

مدلسازی خشک کردن لایه نازک موز و بهینه سازی فرآیند توسط شبکه عصبی مصنوعی

فاطمه کریمی^۱، جلال دهقان نیا^{۲*}، بابک قنبرزاده^۳ و شاهین رفیعی^۴

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۹/۱۴

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۴ دانشیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

* مسئول مکاتبه: E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

یکی از فرآیندهای مهم به منظور نگهداری محصولات کشاورزی پس از برداشت، خشک کردن آنها می‌باشد. از آن جا که مدت زمان و شرایط خشک کردن بر بازده اقتصادی و میزان مصرف انرژی مورد نیاز برای فرایند تأثیر بسزائی دارد، لذا مدلسازی سینتیک خشک کردن می‌تواند یک راه مناسب برای کنترل بهینه فرایند باشد. در این تحقیق، خشک کردن لایه نازک موز در چهار دمای هوای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و سه ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی متر انجام شد. نتایج نشان داد که مدل پیچ و پیچ اصلاح شده، بهترین مطابقت را با داده‌های آزمایشی دارند. این مدلها دارای R^2 بیشتر و RMSE و χ^2 کمتر بودند. از شبکه عصبی مصنوعی نیز برای شبیه سازی ورقه‌های خشک شده موز استفاده شد. نتایج نشان داد که داده‌های آزمایشگاهی خوبی می‌توانند توسط شبکه برازش شوند (ضریب همبستگی: ۰/۹۹۸۴).

واژه های کلیدی: خشک کردن لایه نازک، شبکه عصبی مصنوعی، مدلسازی، موز

Modeling thin-layer drying of banana and process optimization using artificial neural network

F Karimi¹, J Dehghannya^{2*}, B Ghanbarzadeh³ and Sh Rafiee⁴

Received: September 10, 2011

Accepted: December 04, 2012

¹ MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴ Associate Professor, University College of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding author: E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

One of the important processes to preserve agricultural crops after harvest is drying. Since drying time and condition has considerable impacts on the process economic efficiency and energy consumption, therefore, kinetic modeling of drying can be a suitable way for optimum process control. In this study, banana thin layer drying was performed at four air temperatures (50, 60, 70 and 80°C), three air velocities (0.5, 1 and 1.5 m/s) and three banana thicknesses (2, 4 and 6 mm). Results showed that the Page and modified Page models have the best fit with the experimental data. These models had higher R^2 and lower RMSE and χ^2 . Artificial neural network was also used to optimize thin layer drying of banana. The results demonstrated that the experimental data can be fitted well with the network (correlation coefficient: 0.9984).

Keywords: Thin layer drying, Artificial neural network, Modeling, Banana

مقدمه

نسبتاً بالای محصولات خشک‌شده، علاوه بر مصرف تازه خوری، خشک‌شدن ورقه‌های موز منطقی و مقرون به صرفه خواهد بود.

از طرف دیگر، مدلسازی سینتیک خشک‌کردن، روابط بین متغیرهای زمان و رطوبت را ارائه می‌دهد که می‌تواند راه مناسبی برای کنترل زمان و شرایط خشک‌کردن باشد (رفیعی و همکاران ۲۰۰۷ و رفیعی و همکاران ۲۰۰۸). از مدل‌های مختلفی مانند نیوتن، پیچ، اصلاح شده پیچ، هندرسون و پاییس، لگاریتمی، دو جمله ای، دو جمله ای نمایی، تقریب پخش، ورما و همکاران، ونگ و سینگ، هندرسون و پاییس اصلاح شده و میدیلی و همکاران برای مدلسازی سینتیک خشک‌کردن استفاده می‌شود.

چن و وو (۲۰۰۱)، خشک‌شدن شلتوک با رطوبت بالا را به صورت لایه نازک مدلسازی کردند. آزمایش‌ها در

خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است که در آن فرایند کاهش رطوبت، در اثر انتقال جرم و حرارت همزمان صورت می‌گیرد. علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی به وسیله میکروارگانیسم‌ها و یا واکنش‌های شیمیایی، خشک‌کردن مواد غذایی باعث کاهش وزن ماده غذایی شده و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری حاصل می‌شود (فنگ و تانگ ۱۹۹۸). امروزه خشک‌شدن ورقه‌های میوه‌های مختلف مانند سیب، کیوی، پرتقال، موز، زردآلو و ... مرسوم گردیده و در بازار به قیمت بسیار بالایی به فروش می‌رسد. از آنجایی که عمر نگه‌داری موز بسیار کم می‌باشد و به دلیل ارزش افزوده

خشک شدن، رطوبت و سرعت هوای دمیده شده بود. در این پژوهش، ورودی‌های شبکه شامل سرعت جریان هوا در سه سطح ۰/۱۷۸، ۰/۲۶۷ و ۰/۳۵۶ متر بر ثانیه و دمای هوای ورودی در سه سطح ۵۴/۴، ۶۸ و ۸۱/۶ درجه‌ی سلسیوس و رطوبت نسبی هوای خشککن در سه سطح ۲/۸، ۱۴/۵ و ۲۶/۲ گرم بر متر مکعب بودند. نتیجه حاصل از این تحقیق به این شرح بود که می‌توان در یک خشککن بستر ثابت توزیع رطوبت در اعماق توده محصول در حال خشک شدن را توسط شبکه عصبی مدلسازی کرد؛ به نحوی که خروجی شبکه (تخمین رطوبت) به تغییرات ورودی شبکه بیشتر حساس باشد. در تحقیقی دیگر، بهینه‌سازی تخلخل در طی خشک کردن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام شده است (حسین و همکاران ۲۰۰۲). در این تحقیق، ورودی‌های شبکه عصبی مصنوعی شامل دمای خشک شدن، محتوای رطوبتی، تخلخل اولیه و نوع محصول و خروجی شبکه عصبی شامل تخلخل نهایی بود. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالایی می‌تواند تخلخل نهایی را پیش بینی کند. ارتنرک و همکاران (۲۰۰۴)، تحقیقی در زمینه‌ی مقایسه تخمین خشک کردن گیاه آنگوستیفولیا^۲ (یک گیاه با کاربرد پزشکی فراوان) به وسیله تحلیل رگرسیون و شبکه های عصبی مصنوعی انجام دادند. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه سلسیوس، در سه سطح سرعت هوای ۰/۳، ۰/۷ و ۱/۱ متر بر ثانیه و طول نمونه در سه اندازه کمتر از ۳ میلی متر، بین ۳ تا ۶ میلی متر و بیشتر از ۶ میلی متر انجام شد. ۱۵۰ گرم از نمونه‌ها پس از خروج از یخچال، تحت تیمارهای فوق در خشککن قرار گرفت. تحلیل رگرسیونی با چهار مدل نیوتن، هندرسون و پاییس، پیچ و پیچ اصلاح شده صورت گرفت و هم-زمان تحلیل در شبکه های عصبی مصنوعی نیز صورت گرفت و شبکه بهینه دو لایه با یک لایه مخفی و ۳۰ نرون

