

پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک شدن لایه نازک آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) به کمک سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (ANFIS)

امین نصیری^{۱*}، حسین مبلی^۲، شاهین رفیعی^۳، کرامت‌اله رضائی^۴

* نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. (aminnassiri@ut.ac.ir)

۲ و ۳- استادان گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۲۸

چکیده

آویشن از گیاهان دارویی مهم است که از گذشته دور مورد استفاده قرار می‌گرفت. این گیاه دارای خواص متعددی در درمان بیماری‌ها به خصوص بیماری‌های عفونی می‌باشد. از آویشن و ترکیبات موجود در آن در صنایع مختلف غذایی، آرایشی و بهداشتی استفاده فراوانی به عمل می‌آید. آویشن باغی از گونه‌های مهم گیاه آویشن می‌باشد. فرآیند خشک کردن به‌منظور حفظ کمیت و کیفیت اسانس استحصالی از گیاه نقش فوق‌العاده‌ای در فرآوری گیاهان دارویی دارد و از جنبه‌های مهم فناوری خشک کردن با هدف انتخاب مناسب‌ترین روش خشک کردن، مدل‌سازی این فرآیند می‌باشد؛ لذا در این تحقیق، رفتار خشک شدن لایه نازک آویشن باغی در خشک کن لایه نازک تحقیقاتی به کمک سامانه استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (انفیس) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه انجام گرفت. از چهار مدل انفیس برای شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک آویشن باغی استفاده گردید. برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی از دو روش دسته‌بندی شبکه‌ای و دسته‌بندی کاهشی استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب تعیین و ریشه متوسط خطای داده‌ها استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل انفیس می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی پیش‌بینی کند. همچنین تکنیک دسته‌بندی کاهشی در مقایسه با روش دسته‌بندی شبکه‌ای، روشی مناسب برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی در فرآیند پیش‌بینی نسبت رطوبت در مبحث خشک شدن لایه نازک آویشن باغی می‌باشد.

کلید واژه‌ها: آویشن باغی، خشک شدن، انفیس، دسته‌بندی شبکه‌ای، دسته‌بندی کاهشی.

مقدمه

چند ساله می‌باشد. گونه آویشن باغی^۱، به صورت وحشی در ایران وجود ندارد؛ بلکه به ایران وارد شده و به صورت کاشته شده و زراعی دیده می‌شود (مظفریان، ۱۳۷۷). آویشن باغی از قرن شانزدهم رسماً به عنوان یک گیاه دارویی معرفی شد. در تمام دانشنامه‌های

آویشن گیاهی است از تیره نعنائیان یا لب گشادگان که از نظر دارویی دارای اهمیت زیادی است و جزء قدیمی‌ترین گیاهان دارویی و ادویه‌ای محسوب می‌شود. جنس تیموس^۱ در ایران دارای ۱۴ گونه معطر و

روش متداول برای استخراج مدل خشک شدن به منظور پیش‌بینی نحوه خشک شدن، روش‌های آماری است. مدل‌های آماری یا معادلات رگرسیونی تابعی از فرضیات و ملاحظات ذاتی آزمایش‌ها در تحلیل است. در این روش، واقعیت پدیده به کمک یک معادله‌ی جبری بر حسب یک متغیر یعنی دمای خشک‌کن بیان می‌شود. برای پیش‌بینی شاخص‌های 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 چند سال اخیر سامانه‌های قدرتمندی تحت عنوان سامانه‌های استنتاج فازی^۱ بر پایه شبکه عصبی تطبیقی در علوم مختلف به کار برده می‌شود. این نوع سامانه‌ها با بهره‌گیری از قدرت آموزش شبکه‌های عصبی و مزیت زبانی سامانه‌های فازی (انفیس) توانسته‌اند با استفاده از مزایای این دو مدل در جهت تحلیل فرآیند، بسیار قدرتمند عمل کنند. امروزه سامانه‌های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی یکی از روش‌های کارآمد در زمینه پیش‌بینی و مدل‌سازی می‌باشد. انفیس شبکه‌ای پنج لایه متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. آموزش این سامانه به این مفهوم است که با استفاده از داده‌های آموزشی پارامترهای غیر خطی مربوط به توابع عضویت فازی در لایه اول و پارامترهای خطی لایه چهارم طوری تعیین شوند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل گردد. روش آموزش ترکیبی دوگانه^۲ یکی از مهم‌ترین روش‌های سامانه‌های استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی می‌باشد. در این روش جهت آموزش در لایه اول از روش پس انتشار خطا و در لایه چهارم از روش تخمین کم‌ترین مربعات استفاده می‌شود (نجمی، ۱۳۸۵؛ گل محمدی و صفوی، ۱۳۸۹).

دارویی معتبر از پیکر رویشی آویشن به عنوان دارو یاد شده و خواص درمانی آن مورد تایید قرار گرفته است (امیدبگی، ۱۳۸۷). از آویشن و ترکیبات موجود در آن در صنایع مختلف غذایی، آرایشی و بهداشتی استفاده فراوانی به عمل می‌آید.

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی بعد از برداشت است. این فرآیند دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای در فرآوری گیاهان دارویی است، چرا که گیاهان دارویی حاوی اسانس اگر بلافاصله خشک نشوند و یا اسانس آن‌ها استخراج نشود رایحه‌شان را از دست می‌دهند؛ تحقیقات همچنین نشان می‌دهد که ترکیبات معطر گیاهان به شدت تحت تاثیر روش‌های فرآوری قرار می‌گیرند. خشک کردن سریع و کامل، به حفظ رنگ و مواد معطر گیاه کمک می‌کند (امیدبگی، ۱۳۸۸).

