

## پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک‌شدن لایه‌نازک قارچ خوراکی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی پس انتشار

محمد‌هادی خوش تقاضا<sup>۱\*</sup>، بهرام حسین زاده سامانی<sup>۲</sup>، ابراهیم فیاضی<sup>۳</sup> و حامد امیرنجات<sup>۳</sup>

۱- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهر کرد

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

(تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۲۳)

### چکیده

قارچ خوراکی دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) به‌عنوان منبع غذای پرپروتئین و کم‌کالری و همچنین مصارف دارویی، امروزه بسیار موردتوجه قرار گرفته است. با افزایش بیش‌ازپیش تولید قارچ خوراکی نیاز به انبارداری، افزایش ماندگاری، کاهش ضایعات و استفاده از قارچ خشک‌شده بیشتر احساس می‌شود. به همین جهت خشک‌کردن این محصول به‌عنوان یکی از راهکارهای عملی همواره مطرح می‌باشد. امروزه با توجه به مزایای فناوری هوش مصنوعی استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در سطح وسیعی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای موردنیاز در فرایندهای خشک‌کردن در حال رشد و توسعه است. هدف از انجام این تحقیق پیش‌بینی محتوای رطوبتی قارچ خوراکی دکمه‌ای به کمک شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار می‌باشد. در این تحقیق قارچ خوراکی دکمه‌ای به‌صورت لایه‌نازک با استفاده از خشک‌کن هوای داغ در سه سطح دما °C ۴۰، ۵۰ و ۶۰ و سه سطح سرعت جریان باد ۰/۵، ۰/۷ و ۱ m/s خشک‌شده تا محتوای رطوبتی آن به ۱۰٪ (بر پایه وزن خشک) برسد. مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم‌های یادگیری لوبنرگ-مارکوورت (trainlm) برای تخمین و پیش‌بینی میزان رطوبت لایه‌نازک قارچ استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیونی درجه دوم کامل با ضریب تبیین ۰/۹۷ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۷۱ و همچنین شبکه عصبی با ساختار ۱-۱۸-۲۰-۳ با توابع آستانه سیگموئید و لگاریتمی در مقایسه با توپولوژی‌های دیگر نتایج بهتری را ارائه می‌کنند و دارای دقت قابل قبولی در تخمین رطوبت لایه‌نازک قارچ در هنگام خشک شدن دارد.

کلید واژگان: قارچ خوراکی دکمه‌ای، خشک‌کردن، محتوای رطوبتی، شبکه عصبی مصنوعی

\* مسئول مکاتبات: Khoshtag@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

قارچ خوراکی دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) به‌عنوان منبع غذای پرپروتئین و کم‌کالری و همچنین مصارف دارویی، امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در طی سال‌های پیش تولید قارچ خوراکی رشد قابل‌توجهی در سطح جهان داشته است. قارچ خوراکی دکمه‌ای با تولید بیش از ۳۷ درصد قارچ‌های خوراکی، بیشترین سهم تولید را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. در دمای ۲۵-۲۱ درجه سلسیوس کیفیت قارچ‌های تازه معمولاً حدود ۱۲ ساعت پس از برداشت در حد قابل قبولی باقی می‌ماند. میزان رطوبت قارچ خوراکی نقش تعیین‌کننده‌ای در فساد آن دارد که ناشی از فعالیت فیزیکی - شیمیایی، بیوشیمیایی (آنزیمی - غیر آنزیمی) (و همچنین فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. به دلیل فسادپذیری سریع قارچ خوراکی، انجام اقداماتی به‌منظور افزایش زمان نگهداری آن بسیار اهمیت دارد. با توجه به نقش عمده آب در فسادپذیری قارچ خوراکی که بیش از ۹۰ درصد (w.b.) از این محصول را تشکیل می‌دهد، خشک‌کردن یکی از روش‌های نگهداری قارچ خوراکی است که باعث افزایش زمان نگهداری آن از چند روز به چند ماه و تا یک سال و سهولت حمل‌ونقل و نگهداری آن می‌شود [۲].

فرآیند خروج رطوبت از محصولات کشاورزی در نتیجه عمل هم‌زمان گرما و انتقال حرارت خشک‌کردن نامیده می‌شود [۳]. اهداف زیادی در ارتباط با رطوبت‌گیری از محصولات غذایی وجود دارد که از مهم‌ترین آن می‌توان به افزایش مدت نگهداری و ذخیره محصول اشاره کرد [۲]. این هدف با کم کردن درصد رطوبت محصول تا حد قابل‌قبول برای محدود کردن رشد میکروارگانیسم‌ها یا انجام دیگر واکنش‌ها انجام می‌شود. علاوه بر آن، کاهش درصد رطوبت باعث حفظ خصوصیات کیفی محصول از قبیل طعم و ارزش غذایی می‌گردد. یک هدف دیگر از رطوبت‌گیری این است که حجم زیادی از محصول کاسته شود و این کار راندمان حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی محصولات را بالا می‌برد. یک هدف دیگر که تا حد کمتر آشکار می‌باشد این است که بتوان محصولی مناسب برای مصرف تولید نمود، برای مثال حرارت دیدن قارچ خوراکی در طی خشک شدن آن باعث افزایش درصد پروتئین قابل‌هضم آن در برابر مقدار کل پروتئین محصول می‌شود [۲].

خشک‌کردن به روش جریان هوای گرم در سطح تجاری به‌طور گسترده برای انواع سبزی‌ها و از جمله قارچ خوراکی استفاده می‌شود.

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

کاراتانوس<sup>۱</sup> و بلژتیس<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) در تحقیقی معادله لایه‌نازک برای استخراج داده‌های مربوط به خشک شدن میوه‌های تازه و نیمه‌خشک را مورد بررسی قرار داده‌اند. در میان مدل‌های لایه‌نازک، معادله پیچ<sup>۳</sup> برای استخراج داده‌های مربوط به خشک شدن محصولات کشاورزی با محتوای قند بالا مشابه انگور، کشمش بی‌دانه، انجیر و آلو نتایج خوبی را نشان داد، اما در صورت کاهش رطوبت به زیر ۱۵ درصد این مدل توانایی پیش‌بینی فرآیند خشک شدن محصول را نداشته است [۴].