پنج سطح دمایی ۳۵ تا ۶۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۱۰ تا ۵۰ درصد انجام شد. یک مدل دو جمله‌ای به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک شدن لایه نازک شلتوک ارائه شد. دویماز (۲۰۰۳)، خشک کردن ورقه‌های نازک هویج را مورد مطالعه قرار داد. آزمایش‌های خشک کردن در دماهای ۵۰، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام شدند. در این تحقیق، مدل پیچ^۱ نسبت به مدل هندرسون و پاییس نتیجه بهتری نشان داد. شارما و همکاران (۲۰۰۵)، ورقه‌های نازک پیاز را در یک خشککن لایه نازک که انرژی گرمایی آن توسط اشعه مادون قرمز تأمین می‌شد، خشک کردند. آزمایش‌ها در دماهای ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. مدل پیچ به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن ورقه‌های نازک پیاز پیشنهاد شد. بازکار (۲۰۰۶)، خشک شدن لایه نازک زردآلو را مورد آزمایش قرار داد. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس و شش سطح سرعت هوای ورودی ۱، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸، ۲ و ۲/۴ متر بر ثانیه انجام شد. پس از تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از آزمایش، مدل پیچ به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی^۲ (ANN)، روش‌های محاسباتی نوینی برای یادگیری ماشینی در جهت پیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. هر شبکه از یک لایه ورودی و یک لایه خروجی و یک یا چند لایه میانی (یا پنهان) تشکیل شده است. فارکاس و همکاران (۲۰۰۰)، جنبه‌های مدلسازی حبوبات خشک شده توسط شبکه های عصبی مصنوعی را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، شبکه‌های عصبی مصنوعی در یک خشککن بستر ثابت به کار گرفته شد. هدف از این تحقیق، تخمین زدن رابطه بین توزیع رطوبت مواد خشک شده و پارامترهای فیزیکی شامل دمای

1. Page

2. Artificial Neural Networks

(شکل ۱). آزمایش‌ها به منظور مدلسازی سینتیک خشک-کردن ورقه‌های موز با ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر، در چهار سطح دمایی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سطح سرعت هوای ورودی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. نحوه خشک‌کردن بدین صورت بود که هوای جریان یافته به وسیله دمنده از المنت‌ها گذشته، گرم شده و به وسیله کانال به سمت ورقه موز هدایت می‌شود (شکل ۱). جریان هوا با عبور از توده موز باعث جذب رطوبت و خشک‌شدن آن می‌شود. برای تهیه ورقه‌های نازک موز از دستگاه ورقه‌بر (کالپاس‌بر) استفاده گردید. ۸۵ گرم ورقه نازک موز بر روی سینی توری آلومینیومی مربعی به ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی متر مربع به گونه‌ای چیده شد که روی هر سینی یک لایه از محصول قرار گرفت. در طی خشک‌شدن، وزن ورقه‌ها به وسیله ترازوی دیجیتالی متصل به رایانه و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن هر ۵ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شد. خشک‌شدن تا زمان ثابت‌شدن تقریبی وزن ورقه‌های نازک موز ادامه داشت. سپس نمونه‌ها در داخل آون با دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و وزن خشک نمونه‌ها بدست آمد.

مدلسازی سینتیک خشک‌شدن

برای مدلسازی سینتیک خشک‌شدن توده بستر نازک موز از نسبت رطوبت در طی خشک‌شدن توده استفاده می‌شود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک‌شدن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad [1]$$

که در آن MR نسبت رطوبت، M_d رطوبت توده در لحظه جاری بر پایه خشک، M_e رطوبت تعادلی و M_0 رطوبت اولیه توده محصول می‌باشد.

حاصل شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی با ۰/۱ درصد دقت بهتر از مدل پیچ اصلاح شده محتوای رطوبتی را تخمین می‌زند. لرتوراسیریکول و تیپسوان (۲۰۰۸) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی فعالیت آبی و محتوای رطوبتی گیاه کاساوا را بهینه‌سازی کردند. ورودی‌های شبکه شامل دمای خشک‌کردن، رطوبت نسبی و دمای نمونه و خروجی شبکه نیز شامل محتوای رطوبتی و رطوبت نسبی بود. در این تحقیق نیز، شبکه عصبی مصنوعی با ضریب همبستگی بالا (۰/۹۹۱۰) توانست داده‌های شبکه را بهینه نماید.

یکسری از تحقیقات جدیدتر نیز از کاربرد موفقیت آمیز شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پارامترهای فرایند خشک‌کردن محصولات مختلف غذایی حکایت دارد (محبی و همکاران ۲۰۱۱، توکلی پور و مختاریان ۲۰۱۲، مورتی و مانوهار ۲۰۱۲، مومن زاده و همکاران ۲۰۱۲). بعنوان مثال، محتوای رطوبتی نمونه‌های موز پیش تیمار شده با آبگیری اسمزی و اولتراسوند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش-بینی شده است (محبی و همکاران ۲۰۱۱). در این مطالعه، شبکه طراحی شده با ۷ و ۱۰ نرون به ترتیب در لایه‌های میانی اول و دوم، بهترین برازش (ضریب همبستگی: ۰/۹۴) را با داده‌های آزمایشی از خود نشان داد.

از آنجایی که بهینه خشک‌کردن محصولات کشاورزی از جنبه‌های مختلف مثل مصرف انرژی، کاهش ضایعات حاصل از بیش و کم خشک‌کردن و مشتری‌پسندی حائز اهمیت است، لذا هدف این مطالعه مدلسازی سینتیک و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بود.