یکی از جنبه‌های مهم فناوری خشک کردن به خصوص برای فرآیندهای صنعتی، مدل‌سازی فرآیند خشک کردن است. هدف از مدل‌سازی این است که بتوان مناسب‌ترین روش خشک کردن و همچنین بهترین شرایط عملیاتی را برای به دست آوردن یک محصول معین انتخاب کرد (متولی و همکاران، ۱۳۸۹). آگاهی از رفتار خشک شدن در طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند خشک شدن مهم است. در حین فرآیند باید کنترل‌های دقیقی به منظور جلوگیری از ضایعات حرارتی اعمال گردد (گرگیان و همکاران، ۱۳۸۹).

تحقیقات زیادی جهت مدل کردن پروسه خشک کردن انجام شده است که از جمله می‌توان به مدل‌های ریاضی، روش‌های عددی، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مانند المان محدود، روش اجزا محدود و شبکه عصبی مصنوعی اشاره کرد. این روش‌ها اطلاعات مفیدی را در خصوص انتقال حرارت و جرم و یا مدل‌سازی خشک شدن مهیا می‌کنند و می‌توانند در طراحی، ساخت و بهینه‌سازی خشک‌کن‌ها موثر باشند (فیاضی و همکاران، ۱۳۸۹).

1- Fuzzy Inference System

2 Hybrid

مواد و روش‌ها

نمونه‌های آویشن (آویشن باغی) از گل‌خانه‌ی پرورش گیاهان دارویی واقع در شهرستان هشتگرد در مهرماه تهیه گردید. سعی شد تا کلیه نمونه‌ها از برگ‌ها و سرشاخه‌های هوایی گیاه، از فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتری زمین و به صورت تصادفی برداشت شوند. پس از تهیه نمونه‌ها برای جلوگیری از تغییرات فیزیکی و شیمیایی و حفظ تازگی نمونه‌ها برای انجام آزمایش، نمونه‌ها در داخل بسته‌های پلاستیکی قرار داده شد و سپس به سردخانه با دمای $4 \pm 0/5$ درجه سلسیوس منتقل شدند (دویماز، ۲۰۰۸).

۸۰ گرم برگ و سرشاخه آویشن باغی بر روی سه سینی توری آلومینیومی مربعی به ابعاد 25×25 سانتی‌متر مربع به گونه‌ای چیده شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفته بود. در طی خشک شدن، وزن نمونه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتالی متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک کن هر ۲۰ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک شدن تا زمان رسیدن وزن نمونه‌ها به رطوبت ۱۲ درصد (بر پایه‌ی تر) که به عنوان رطوبت مطلوب برای نگهداری گیاهان دارویی می‌باشد (امیدیگی، ۱۳۸۸؛ گاریدو^۸، ۱۹۸۸) ادامه داشت. قبل از شروع آزمایش رطوبت آویشن از طریق قرار دادن نمونه‌های ۱۰ گرمی از محصول در داخل آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت به وسیله معادله (۱) محاسبه شد (بالادین و هیدلی^۹، ۱۹۹۹)، همچنین به منظور تعیین وزن معادل با رطوبت ۱۲ درصد از رابطه (۲) استفاده شد.

$$M_w = \frac{W_w - W_d}{W_w} \quad (1)$$

که در آن M_w : میزان رطوبت بر پایه‌ی تر (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده تر)، W_w : وزن محصول

8- Garrido

9- Balladin and Headley

سامانه‌های استنتاج فازی در بسیاری از فرآیندها از جمله در فرآیند تولید غذا استفاده می‌شود. در این زمینه می‌توان به تحقیقاتی که توسط ژانگ و لیچفیلد^۱ (۱۹۹۳) در استفاده از کنترلرهای فازی در خشک کن دانه، آیونو و همکاران^۲ (۲۰۰۴) که از منطق فازی برای اطمینان از سرخ شدن محصولات غذایی در پروسه خشک کردن استفاده نمودند و همچنین به کارگیری سامانه تطبیقی عصبی - فازی (انفیس) در خشک کن تسمه‌ای دانه توسط لطفی و همکاران^۳ (۲۰۱۱) اشاره کرد. در تحقیق دیگر لرتوراسیریکول^۴ (۲۰۰۸) از مدل‌های تجربی، شبکه عصبی و سامانه تطبیقی عصبی - فازی برای مدل - سازی سینتیک خشک شدن نوعی کیک استفاده کرد. آزمایش‌ها در هفت سطح دمایی و با سرعت ثابت هوای عبوری و ضخامت ثابت نمونه در خشک کن انجام شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی منحنی سینتیک خشک شدن را نسبت به دو روش دیگر بهتر برآورد کرد.

پژوهشگران مختلفی در زمینه شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک شدن لایه نازک گیاهان دارویی به تحقیق پرداخته‌اند. پانچاریا و همکاران^۵ (۲۰۰۲)، رفتار خشک شدن برگ چای، دویماز^۶ (۲۰۰۶) خشک شدن برگ نعناع، دویماز (۲۰۰۸) خشک شدن آویشن در خشک کن کابینی و طاهری گراوند و همکاران^۷ (۲۰۱۱) خشک شدن لایه نازک ریحان را مورد آزمایش قرار دادند.

