

شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک‌شدن لایه نازک نعناع فلفلی (*Lenthapiperita*) به کمک سامانه استنتاج تطبیقی عصبی فازی (Anfis)

امین نصیری^{۱*}، حسین مبلی^۲، شاهین رفیعی^۳، کرامت‌اله رضائی^۴
۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران
۲،۳،۴. استادان، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۱۰/۵)

چکیده

رتبه‌بندی گیاهان دارویی بر اساس تعداد کل دارو نشان می‌دهد گونه‌های متعدد گیاه نعناع با نام عمومی *Mentha* از پرمصرف‌ترین گیاهانی هستند که در صنایع مختلف دارویی، غذایی، آرایشی، و بهداشتی به‌کار می‌روند. فرایند خشک‌کردن برای حفظ کمیت و کیفیت اسانس به‌دست‌آمده از گیاه، دارای نقش فوق‌العاده‌ای در فرآوری گیاهان دارویی است. مدل‌سازی از جنبه‌های مهم این فناوری با هدف انتخاب مناسب‌ترین روش خشک‌کردن است. بنابراین، در این تحقیق، رفتار خشک‌شدن لایه نازک نعناع فلفلی در خشک‌کن لایه نازک تحقیقاتی به‌کمک سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (Anfis) بررسی شد. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، در سه سطح سرعت ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ متر بر ثانیه انجام شد. از چهار مدل انفیس برای شبیه‌سازی سینتیک خشک‌شدن، و برای به‌وجود آوردن ساختار سامانه استنتاج فازی از دو روش دسته‌بندی شبکه‌ای و دسته‌بندی کاهشی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل انفیس داده‌های آزمایشگاهی را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین تکنیک دسته‌بندی کاهشی در مقایسه با روش دسته‌بندی شبکه‌ای، روشی مناسب برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی در فرایند پیش‌بینی مقدار رطوبت در محبت خشک‌شدن لایه نازک نعناع فلفلی است.

کلید واژگان

انفیس، خشک‌شدن، دسته‌بندی شبکه‌ای، دسته‌بندی کاهشی، نعناع فلفلی.

برگ‌ها، پیکر رویشی، و اسانس این گیاه در اکثر فارماکوپه‌های معتبر به‌منزله دارو یاد شده است. از مواد مؤثر نعناع در صنایع داروسازی، داروهای برای مداوای دل‌درد و نفخ شکم تهیه می‌شود. عطر و طعم نعناع برای خوش‌طعم‌شدن داروهای بدمزه به‌کار گرفته می‌شود. منتول اسانس نعناع خاصیت ضد باکتری دارد و در تهیه محلول‌هایی برای شستشوی دهان و گلو استفاده می‌شود. منتول همچنین خاصیت ضد خارش دارد. اسانس نعناع در صنایع غذایی، بهداشتی و آرایشی، شیرینی‌سازی،

مقدمه

گیاهان دارویی اسانس‌دار نقش مهمی در زندگی انسان دارند و در ایران نیز دارای سابقه طولانی‌اند. از دوهزار سال قبل تاکنون برای ساخت ادویه و دارو از گونه‌های متنوع نعناع استفاده می‌شود. بهره‌گیری انسان از نعناع^۱ به ۲۵۰ سال قبل باز می‌گردد. از

* نویسنده مسئول. Email: Aminnassiri63@gmail.com
تلفن: ۰۹۱۲۶۰۵۹۵۶۲

1. *Mentha piperita* L.

کیفی محصولات کشاورزی چندین متغیر ورودی و خروجی مؤثرند، تحلیل آماری این نوع مسائل مستلزم ارائه تعدادی روابط ریاضی است که اغلب برای استفاده و تفسیر مشکل است.

در سال‌های اخیر سامانه‌های قدرتمندی به نام سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی در علوم گوناگون به کار می‌رود. این نوع سامانه‌ها با بهره‌گیری از قدرت آموزش شبکه‌های عصبی و مزیت زبانی سامانه‌های فازی (ANFIS) توانستند از مزایای این دو مدل برای تحلیل فرایندهای قدرتمند استفاده کنند. امروزه سامانه‌های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی یکی از روش‌های کارآمد در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی است. انفیس شبکه‌ای پنج لایه متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال‌دهنده گره‌هاست. آموزش این سامانه به این مفهوم است که با استفاده از داده‌های آموزشی پارامترهای غیرخطی مربوط به توابع عضویت فازی در لایه اول و پارامترهای خطی لایه چهارم طوری تعیین شوند که بازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل شود. روش آموزش ترکیبی دوگانه^۱ از مهم‌ترین روش‌های سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی است. در این روش برای آموزش در لایه اول از روش پسانتشار خطا و در لایه چهارم از روش تخمین کم‌ترین مربعات استفاده می‌شود (Najmi, 2006; Golmohammadi & Safavi, 2010).