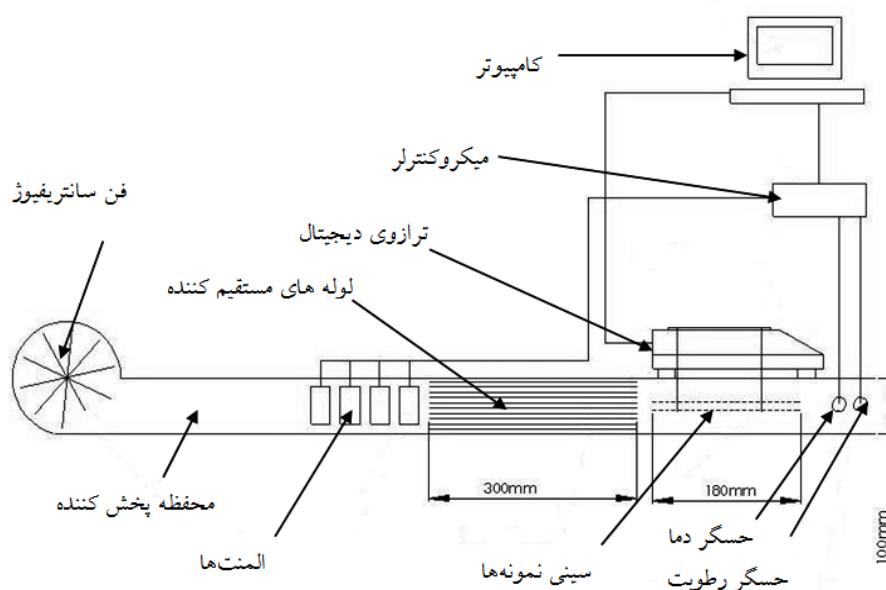
مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک-کن لایه نازک آزمایشگاهی، که در گروه مهندسی ماشین-های کشاورزی دانشگاه تهران ساخته شده، استفاده شد

شبکه‌های عصبی مصنوعی

در این تحقیق، از شبکه‌های پس‌انتشار پیشخور^۱ با الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوارت استفاده شد (شکل ۲). این شبکه شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی است. برای آموزش این شبکه از الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا^۲ (EBP) استفاده می‌شود. در حالت پس‌انتشار، ابتدا وزن‌های لایه خروجی تعدیل می‌شود، زیرا برای هر یک از نرون‌های لایه خروجی، مقدار مطلوب وجود دارد و می‌توان به کمک آن‌ها و قاعده‌های به‌نگام‌سازی، وزن‌ها را تعدیل نمود (خانا ۱۹۹۰). لایه ورودی شبکه شامل پارامترهای دما، سرعت هوا و زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز بوده و لایه خروجی را پاسخ‌های مورد نظر شامل محتوای رطوبتی و نرخ خشک‌شدن تشکیل می‌دهد.

بر اساس داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه، نسبت رطوبت در طی فرآیند خشک‌شدن ورقه‌های موز در هر یک از شرایط مورد آزمایش، براساس مدل‌های رایج شامل نیوتن، پیچ، پیچ اصلاح شده، هندرسون و پابیس، لگاریتمی، دوجمله‌ای، دوجمله‌ای نمایی، ونگ و سینگ، تامسون، تقریب انتشار، ورما و همکاران، هندرسون و پابیس اصلاح شده، میدیلی و همکاران (جدول ۱)، مورد تحلیل قرار گرفت. مدلی که دارای R^2 بیشتر و RMSE و χ^2 کمتر بود، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم افزار SAS 9.1 و برای مدلسازی و به دست آوردن ضرایب آن‌ها از روش رگرسیون خطی و غیرخطی با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.11 استفاده شد.

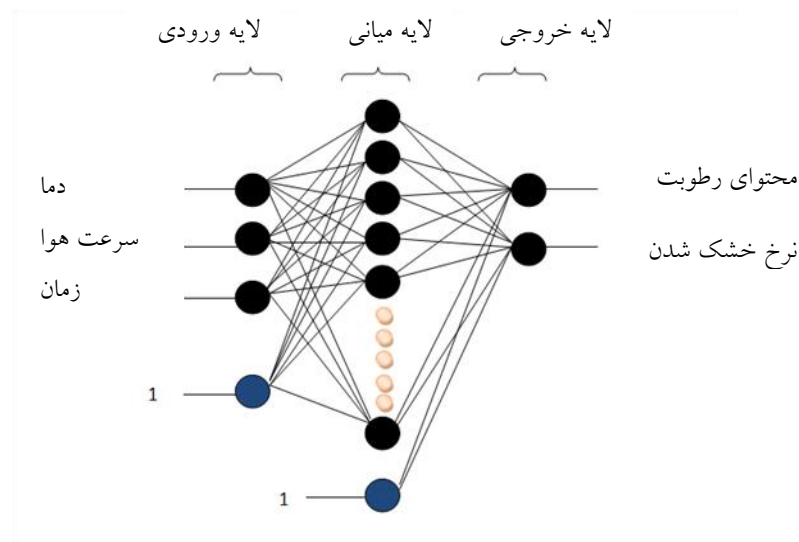


شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده

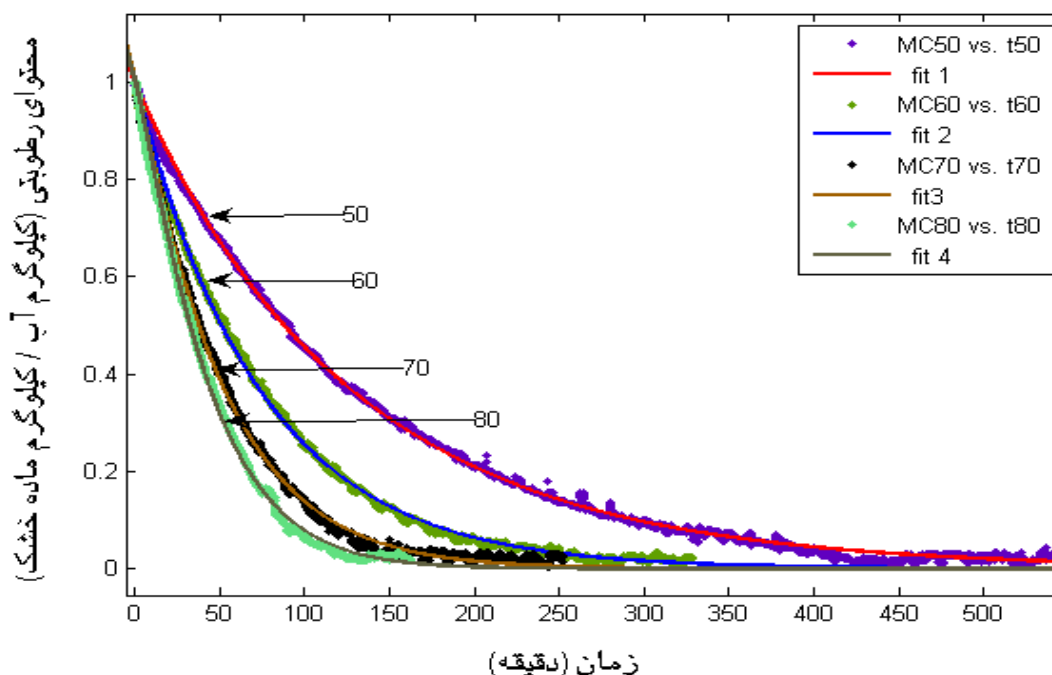
جدول ۱- مدل‌های رگرسیون خشک شدن توده بستر نازک محصولات کشاورزی