در این تحقیق، با استفاده از سامانه فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی روشی جدید و موثری جهت شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک شدن لایه نازک آویشن باغی ارائه شده است.

1- Zhang and Litchfield

2- Ioannou et al.

3- Lutfy et al.

4- Lertworasirikul

5- Panchariya et al.

6- Doymaz

7- Taheri-Garavand et al.

در خروج آب از بافت نمونه و در نتیجه خشک شدن محصول می‌گردد.

تر (کیلوگرم) و W_d : وزن محصول خشک (کیلوگرم) می‌باشند.

شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک شدن

برای مدل‌سازی سینتیک خشک شدن بستر نازک آویشن باغی از نسبت رطوبت در طی خشک شدن محصول استفاده می‌شود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن به وسیله معادله (۳) محاسبه می‌گردد (محمدی، ۱۳۸۷)

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

که در آن MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) و M_0 رطوبت اولیه توده محصول (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده تر) می‌باشد. طرف چپ معادله (۳) نسبت رطوبت را نشان می‌دهد که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است. بر اساس تحقیقات انجام شده، در صورتی که محتوای رطوبت نسبی هوای خشک‌کن متغیر باشد که در نتیجه آن محتوای رطوبت تعادلی نمونه‌ها نیز ثابت نخواهد بود و در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری محتوای رطوبت تعادلی نخواهد بود. بنابراین معادله نسبت رطوبت در طی خشک کردن به جای معادله (۳) به صورت معادله (۴) ساده می‌گردد (اربابی و آیسیرآ، ۲۰۱۰).

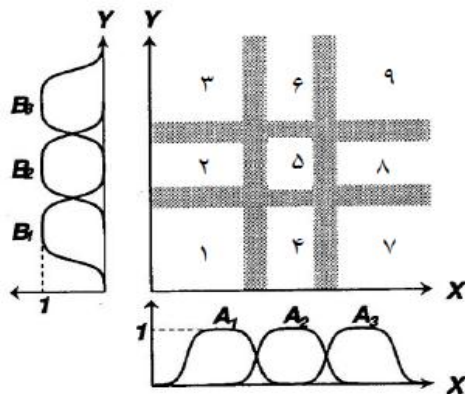
$$MR = \frac{M_d}{M_0} \quad (4)$$

$$W_{w1}[1 - M_{w1}] = W_{w2}[1 - M_{w2}] \quad (2)$$

که در آن W_{wi} وزن نمونه بر حسب کیلوگرم در رطوبت M_{wi} بر پایه‌ی تر می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک‌کن لایه نازک آزمایشگاهی که در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شده بود (طاهری گراوند و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده شد.

این خشک‌کن از یک فن سانترفوژ برای ایجاد جریان هوا و ده المنت برقی ۱۰۰۰ وات برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه خشک‌کن و دو حسگر دما^۱ و یک حسگر رطوبت^۲ برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده تشکیل شده است. ترازوی مورد استفاده در دستگاه خشک‌کن مدل GF3000 ساخت شرکت A&D ژاپن می‌باشد. این ترازو دارای دقت ۰/۰۱ گرم و حداکثر وزن قابل اندازه‌گیری ۳۱۰۰ گرم می‌باشد. برای اجرای فرایند کنترل و پایش خشک‌کن، میکرو کنترلر AVR مدل ATMEGA 32 مورد استفاده قرار گرفت که توسط نرم‌افزار سی پلاس برنامه‌آن نوشته شد. برای رسیدن شرایط سامانه به حالت پایدار کلیه آزمایش‌ها ۱۵ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. بعد از رسیدن شرایط سامانه به حالت پایدار، سینی حاوی نمونه‌ها با دقت در محفظه خشک‌کن قرار داده شد. نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته در کانال به وسیله دمنده از گرم‌کن گذشته و پس از گرم شدن به وسیله کانال به سمت توده آویشن هدایت می‌شود. جریان هوا هنگام گذر از توده، رطوبت نمونه را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. بدین ترتیب افزایش دما باعث تسریع

قسمت که بر هر یک از این فضاها یکی از قواعد اگر و آن‌گاه حاکم است، تقسیم می‌شود. مهم‌ترین محدودیت روش دسته‌بندی شبکه‌ای تعداد قواعد فازی می‌باشد، به این معنی که با افزایش متغیرهای ورودی تعداد قواعد فازی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر تعداد متغیرهای ورودی n و تعداد توابع عضویت برای هر متغیر ورودی m باشد، در این صورت تعداد قواعد فازی برابر با m^n خواهد بود. بنابراین این روش برای مسائلی که تعداد متغیرهای ورودی کم‌تری دارد مناسب می‌باشد (به عنوان مثال ۶ متغیر) (نشاط و همکاران^۴، ۲۰۱۱). تکنیک دسته‌بندی کاهشی داده‌ها را بر اساس پتانسیل داده‌ها طبقه‌بندی می‌کند. در صورتی که ایده‌ی روشنی درباره تعداد طبقه‌های یک مجموعه از داده‌ها موجود نباشد، این روش یک الگوریتم سریع برای تخمین تعداد طبقه‌ها و مراکز آن‌ها در مجموعه داده‌ها ارائه می‌دهد. در روش دسته‌بندی کاهشی، پتانسیل هر نقطه، بر اساس چگالی نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود. نقطه‌ای که بالاترین پتانسیل را داشته باشد به عنوان مرکز طبقه اول انتخاب می‌گردد؛ نقاط اطراف این نقطه بر اساس شعاع موثر حذف می‌شوند و سپس نقطه‌ای که بالاترین پتانسیل



شکل ۱- تقسیم فضای داده‌ها توسط روش دسته‌بندی شبکه‌ای بر اساس تعداد و نوع توابع عضویت

برای شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک شدن بستر نازک آویشن باغی از سامانه فازی سوگنو در قالب سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (انفیس) استفاده شد. اجرای ساختار انفیس بر اساس توابع عضویت انفیس در جعبه‌افزار منطق فازی نرم‌افزار مطلب نسخه ۷/۶ انجام گرفت.