سامانه‌های استنتاج فازی در بسیاری از فرایندها از جمله در فرایند تولید غذا استفاده می‌شود. به تحقیقاتی که Zhang & Litchfield (1993) در استفاده از کنترلرهای فازی در خشک‌کن دانه، لوآنو و همکاران (۲۰۰۴) که از منطق فازی برای اطمینان از سرخ‌شدن محصولات غذایی در فرایند خشک‌کردن و لطفی و همکاران (۲۰۱۱) در بهره‌ای از سامانه تطبیقی عصبی-فازی در خشک‌کن تسمه‌ای دانه استفاده کردند، می‌توان اشاره کرد. در تحقیق دیگر Lertworasirikul (2008) از مدل‌های تجربی، شبکه عصبی، و سامانه تطبیقی عصبی-فازی برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن نوعی کیک بهره برد.

1. Hybrid

نوشابه‌سازی، و صنایع ادویه‌ای نیز، مصرف می‌شود، به دلیل این کاربردهای متنوع است که در اکثر کشورها، نعنای را برای استخراج اسانس آن کشت می‌کنند (Omidbaigi, 2005).

خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگاه‌داری محصولات کشاورزی بعد از برداشت است. این فرایند اهمیت فوق‌العاده‌ای در فراوری گیاهان دارویی دارد، چرا که گیاهان دارویی اسانس‌دار اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آن‌ها استخراج نشود رایحه‌شان را از دست می‌دهند، همچنین تحقیقات نشان می‌دهد ترکیبات معطر گیاهان به شدت تحت تأثیر روش‌های فراوری قرار می‌گیرند. خشک‌کردن سریع و کامل، به حفظ رنگ و مواد معطر گیاه کمک می‌کند (Omidbaigi, 2009).

یکی از جنبه‌های مهم فناوری خشک‌کردن به‌خصوص برای فرایندهای صنعتی، مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن است. هدف از مدل‌سازی این است که مناسب‌ترین روش خشک‌کردن و بهترین شرایط عملیاتی را برای به‌دست‌آوردن محصول معین بتوان انتخاب کرد (Motevali et al, 2010). آگاهی از رفتار خشک‌شدن در طراحی، شبیه‌سازی، و بهینه‌سازی فرایند خشک‌شدن مهم است. در حین فرایند باید کنترل‌های دقیقی برای جلوگیری از ضایعات حرارتی اعمال گردد (Gorjian et al, 2010).

تحقیقات زیادی برای مدل‌کردن فرایند خشک‌کردن انجام شده است که می‌توان به مدل‌های ریاضی، روش‌های عددی، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مانند المان محدود، روش اجزای محدود، و شبکه عصبی مصنوعی اشاره کرد. این روش‌ها اطلاعات مفیدی را در خصوص انتقال حرارت و جرم و یا مدل‌سازی خشک‌شدن مهیا می‌کنند و در طراحی، ساخت، و بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها مؤثرند.

روش متداول برای استخراج مدل خشک‌شدن به‌منظور پیش‌بینی نحوه خشک‌شدن، کاربرد روش‌های آماری است. مدل‌های آماری یا معادلات رگرسیونی تابعی از فرضیات و ملاحظات ذاتی آزمایش‌ها در تحلیل هستند. در این روش، واقعیت پدیده به کمک معادله جبری برحسب یک متغیر یعنی زمان خشک‌شدن بیان می‌شود. برای پیش‌بینی شاخص‌های

که در آن M_w : میزان رطوبت بر پایه تر (kg) (water/kg wet matter), W_w : وزن محصول تر (kg) و W_d : وزن محصول خشک (kg) است.

$$W_{w1}[1 - M_{w1}] = W_{w2}[1 - M_{w2}] \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن W_w1 و W_w2 وزن نمونه بر حسب (kg) در رطوبت M_w1 و M_w2 بر پایه تر است.

برای انجام آزمایش‌ها، از خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی تولیدشده در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران استفاده شد (Taheri-Garavand *et al*, 2011). ساختمان خشک‌کن شامل فن سانتریفیوژ برای ایجاد جریان هوا، ده‌المنت ۱۰۰۰ وات برای گرم‌کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن، دو حسگر دما (LM35)، و یک حسگر رطوبت (SHT15) برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای عبوری است (شکل ۱).