کادر<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۸۲) تأثیر تغییرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت لایه محصول در فرآیند خشک‌کردن پسته کله قوچی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرات دما، سرعت جابه‌جایی هوا و ضخامت محصول اثر معنی‌داری بر روی دو شاخص زمان و آهنگ خشک شدن پسته دارند. مقایسه میانگین‌ها نشان داده است که افزایش دما تا ۹۰ درجه سلسیوس باعث بیش از ۵۰ درصد کاهش زمان و افزایش آهنگ خشک شدن می‌شود [۵].

وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ مدل‌سازی ریاضی خشک‌کردن لایه‌نازک سیب را مورد بررسی قرار دادند. فرآیند خشک شدن با جابه‌جایی هوا در یک خشک‌کن آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها در چهار سطح دمایی ۷۵، ۸۵، ۹۵ و ۱۰۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای  $0.03 \pm 1/2$  متر بر ثانیه انجام شد. مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشی برازش شدند. نتایج نشان داد که مدل لگاریتمی بهتر از سایر مدل‌ها فرایند

1. Karathanos
2. Belessiotis
3. Page
4. Kader

کوچکی به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اجاق در دمای مربوطه گذاشته شد و سپس ظروف توزین شد و پس از صفر کردن ترازو نمونه‌های ۵ گرمی قارچ درون ظروف ریخته شده و در داخل اجاق قرار داده شد. پس از اتمام زمان خشک شدن، نمونه‌ها از اجاق بیرون آورده شد و بلافاصله وزن آن اندازه‌گیری شد. محتوای رطوبتی بر پایه خشک از رابطه زیر به دست آمد:

$$Mc_{db} = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

که در آن:

$Mc_{db}$ : میزان رطوبت بر پایه خشک (اعشار)

$m_1$ : جرم اولیه محصول (kg)

$m_2$ : جرم نهایی محصول پس از خشک کردن (kg)

ترازوی مورد استفاده برای توزین نمونه‌ها A&D مدل GF-6000 ساخت کشور ژاپن با حساسیتی برابر ۰/۰۱ گرم بود. اجاق مورد استفاده Memmert، ساخت کشور آلمان با دقت  $\pm 1^\circ\text{C}$  بود.

## ۲-۲ خشک‌کن و روش آزمایش

برای انجام آزمایش از دستگاه خشک‌کن آزمایشگاه قرمز (شکل ۱) استفاده شد [۸]. این خشک‌کن به‌طور عمده از دو قسمت کانال تأمین جریان هوا و محفظه‌ی تأمین اشعه مادون قرمز تشکیل شده است. نمونه‌های مورد آزمایش در وسط کانال بر روی ظرفی که از توری ساخته شده بود و بر روی ترازوی دیجیتال که در زیر و خارج از کانال تعبیه شده بود قرار گرفته بود. محفظه مادون قرمز در بالای دریچه‌ای که در قسمت فوقانی کانال تعبیه شده بود قرار داده شد. حدفاصل بین کانال و محفظه‌ی مادون قرمز شیشه میرال (شیشه‌ای است که با حرارت‌های بالا باز پخت شده و در برابر حرارت دیدن مقاوم است) با ضخامت ۱۰mm قرار گرفت تا ضمن ثابت ماندن سرعت هوای مورد نظر در کانال، اشعه‌های مادون قرمز از دریچه‌ی فوقانی کانال به محصول تابانده شود. دیواره‌های محفظه مادون قرمز از ورق آلومینیوم پوشانده شد تا بازده تابشی اشعه افزایش یابد، همچنین این محفظه به‌گونه‌ای ساخته شد تا برای حصول شدت‌های تابش گوناگون، بتوان فاصله بین منبع مادون قرمز و نمونه را از طریق جابه‌جایی منبع مادون قرمز، تغییر داد. خشک‌کن آزمایشگاهی دارای مکنده سانتریفوژ بود

خشک شدن را پیش‌بینی می‌کند. نمودارهای خشک شدن دو مرحله نزولی را نشان داد. مقدار ضریب پخش مؤثر در مرحله دوم تقریباً ۶ برابر بزرگ‌تر از ضریب پخش مؤثر در مرحله اول بود. همچنین رابطه نسبت رطوبت با زمان خشک شدن در خشک‌کن لایه‌نازک که در طراحی و کنترل خشک‌کردن به روش جابه‌جایی هوا کاربرد دارد، استخراج شد [۶]. لازم به ذکر است که روش انتقال حرارت در همه‌ی تحقیقات بالا، به روش جابه‌جایی هوای گرم بود.

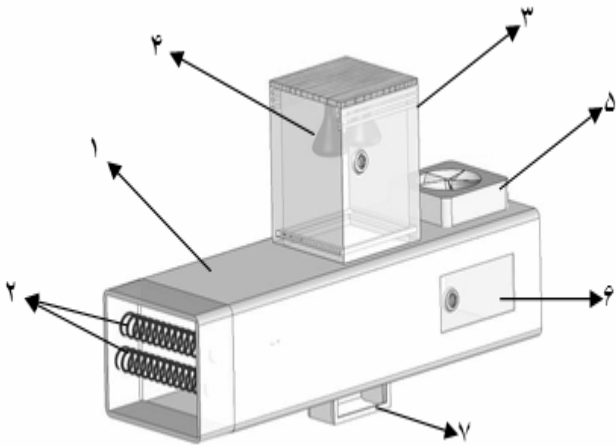
امروزه با توسعه سریع فناوری پردازش رایانه‌ای و ایجاد نرم‌افزارهای مربوطه، از مزایای فناوری هوش مصنوعی برای حل مسائل مربوط به مدل‌سازی سامانه‌ها و پیش‌بینی فرآیندها استفاده می‌شود [۱۲ و ۱۳]. یکی از روش‌های هوش مصنوعی که در سطح وسیعی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مورد نیاز در فرآیندهای خشک‌کردن از یک دهه گذشته آغاز شده و در حال بسط و توسعه است، شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد که در این تحقیق از آن برای مدل‌سازی فرآیند استفاده می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین رطوبت نسبی

برای خشک‌کردن از قارچ دکمه‌ای که در منطقه ملارد کرج پرورش می‌یابد، استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت تازه تهیه گردید. قارچ‌ها بعد از شسته شدن با آب توسط چاقویی به ضخامت ۳mm بریده شده و یک‌لایه از آن پس از آماده شدن خشک‌کن و تنظیم آن در دماها و سرعت‌های مورد آزمایش روی بستر توری خشک‌کن قرار داده شد. لازم به ذکر است مقدار قارچ دکمه‌ای مورد استفاده در هر آزمایش ۵۰ گرم بوده است.