برای آموزش، ارزیابی و آزمایش مدل‌های انفیس داده‌ها به طور تصادفی به سه گروه داده‌های آموزشی، ارزیابی و آزمایشی تقسیم شدند (لرتوراسیریکول، ۲۰۰۸). متغیرهای ورودی مدل‌ها، دمای خشک‌کن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای خشک‌کن در سه سطح ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و زمان خشک کردن و پارامتر خروجی نسبت رطوبت (MR) بود.

به دلیل آن‌که در شبکه‌های عصبی نحوه عملکرد داخلی شبکه روشن نیست، برای تعیین معماری شبکه از آزمون و خطا استفاده می‌شود. بنابراین باید تعدادی از شبکه‌های عصبی- فازی را با معماری‌های مختلف امتحان نمود تا بتوان به بهترین مدل دست یافت.

در سامانه استنتاج تطبیقی عصبی- فازی (انفیس) به منظور ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی^۱ (FIS) (تعداد و نوع توابع فازی، عملگرهای فازی و قواعد اگر و آن‌گاه) از دو روش تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای^۲ و تکنیک دسته‌بندی کاهشی^۳ استفاده می‌شود. روش دسته‌بندی شبکه‌ای فضای داده‌ها را بر اساس تعداد و نوع توابع عضویت به یک فضای مستطیلی تقسیم می‌کند، به طوری که بر هر یک از این فضاها یکی از قواعد اگر و آن‌گاه حاکم است. شکل ۱ نمایشی از روش کار تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای را برای دو متغیر ورودی نشان می‌دهد. برای هر یک از متغیرها سه تابع عضویت زنگوله‌ای تعریف شده است، بنابراین فضای داده‌ها به نه

1- Fuzzy Inference System
2- Grid partition
3- Subtracting clustering

مربعات و روش کاهش شیب پس انتشار می‌باشد، از عملگر And با تابع Prod و برای محاسبه خروجی نهایی از میانگین وزن دار شده قواعد استفاده شد (لرتوراسیری‌کول، ۲۰۰۸؛ کونی و همکاران^۵، ۲۰۰۹).

روال آموزش بعد از ۱۰۰ دوره آموزش^۶ یا رسیدن به تیرانس خطای صفر متوقف می‌گردد. برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب تعیین (R^2) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) استفاده شد. در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیش‌تر و مقدار RMSE کم‌تر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک شدن پیش‌بینی کند. مقدار RMSE توسط رابطه (۵) محاسبه شد (آقاباشلو و همکاران^۷، ۲۰۰۹).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{exp_i} - MR_{pre_i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که در آن MR_{exp_i} ، نسبت رطوبت به دست آمده در طی خشک شدن، MR_{pre_i} ، نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل، N : تعداد مشاهده‌ها و n : تعداد ثابت‌های مدل می‌باشند.

نتایج و بحث

رطوبت آویشن باغی در شروع خشک شدن برابر با $63/89 \pm 1/25$ درصد بر پایه وزن تر بود. جدول ۳ نتایج حاصل از آموزش مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۳ و تعداد توابع عضویت تعریف شده برای مدل‌های مختلف (جدول ۱ و ۲) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد توابع عضویت مقادیر ضریب تعیین و ریشه متوسط خطای داده‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با افزایش تعداد توابع عضویت، توانایی مدل‌ها برای پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبت بهبود پیدا می‌کند. نتیجه مشابهی

را در بین نقاط باقی مانده دارا می‌باشد به عنوان مرکز طبقه بعدی انتخاب می‌شود. این روند ادامه می‌یابد تا تمام نقاط در طبقه‌های مناسب قرار گیرند (جانگ^۱، ۱۹۹۳ و نشات و همکاران، ۲۰۱۱). شعاع موثر نقش مهمی در تعیین تعداد طبقه‌ها دارد. شعاع موثر کوچک‌تر باعث ایجاد طبقه‌های کوچک‌تر و در نتیجه افزایش تعداد طبقات و قواعد فازی می‌شود. بعد از دسته‌بندی فضای داده‌ها، تعداد قواعد فازی و توابع عضویت فرضی تعیین می‌گردد. با استفاده از برآورد مربعات خطی، نتیجه در خروجی توابع عضویت تعیین می‌شود. در انتها با استفاده از روش آموزش، پارامترهای توابع عضویت و خروجی این توابع متناسب با خروجی مطلوب، بهینه می‌شوند (وی و همکاران^۲، ۲۰۰۷).