حسگر دما در دمای 25°C دارای دقتی در حد 0.4°C و خروجی آن در محدوده بین صفر تا 100°C درجه سلسیوس خطی است. دقت رطوبت و دمای حسگر رطوبت در دمای 25°C به ترتیب ۲ درصد و 0.4°C درجه سلسیوس است. خروجی حسگر رطوبت برای دامنه رطوبتی بین ۱۰ تا ۹۰ درصد کاملاً خطی است. فن سانتریفیوژ دستگاه خشک‌کن دارای قابلیت تغییر میزان هوای ورودی به محفظه فن برای تنظیم سرعت هوا در خروجی است. برای تنظیم دقیق و ثابت نگه‌داشتن سرعت هوا در خروجی فن از دستگاه اینورتر استفاده شده است که با تغییر در بسامد ورودی به موتور، دور آن را تغییر می‌دهد. برای تنظیم بسامد ورودی به موتور متناسب با سرعت هوای خروجی از سرعت‌سنج پروانه‌ای مدل Testo 405-V1 با محدوده عملکرد $10-100\text{ m/s}$ استفاده شد. ترازوی دستگاه خشک‌کن مدل GF3000 ساخت شرکت A&D ژاپن است. این ترازو دارای دقت 0.1% گرم و حداکثر وزن اندازه‌گیری 3100 گرم است. برای اجرای فرایند کنترل و پایش خشک‌کن، میکروکنترلر AVR مدل ATMEGA 32 ساخت نرم‌افزار C+ - استفاده شد.

آزمایش‌ها در هفت سطح دمایی و با سرعت ثابت هوای عبوری و ضخامت ثابت نمونه در خشک‌کن انجام شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی منحنی سینتیک خشک‌شدن را در مقایسه با دو روش دیگر بهتر برآورد کرد.

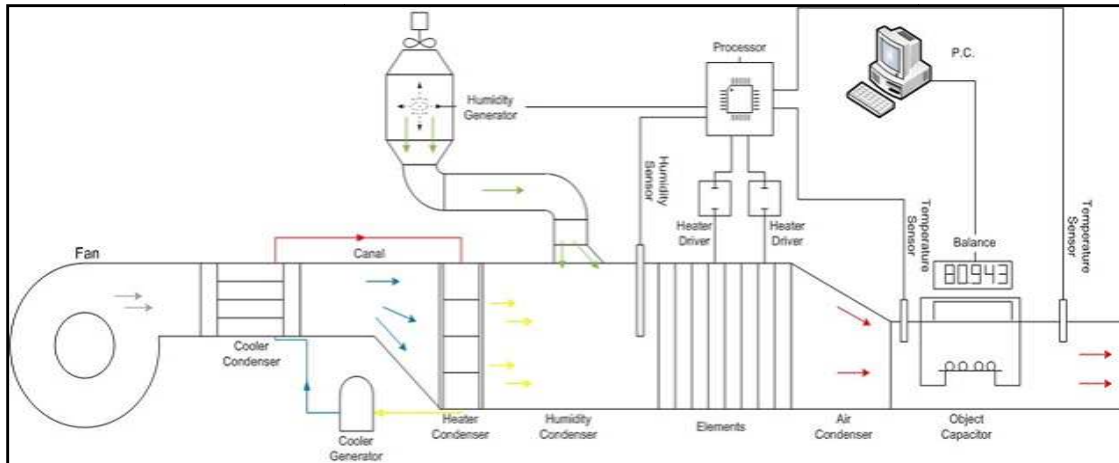
در این تحقیق، با استفاده از سامانه فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی روشی جدید و مؤثر برای شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک‌شدن لایه نازک نعنای فلفلی ارائه شده است.

▪ مواد و روش‌ها

برگ و سرشاخه‌های گیاه نعنای فلفلی از فاصله ۴ تا ۵ سانتی‌متری از سطح زمین و از مزرعه کشت گیاهان دارویی واقع در شهرستان هشتگرد در اواخر مهرماه برداشت شد. پس از نمونه‌برداری برای جلوگیری از تغییرات فیزیکی و شیمیایی و حفظ تازگی، نمونه‌ها داخل بسته‌های پلاستیکی قرار داده شد و سپس به سردخانه با دمای $4.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس منتقل شدند (Özbek & Dadali, 2007).