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت قارچ از استاندارد AOAC (۱۹۸۰) استفاده شد [۷]. به این ترتیب که برای به دست آوردن درصد واقعی رطوبت محصول، ابتدا به‌طور تصادفی، ۵ نمونه ۵ گرمی از توده‌ی محصول مورد استفاده جدا کرده درون اجاق قرار داده شد. طبق استاندارد گفته شده باید برای تعیین رطوبت قارچ، نمونه‌ها را به مدت ۳ تا ۴ ساعت در اجاق با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار گیرد. برای انجام این کار ابتدا ظروف



شکل ۱ شماتیک خشک‌کن آزمایشگاهی مادون‌قرمز. ۱. کانال، ۲. گرم‌کن‌ها، ۳. محفظه مادون‌قرمز، ۴. لامپ‌های مادون‌قرمز، ۵. فن مکنده، ۶. دریچه تنظیم سرعت هوا، ۷. ترازو

در این تحقیق آزمایش‌های خشک‌کردن در سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ۵/۰، ۷/۰ و ۱ متر بر ثانیه و روش خشک‌کردن جریان هوای گرم و در سه تکرار انجام شد. سطوح شدت تابش و سرعت هوا بر اساس تحقیقات پیشین انتخاب گردیده‌اند [۹ و ۱۰ و ۱۱].

برای شروع آزمایش ابتدا دستگاه روشن شده سپس بعد از ۱۵ دقیقه کار کردن دستگاه که دما و سرعت هوای خشک‌کن ثابت می‌گشت، نمونه‌ها برای شروع آزمایش‌ها بر روی بستر خشک‌کن قرار داده می‌شدند و پس از شروع آزمایش وزن نمونه‌ها در هر یک دقیقه، توسط ترازو اندازه‌گیری شده و در رایانه ثبت می‌گردید. خشک‌کردن نمونه تا زمانی که وزن نمونه‌ها در دفعات متوالی اندازه‌گیری تغییر نکند، ادامه داشت و برای تحلیل و مقایسه اثرات سطوح مختلف خشک‌کردن بر روی زمان خشک‌شدن قارچ خوراکی، رسیدن محصول به رطوبتی معادل ۱۰٪ (بر پایه وزن خشک) منظور گردید. دما و رطوبت نسبی محیط اطراف خشک‌کن از متغیرهای تعیین‌کننده در خشک‌کردن مواد غذایی می‌باشند. از این رو در هر آزمایش خشک‌کردن دما و رطوبت نسبی هوای اطراف خشک‌کن به ترتیب با استفاده از دماسنج دیجیتالی Testo 925 با دقت  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  و رطوبت‌سنج Testo 400 با دقت  $\pm 0.1$  ساخت کشور آلمان اندازه‌گیری و ثبت شد. در طول آزمایش‌های خشک‌کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط  $30 \pm 3$  درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا  $50 \pm 3$  درصد بود.

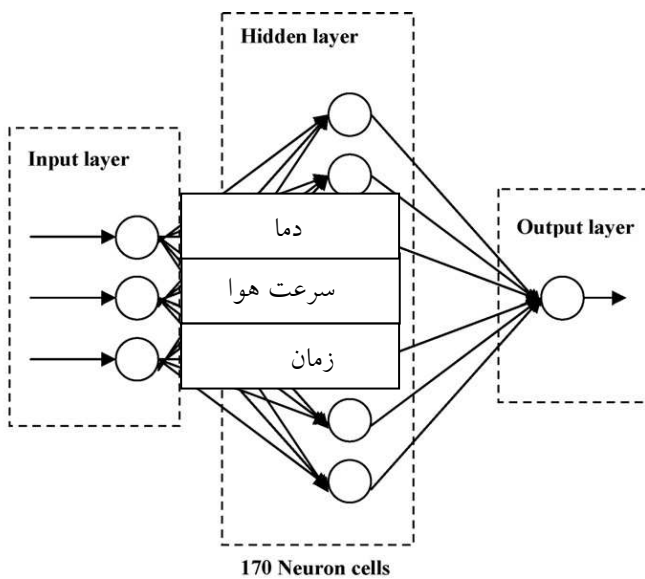
که هوا را به‌صورت موازی بر بستر مواد جریان می‌داد و برای تأمین اشعه‌ی مادون‌قرمز، از دو لامپ ۲۵۰ وات مادون‌قرمز ساخت شرکت Osram کشور اسلواکی، استفاده گردید.

لامپ مادون‌قرمز در فواصل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری نمونه قرار داده شد. شدت تابش در این فاصله‌ها به‌وسیله یک دستگاه تابش‌سنج OPHIR ساخت کشور آمریکا با دقت  $0.3 \pm$  وات بر سانتیمتر مربع اندازه‌گیری شد و به ترتیب ۴۹/۰، ۳۱/۰ و ۲۲/۰ وات بر سانتی‌متر مربع به دست آمد. شدت تابش‌های ذکر شده در این آزمایش، به ترتیب دماهای ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درجه سلسیوس را در سطح نمونه ایجاد نمودند. دمای سطح نمونه با استفاده از دماسنج لیزری (Raytek مدل RAYST6XLG) ساخت کشور ایالات متحده آمریکا با دقت  $\pm 2^\circ\text{C}$  اندازه‌گیری شد. در این آزمایش سرعت جریان هوا، توسط دریچه‌ای در بدنه خشک‌کن تنظیم گردید و برای کالیبره کردن آن، از بادسنج مدل Testo 400, hot wire anemometer با دقت  $\pm 0.1$  متر بر ثانیه ساخت کشور آلمان استفاده شد. سرعت جریان هوا هنگام آزمایش در وسط کانال جریان هوا و محل قرارگیری ظرف توری نمونه‌ها توسط سرعت‌سنج پره‌ای از نوع Loutron AM-4202 با وضوح ۰/۱ متر بر ثانیه ساخت کشور تایوان اندازه‌گیری شد. این نوع سرعت‌سنج سرعت میانگینی از سرعت جریان هوا در بستر خشک‌کن را ارائه می‌دهد. ترازوی استفاده‌شده، EK-3000i مدل A&D ساخت کشور ژاپن بود که وزن نمونه را بدون نیاز به برداشتن نمونه از داخل خشک‌کن به‌طور پیوسته (هر یک دقیقه) اندازه گرفته و برای ثبت از طریق سیم رابط RS232C به رایانه منتقل می‌کرد. دقت اندازه‌گیری این ترازو ۰/۱ گرم بود. نحوه خشک‌کردن بدین‌صورت است که اشعه‌ی تابیده‌شده به محصول، سطح آن را گرم کرده و همچنین موجب افزایش گرادیان حرارتی بین سطح محصول و سطوح داخلی شده و باعث خروج رطوبت از داخل محصول گردیده که این رطوبت به‌واسطه جریان هوای ایجادشده توسط دمنده از محیط اطراف محصول خارج می‌گردد.