در این تحقیق از چهار مدل انفیس برای شبیه‌سازی استفاده گردید. در مدل‌های اول و دوم (Gp1 و Gp2) از تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی استفاده شد. نوع و تعداد توابع عضویت استفاده شده در این دو مدل در جدول ۱ ذکر گردیده است (لرتوراسیری‌کول، ۲۰۰۸). در مدل‌های سوم و چهارم (Sc1 و Sc2) از دسته‌بندی کاهشی برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی استفاده شد. پارامترهای مورد استفاده در این روش در جدول ۲ ارائه گردیده است. در این روش نوع و تعداد توابع عضویت بر اساس پارامترهای مورد استفاده توسط نرم‌افزار تعیین می‌شود (جدول ۲). از آنجایی که مدل (Sc2) در مقایسه با مدل (Sc1) دارای شعاع موثر و نسبت عدم پذیرش^۳ کوچکتری می‌باشد؛ بنابراین مدل (Sc2) دارای دسته‌های کوچکتر و در نتیجه تعداد طبقات، قواعد فازی و توابع عضویت بیش‌تری می‌باشد (جدول ۲).

در تمام مدل‌ها برای آموزش سامانه استنتاج فازی از روش بهینه‌سازی هیبرید^۴ که ترکیبی از روش حداقل

5- Koni et al.

6- Epoch

7- Aghbashlo et al.

1- Jang

2- Wei et al.

3- Reject ratio

4- Hybrid optimization approach

آموزش، ارزیابی و آزمایش به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۹۹۹۹۸، ۰/۹۹۹۹۶ و ۰/۹۹۹۹۹ و خطای آموزش ۰/۰۰۰۱۶، ۰/۰۰۰۹۹ و ۰/۰۰۰۴۴ به ترتیب برای داده‌های آموزش، ارزیابی و آزمایش توسط مدل (Sc2) به دست آمد؛ بنابراین مدل (Sc2) که ساختار سامانه استنتاج فازی آن توسط روش دسته‌بندی کاهشی ایجاد شده است و همچنین با توجه به پارامترهای مورد استفاده برای تعریف این ساختار، دارای تعداد توابع عضویت و قواعد فازی بیش‌تری در مقایسه با سه مدل دیگر است، بهتر خشک‌شدن لایه نازک آویشن باغی را در مقایسه با سایر مدل‌ها پیش‌بینی می‌کند.

توسط لئوراسیریکول (۲۰۰۸) برای خشک کردن نوعی کلوچه ارثه شده است. از طرفی از نتایج جدول ۳ و با مقایسه شاخصه‌های آماری ضریب تعیین و ریشه متوسط خطای داده‌ها برای مدل‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که تکنیک دسته‌بندی کاهشی در مقایسه با روش دسته‌بندی شبکه‌ای روش مناسب‌تری برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی در فرآیند پیش‌بینی نسبت رطوبت در مبحث خشک‌شدن لایه نازک آویشن باغی می‌باشد. با توجه به جدول ۳، بهترین همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایشگاهی برای مراحل

جدول ۱- تعداد و نوع توابع مورد استفاده در تکنیک دسته‌بندی شبکه‌ای برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی

مدل انفیس	تکنیک ایجاد ساختار FIS	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت برای متغیرهای ورودی		
		متغیر ورودی	متغیر خروجی	زمان	سرعت هوا	دما
Gp1	دسته‌بندی شبکه‌ای	مثلی	خطی	۳	۳	۳
Gp2	دسته‌بندی شبکه‌ای	مثلی	خطی	۴	۴	۴

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در روش دسته‌بندی کاهشی برای ایجاد ساختار سامانه استنتاج فازی و مشخصات مدل‌های انفیس ایجاد شده توسط نرم‌افزار برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی آویشن در فرآیند خشک‌شدن

مدل انفیس	پارامترهای مورد استفاده							تابع عضویت
	نسبت عدم پذیرش	نسبت پذیرش ^۱	ضریب انتقال ^۲	شعاع موثر ^۳	تابع عضویت	تعداد توابع عضویت برای متغیرهای ورودی		
					تابع عضویت	زمان	سرعت هوا	دما
Sc1	۰/۱۵	۰/۵	۱/۲۵	۰/۵	گوسی	۱۶	۱۶	۱۶
Sc2	۰/۱	۰/۵	۱/۲۵	۰/۱	گوسی	۸۳	۸۳	۸۳

1- Accept ratio
2- Squash factor
3- Range of influence

جدول ۳- نتایج شاخص‌های آماری در پیش‌بینی نسبت رطوبت آویشن توسط مدل‌های مختلف انفیس

مدل انفیس	مدل R ²	خطای شبکه (RMSE)				مدل RMSE	مدل R ²
		ارزیابی آزمون	ارزیابی آموزش	ارزیابی	آموزش		
Gp1	۰/۹۸۰۶	۰/۹۷۱۵	۰/۹۳۸۷	۰/۹۸۳۶	۰/۳۳۵	۰/۹۸۰۶	
Gp2	۰/۹۸۸۷	۰/۹۷۹۳	۰/۹۵۹۱	۰/۹۹۰۸	۰/۲۶۶	۰/۹۸۸۷	
Sc1	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۷۳	۰/۹۸۲	۰/۹۹۶۱	۰/۱۷۳	۰/۹۹۵۴	
Sc2	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹۹	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۹۹۸	

جدول ۴- شاخص‌های آماری مدل انفیس (Sc2) در پیش‌بینی نسبت رطوبت آویشن به تفکیک تیمارهای مختلف آزمایش