130 گرم برگ و سرشاخه نعنای فلفلی روی سه سینی توری آلومینیومی مربعی به ابعاد 25×25 سانتی‌متر مربع به‌گونه‌ای چیده شد که روی هر سینی لایه‌ای از محصول قرار گرفته بود. در طول دوره خشک‌شدن، وزن نمونه‌ها به‌وسیله ترازوی دیجیتالی متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن هر 10 ثانیه اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک‌شدن تا زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به رطوبت 12 درصد (بر پایه تر) که رطوبت مطلوب برای نگهداری گیاهان دارویی است (Garrido, 1988; Omidbaigi, 2009) ادامه داشت. قبل از شروع آزمایش رطوبت نمونه‌های نعنای از طریق قراردادن نمونه‌های 10 گرمی در داخل آن و در دمای 10.5°C درجه سلسیوس مدت 2 ساعت (Özbek & Dadali, 2007) به‌وسیله معادله ۱ محاسبه شد، همچنین به‌منظور تعیین وزن معادل با رطوبت 12 درصد از رابطه ۲ استفاده شد.

$$M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad \text{رابطه ۱}$$



شکل ۱. طرح‌واره خشک‌کن استفاده‌شده در این تحقیق [Taheri-Garavand et al, 2011]

بسیاری از برآزش‌ها را انجام داد. برای آموزش، ارزیابی، و آزمایش مدل‌های انفیس داده‌ها تصادفی به سه گروه داده‌های آموزشی، ارزیابی، و آزمایشی تقسیم شدند [Lertworasirikul, 2008]. مدل‌ها دمای خشک‌کن در سه سطح ۴۰، ۵۰، و ۶۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای خشک‌کن در سه سطح ۱/۰، ۱/۵، و ۲/۰ متر برثانیه و زمان خشک‌کردن و پارامتر خروجی نسبت رطوبت (MR) بود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی، و رطوبت توده در هر لحظه در طول دوره خشک‌شدن با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک (kg water/kg dry matter)، M_e رطوبت تعادلی (kg water/kg dry matter)، و M_0 رطوبت اولیه توده محصول (kg water/kg dry matter) است.

سمت چپ معادله نسبت رطوبت را نشان می‌دهد که مشخص‌کننده فرایند خشک‌کردن است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده، در صورتی که محتوای رطوبت نسبی هوای خشک‌کن متغیر باشد، در نتیجه آن محتوای رطوبت تعادلی نمونه‌ها نیز ثابت نخواهد بود، برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری محتوای رطوبت تعادلی نخواهد بود. بنابراین، معادله نسبت رطوبت در طول

برای رسیدن شرایط سامانه به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها ۱۵ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. سپس سینی دارای نمونه‌ها با دقت در محفظه خشک‌کن قرار می‌گرفت. نحوه خشک‌کردن به این صورت است که هوای جریان‌یافته در کانال به‌وسیله دمنده از گرم‌کن گذشته و پس از گرم‌شدن از طریق کانال به سمت توده نعان هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت نمونه را جذب و باعث گرم‌شدن آن می‌شود. بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک‌شدن محصول می‌گردد.

شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک‌شدن

برای شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک‌شدن بستر نازک نعان فلغلی از سیستم فازی سوگنو در قالب سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (Anfis) استفاده شد. اجرای ساختار انفیس بر اساس توابع عضویت انفیس در جعبه‌افزار منطق فازی نرم‌افزار Matlab (Ver 7.6) انجام گرفت.

به دلیل آن‌که در شبکه‌های عصبی نحوه عملکرد داخلی شبکه روشن نیست، برای تعیین معماری شبکه از آزمون و خطا استفاده می‌شود. از این‌رو باید تعدادی از شبکه‌های عصبی فازی را با معماری‌های گوناگون امتحان کرد تا بتوان به بهترین مدل دست یافت. مهم‌ترین محدودیت در طراحی مدل‌های متنوع این است که به دلیل آن‌که پارامترهای انفیس با زیادترشدن توابع عضویت برای هر ورودی تصادفی زیاد می‌شود، با کامپیوترهای موجود نمی‌توان

مشخص نباشد، از این روش می‌توان برای تخمین تعداد طبقه‌ها و مراکز آن‌ها استفاده کرد. دسته‌بندی کاهشی پتانسیل هر نقطه را بر اساس چگالی نقاط اطراف آن محاسبه می‌کند، نقطه‌ای که بالاترین پتانسیل را داشته باشد مرکز طبقه اول انتخاب می‌شود، نقاط اطراف این نقطه بر اساس شعاع مؤثر حذف می‌شوند. سپس نقطه‌ای که بالاترین پتانسیل را در بین نقاط باقی‌مانده داراست، مرکز طبقه بعدی انتخاب می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا تمام نقاط در طبقه‌های مناسب قرار گیرند (Neshat *et al*, 2011; Jang, 1993) در تمام مدل‌ها برای آموزش FIS از روش بهینه‌سازی هیبرید^۵ که ترکیبی از روش حداقل مربعات و روش کاهش شیب پس انتشار است، از عملگر And با تابع Prod و برای محاسبه خروجی نهایی از میانگین وزن‌دار شده قواعد استفاده شد (Lertworasirikul, 2008; Köni *et al*, 2009).