مرجع	مدل*	نام مدل
Westerman et al., 1973	$MR = \exp(-kt)$	نیوتن
Guarte, 1996	$MR = \exp(-ktn)$	پیچ
Overhults et al., 1973	$MR = \exp[-(kt)n]$	اصلاح شده پیچ
Zhang and Litchfield, 1991	$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پابیس
Yaldız and Ertekin, 2001	$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی
Rahman et al., 1998	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	دو جمله‌ای
Yaldız et al., 2001	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	دو جمله‌ای نمایی
Ozdemir and Devres, 1999	$MR = 1 + at + bt^2$	ونگ و سینگ
Yaldız and Ertekin, 2001	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-ktb)$	تقریب انتشار
Yaldız and Ertekin, 2001	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	ورما و همکاران
Karathanos, 1999	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	هندرسون و پابیس اصلاح شده
Midilli et al., 2002	$MR = a \exp(-ktn) + bt$	میدیلی و همکاران

* t: زمان (min) و a, b, c, g, h, k و n ثابت‌های مدل‌ها می‌باشند.



شکل ۲ - شمای کلی از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در تحقیق



شکل ۳ - منحنی خشک شدن بر اساس داده‌های آزمایشی و برازش داده شده با مدل پیچ در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه و ضخامت ۲ میلی‌متر در چهار دمای مختلف

در همه نمونه‌های آزمایشی سرعت خشک شدن در اوایل فرآیند بیشتر از اواخر فرآیند می‌باشد. به بیان دیگر، با افزایش زمان خشک شدن و کاهش محتوای رطوبتی شیب مدل‌ها کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش سرعت خشک شدن می‌باشد. در این شکل (منحنی خشک شدن مربوط به دمای ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه و ضخامت ۲ میلی‌متر)، در مدت زمان ۵۰ دقیقه اول فرآیند خشک شدن ۶۰ درصد محتوای رطوبتی اولیه کاهش یافته در حالیکه در ۵۰ دقیقه دوم فرآیند تنها ۲۶ درصد از محتوای رطوبتی اولیه ورقه‌های موز کاهش یافته است. تاوایانی‌چایانا و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی که در مورد فرآیند خشک شدن ورقه‌های موز انجام دادند نیز پارامتر محتوای رطوبتی را بر سرعت فرآیند موثر یافتند. آنها گزارش کردند که سرعت خشک شدن با کاهش محتوای رطوبتی، کاهش می‌یابد. در اوایل زمان فرآیند، تبخیر رطوبتی که در لایه سطحی نمونه‌های موز قرار گرفته نیاز به انرژی کمی دارد و با مدت زمان کم این انرژی تامین می‌شود. اما بعد از تبخیر

به منظور توسعه مدل با حداقل خطای میانگین مربعات از دو نرون در لایه میانی شبکه مورد آزمایش استفاده شده و در نهایت ۱۵ نرون برای لایه میانی برای دستیابی به حداقل خطای میانگین مربعات مورد نظر (۳-۱۰) مورد استفاده قرار گرفت (توپولوژی ۲-۱۵-۳). با این مشخصات شبکه بعد از ۳۲ اپوک به جواب رسید.

نتایج و بحث

استخراج مدل سینتیک خشک شدن

همانطور که در شکل ۳ (شکل نمونه از بین ۱۸ شکل استخراج شده در این تحقیق) مشاهده می‌شود، افزایش دما تاثیر معنی‌داری بر زمان خشک شدن ورقه‌های موز داشته است. این تاثیر باعث شده است که سینتیک خشک شدن ورقه‌های موز در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ کاملاً از یکدیگر مجزا شوند. افزایش دما، سرعت خشک شدن ورقه‌های موز را افزایش داده که این افزایش سرعت، باعث کاهش زمان مورد نیاز برای خشک شدن نمونه‌ها شده است. با توجه به شکل ۳ مشخص است که

سطحی رطوبت نمونه‌ها، در ادامه فرآیند باید رطوبت درون نمونه به سطح نمونه انتقال یابد و تبخیر شود. انتقال رطوبت از درون نمونه به سطح نمونه نیاز به انرژی دارد و هرچه فاصله این انتقال بیشتر باشد انرژی بیشتری مورد نیاز می‌باشد. بنابراین سرعت خشک‌شدن نمونه‌ها در اوایل فرآیند بیشتر از اواخر فرآیند می‌باشد (دویماز، ۲۰۱۰). کوآ و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که سرعت خشک‌شدن در اوایل زمان خشک‌شدن بیشتر است و با افزایش زمان شیب منحنی محتوای رطوبتی کاهش می‌یابد. آنها منحنی‌های سرعت خشک‌شدن ورقه‌های موز را بر اساس تغییر محتوای رطوبتی و زمان خشک‌شدن ارائه دادند و نسبت سطح به جرم نمونه‌ها را فاکتور مهمی در سرعت فرآیند معرفی کردند. هر چه سطح یک میزان مشخص از جرم موز بیشتر باشد سرعت فرآیند بیشتر خواهد بود. سطح بیشتر یک مقدار مشخص از جرم محصول نشان‌دهنده آن است که فاصله مرکز نمونه موز تا سطح نمونه کمتر می‌باشد و انتقال رطوبت به سطح آسانتر صورت می‌گیرد.