شاخصه‌های آماری		پارامترهای خشک‌کن	
مدل RMSE	مدل R ²	سرعت (m/s)	دما (°C)
۰/۰۰۰۴۹۸	۰/۹۹۹۹۸	۱	۴۰
۰/۰۰۰۳۹۵	۰/۹۹۹۹۸	۱/۵	۴۰
۰/۰۰۰۳۳۲	۰/۹۹۹۹۸	۲	۴۰
۰/۰۰۰۹۱۵	۰/۹۹۹۹۶	۱	۵۰
۰/۰۰۰۸۹۱	۰/۹۹۹۹۶	۱/۵	۵۰
۰/۰۰۰۴۰۲	۰/۹۹۹۹۸	۲	۵۰
۰/۰۰۵۸۷۰	۰/۹۹۸۸	۱	۶۰
۰/۰۰۱۵۱۱	۰/۹۹۹۹۶	۱/۵	۶۰
۰/۰۰۲۶۲۱	۰/۹۹۹۹	۲	۶۰

روی یکدیگر منطبق شده‌اند. با توجه به شکل تغییر رطوبت در طی خشک شدن (شکل‌های ۴ تا ۶) می‌توان دریافت که هرچه دمای هوای خشک‌کن بیش‌تر باشد در دقایق اول خشک شدن، کاهش رطوبت سریع‌تر می‌باشد (هندرسون^۱، ۱۹۷۴؛ کاراتانوس^۲، ۱۹۹۹؛ یالدیز و همکاران^۳، ۲۰۰۱).

توانایی مدل (Sc2) انفیس در پیش‌بینی نسبت رطوبت خشک شدن لایه نازک آویشن باغی به تفکیک دما و سرعت‌های مورد آزمایش بر اساس شاخصه‌های آماری ضریب تعیین و ریشه متوسط خطای داده‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل (جدول ۳ و ۴) کاملاً مشخص می‌گردد که مدل

شکل ۲ روند کاهش خطای مدل‌سازی خشک کردن لایه نازک آویشن با افزایش تعداد دوره آموزش در دما و سرعت هوای خشک شدن را برای مدل (Sc2) انفیس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای مدل‌سازی به ازای ۱۰۰ تکرار دوره آموزش به میزان قابل قبولی کاهش یافت. شکل ۳ نیز ساختار مدل برتر (Sc2) را نشان می‌دهند.

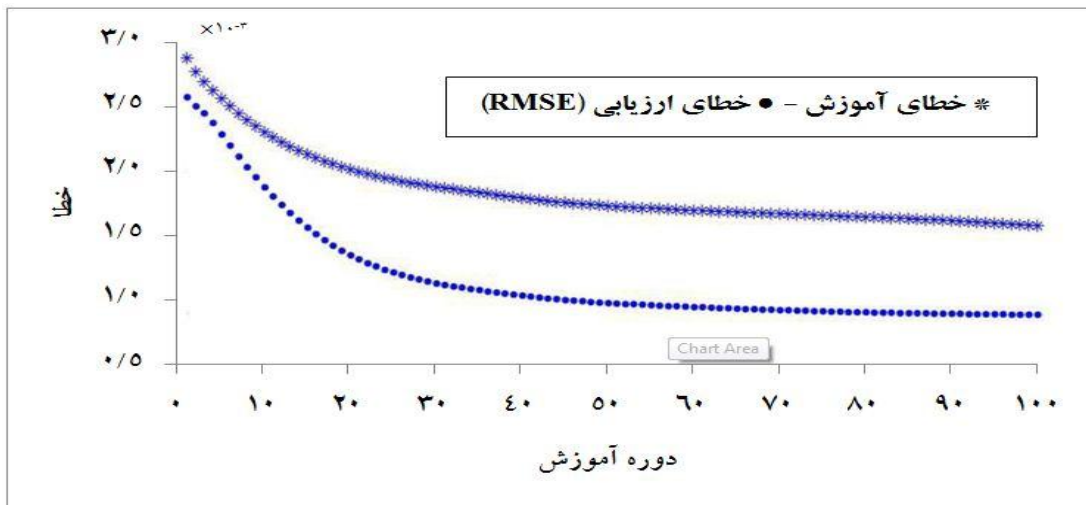
مقایسه منحنی نسبت رطوبت بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های استخراج شده توسط مدل برتر در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است. مطابق این شکل‌ها داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی حاصل از داده‌های مدل

1- Henderson
2- Karathanos
3- Yaldiz et al.

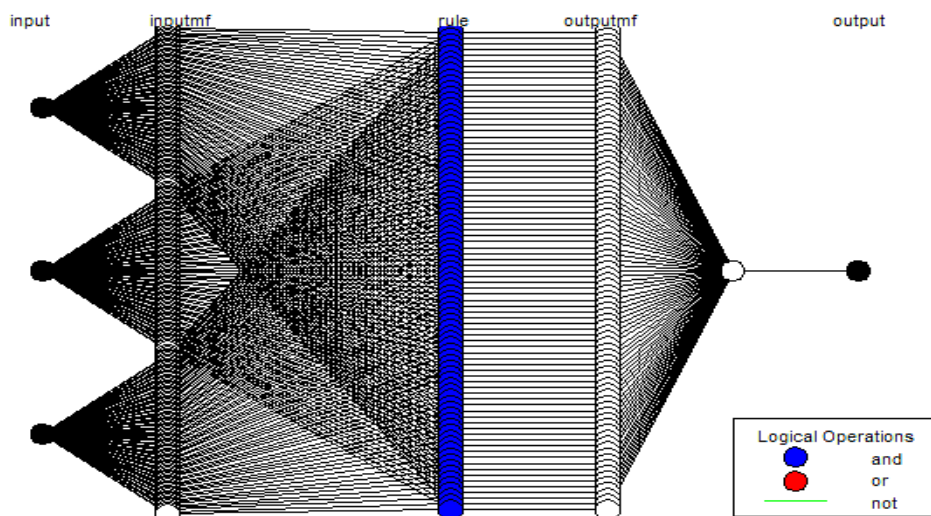
همچنین از این مدل‌ها می‌توان جهت پیش‌بینی نسبت رطوبت در الگوهایی که مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند استفاده کرد که این ویژگی باعث صرفه‌جویی در وقت و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این مدل‌ها ابزاری مناسب جهت پیش‌بینی نسبت رطوبت در مبحث خشک شدن لایه نازک می‌باشند که می‌توانند در سامانه‌های کنترل خشک کن به کار روند.