دوره خشک‌کردن به جای معادله ۳ به صورت معادله ۴ ساده می‌گردد (Diamante & Munro, 1993).
چهار مدل برای شبیه‌سازی به کار برده شد. در مدل‌های اول و دوم از تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای^۱ برای به وجود آوردن ساختار سامانه استنتاج فازی^۲ (FIS) استفاده شد. نوع و تعداد توابع عضویت بهره‌گرفته در این دو مدل در جدول ۱ ذکر شده است (Lertworasirikul, 2008) در مدل‌های سوم و چهارم از دسته‌بندی کاهشی^۳ برای ایجاد ساختار FIS استفاده شد. پارامترهای استفاده‌شده در این روش در جدول ۲ ارائه شده است. روش دسته‌بندی شبکه‌ای فضای داده‌ها را بر اساس تعداد و نوع توابع عضویت به فضاهای مستطیلی تقسیم می‌کند به طوری که بر هر فضایی یکی از قواعد اگر و آن‌گاه حاکم است. دسته‌بندی کاهشی داده‌ها را بر اساس پتانسیل داده‌ها طبقه‌بندی می‌کند. در صورتی که تعداد طبقه‌های مجموعه

جدول ۱. تعداد و نوع توابع استفاده‌شده در تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای برای ایجاد ساختار FIS

مدل	تابع عضویت	تابع عضویت متغیر	تعداد توابع عضویت برای متغیرهای ورودی	
انفیس	متغیر ورودی	خروجی	زمان	سرعت هوا
۱	مثلثی	خطی	۳	۳
۲	مثلثی	خطی	۴	۴

جدول ۲. پارامترهای استفاده‌شده در روش دسته‌بندی کاهشی برای ایجاد ساختار FIS

مدل انفیس	پارامترهای استفاده‌شده			
	Range of influence	Squash factor	Accept ratio	Reject ratio
۳	۰/۵	۱/۲۵	۰/۵	۰/۱۵
۴	۰/۱	۱/۲۵	۰/۲	۰/۱

(RMSE) استفاده شد. در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیشتر و مقدار RMSE کمتر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طول دوره خشک‌شدن پیش‌بینی کند (Aghbashlo *et al*, 2009).

روال آموزش بعد از ۱۰۰ دوره آموزش^۴ یا رسیدن به تکران صفر متوقف شد. برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب تعیین (R^2) و ریشه متوسط خطای داده‌ها

5. Hybrid

1. Grid partition
2. Fuzzy Inference System
3. Subtracting Clustering
4. Epoch

۰/۰۰۰۴۶ به ترتیب برای داده‌های آموزش، ارزیابی، و آزمایش به وسیله مدل ۴ به دست آمد (جدول ۴).

شکل ۲ روند کاهش خطای مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک نعنای با افزایش تعداد دوره آموزش در دما و سرعت هوای خشک شدن را برای مدل ۴ انفیسی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای مدل‌سازی بازای ۱۰۰ تکرار دوره آموزش به میزان قابل قبولی کاهش یافت. شکل ۳ ساختار مدل برتر را نشان می‌دهد.

مقایسه منحنی نسبت رطوبت بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های استخراج شده به وسیله مدل برتر در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است. مطابق شکل‌های ۴ و ۶ داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده‌های مدل روی یکدیگر منطبق شده‌اند. با توجه به بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل جدول ۴ کاملاً مشخص است که مدل جدید داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن $\text{MR}_{\text{exp},i}$ ، نسبت رطوبت به دست آمده در دوره خشک شدن، $\text{MR}_{\text{pre},i}$ ، نسبت رطوبت پیش‌بینی شده به وسیله مدل، N : تعداد مشاهده‌ها و n : تعداد ثابت‌های مدل است.

