگاریتمی	۰/۰۷۲۸	۰/۰۵۸۹	۰/۹۷۴۴



شکل ۵- همبستگی نسبت‌های رطوبت تجربی و پیش‌بینی شده با مدل میدیلی برای توان ۸۰۰ وات و ضخامت نمونه‌های ۹ میلی‌متر

(CFBP) استفاده شد. الگوریتم‌ها با نگاشته‌ها مختلف بین پارامترهای ورودی (ضخامت نمونه‌ها، توان مایکروویو و زمان فرآیند) و پارامتر خروجی (نسبت رطوبت لحظه‌ای) آموزش داده شدند. تعداد نرون‌های پنهان در لایه‌های میانی با استفاده از معماری $3-y-1$ و $3-y-x-1$ به ترتیب برای شبکه با

پیش‌بینی مقدار رطوبت لحظه‌ای با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

در این مطالعه، برای پیش‌بینی نسبت رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها از دو ساختار شبکه عصبی مصنوعی شامل شبکه پس‌انتشار پیش‌خور چند لایه (MFFBP) و شبکه پس‌انتشار پیش‌رو زنجیره‌ای

شبکه پس‌انتشار پیشرو زنجیره‌ای با توپولوژی ۱-۲۰-۲۰-۳، الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوارت و تابع فعال‌سازی Tan-Tan-Log به ترتیب بهترین عملکرد را در پیش‌بینی رطوبت نسبی لحظه‌ای سیر و موسیر داشته‌اند.

از جدول ۳ دو نتیجه مهم به دست می‌آید. اول اینکه افزایش تعداد لایه‌های پنهان از یک لایه به دو لایه، باعث بهبود معنی‌دار عملکرد شبکه‌ها می‌شود. دوم اینکه عملکرد شبکه عصبی مصنوعی با افزایش تعداد نرون‌های لایه‌های پنهان بهبود می‌یابد اما با افزایش بیشتر تعداد نرون‌ها در این لایه‌ها، عملکرد شبکه کاهش می‌یابد.

به تعبیر دیگر، برای تعداد نرون‌های لایه‌های میانی یک حد بهینه وجود دارد که باید بدان دست یافت. یافته‌هایی مشابه با این نتایج را دیگر پژوهشگران، مانند گرجیان و همکاران (Gorjian et al., 2014) و بیگی و همکاران (Beigi et al., 2017) در استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی گزارش داده‌اند.

یک و دو لایه میانی تغییر داده شدند. در جدول ۳، بهترین آرایش شبکه‌های دارای کمترین خطا در پیش‌بینی داده‌های تجربی، ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، شبکه عصبی با ساختار پس‌انتشار پیشرو زنجیره‌ای با توپولوژی ۱-۱۰-۱۰-۳، الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوارت و تابع فعال‌سازی Tan-Tan-Lin دارای کمترین خطا و بیشترین ضریب تبیین در پیش‌بینی رطوبت نسبی لحظه‌ای ورقه سیب‌زمینی در فرآیند خشکاندن با توان مایکروویو را داشت. کاوه و همکاران (Kaveh et al., 2019a)، برای پیش‌بینی رطوبت نسبی سیر و موسیر از شبکه‌های عصبی مصنوعی با ساختار پس‌انتشار پیش‌خور و پس‌انتشار پیشرو زنجیره‌ای، توابع آموزش لونیگ-مارکوارت و تنظیم بی‌زی و توابع فعال‌سازی سیگموئید لگاریتمی، خطی و تانژانت هائیربولیک سیگموئید استفاده کردند. این محققان سرانجام گزارش کردند که شبکه پس‌انتشار پیش‌خور با توپولوژی ۱-۷-۷-۱، الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوارت و تابع فعال‌سازی Tan-Tan-Lin و