جدید می‌تواند داده‌های آزمایشگاهی را به خوبی پیش‌بینی کند.

در بررسی فرآیند خشک کردن مدل‌های تجربی دارای پیچیدگی کم‌تری نسبت به مدل‌های انفیس هستند، در مقابل مدل‌های انفیس علی‌الرغم پیچیدگی دارای دقت بالاتری می‌باشند و برای فرآیندهای پیچیده‌تر مناسب‌تر هستند (لرتوراسیری‌کول، ۲۰۰۸). به علاوه امکان به‌کارگیری بیش از دو متغیر در ورودی وجود دارد.

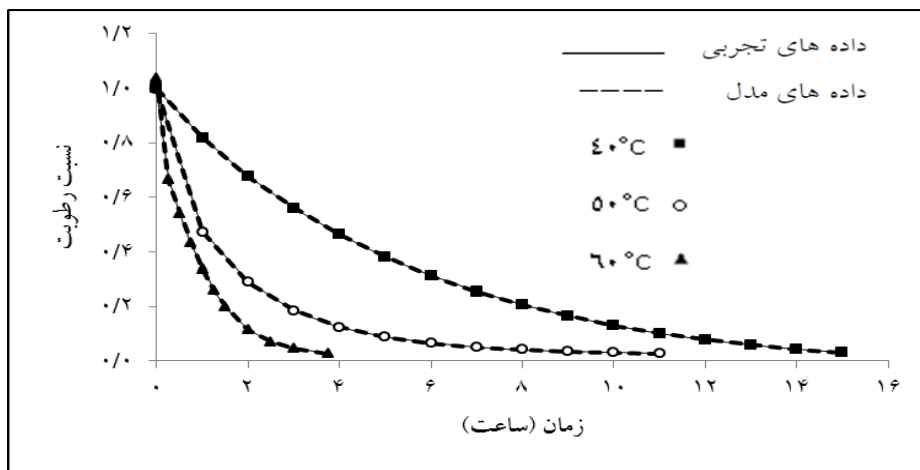


شکل ۲- منحنی عملکرد مدل (Sc2) انفیس در حین آموزش برای پیش‌بینی مقادیر نسبت رطوبت آویشن

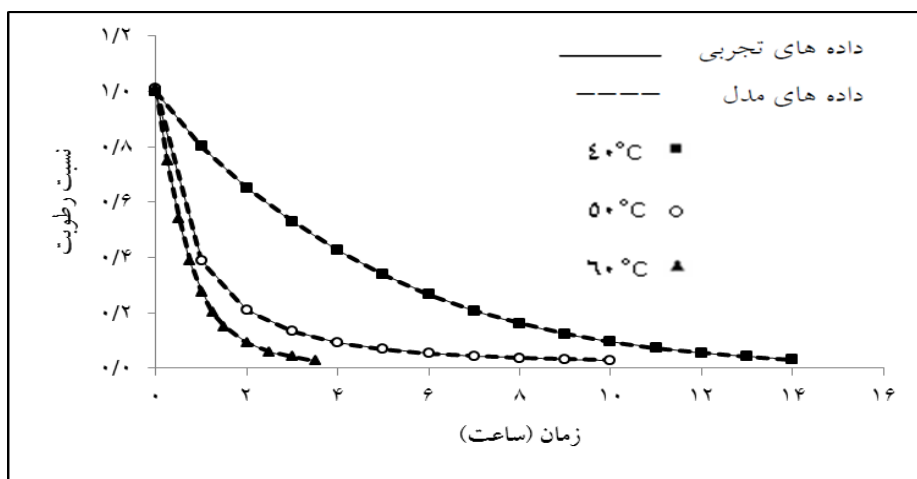


شکل ۳- ساختار مدل (Sc2) انفیس با سه ورودی و یک خروجی و ۸۳ تابع عضویت برای هر ورودی به منظور پیش‌بینی محتوای رطوبتی آویشن در فرآیند خشک شدن

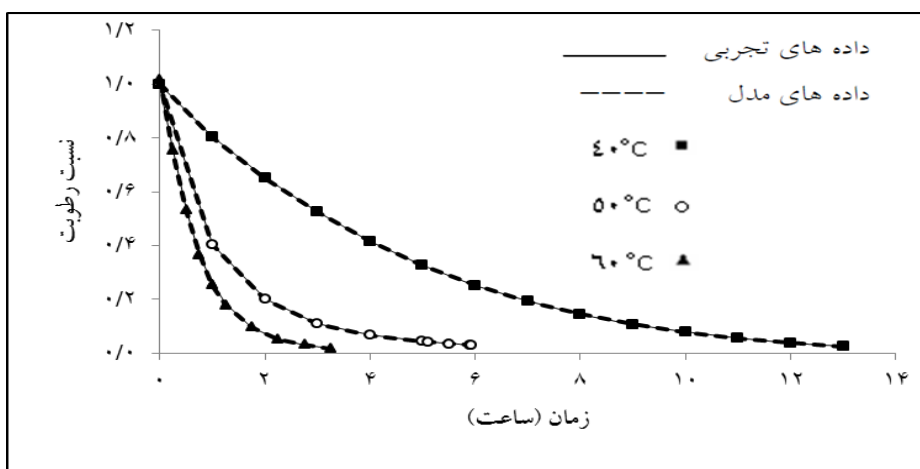
نصیری و همکاران: پیش‌بینی محتوای رطوبتی ...