نتایج و بحث

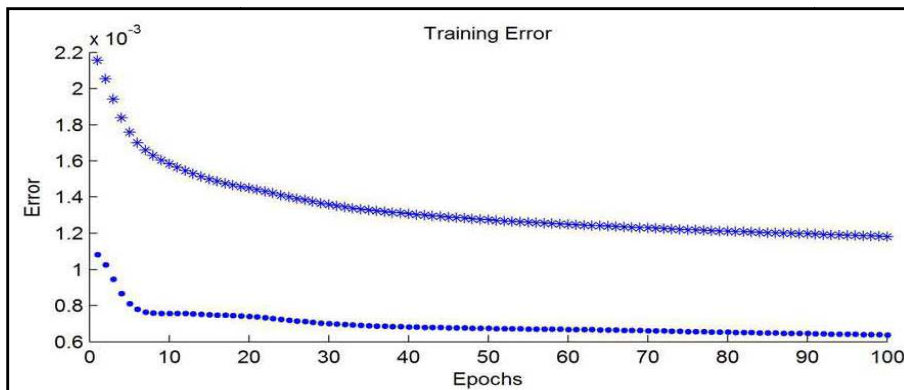
رطوبت نعنای فلفلی در آغاز خشک شدن برابر با $76/57 \pm 3/75$ بر پایه وزن تر بود. مشخصات مدل‌های استفاده شده در جدول ۳ ذکر شده است. جدول ۴ نتایج حاصل از آموزش مدل‌های گوناگون را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول مدل ۴ در مقایسه با سایر مدل‌ها بهتر خشک شدن نعنای فلفلی را پیش‌بینی می‌کند. بهترین همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی برای مراحل آموزش، ارزیابی، و آزمایش به ترتیب با ضریب تعیین $0/99998$ ، $0/99994$ و $0/99997$ و خطای آموزش $0/0012$ ، $0/0006$ و

جدول ۳. مشخصات مدل‌های انفیسی استفاده شده برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی نعنای در فرایند خشک شدن

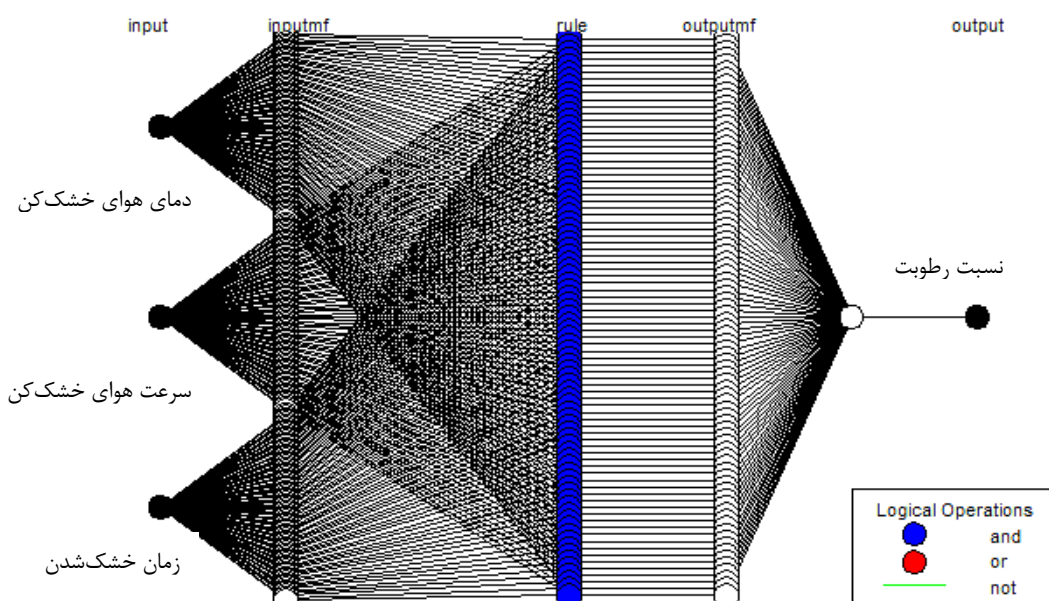
مدل انفیسی	تکنیک ایجاد ساختار FIS	نوع تابع عضویت متغیر ورودی	تعداد توابع عضویت برای متغیرهای ورودی			تابع عضویت متغیر خروجی
			زمان	سرعت هوا	دما	
۱	دسته‌بندی شبکه‌ای	مثلی	۳	۳	۳	خطی
۲	دسته‌بندی شبکه‌ای	مثلی	۴	۴	۴	خطی
۳	دسته‌بندی کاهشی	گوسی	۱۳	۱۳	۱۳	خطی
۴	دسته‌بندی کاهشی	گوسی	۷۹	۷۹	۷۹	خطی

جدول ۴. نتایج شاخص‌های آماری در پیش‌بینی نسبت رطوبت نعنای به وسیله مدل‌های مختلف انفیسی