Excel ایجاد گردید. با توجه به اینکه خشک شدن یک فرایند بسیار زمان‌بر است فقط زمانی‌هایی که تغییر قابل‌توجهی در محتوای رطوبتی صورت گرفته مدنظر قرار گرفت، بر همین اساس تعداد کل الگوهای ایجادشده برای شبکه ۲۰۹۱ عدد بوده است که اندازه ماتریس ورودی و خروجی به ترتیب ۳×۲۰۹۱ و ۱×۲۰۹۱ به دست آمد.

جدول ۲ محدوده و سطوح در نظر گرفته‌شده برای متغیرهای مستقل

پارامتر سطح	دمای (°C)	سرعت (m/s)	زمان (min)
کمینه	۴۰	۰/۵	۰
بیشینه	۶۰	۱	T <sub>Max</sub> (۳۷۹)
تعداد سطوح	۳	۳	۳۸۱-۱۶۶



شکل ۲ معماری شبکه عصبی مصنوعی

در این پژوهش از شبکه‌های چندلایه پرسپترون<sup>۵</sup> MLP در آن تمامی نرون‌ها به یکدیگر وصل شده‌اند استفاده شد. این مدل، به علت سادگی و درعین‌حال دقت بالا، کاربرد زیادی در شبیه‌سازی خشک شدن دارد [۱۳]. از توابع آستانه مختلفی چون سیگموئیدی (logsig)، لگاریتمی (tansig) و

## ۳-۲ مدل‌سازی رگرسیونی

برای مدل‌سازی و پیدا کردن رابطه ریاضی بین متغیرهای مستقل آزمایش (دما، سرعت هوا و زمان) و متغیر وابسته (رطوبت) مدل‌های گوناگونی مطابق جدول (۱) بر داده‌های آزمایش برآزش گردید. با توجه به دو شاخص ضریب تبیین و برازش و صحت‌گذاری مدل، ۷۰٪ داده‌ها برای به دست آوردن و ۳۰٪ داده‌ها برای ارزیابی مدل به‌طور کاملاً تصادفی انتخاب شدند.

جدول ۱ مدل‌های برآزش شده بر روی داده‌های آزمایش

ردیف	نوع مدل
۱	$Y=aX_1+bX_2+cX_3$
۲	$Y=aX_1+bX_2+cX_3+dX_1X_2+eX_1X_3+fX_2X_3$
۳	$Y=aX_1+bX_2+cX_3+dX_1^2+eX_2^2+fX_3^2$
۴	$Y=aX_1+bX_2+cX_3+dX_1X_2+eX_1X_3+fX_2X_3+gX_1^2+hX_2^2+iX_3^2$

متغیرهای وابسته رابطه:  $X_3, X_2, X_1$

ثابت‌های رابطه:  $a, b, c, d, e, f, g, h, i$

## ۲-۴ مدل‌سازی شبکه عصبی

هر شبکه عصبی از سه لایه ورودی، میانی یا مخفی و خروجی تشکیل شده است. در لایه اول یا ورودی، به تعداد عوامل اولیه و در لایه خروجی به تعداد عوامل نهایی موردنظر، نرون بستگی دارد. لایه مخفی می‌تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شود که تعداد نرون‌های هر لایه آن متغیر است و عموماً به روش سعی و خطا تعیین می‌شود [۱۲]. سه عامل دما، سرعت هوا و زمان خشک شدن به‌صورت سه نرون در لایه ورودی و مقدار محتوای رطوبتی به‌عنوان تنها نرون در لایه خروجی مدل‌سازی شد (شکل ۲).

جدول (۲) ماتریس آزمایش و سطوح مختلف تیماری‌های این آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در مدل‌سازی شبکه عصبی تعیین ماتریس ورودی و خروجی بسیار مهم است، ابتدا داده‌ها فراخوانده شده و سپس برای هر تیمار عمل میانگین‌گیری صورت پذیرفت و در ادامه ماتریس‌های ورودی و خروجی بر اساس جدول (۱) و شکل (۲) در نرم‌افزار

در این روابط  $a_i$  نسبت رطوبت تجربی  $i$  ام به دست آمده از آزمایش،  $p_i$  نسبت رطوبت پیشگویی شده  $i$  ام توسط شبکه،  $N$  تعداد مشاهدات خشک شدن می‌باشد.

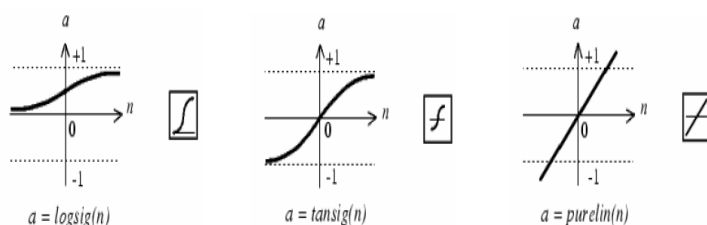
### ۳- نتایج

رطوبت اولیه قارچ به روش وزنی برابر  $13/286\%$  بر پایه وزن خشک (d.b.) بود. پس از به دست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دما و سرعت‌های مختلف خشک‌کردن، منحنی‌های خشک‌کردن حاصل از داده‌های آزمایشی برآش داده شدند. در شروع فرآیند خشک‌کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با پیشرفت زمان محتوی رطوبت محصول به‌طور طبیعی کاهش پیدا کرده و نرخ کاهش رطوبت به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. منحنی آهنگ خشک شدن محصول در ابتدای فرآیند به علت تبخیر رطوبت سطحی صعودی بوده و پس‌ازاین زمان به علت شروع نفوذ آب از درون ماده به سطح نزولی می‌باشد.

شکل ۴ منحنی‌های خشک شدن لایه‌نازک قارچ در دماهای متفاوت و سرعت متفاوت را نشان می‌دهند. در سرعت‌های پایین‌تر، مدت‌زمان کل خشک شدن بیشتر است. مشخص گردید که با افزایش دما، زمان خشک‌کردن به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول کاهش می‌یابد.