جدول ۳- نتایج آماری پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی

R ²	NRMSE	MSE	تعداد لایه‌ها و نرون‌ها	تابع فعال‌سازی	الگوریتم آموزش	ساختار شبکه
۰/۹۹۶۰	۰/۰۱۹۴	۵/۲۱× ^۴ -۱۰	۱-۱۵-۳	Tan-Lin	LM	MFFBP
۰/۹۹۸۲	۰/۰۱۴۰	۲/۱۸× ^۴ -۱۰	۱-۱۰-۳	Tan-Lin	BR	MFFBP
۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۸۲	۶/۹۳× ^۵ -۱۰	۱-۸-۷-۳	Tan-Tan-Lin	LM	MFFBP
۰/۹۹۹۰	۰/۰۱۰۸	۱/۱۸× ^۴ -۱۰	۱-۱۲-۳	Log-Lin	BR	MFFBP
۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۸۱	۶/۸۷× ^۵ -۱۰	۱-۱۰-۱۰-۳	Tan-Tan-Lin	LM	CFBP
۰/۹۹۸۷	۰/۰۱۲۸	۱/۵۶× ^۴ -۱۰	۱-۱۱-۱۲-۳	Log-Log-Lin	LM	CFBP
۰/۹۹۹۲	۰/۰۱۰۵	۱/۱۴× ^۴ -۱۰	۱-۱۰-۱۲-۳	Tan-Tan-Lin	BR	CFBP
۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۸۳	۷/۱۰× ^۵ -۱۰	۱-۶-۶-۳	Log-Log-Lin	BR	CFBP

نمونه‌های سیب‌زمینی با سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و اطلاعات مربوط به بهترین مدل‌ها و الگوریتم‌ها در جدول ۴ گزارش

پیش‌بینی مقدار رطوبت لحظه‌ای با استفاده از ANFIS نتایج آماری پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن

شده است. مانند سایر مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، در تجزیه و تحلیل ANFIS نیز باید بهترین معماری طراحی شود. برای دستیابی به معماری بهینه، از روش آزمون و خطا استفاده و تعداد قوانین فازی در پیش‌بینی پارامتر خروجی تعیین می‌شود. در این تحقیق، از روش خوشه‌بندی شبکه‌ای برای ایجاد ساختار سیستم، شش تابع عضویت ورودی و یک تابع عضویت خروجی استفاده شده است.

شده است. مانند سایر مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، در تجزیه و تحلیل ANFIS نیز باید بهترین معماری طراحی شود. برای دستیابی به معماری بهینه، از روش آزمون و خطا استفاده و تعداد قوانین فازی در پیش‌بینی پارامتر خروجی تعیین می‌شود. در این تحقیق، از روش خوشه‌بندی شبکه‌ای برای ایجاد ساختار سیستم، شش تابع عضویت ورودی و یک تابع عضویت خروجی استفاده شده است.

جدول ۴- نتایج آماری پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن با سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی.

R ²	NRMSE	MSE	تعداد توابع عضویت	تابع عضویت خروجی	تابع عضویت ورودی	الگوریتم خوشه‌بندی
۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۸۵	۶/۸۳×۱۰ ^{-۵}	۴،۴،۴	خطی	گوسی	شبکه‌ای
۰/۹۹۹۲	۰/۰۱۰۸	۱/۱۱×۱۰ ^{-۴}	۳،۴،۴	خطی	زنگوله‌ای	شبکه‌ای
۰/۹۹۷۵	۰/۰۱۸۰	۳/۰۹×۱۰ ^{-۴}	۴،۴،۴	خطی	دوزنقه‌ای	شبکه‌ای
۰/۹۹۳۷	۰/۰۲۸۵	۷/۷۵×۱۰ ^{-۵}	۵،۵،۵	خطی	مثلثی	شبکه‌ای
۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۹۱	۸/۳۲×۱۰ ^{-۵}	۳،۳،۳	خطی	منحنی دو طرفه گوسی	شبکه‌ای
۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۶۹	۴/۵۳×۱۰ ^{-۵}	۳،۳،۴	خطی	سیگموئیدی	شبکه‌ای

کاوه و همکاران (Kaveh et al., 2019b) برای پیش‌بینی سینتیک خشک شدن توت سفید در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-هوای داغ، از ANFIS استفاده و گزارش کردند که بهترین مدل قادر به پیش‌بینی نسبت رطوبت نمونه‌ها با ضریب تبیین برابر با ۰/۹۹۹۵ و MSE برابر با ۰/۰۰۴۴ است.

مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی منحنی‌های خشک شدن

نتایج حاصل از مقایسه عملکردی سه روش مدل‌سازی مختلف مورد مطالعه در این پژوهش برای پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن ورقه‌های

در پژوهشی، نصیری و همکاران (Nasiri et al., 2014) با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی مقدار رطوبت لایه نازک آویشن باغی، ضریب‌های تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای بهترین مدل را به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹۹۸ و ۰/۰۰۱۵ گزارش کردند. ضیا فروغی و همکاران (Ziaforoughi et al., 2016) ضریب‌های تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای بهترین مدل ANFIS مورد استفاده در تحقیق خود را برای پیش‌بینی نسبت رطوبت میوه در خشک‌کن مادون قرمز را به ترتیب ۰/۹۹۹۸ و ۰/۰۰۴۱ گزارش کردند.

دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2016) بارش-رواناب در حوزه آبخیز کسلیان را با استفاده از دو روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و شبکه فازی-عصبی تطبیقی مدل‌سازی کرده و بیان داشتند که شبکه عصبی-فازی تطبیقی از دقت بالاتری برخوردار بود. یوسفی (Yousefi, 2017) ورقه‌های خربزه با ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ میلی‌متر را با استفاده از جریان هوا با دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس خشکاندند. ایشان از ANFIS و مدل ترکیبی شبکه عصبی-الگوریتم ژنتیک برای تخمین سینتیک خشک شدن نمونه‌ها استفاده و گزارش کردند خطای ANFIS در مقایسه با دیگر روش مدل‌سازی کمتر بود.

سیبزمینی در خشک‌کن مایکروویو به صورت خلاصه در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های آماری، در پیش‌بینی داده‌های تجربی، مدل ANFIS در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی و مدل ریاضی از دقت بهتری برخوردار بود.

مزیت و برتری ANFIS در مقایسه با دیگر روش‌های مدل‌سازی توسط محققان مختلف گزارش

شده است. کاوه و همکاران (Kaveh et al., 2018) در پیش‌بینی رطوبت نسبی لحظه‌ای بادام در حین فرآیند خشک کردن بستر نازک با خشک‌کن هوای گرم از شبکه عصبی مصنوعی و ANFIS استفاده و دقت بهتر سیستم استنتاج فازی را گزارش کردند.

جدول ۵- نتایج آماری مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی مورد استفاده برای پیش‌بینی نمودارهای خشک شدن ورقه‌های سیبزمینی

نام مدل	MSE	NRMSE	R ²
میدیلی	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۱۰	۰/۹۹۹۱
شبکه عصبی	۶/۸۷×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۸۱	۰/۹۹۹۴
انفیس	۴/۵۳×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۶۹	۰/۹۹۹۷

کاهش معنی‌دار زمان فرآیند می‌شود. عملکرد روش‌های شبیه‌سازی مختلف شامل مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) در تخمین لحظه‌ای نسبت رطوبت نمونه‌ها در فرآیند خشک شدن بررسی و مقایسه شد. برای پیش‌بینی سینتیک

خشک شدن، هفت مدل دینامیکی لایه نازک بر داده‌های تجربی برآزش و بر اساس مجموعه داده‌ها، چندین مدل پیش‌بینی غیر خطی (ANN و ANFIS) با سه ورودی (توان مایکروویو، ضخامت

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر توان مایکروویو و ضخامت ورقه‌های سیبزمینی بر مدت زمان لازم برای خشکاندن لایه نازک نمونه‌ها مطالعه شد. فرآیند خشکاندن نمونه‌ها با ضخامت‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ میلی‌متر با استفاده از آن مایکروویو و در توان‌های ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ وات پی‌گرفته شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد زمان مورد نیاز برای خشکاندن نمونه‌ها با استفاده از توان مایکروویو بسیار کوتاه است و افزایش توان و کاهش ضخامت نمونه‌ها باعث

نمونه‌ها و زمان فرآیند) و یک خروجی (نسبت رطوبت) طراحی و استفاده شد. معلوم شد هر سه روش مدل‌سازی در برآورد نسبت رطوبت لحظه‌ای نمونه‌ها دقت مطلوبی دارند. با این حال، در مقایسه با مدل دینامیکی رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی، مدل ANFIS با ضریب تبیین ۰/۹۹۹۷ سیستم‌های پیچیده دارد.

بهترین نتایج را ارائه داده است. بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت مدل ANFIS به عنوان یکی از انواع مدل‌های غیر خطی، ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی پارامترهای اساسی فرآیند خشک کردن است و قابلیت بالایی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده دارد.