از میان مدل‌های مورد بررسی که در جدول ۱ ارائه شده است، مدل‌های پیچ و پیچ اصلاح شده به خاطر مقدار بالای R^2 و مقادیر پایین RMSE و χ^2 در هر چهار سطح دمایی نسبت به سایر مدل‌ها با دقت بیشتری خشک‌شدن ورقه‌های نازک موز را پیش‌بینی کردند. مقدار میانگین R^2 ، RMSE و χ^2 برای مدل پیچ ۰/۹۹۵۷، ۰/۰۱۱۳ و ۰/۰۰۰۲۷ و همچنین این مقادیر برای مدل پیچ اصلاح شده به ترتیب ۰/۹۹۷۹، ۰/۰۰۹۳ و ۰/۰۰۰۲۱ است. بعنوان نمونه، مقادیر R^2 ، RMSE، χ^2 و ضرایب مدل پیچ در شرایط مختلف آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است. دویماز (۲۰۱۰)، در تحقیقی به‌منظور پیش‌بینی محتوای رطوبتی ورقه‌های موز به ضخامت ۵ میلی‌متر، مدل‌های ریاضی هندرسون و پابیس، لگاریتمی، پیچ، توانی و ونگ و سینگ را ارزیابی کرد. او مدل پیچ را به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی ورقه‌های موز در دماهای ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس

معرفی کرد. در این تحقیق، مقادیر R^2 برای مدل پیچ مربوط به دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۹۹۴، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۸ و ۰/۹۹۲ و همچنین مقادیر RMSE به ترتیب ۰/۰۲۸، ۰/۰۳۶، ۰/۰۱۱ و ۰/۰۳۱ گزارش شد. در تحقیقی دیگر نیز، سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های موز، کیوی و گلابی با ضخامت ۵ میلی‌متر، سرعت هوای ۰/۳ متر بر ثانیه و دمای ۴۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته است (سیلان و همکاران ۲۰۰۷). در این تحقیق نیز، مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی ورقه‌های موز با شرایط ذکر شده مدل پیچ با R^2 برابر ۰/۹۹۸ گزارش شد.

در مدل پیچ و پیچ اصلاح شده ضرایب n و k ثابت های مدل‌ها هستند. در تحقیق حاضر، ثابت n در مدل پیچ در محدوده ۰/۹۱۱۴ تا ۱/۱۵۷ و در مدل پیچ اصلاح شده در محدوده ۰/۹۲۱ تا ۱/۱۴۶ قرار دارد و ثابت k برای مدل پیچ بین محدوده ۰/۰۰۳۹۲۹ تا ۰/۰۳۹۱۲ و برای پیچ اصلاح شده ۰/۰۰۲۲۴۶ تا ۰/۰۰۴۴۹ قرار دارد. سیلان و همکاران (۲۰۰۷) نیز ثابت‌های n و k را برای مدل پیچ مطابق شده بر سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های موز با ضخامت ۵ میلی‌متر، سرعت هوای ۰/۳ متر بر ثانیه و دمای ۴۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۸۹۸ و ۰/۰۱۳۹ گزارش کردند. همانطور که از جدول ۲ مشخص است ثابت‌های مدل‌ها مطابق با تغییر شرایط (دما، سرعت و ضخامت نمونه‌ها) تغییر می‌کند و ارائه مدل پیش‌بینی روند فرآیند با تعیین این ثابت‌ها صورت می‌گیرد. با تشخیص اثرات شرایط فرایند روی ثابت‌های مدل، می‌توان مقادیر این ثابت‌ها را به صورت مدل‌هایی ارائه داد. در این تحقیق، با استفاده از تجزیه واریانس رگرسیون، ثابت‌های n و k برای مدل‌های پیچ و پیچ اصلاح شده و سپس با بررسی تاثیرگذاری ضرایب مدل‌های n و k (دما، سرعت و ضخامت) برای هر دو مدل پیچ و پیچ اصلاح شده بر اساس آزمون t ، مدل ضرایب k و n برای مدل پیچ و پیچ اصلاح شده بدست آمدند. روابط ۲ و ۳ به

میلیمتر) می‌توان روند خشک‌شدن نمونه‌ها را کنترل نمود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی

شکل ۴ تصویری از نمودارهای نظیر به نظیر بین داده‌های واقعی با داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است برای هر یک از پلات‌های آموزش، ارزیابی، تست و کل دوخط $Y=T$ و Fit وجود دارد. انطباق خوب این دوخط برای هر یک از این پلات‌ها نشان‌دهنده دقت بالای این شبکه است. ضریب همبستگی (R) بسیار بالای این نمودارها گواه دیگری بر پیش‌بینی بسیار دقیق محتوای رطوبتی و نرخ خشک‌شدن توسط این شبکه آموزش دیده است. مقدار این ضریب برای پلات‌های آموزش، ارزیابی، تست و کل به ترتیب $۰/۹۹۹۴$ ، $۰/۹۹۹۴$ ، $۰/۹۸۶۷$ و $۰/۹۹۸۴$ بود.

جدول ۳ نیز خروجی شبکه را در نقاط آزمایشی در کنار داده‌های آزمایشی ارائه داده است. از این جدول، می‌توان تشخیص داد که دقت پیش‌بینی پاسخ‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بسیار بالاست. درصد خطای پیش‌بینی به منظور سهولت در تشخیص دقت در جدول ارائه شده است. میانگین کلی درصد خطای پیش‌بینی شبکه آموزش دیده با داده‌های واقعی برای محتوای رطوبتی $۱/۱۸$ درصد و برای نرخ خشک‌شدن $۲/۱۷$ حاصل شد.