روند کاهش رطوبت تحت شرایط مختلف آزمایش نشان داد که در روش جریان هوای گرم با افزایش سرعت جریان هوا، زمان خشک‌کردن محصول کاهش می‌یابد (شکل ۴). علت این پدیده در آن است که با افزایش سرعت جریان هوا فشار بخار محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه خواهد بود و با سرعت بیشتری از آن خارج می‌گردد [۵] یعنی در این روش جریان هوای گرم و در سرعت جریان هوای  $0/5$ ،  $7/0$  و  $1$  متر بر ثانیه در دمای  $40$  درجه سلسیوس، اختلاف زمان خشک‌کردن به ترتیب  $381/7$ ،  $252$  و  $215/7$  دقیقه، در دمای  $50$  درجه سلسیوس، اختلاف زمان خشک‌کردن به ترتیب  $257$ ،  $232$  و  $186/7$  دقیقه و در دمای  $60$  درجه سلسیوس، اختلاف زمان خشک‌کردن به ترتیب  $216$ ،  $205$  و  $167/7$  دقیقه، معنی‌دار هستند.

خطی (purelin) و الگوریتم‌های آموزش همراه با نظارت، شبکه‌های پس‌انتشار روبه‌جلو (FFBP<sup>6</sup>) مانند الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت<sup>۷</sup> (trainlm)، الگوریتم trainscg و چند نوع الگوریتم آموزش دیگر استفاده شد و نتایج آن‌ها مقایسه می‌شود (شکل ۳).



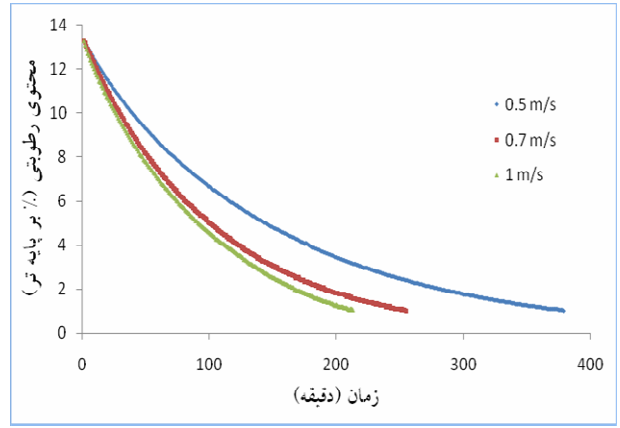
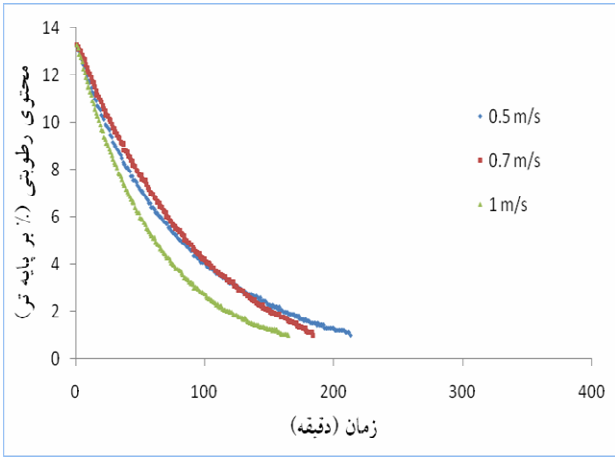
شکل ۳ توابع آستانه

همان‌طور که گفته شد، تعداد کل الگوهای ورودی شبکه  $2091$  که ابتدا نرمال‌سازی شده و سپس به صورت تصادفی به سه گروه آموزش ( $60\%$ )، ارزیابی ( $30\%$ ) و آزمون ( $10\%$ ) تقسیم‌بندی شدند. همچنین نرخ آموزش (lr) برای تمامی حالات  $0/2$  و میزان مومنت  $0/1$  در نظر گرفته شد. کد موردنیاز برای شبیه‌سازی شبکه عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB R2012 توسعه داده شد، بهترین توپولوژی شبکه عصبی بر اساس دو معیار ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین مربعات خطا (MSE) مشخص گردید. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن قارچ را توصیف کند، توپولوژی است که دارای بیشترین ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کمترین MSE باشد. نحوه محاسبه ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا در روابط زیر نشان داده شده است [۱۲].

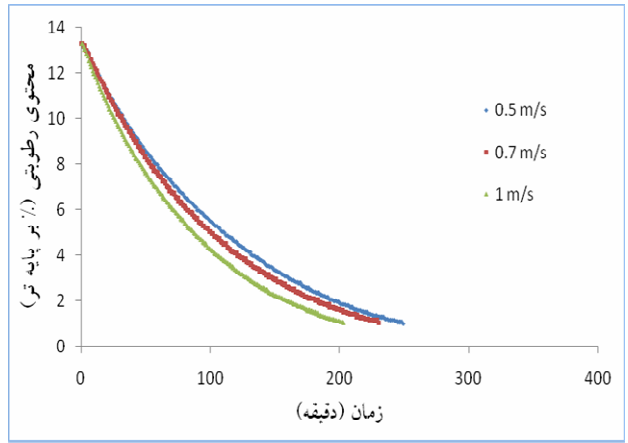
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2$$

$$R^2 = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i - \bar{p}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

6. Feed Forward Back Propagation  
7. Levenberg-Marquardt Technique



الف



ب

ج

شکل ۴ منحنی‌های محتوی رطوبتی خشک شدن لایه‌نازک قارچ سرعت‌های مختلف و در دماهای الف) ۴۰، ب) ۵۰ و ج) ۶۰ درجه سلسیوس

۱-۳ نتایج مدل‌سازی رگرسیونی

در بین مدل‌های برازش شده، مدل درجه دوم کامل  $(Y=aX_1+bX_2+cX_3+dX_1X_2+eX_1X_3+fX_2X_3+gX_1^2+hX_2^2+iX_3^2)$  با ضریب تبیین ۰/۹۷ و میانگین مربعات خطای ۰/۰۷۱ به‌عنوان بهترین مدل در بین سایر مدل‌های برازش شده انتخاب شد. در جدول (۳) تحلیل واریانس مدل برازش شده مشاهده می‌شود.

جدول ۳ تحلیل واریانس مدل رگرسیونی درجه دوم کامل.