تعارض منافع

نویسندگان در رابطه با انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از اخلاق نشر تبعیت کرده و از موارد سوء اخلاق از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Behmanesh, M. and Mohammadi, M. 2017. Adaptive neuro-fuzzy inference system with self-feedback and imperialist competitive learning algorithm for chaotic time series prediction. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*. 7(4): 13–30. (in Persian)
- Beigi, M. 2016. Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology*. 36(1): 145–150.
- Beigi, M. 2019. Drying of mint leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 21(1): 77–88.
- Beigi, M., Toriki-Harchegani, M. and Tohidi, M. 2017. Experimental and ANN modeling investigations of energy traits for rough rice drying. *Energy*. 141, 2196–2205.
- Darvishi, H., Zarein, M. and Farhudi, Z. 2016. Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *Journal of Food Science and Technology*. 53(5): 2317–2333.
- Darvishi, H., Mohammadi, P., Azadbakht, M. and Farhudi, Z. 2018. Effect of different drying conditions on the mass transfer characteristics of kiwi slices. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 20(2): 249–264.
- Dehghani, N., Vafakhah, M. and Bahremand, A. 2016. Rainfall-runoff modeling using artificial neural network and neuro-fuzzy inference system in Kasilian watershed. *Journal of Watershed Management Research*. 7(13): 128–137. (in Persian)
- Demiray, E. and Tulek, Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. *Rio Grande*) slices in a convective hot air dryer. *Heat and Mass Transfer*. 48(5): 841–847.
- Dokoochaki, H., Gheisari, M., Mousavi, S. F., Zandparsa, S. and Hoogenboom, G. 2014. Development complex crop model based on CSM-CERES-Maize model for irrigation management and evaluating the maize growth simulations. *Journal of Water and Irrigation Management*. 3(2): 121–133. (in Persian)
- Ghanbarian, D., Baraani Dastjerdi, M. and Toriki-Harchegani, M. 2016. Mass transfer characteristics of bisporus mushroom (*Agaricus bisporus*) slices during convective hot air drying. *Heat and Mass Transfer*. 52(5): 1081–1088.
- Ghorbanpour, M. and Yousefi, M. 2019. Kinetics of biodegradable film drying in microwave oven. *Innovative Food Technologies*. 6(1): 1–8. (in Persian)

- Gorjian, Sh., Tavakoli Hashtjin, T. and Kohsh Taghaza, M. H. 2014. Modeling of thin-layer drying kinetics of barberry fruit (*Berberis Vulgaris*) using artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*. 45(11): 1–12. (in Persian)
- Hafezi, N., Sheikhe Davoodi, M. J. and Sajjadih, S. M. 2016a. A Study of drying rate of sliced potatoes during radiation-vacuum drying process using regression and artificial neural network models. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 47(2): 279–289. (in Persian)
- Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., Sajadiye, S. M. and Khorasani Ferdavani, M. E. 2016b. The study of some physical properties and energy aspects of potatoes drying process by the infrared-vacuum method. *Journal of Agricultural Machinery*. 6(2): 463–475. (in Persian)
- Joardder, M. U. H., Brown, R., Kumar, C. and Karim, M. A. 2015. Effect of cell wall properties on porosity and shrinkage of dried apple. *International Journal of Food Properties*. 18(10): 2327– 2337.
- Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Amiri Chayjan, R. and Mohammadigol, R. 2019a. 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)
- Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E. and Farshbaf Moghimi, M. B. 2018. The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Processing and Preservation*. 47(1): e12868.
- Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Golpour, I., Mesri Gandshmin, T., Abbaspour-Gilandeh, Y. and Jahedi Rad, Sh. 2019b. Prediction of white mulberry drying kinetics in microwave-convective dryer: A comparative study between mathematical model, artificial neural network and ANFIS. *Journal of Food Science and Technology*. 88(16): 201–219. (in Persian)
- Khodaparast Shirazi, J. and Sadeghi, Z. 2012. Modeling and forecasting method in seafood export ARIMA and artificial neural networks. *Quarterly Journal of Quantitative Economics*. 9(4): 111–132. (in Persian)
- Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Iqbal, J., Shamshirband, Sh., Omid, M., Badrul Anuar, N. and Abdul Wahab, A.W. 2015. A comparative study between artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy consumption in greenhouse tomato production: A case study in Isfahan province. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 17(1): 49–62.
- Mosavi Baygi, S. F., Farahmand, A., Taghi Zadeh, M. and Zia Foroghi, A. 2015. Modeling on hot air and infrared thin layers drying of persimmon slices. *Food Science and Technology*. 13(53): 161–171. (in Persian)
- Motevalli, A., Minaei, S., Abbasi, S. and Ghaderi, A. R. 2011. An Investigation of the Variations of Drying Rate, Effective Diffusion Coefficient, and Activation Energy for Microwave-vacuum Drying of Cherry. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*. 41(2): 161– 168. (in Persian)
- Naghipur Zadeh Mahani, M. and Aghkhani, M.H. 2016. The effect of slicing type on drying kinetics and quality of dried carrot. *Journal of Agricultural Machinery*. 6(1): 224–235. (in Persian)
- Nasiri, A., Mobli, H., Refiee, Sh. and Rezaei, K. 2014. Kinetic model simulation of thin-layer drying of thyme (*Thymus vulgaris* L.) using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Agricultural Engineering*. 36(2): 37–48. (in Persian)
- Nasiri, A., Mobli, H., Rafiee, Sh, Rezaei, K. 2015. Kinetic model simulation of thin-layer drying of peppermint (*Mentha piperita* L.) using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). 44(1): 35–43. (in Persian)