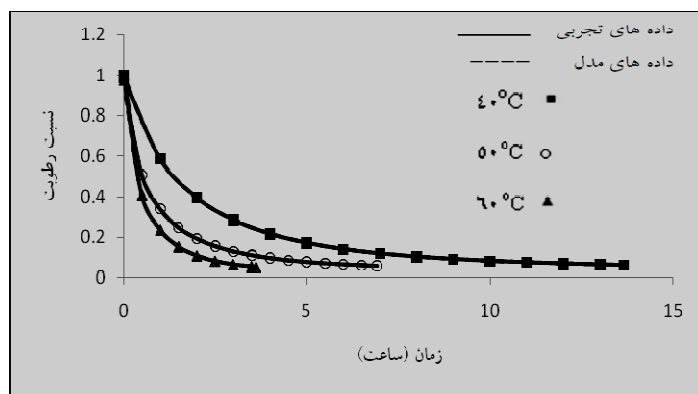
مدل انفیسی	مدل		خطای شبکه (RMSE)			R ²	
	R ²	RMSE	آزمون	ارزیابی	آموزش	آزمون	ارزیابی
۱	۰/۹۹۳۵	۰/۰۱۵۲	۰/۹۹۴۴	۰/۹۶۴۲	۰/۹۹۴۱	۰/۰۱۸۲	۰/۰۱۲۰
۲	۰/۹۹۶۹	۰/۰۱۰۶	۰/۹۹۸۹	۰/۹۸۱۸	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۸۱
۳	۰/۹۸۲۷	۰/۰۲۴۸	۰/۹۹۵۸	۰/۹۳۸۸	۰/۹۸۲۸	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۷۱
۴	۰/۹۹۹۹۸	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹۷	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۶۴



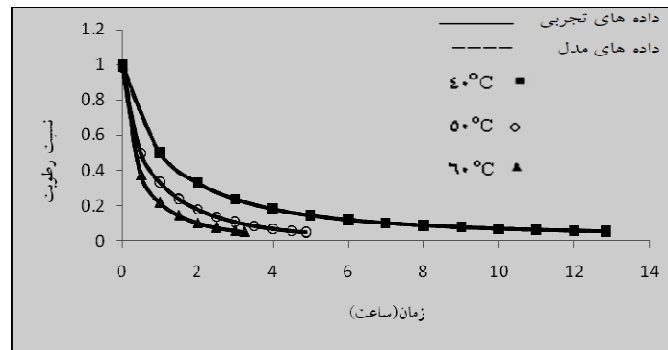
شکل ۲. منحنی عملکرد مدل ۴ انفیس در حین آموزش برای پیش‌بینی مقادیر MR نعنای
 (* خطای آموزش • خطای ارزیابی (RMSE))



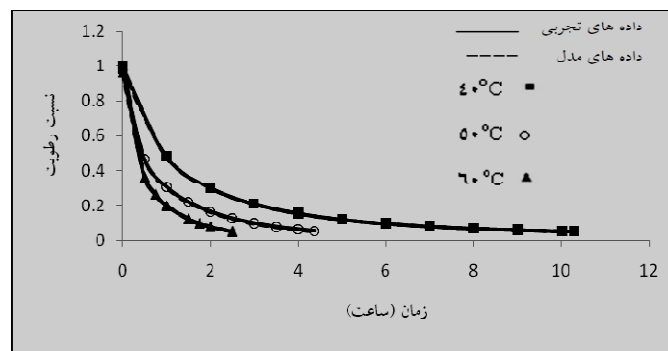
شکل ۳. ساختار مدل ۴ انفیس برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی نعنای در فرایند خشک‌شدن



شکل ۴. مقایسه منحنی خشک‌شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل انفیس در سرعت ۱/۰m/s



شکل ۵. مقایسه منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل انفیس در سرعت ۱/۵m/s



شکل ۶. مقایسه منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل انفیس در سرعت ۲/۰m/s

نتیجه گیری کلی

در بررسی فرایند خشک کردن مدل‌های تجربی دارای پیچیدگی کمتری در مقایسه با مدل‌های انفیس هستند، در مقابل مدل‌های انفیس با وجود پیچیدگی دارای دقت بالاتری هستند. به علاوه امکان به کارگیری بیش از دو متغیر در ورودی وجود دارد. برای پیش‌بینی نسبت رطوبت در الگوهای آزمایش نشده نیز، از این مدل‌ها می‌توان استفاده کرد. بنابراین، این مدل‌ها ابزاری مناسب برای پیش‌بینی نسبت رطوبت در مبحث خشک شدن لایه‌نازک‌اند که می‌توانند در سامانه‌های کنترل خشک‌کن به کار روند. بهترین همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی برای مراحل آموزش، ارزیابی، و آزمایشی با مدل ۴ و تکنیک دسته‌بندی کاهشی به دست آمد. می‌توان نتیجه گرفت تکنیک دسته‌بندی کاهشی در مقایسه با روش دسته‌بندی شبکه‌ای روشی مناسب برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی (FIS) در فرایند پیش‌بینی نسبت رطوبت در مبحث خشک شدن لایه نازک نعان فلفلی است.