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مجموع مربعات
رگرسیون	۹	۲۱۸۸۵/۳	۲۴۳۱/۷**
خطی	۳	۱۸۶۸۴/۹	۱۹۳/۰۸**
دما	۱	۳/۶	۳۵/۱۱**
سرعت	۱	۳/۴	۱/۵۵*
زمان	۱	۱۸۶۷۷	۴۸۳/۱۱**
درجه دوم	۳	۳۱۹۵/۶	۵۲۹/۹۶**
دما × دما	۱	۵/۴	۵۷/۴۵**
سرعت × سرعت	۱	۴۷/۳	۰/۲۰ <sup>ns</sup>
زمان × زمان	۱	۳۱۴۲/۹	۱۵۳۴/۸۲**
اثرات متقابل	۳	۴/۹	۱/۶۲**
دما × سرعت	۱	۰/۱	۰/۰۰۰۰۱ <sup>ns</sup>
دما × زمان	۱	۲/۹	۳/۶۰**
سرعت × زمان	۱	۱/۹	۱/۸۸**
خطا	۱۸۹۷	۵۲۷/۵	۰/۲۸
کل	۱۹۰۶	۲۲۴۱۲/۸	

\*\* و \* به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱٪ و ۵٪  
<sup>ns</sup> عدم معنی‌داری

۱)، از شبکه MLP با الگوریتم یادگیری LM و تابع آستانه logsig و Tansig با تعداد چرخه آموزش ۳۷۱ بود. این توپولوژی تغییرات محتوای رطوبتی را با ضریب تعیین ۰/۹۹۹۹ و خطای آموزش ۰/۰۰۰۱ شبکه را آموزش داده و محتوای رطوبتی را پیش‌بینی می‌کند (جدول ۴).

همان‌طور که در جدول (۳) دیده می‌شود ضرایب متغیرهای (سرعت) (سرعت) و (دما) (سرعت) معنی‌دار نشده‌اند و می‌توان مدل درجه دوم کامل را ساده‌تر کرد. در نهایت مدل به دست آمده به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$MR = 7/8112 + 0/3080 \times T - 1/8696 \times V - 0/0782 \times t - 0/0037 \times T^2 - 0/0001 \times t^2 - 0/0009 \times T \times t - 0/0027 \times V \times t$$

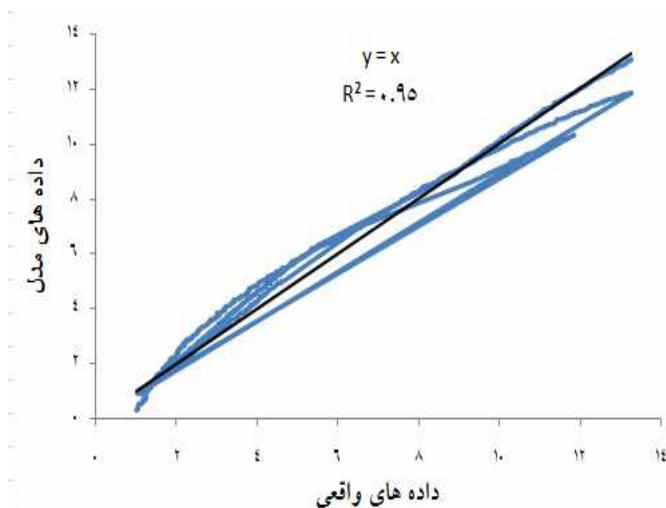
در این رابطه MR بیانگر میزان رطوبت، T بیانگر دما برحسب درجه سلسیوس، V بیانگر سرعت برحسب m/s و t بیانگر زمان برحسب دقیقه می‌باشد.

نتایج به دست آمده از ۳۰٪ داده‌های آزمایش بکار رفته در قسمت ارزیابی مدل برازش شده نشان داد که مدل با ضریب تبیین ۰/۹۵ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۹۳ پیش‌بینی قابل قبولی را نشان داده است. در شکل (۵) دقت پیش‌بینی مدل به دست آمده نشان داده شده است.

### ۲-۳ نتایج شبکه عصبی

برای بررسی عملکرد شبکه MLP از توپولوژی‌های مختلف با تعداد نرون‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. این توپولوژی‌ها کاملاً به صورت سعی و خطا انتخاب و شبیه‌سازی شدند. در مرحله اول بعد از آموزش شبکه بهترین توپولوژی بر اساس  $R^2$ ، MSE از میان توپولوژی‌های مختلف به دست آمد. جدول (۴) خلاصه‌ای از بهترین نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از به کارگیری شبکه عصبی با توپولوژی‌های مختلف نشان داد که بهترین توپولوژی دارای ساختاری با معماری ۱-۲۰-۱۸-۳ (۳ نرون در لایه ورودی، تعداد نرون در دولایه پنهان به ترتیب ۲۰ و ۱۸ و تعداد نرون در لایه خروجی



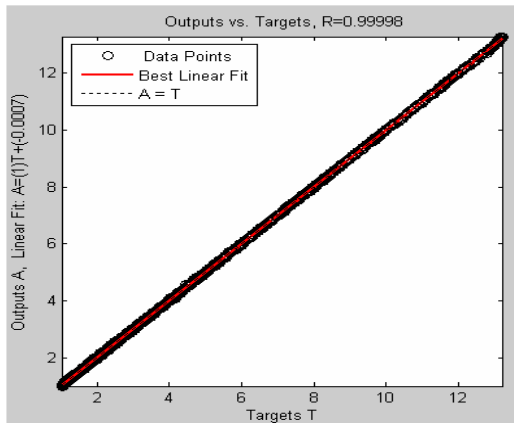
شکل ۵ برازش خط  $(y=x)$  بر داده‌های واقعی آزمایش و داده‌های پیش‌بینی شده مدل.

مدت زمان مورد نیاز برای همگرا شدن شبکه ۷۸/۳۴ ثانیه بود که نشان از قابلیت بالای شبکه عصبی به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی با زمان است که می‌تواند در سامانه‌های کنترل خشک‌کن به کار رود [۱۴].