- Noori, M., Kashaninejad, M., Daraei Garne Khani, A. and Bolandi, M. 2013. Optimization of drying process of parsley using the combination of hot air and microwave methods. *Electronic Journal of Food Processing and Preservation*. 4(2): 103–122. (in Persian)
- Sattari, M., Salmasi, F. and Torkaman, GH. 2016. Performance evaluation of ANFIS and M5 tree models in crump weir discharge coefficient modeling. *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*. 3(5): 51–61. (in Persian)
- Sheela, KG. and Deepa, S. N. 2013. Review on methods to fix number of hidden neurons in neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/425740>
- Shirazi, R., Bakhshabadi, H. and 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*. 80(15): 61–72. (in Persian)
- Süfer, Ö., Sezar, S. and Demir, H. 2017. Thin layer mathematical modeling of convective, vacuum and microwave drying of intact and brined onion slices. *Journal of Food processing and Preservation*. 41(6):e13239.
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi Pirbalouti, A. and Sadeghi, M. 2016a. Dehydration behavior, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58: 407–418.
- Torki-Harchegani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M. and Tohidi, M. 2016b. Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices undergoing oven treatment. *Heat and Mass Transfer*. 52(2): 281–289.
- Wang, J. and Xi, Y. S. 2005. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*. 68(4): 505–511.
- Wang, J., Xiong, Y. S. and Yu, Y. 2004. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. *European Food Research and Technology*. 219(5): 500–506.
- Yousefi, A. R. 2017. Estimation of papaw (*Carcia papaw* L.) moisture content using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and genetic algorithm-artificial neural network (GA-ANN). *Iran Food Science and Technology Research Journal*. 12(6): 767–779.
- Ziafroughi, A., Yousefi, A. R. and Razavi, S. M. A. 2016. A comparative modeling study of quince infrared drying and evaluation of quality parameters. *International Journal of Food Engineering*, 12(9): 901-910.
- Zojaji, M., Mazaheri, A. F., Namayandeh, S. and Abolhasani, M. 2016. Investigation of black mulberry drying kinetics and energy consumption under microwave oven. *Journal of Food Technology and Nutrition*. 13(3): 57–64. (in Persian)

Original Research

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

H. Azimi-Nejadian* and M. Moradi Hassan Abad

* Corresponding Author: Ph.D. Candidate, Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. E-mail: h.aziminejadian@shirazu.ac.ir

Received: 30 July 2019, Accepted: 20 February 2020

<http://doi: 10.22092/fooder.2020.127271.1234>

Abstract

The main objective of this research was to compare of accuracy of three widely used simulation methods including mathematical thin layer models, artificial neural networks (ANN), and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in estimation of instantaneous moisture ratio of microwave power dried potato slices. To predict the moisture ratio, seven mathematical models were used. Furthermore, based on the experimental data, microwave power, samples thickness and process time, and the moisture ratio were considered as inputs and output of artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system, respectively. Designing of neural networks was performed based on multi-layer feed-forward back-propagation (MFFBP) and cascade forward back-propagation (CFBP) structures, linear (Lin), sigmoid hyperbolic tangent (Tan) and logarithmic (Log) threshold functions, and Levenberg-Marquardt (LM) and Bayesian Regularization (BR) training algorithms. For simulation by adaptive neuro-fuzzy inference system, Takagi-Sugeno fuzzy system was selected, structure of the fuzzy inference system (FIS) created by grid partitioning method, and the membership functions in fuzzy logic toolbar of MATLAB software used. Among the studied modeling methods, Midilli model, CFBP network with 3-10-10-1 topology, LM training algorithm and Tan-Tan-Lin function, and ANFIS model with sigmoid membership function in input and $3 \times 3 \times 4$ fuzzy rules were found as the best models. Based on the obtained results, all the three modeling methods were capable to estimate the instantaneous moisture ratio with desirable accuracy. However, showing the coefficient of determination of 0.9997 and mean square error of 4.53×10^{-5} , ANFIS model had the better performance in estimation of the experimental data.

Keywords: Simulation of drying process, Regression models, Artificial intelligence, Instantaneous moisture ratio