معرفی نمادها

M_d	رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک (kg water/kg dry mater)
M_e	رطوبت تعادلی (kg water/kg dry mater)
M_o	رطوبت اولیه توده محصول (kg water/kg dry mater)
M_w	میزان رطوبت بر پایه تر (kg water/kg wet mater)
MR	نسبت رطوبت
$MR_{exp,i}$	نسبت رطوبت به دست آمده در طول دوره خشک شدن
$MR_{pre,i}$	نسبت رطوبت پیش‌بینی شده به وسیله مدل
N	تعداد مشاهده‌ها
R^2	ضریب تعیین
RMSE	جذر میانگین مربع خطای داده‌ها
W_d	وزن محصول خشک (kg)
W_w	وزن محصول تر (kg)

REFERENCES

1. Aghbashlo, M., Kianmehr, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2009). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetike of barberries (*barberries vulgaris*). *Journal of Food Process Engineering*, 32(2), 278-293.
2. Diamante, L.M., & Munro, P.A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. (51):271-276.
3. Garrido, M. (1988). Fungal contamination in commercial spices. *Almentaria*. 25(189),81-84.
4. Golmohammadi, M.H. & Safavi, H.R. (2010). Hydrological univariate time series forecasting using neural network based adaptive fuzzy system. In: The 5th Nation Congress of Civil Engineering, 5-7 Sept, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.(In Farsi)
5. Gorjian, SH., Tavakoli Hashjin, T. & Khosh-Taghaza, M.H. (2010). Modeling of thin-layer drying kinetics of Barberry Fruit (*Berberis Vulgaris*) using Artificial Neural Network. In: The 6th Nation Conference on Agri.Machinery Eng. and Mechanization, 15-16 Sept, Tehran University, Karaj, Iran.(In Farsi)
6. Ioannou, I., Perrot, N., Curt, C., Mauris, G., & Trystram, G. (2004). Development of a control system using the fuzzy set theory applied to a browning process—A fuzzy symbolic approach for the measurement of product browning: Development of a diagnosis model—Part I. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 497-506.
7. Jang, Jyh-S.R. (1993). Anfis:Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transaction on systems, Man, and Cybernetics*, (Vol. 23), (NO. 3).
8. Köni, M., Türker, M., Yüzgec, U., Dinçer, H., & Kapucu, H. (2009). Adaptive modeling of the drying of baker's yeast in a batch fluidized bed. *Control Engineering Practice* 17. 503-517.
9. Lertworasirikul, S. (2008). Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study. *LWT* 41. 1360-1371.
10. Lutfy, O.F., Mohd Noor, S.B., Marhaban, M.H. & Abbas, K.A. (2011). Non-linear modelling and control of a conveyor-belt grain dryer utilizing neuro-fuzzy systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: *Journal of Systems and Control Engineering* 225:611.
11. Motevali, A., Minaei, S., Khosh-Taghaza, M.H., Kazemi, M. & Nikbakht, A.M. (2010). Comparison of mathematical models and neural networks to predict the drying of pomegranate seeds. In: The 6th Nation Conference on Agri.Machinery Eng. and Mechanization, 15-16 Sept, Tehran University, Karaj, Iran.(In Farsi)
12. Najmi, M.R. (2006). Fin geometry optimization of air-cooled engines cooling surface using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). For fulfillment of the Requirements for MSc. Degree. Tehran University.(In Farsi)
13. Neshat, M., Adeli, A., masoumi, A. & sargolzae, M. (2011). A Comparative Study on ANFIS and Fuzzy Expert System Models for Concrete Mix Design. *International Journal of Computer Science Issues*, (Vol. 8), Issue 3, No. 2.
14. Omidbaigi, R. (2005). *Production and Processing of Medicinal Plants*. (Vol. 2), Mashhad: Behnashr.(In Farsi).
15. Omidbaigi, R. (2009). *Production and Processing of Medicinal Plants*. (5th ed.). (Vol. 1), Mashhad: Behnashr.(In Farsi).
16. Özbek, B. & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83, 541-549.
17. Taheri-Garavand, A., Rafiee, SH. & Keyhani, A. (2011). Effect of temperature, relative humidity and air velocity on drying kinetics and drying rate of BASIL leaves. *Electronic Journal of Environmental, Ahricultural and Food Chemistry*, 10(4). 2075-2080.
18. Zhang, Q., & Litchfield, J. B. (1993). Fuzzy logic control for a continuous crossflow grain dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 16(1), 59-77.