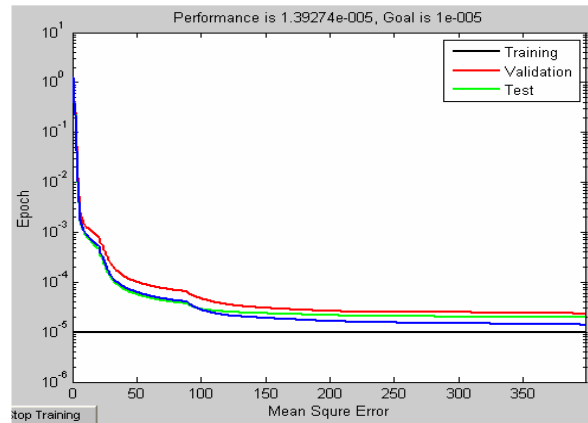
در ادامه برای تحقیق دقیق‌تر بروی مدل‌ها از آنالیز رگرسیونی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی شبکه عصبی استفاده شد که در شکل (۶) نشان داده شده است.

بهترین همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و داده‌های آزمایشگاهی برای مراحل آموزش، ارزیابی و آزمون به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۹۹۹۹ و ۱ و خطای آموزش ۰/۰۰۰۱ برای همه حالت‌ها به دست آمد.

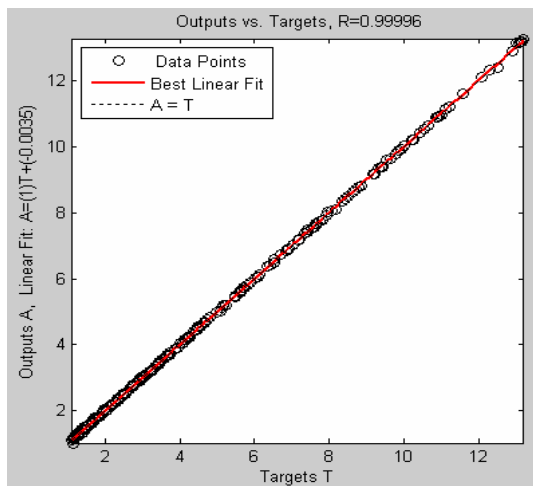




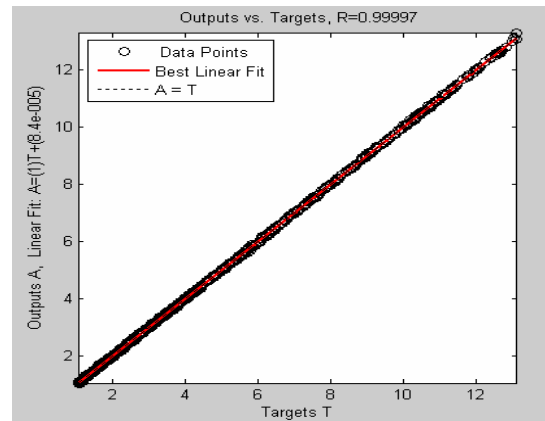
(الف)



(ب)

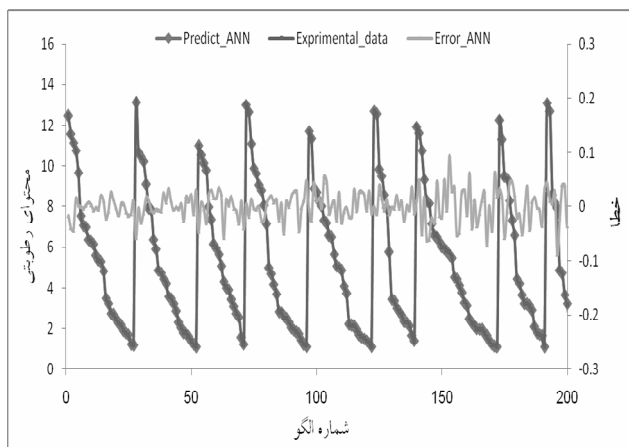


(ج)



(د)

شکل ۶ منحنی الف) برازش خطی برای داده‌های آموزش، ب) منحنی آموزش شبکه (خطای آموزش)، ج) برازش خطی برای داده‌های آزمون، د) برازش خطی برای داده‌های ارزیابی.



شکل ۷ مقایسه محتوای رطوبتی پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مقادیر تجربی برای قسمت آزمون.

مقایسه محتوای رطوبتی پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و مقادیر تجربی به دست آمده از آزمایشگاه در شکل (۶) برای بهترین توپولوژی (۱-۱۸-۲۰-۳) برای قسمت آزمون (۲۰۹ آلو) نشان داده شده است. در این نمودار میزان خطای پیش‌بینی شبکه نیز آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی شبکه عصبی نشان می‌دهد که میزان خطا در اکثر الگوهای قسمت آزمون در حدود صفر می‌باشد، که حاکی از قابلیت شبکه در پیش‌بینی محتوای رطوبتی در فرایند خشک‌کردن می‌باشد. مدل شبکه عصبی با ضریب تبیین ۰/۹۹۹۹ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۰۰۱ نسبت به بهترین مدل رگرسیونی برازش شده (ضریب تبیین ۰/۹۷ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۷۱) دقت بالاتری دارد.

جهت پیش‌بینی محتوای رطوبتی در فرایند خشک‌کردن محصولات کشاورزی می‌تواند تا حدود زیادی این هزینه و زمان را برای الگوهایی که آزمایش نشده‌اند کاهش دهند. مدل رگرسیونی درجه دوم کامل با ضریب تبیین ۰/۹۷ و مجموع مربعات خطای ۰/۰۷۱ دارای دقت قابل قبولی در تخمین رطوبت لایه‌نازک قارچ در هنگام خشک شدن دارد. همچنین بهترین توپولوژی شبکه عصبی FFBP برای خشک‌کردن لایه‌نازک قارچ ۱-۱۸-۲۰-۳ با الگوریتم آموزش لوبنبرگ-مارکوارت می‌باشد، که خطای آموزش آن ۰/۰۰۰۱ است. با توجه به دقت مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیونی و همچنین ماهیت هر دو مدل با توجه به اینکه شبکه عصبی قابلیت پیش‌بینی در خارج از محدوده داده‌های آموزش داده‌شده را دارد و این امر برای مدل رگرسیونی محدودیت محسوب می‌شود، مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی روند خشک شدن لایه‌نازک قارچ در این تحقیق پیشنهاد می‌گردد.

همچنین لازم به ذکر است با توجه به اینکه مدل‌های رگرسیونی فقط دارای قابلیت پیش‌بینی در محدوده داده‌هایی را دارند که مدل بر اساس آن‌ها ساخته شده است و مدل شبکه عصبی دارای قابلیت تخمین و پیش‌بینی در خارج از محدوده آزمایش را دارد، مدل شبکه عصبی به‌عنوان مدل پیشنهادی در این پژوهش ارائه می‌گردد.