ترتیب مدل‌های ضرایب k و n را برای مدل پیچ بر اساس شرایط فرایند نشان می‌دهند:

$$k = (-4.67 - 2.68d + 6.92V + 0.32T) \times 10^{-3}$$

$$R^2 = 0.83 \quad [۲]$$

$$n = 1.04 + 0.0014d + 0.000265T$$

$$R^2 = 0.74 \quad [۳]$$

همانگونه که مشاهده می‌شود در رابطه ۳، مدل ضریب n برای مدل پیچ فقط بر اساس دو پارامتر ضخامت (d) و دما (T) ارائه شده است. این مدل نشان می‌دهد که پارامتر سرعت (V) در مدل ضریب n برای مدل پیچ معنی‌دار نبوده (سطح ۵ درصد) و بنابراین پارامتر سرعت از مدل حذف شده است. همچنین، مدل‌های ضرایب k و n برای مدل پیچ اصلاح شده به ترتیب در روابط ۴ و ۵ ارائه شده است:

$$k = (-2.17 - 2.51d + 3.43V + 0.33T) \times 10^{-3}$$

$$R^2 = 0.96 \quad [۴]$$

$$n = 1.04 + 0.0014d + 0.000265T$$

$$R^2 = 0.74 \quad [۵]$$

بنابراین، با استفاده از روابط ۲ تا ۵ مطابق با شرایط حاکم بر خشک‌کن، در کل بازه‌های پارامترهای مستقل (بازه دما از ۵۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس، بازه سرعت از $۰/۵$ تا $۱/۵$ متر بر ثانیه و بازه ضخامت از ۲ تا ۶

جدول ۲ - مقادیر ضرایب مدل پیچ در شرایط مختلف آزمایشگاهی

	k	χ^2	RMSE	R ²	دمای هوا (°C)	سرعت هوا (m/s)	ضخامت (mm)
۰/۹۹۰۹	۰/۰۰۸۲۱۷	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹۸۶	۵۰	۰/۵	۲
۱/۰۱	۰/۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۴۳	۰/۰۰۸۹	۰/۹۹۸۷	۶۰		
۱/۰۷۳	۰/۰۱۴۱۶	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۱۱۷	۰/۹۹۷۸	۷۰		
۱/۱۵۷	۰/۰۱۲۳۶	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۱۲۷	۰/۹۹۷۸	۸۰		
۱/۰۱۳	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۱۵۸	۰/۹۹۶۲	۵۰	۱	
۰/۹۱۱۴	۰/۰۲۴۱۹	۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۱۴۶	۰/۹۹۶۲	۶۰		
۰/۹۵	۰/۰۲۸۱۱	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۱۰۱	۰/۹۹۷۹	۷۰		
۱/۱۱۹	۰/۰۱۵۶۷	۰/۰۰۰۵۶	۰/۰۱۲۷	۰/۹۹۷۱	۸۰		
۰/۹۸۶۸	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۱۱۷	۰/۹۹۷۸	۵۰	۱/۵	
۰/۹۲۲۷	۰/۰۲۶۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹۹۵	۶۰		
۱/۰۴۳	۰/۰۲۰۶۵	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۸۲	۰/۹۹۹	۷۰		
۰/۹۵۰۲	۰/۰۳۹۱۲	۰/۰۰۰۲۴	۰/۰۰۹۸	۰/۹۹۸۳	۸۰		
۱/۰۸۴	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۸۸	۰/۹۹۸۸	۵۰	۰/۵	۴
۱/۱۰۳	۰/۰۰۵۴۲	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۱۳۳	۰/۹۹۷۵	۶۰		
۱/۰۱	۰/۰۱۱۵۲	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۵۲	۰/۹۹۹۵	۷۰		
۱/۰۱۹	۰/۰۱۲۹۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹۹۵	۸۰		
۱/۰۳۹	۰/۰۰۵۷۷۲	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۱۱۰	۰/۹۹۸۱	۵۰	۱	
۱/۰۲۳	۰/۰۰۹۸۷۸	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹۸۵	۶۰		
۱/۰۱۴	۰/۰۱۲۶۲	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۱۱۲	۰/۹۹۷۶	۷۰		
۱/۰۳۵	۰/۰۱۳۰۵	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۱۱۶	۰/۹۹۷۵	۸۰		
۰/۹۶۹۷	۰/۰۰۹۲۱۹	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹۸۵	۵۰	۱/۵	
۱/۰۶۱	۰/۰۰۹۹۸۹	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹۸۵	۶۰		
۱/۰۳۳	۰/۰۱۳۹۷	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۱۰۶	۰/۹۹۷۹	۷۰		
۰/۹۷۹۵	۰/۰۱۹۵۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹۹۴	۸۰		
۰/۹۸۸۸	۰/۰۰۴۴۴	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۱۴۰	۰/۹۹۶۹	۵۰	۰/۵	۶
۱/۰۶۷	۰/۰۰۴۳۹۹	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۱۴۶	۰/۹۹۶۹	۶۰		
۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۸۹۰۹	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹۹۵	۷۰		
۱/۰۰۴	۰/۰۰۹۸۵۹	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۸۷	۰/۹۹۸۷	۸۰		
۱/۰۲	۰/۰۰۴۰۳۸	۰/۰۰۰۷۳	۰/۰۱۸۳	۰/۹۹۴۸	۵۰	۱	
۱/۰۳	۰/۰۰۶۵۳۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۶۹	۰/۹۹۹۱	۶۰		
۱/۰۵۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۸۶	۰/۹۹۸۸	۷۰		
۱/۰۳۱	۰/۰۰۹۵۳۸	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹۹۵	۸۰		
۱/۰۴۷	۰/۰۰۳۹۲۹	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۱۹۲	۰/۹۹۴۵	۵۰	۱/۵	
۱/۰۳۲	۰/۰۰۷۱۸۹	۰/۰۰۰۴۲	۰/۰۱۱۴	۰/۹۹۷۸	۶۰		
۱/۰۰۹	۰/۰۱۰۰۵	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۱۳۳	۰/۹۹۶۷	۷۰		
۰/۹۱۷۲	۰/۰۱۹۸۹	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۷۴	۰/۹۹۸۹	۸۰		