شکل ۴- مقایسه منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل (Sc2) انفیس در سرعت ۱ متر بر ثانیه در دماهای مورد آزمایش



شکل ۵- مقایسه منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل (Sc2) انفیس در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در دماهای مورد آزمایش



شکل ۶- مقایسه منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل (Sc2) انفیس در سرعت ۲ متر بر ثانیه در دماهای مورد آزمایش

منابع

۱. امیدبگی، ر. ۱۳۸۷. تولید و فرآوری گیاهان دارویی (جلد سوم، چاپ پنجم)، انتشارات آستان قدس رضوی.
۲. امیدبگی، ر. ۱۳۸۸. تولید و فرآوری گیاهان دارویی (جلد اول، چاپ پنجم)، انتشارات آستان قدس رضوی.
۳. فیاضی، ا.، کاظمی، م.، خوش تقاضا، م.ه. و امیرنجات، ح. ۱۳۸۹. پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک شدن لایه نازک قارچ خوراکی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی پس‌انتشار. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۴. گرجیان، ش.، توکلی هاشجین، ت. و خوش تقاضا، م.ه. ۱۳۸۹. مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک میوه زرشک (*Berberis Vulgaris L.*) به کمک شبکه عصبی مصنوعی. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۵. گل محمدی، م.ح. و صفوی، ح.ر. ۱۳۸۹. پیش‌بینی سری‌های زمانی تک متغیره هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
۶. متولی، ع.، مینایی، س.، خوش تقاضا، م.ه.، کاظمی، م. و نیکبخت، ع.م. ۱۳۸۹. مقایسه پیش‌بینی مدل‌های ریاضی و شبکه‌های عصبی در خشک کردن دانه انار. ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۷. محمدی، ع. ۱۳۸۷. انتخاب مدل مناسب خشک کردن کیوی رقم هایوارد و مقایسه زمان و مقدار انرژی مصرفی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.
۸. مظفریان، و. ۱۳۷۷. فرهنگ نام‌های گیاهان ایران. انتشارات فرهنگ معاصر.
۹. نجمی، م.ر. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی هندسه فین‌های سطح خنک‌کاری موتورهای هواخنک با استفاده از شبکه عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS). پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک، دانشگاه تهران.
10. Aghbashlo, M., Kianmehr, M., and Samimi-Akhijahani, H. 2009. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetic of barberries (*barberries vulgaris L.*). Journal of Food Process Engineering, 32(2): 278-293.
11. Balladin, A.D., and Headley, O. 1999. Evaluation of solar dried thyme (*Thymus vulgaris L.*) herbs. Renewable Energy, 17: 523-531.
12. Doymaz, I. 2006. Thin layer drying behavior of mint leaves. Journal of Food Engineering, 74: 370-375.
13. Doymaz, I. 2008. Drying of thyme (*Thymus Vulgaris L.*) and selection of a suitable thin-layer drying model. Journal of Food Processing and Preservation, 35 (4): 458-465.
14. Erbay, Z., and Icier, F. 2010. A Review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50 (5): 441-464.
15. Garrido, M. 1988. Fungal contamination in commercial spices. Almentaria, 25(189): 81-84.

16. Henderson, S.M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17: 1167–1172.
17. Ioannou, I., Perrot, N., Curt, C., Mauris, G., and 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.
18. Jang, J.S.R. 1993. Anfis: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, 23 (3): 665-685.
19. Karathanos, V.T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337–344.
20. Köni, M., Türker, M., Yüzgeç, U., Dinçer, H., and Kapucu, H. 2009. Adaptive modeling of the drying of baker's yeast in a batch fluidized bed. *Control Engineering Practice*, 17. 503–517.
21. Lertworasirikul, S. 2008. Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 41: 1360–1371.
22. Lutfy, O.F., Mohd Noor, S.B., Marhaban, M.H., and 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*, pp. 225:611.
23. Neshat, M., Adeli, A., Masoumi, A., and Sargolzae, M. 2011. A Comparative study on ANFIS and fuzzy expert system models for concrete mix design. *International Journal of Computer Science Issues*. 8 (2): 196-210.
24. Panchariya, P.C., Popovic, P.C., and Sharma, A. L. 2002. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52(4): 349–357.
25. Taheri-Garavand, A., Rafiee, SH., and Keyhani, A. 2011. Effect of temperature, relative humidity and air velocity on drying kinetics and drying rate of Basil leaves. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 10(4): 2075-2080.
26. Wei, M., Bai, B., Sung, A.H., and Liu, Q. 2007. Predicting injection profiles using ANFIS. *Information Sciences*, 177: 4445–4461.
27. Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26: 457–465.
28. Zhang, Q. and Litchfield, J.B. 1993. Fuzzy logic control for a continuous crossflow grain dryer. *Journal of Food Processing and Engineering*, 16(1): 59–77.