## ۵- نتیجه‌گیری

با وجود اینکه خشک‌کردن محصولات کشاورزی جهت ماندگاری و کاهش ضایعات یک امر ضروری است، اما فرایند خشک‌کردن نیازمند دانش، خشک‌کن‌های دقیق است که فرایندی پرهزینه و زمان‌بر است. به همین جهت یافتن بهترین شرایط خشک‌کردن نیازمند انجام آزمایش‌های مکرر و هزینه‌بر همراه با صرف زمان است. لذا استفاده از شبکه‌های عصبی

جدول ۴ نتایج ساختارهای مختلف شبکه عصبی خشک‌کردن لایه‌نازک قارچ خوراکی.

تابع آستانه	قاعده آموزش	تعداد نرون‌ها		خطای شبکه (MSE)			$R^2$	تکرار (epoch)	زمان شبیه‌سازی (Sec)
		لایه اول	لایه دوم	آموزش	ارزیابی	آزمون			
Log/Tan	trainlm	۱۵	۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۳۶۹	۵۳/۳۱	
Log/Tan	trainlm	۱۸	۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۴۹۷	۴۱/۶۲	
Log/Tan	trainlm	۲۰	۰	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۴۳۰	۳۹/۳۳	
Log/Tan	trainlm	۲۲	۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۹۳۲	۶۹/۳۸	
Log/Tan	trainlm	۲۵	۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۴۸۹	۵۲/۳۴	
Log/Tan	trainrp	۱۵	۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۳	۱۷۸۳	۷۵/۸۵	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۱۲	۱۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۴۴۷	۶۱/۷۴	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۱۸	۲۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۳۷۱	۷۸/۳۴	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۲۰	۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۲۶۰	۶۲/۰۱	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۲۰	۲۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۲	۴۰۹	۸۶/۰۷	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۲۵	۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۵۵۳	۱۵۴/۴۸	
Log/Tan/ Tan	trainlm	۲۵	۲۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	۱۲۲۹	۳۰۴/۴۵	
Log/Tan/ Tan	trainrp	۱۸	۲۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۴۰۹	۵۱/۰۶	
Log/Tan/ Tan	traingd	۱۸	۲۰	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۵۰	۰/۰۰۰۴۹	۲۰۰۰	۸۱/۳۳	
Log/Tan/ Tan	traingda	۱۸	20	۰/۰۳۶۶	۰/۰۴۰۲	۰/۰۳۲۳	۹۶	۴۹/۰۶	

## ۶- منابع

- [7] AOAC. (1980). Official methods of analysis (13th ed). Washington, DC Association of Official Analytical Chemists.
- [8] Mohajeran, S. H. (2005). Development of Experimental Infrared Radiation Dryer for Rough Rice Drying. A Publication of TarbiatModarres University. Tehran, Iran.
- [9] Arora, S., U.S. Shivhare, J. Ahmed & G.S.V. Raghvan. (2003). Drying kinetics of AgaricusBisporus and pleurotus Florida mushrooms. Transactions of the ASAE.46:721- 724.
- [10] Cao, W., Y. Nishiyoma& S. Koide. (2003). Thin- layer drying of maitake mushroom analyzed with a simplified model. Journal of Biosystem Engineering.85:331-337.
- [11] Pankaj, B. P. & G. P. Sharma. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. 93(3): 285-291.
- [12] Schalkoff.R.J. (1997). Artificial neural networks, McGraw-Hill.
- [13] Dayhoff, J. E. (1990). Neural Network Principles. Prentice-Hall International, U.S.A
- [14] Farkas, I., Remenyi, P. and Biro, A. (2000).A neural network topology for modelling grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26: 147-158.
- [1] Walde, S. G., V. Velu, T. Jyothirmayi and R. G. Math. (2006). Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. *Journal of Food Engineering*. 74: 108-115.
- [2] Hajizadeh, R. (1996). Investigating ways to keep the edible mushroom slices and powder. A Publication of TarbiatModarres University. Tehran, Iran.
- [3] Gogus, F. (1994). The effect of movement of solutes on millard reaction during drying. Ph.D. Thesis. Leeds University.
- [4] Karathanos, T and G. Belessiotis. (1999). Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried Fruits. *J. agric. Eng*, 74, pp 355- 361.
- [5] Kader, A.A., Heintz, C., Labavitch, J. and Rae, H. (1982). Studies related to the description and evaluation of pistachio nut quality. *J. Amer. Soc. Hort. Sci*, 107: 812-816.
- [6] Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, and X. Hu. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40, pp 39-46.

## Prediction of thin layer drying of edible mushroom moisture content by feed forward artificial neural networks method

Khoshtaghaza, M. H.<sup>1\*</sup>, Hosseinzadeh, B.<sup>2</sup>, Fayyazi, E.<sup>3</sup>, Amirnejat, H.<sup>3</sup>

1. Assoc. Prof. of Mechanics of Agricultural Machinery Dept., University of Tarbiat Modares.
2. Assistant Prof. of Biosystems Engineering Dept., University of Sharekord University
3. M.Sc. Graduate of Mechanics of Agricultural Machinery Dept., University of Tarbiat Modares.

(Received: 93/2/10 Accepted: 92/4/23)

Nowadays the edible mushroom has got a great consideration as a high protein and low calorie food source and also its medicinal consumption. As the production of edible mushrooms increases, it is necessary to notice on its storability, waste decreasing and usage of dried mushrooms. For this reason drying of this crop as a practical way has been considered. Nowadays advantages of artificial neural network are noticeable for simulation and prediction of necessary parameters in drying processes. The objective of this study is moisture content prediction of edible mushroom with arithmetic neural network during drying process. In this study the thin layers of edible mushroom were dried by hot air dryer in three temperature levels: 40, 50, 60°C and three air flow speed levels: 0.5, 0.7, 1 m/s until the moisture content reached to 10% (d.b.). Regression models and feed forward neural network with Levenberg–Marquardt learning algorithms were used to estimate and predict the moisture content of mushroom thin layers. The results showed that the quadratic degree regression model with determination coefficient of 97.0 and the error sum of the squares of 0.071 and also the neural network with 3-20-18-1 structure with sigmoid threshold and logarithmic function in comparison with other topologies had better results to predict the moisture content of mushroom thin layer during drying.

**Keywords:** Edible mushroom, Drying, Moisture content, Arithmetic neural network

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: [Khoshtag@modares.ac.ir](mailto:Khoshtag@modares.ac.ir)