نتیجه‌گیری

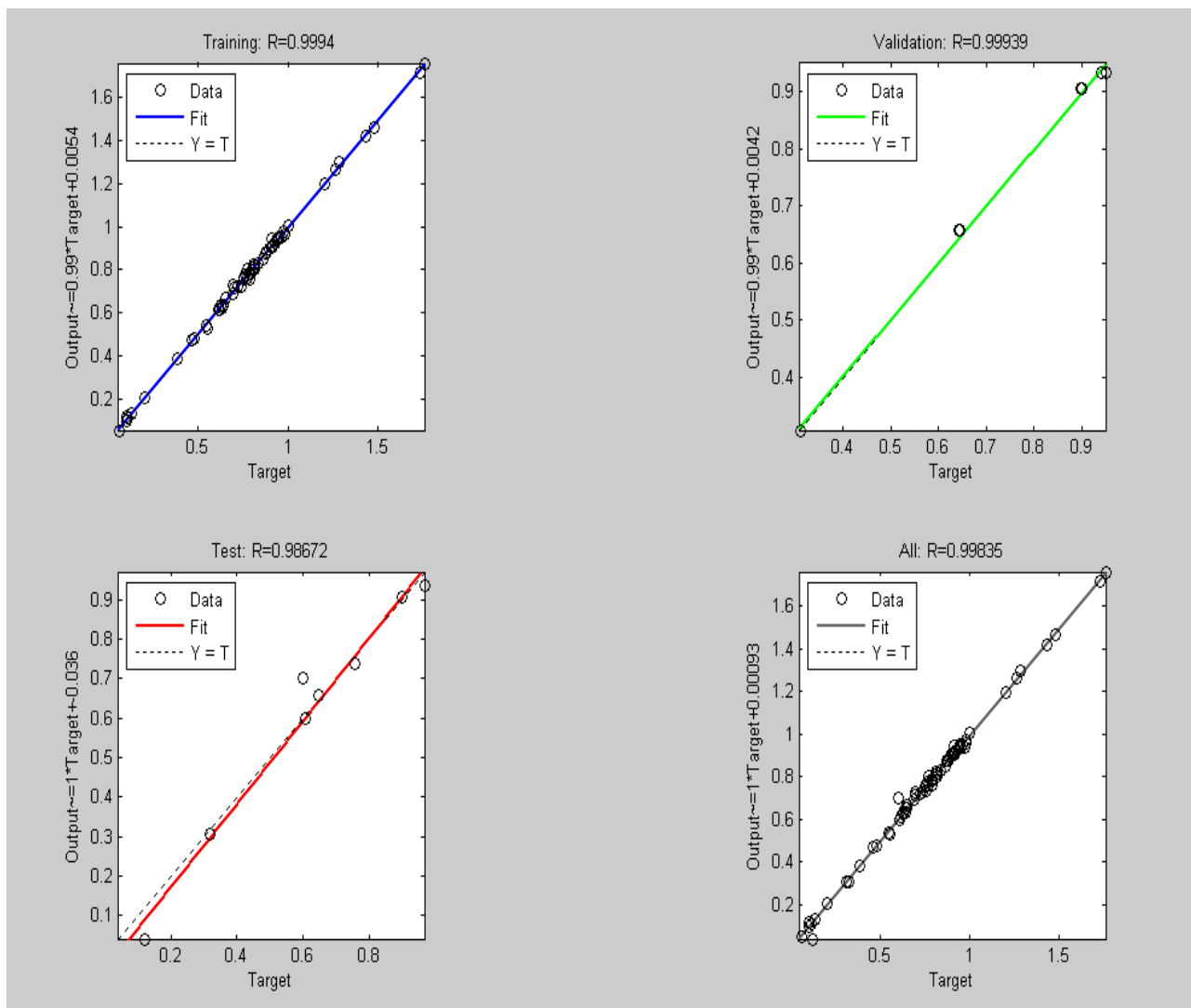
نتایج حاصل از مدلسازی سیپتیک ورقه‌های موز از جنبه‌های مختلف را می‌توان به طور خلاصه این طور بیان نمود:

(۱) از بین ۱۲ مدل بررسی شده، مدل پیچ و پیچ اصلاح شده به علت دارا بودن R^2 بالاتر و χ^2 و RMSE پایین‌تر نسبت به سایر مدل‌ها، بهتر توانست داده‌های آزمایشی را پیش‌بینی کند.

(۲) ثابت n در مدل پیچ در محدوده ۰/۹۱۱۴ تا ۱/۱۵۷ و در مدل پیچ اصلاح شده در محدوده ۰/۹۲۱ تا ۱/۱۴۶ بوده و ثابت k برای مدل پیچ در محدوده ۰/۰۰۳۹۲۹ تا ۰/۰۳۹۱۲ و برای پیچ اصلاح شده ۰/۰۰۲۲۴۶ تا ۰/۰۰۴۴۹ بدست آمد. مقدار میانگین R^2 برای مدل پیچ ۰/۹۹۵۷ و برای مدل پیچ اصلاح شده ۰/۹۹۷۹ بود.

(۳) افزایش دمای خشک‌کردن و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن باعث افزایش سرعت خشک‌شدن می‌شود. دمای هوا اثر بیشتری نسبت به سرعت هوای ورودی بر سرعت خشک‌شدن توده بستر نازک ورقه‌های نازک موز در محدوده‌های مورد آزمایش داشت. افزایش ضخامت ورقه‌های موز باعث افزایش مدت زمان خشک‌شدن در دماها و سرعت‌های مختلف آزمایش گردید.

(۴) شبکه عصبی مصنوعی، محتوای رطوبتی و نرخ خشک‌شدن ورقه‌های موز را به کمک سه پارامتر ورودی زمان، سرعت‌های هوای خشک‌شدن و دماهای خشک‌کن پیش‌بینی کرد. شبکه‌ای که برای آموزش داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت، شبکه پس انتشار پیشخور با الگوریتم آموزش لونیبرگ-مارکوارت بود. توپولوژی ۲-۱۵-۳ با خطای کمتر از 10^{-3} و با ضریب همبستگی کلی ۰/۹۹۸۴ تایید شد.



شکل ۴ - نمودارهای نقاط نظیر به نظیر پاسخ‌های واقعی و خروجی شبکه عصبی برای زیرمجموعه‌های آموزش، تست، ارزیابی و کل داده‌ها

جدول ۳- پاسخ‌های پیش‌بینی شده شبکه عصبی مصنوعی و درصد خطای پیش‌بینی در نقاط آزمایشی

شبکه عصبی مصنوعی (%)	درصد خطای پیش‌بینی	نتایج شبکه عصبی مصنوعی			داده‌های واقعی آزمایشی		دما (°C)	سرعت (m/s)	زمان (h)
		محتوای رطوبتی	نرخ خشک‌شدن (kg _{water} /kg _{d.m.} .h)	نرخ خشک‌شدن	محتوای رطوبتی	نرخ خشک‌شدن (kg _{water} /kg _{d.m.} .h)			
۰/۲۳۹	۰/۲۸۸	۱/۰۰۲	۱/۲۶۴	۱/۰۰	۱/۲۶	-۱	-۱	-۱	
۰/۲۰۸	۱/۲۳۲	۰/۶۹۱	۰/۳۸۵	-۰/۶۹	-۰/۳۸	-۱	-۱	۱	
۰/۱۹۴	۰/۴۳۹	۱/۱۹۸	۰/۷۵۳	۱/۲۰	۰/۷۵	-۱	۱	-۱	
۰/۲۸۱	۱/۶۱۷	۰/۷۲۲	۰/۱۱۶	-۰/۷۲	-۰/۱۰	-۱	۱	۱	
۱/۱۵۸	۱/۰۲۰	۱/۴۶۳	۰/۷۸۲	۱/۴۸	۰/۷۹	۱	-۱	-۱	
۱/۵۰۲	۲/۴۷۸	۰/۸۴۷	۰/۱۱۳	-۰/۸۶	-۰/۱۱	۱	-۱	۱	
۰/۶۲۹	۰/۶۵۷	۱/۴۲۱	۰/۴۷۷	۱/۴۳	۰/۴۸	۱	۱	-۱	
۱/۰۶۶	۱۰/۸۴۰	۰/۷۶۲	۰/۰۵۳	-۰/۷۷	-۰/۰۶	۱	۱	۱	
۰/۷۶۱	۲/۴۰۸	۰/۸۷۷	۰/۴۷۱	-۰/۸۷	-۰/۴۶	-۱	.	.	
۳/۸۲۱	۱/۸۲۵	۰/۹۴۵	۰/۲۰۴	-۰/۹۱	-۰/۲۰	۱	.	.	
۰/۷۸۷	۳/۹۰۵	۰/۹۰۳	۰/۵۲۹	-۰/۹۱	-۰/۵۵	.	-۱	.	
۱/۹۷۲	۲/۹۳۸	۰/۹۶۱	۰/۰۹۷	-۰/۹۸	-۰/۱۰	.	۱	.	
۱/۴۰۸	۴/۵۵۵	۱/۲۹۸	۰/۸۰۵	۱/۲۸	۰/۷۷	.	.	-۱	
۱/۸۴۷	۰/۲۰۶	۰/۷۷۴	۰/۱۳۰	-۰/۷۶	-۰/۱۳	.	.	۱	
۰/۳۲۲	۰/۸۹	۱/۷۵۴	۱/۷۱۵	۱/۷۶	۱/۷۳	.	.	-۲	
۰/۳۰۸	۰/۰۷۵	۰/۷۰۰	۰/۰۴۱	-۰/۶۰	-۰/۱۲	.	.	۲	
۳/۶۸۱	۴/۰۴۰	۰/۹۳۴	۰/۳۰۷	-۰/۹۷	-۰/۳۲	.	.	.	
۱/۶۵۳	۰/۹۴۵	۰/۹۳۴	۰/۳۰۷	-۰/۹۵	-۰/۳۱	.	.	.	
۰/۶۰۷	۰/۹۴۵	۰/۹۳۴	۰/۳۰۷	-۰/۹۴	-۰/۳۱	.	.	.	

منابع مورد استفاده:

- Bozkir O, 2006. Thin layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering* 77: 146-151.
- Ceylan I, Aktas M and Dogan H, 2007. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27: 1931-1936.
- Chen C and Wu PC, 2001. Thin layer drying model for rough rice with high moisture content. *Journal of Agricultural Engineering Research* 80: 45-52.
- Doymaz I, 2003. Thin layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering* 60: 125-130.
- Doymaz I, 2010. Evaluation of Mathematical Models for Prediction of Thin-Layer Drying of Banana Slices. *International Journal of Food Properties* 13: 486-497.
- Erenturk K, Erenturk S and Lope G, 2004. A comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of *Echinacea angustifolia*: regression analysis and neural network. *Computers and Electronics in Agriculture* 45: 71-90.
- Farkas I, Remenyi P and Biro A, 2000. A neural network topology for modeling grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture* 26: 147-158.
- Feng H and Tang J, 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science* 63: 238-251.

- Guarte RC, 1996. Modelling the drying behavior of copra and development of a natural convection dryer for production of high quality copra in the Philippines. PhD Dissertation, Hohenheim, Stuttgart, Germany.
- Hussain MA, Shafiur Rahman M and Ng CW, 2002. Prediction of pores formation (porosity) in foods during drying: generic models by the use of hybrid neural network. *Journal of Food Engineering* 51: 239-248.
- Karathanos VT, 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 39: 337-344.
- Khanna T, 1990. *Foundations of Neural Networks*. Addison-Wesley Publishing Company, U.S.A.
- Koua BK, Fassinou WF, Gbaha P and Toure S, 2009. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy* 34: 1594-1602.
- Lertworasirikul S and Tipsuwan Y, 2008. Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network. *Journal of Food Engineering* 84: 65-74.
- Midilli A, Kucuk H and Yapar Z, 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology* 20: 1503-1513.
- Mohebbi M, Shahidi F, Fathi M, Ehtiati A and Noshad M, 2011. Prediction of moisture content in pre-osmosed and ultrasounded dried banana using genetic algorithm and neural network. *Food and Bioproducts Processing* 89:362-366.
- Momenzadeh L, Zomorodian A and Mowla D, 2012. Applying artificial neural network for drying time prediction of green pea in a microwave assisted fluidized bed dryer. *Journal of Agricultural Science and Technology* 14:513-522.
- Murthy TPK and Manohar B, 2012. Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *International Journal of Food Science and Technology* 47:1229-1236.
- Overhults D and White GM, 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASABE* 16: 112-113.
- Özdemir M and Devres YO, 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering* 42: 225-233.
- Rafiee S, Jafari A, Kashaninejad M and Omid M, 2007. Experimental and numerical investigations of moisture diffusion in pistachio nuts during drying with high temperature and low relative humidity. *International Journal of Agriculture and Biology* 9: 412-415.
- Rafiee S, Keyhani A and Jafari A, 2008. Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. *International Journal of Food Properties* 11: 1-10.
- Rahman MS, Perera CO and Thebaud C, 1998. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International* 30: 485-491.
- Sharma GP, Verma RC and Pankaj P, 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* 71: 282-286.
- Tavakolipour H and Mokhtarian M, 2012. Neural network approaches for prediction of pistachio drying kinetics. *International Journal of Food Engineering* 8: Article Number: 42.
- Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S and Soponronnarit S, 2008. Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of Food Engineering* 86: 573-583.
- Westerman PW, White GM and Ross IJ, 1973. Relative humidity effect on the high temperature drying of shelled corn. *Transactions of the ASABE* 16: 1136-1139.
- Yaldiz O and Ertekin C, 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology* 19: 583-596.
- Yaldiz O, Ertekin C and Uzun HI, 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy* 26: 457-465.
- Zhang Q and Litchfield JB, 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology* 9: 383-395.