

پیش‌بینی برخی خصوصیات خشک کردن پسته، آلبالو و بنه به کمک شبکه‌های

عصبی مصنوعی

محمد کاوه^{۱*}، رضا امیری چایجان^۲

^۱ دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

^۲ دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*نویسنده مسئول:

پست الکترونیکی: sirwankaweh@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹

چکیده

هدف از این تحقیق تخمین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی ویژه، آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت در فرایند خشک کردن سه محصول پسته، آلبالو و بنه با خشک‌کن مادون قرمز- جابجایی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. به منظور پیش‌بینی این پارامترها از پنج عامل مؤثر نوع محصول، سرعت هوای ورودی، دمای هوای ورودی، توان تابش مادون قرمز و زمان خشک کردن استفاده گردید. از شبکه‌ها و الگوریتم‌های متعددی برای آموزش الگوهای موجود و ارزیابی شبکه استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که شبکه پس انتشار پیشخور با توپولوژی ۲-۶-۴ و تابع آستانه TAN-PUR-TAN و الگوریتم آموزش لونیگ- مارکوارت قادر است ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه را به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۹۴۶ و ۰/۹۸۱۲ و خطای میانگین مربعات ۰/۰۰۲۲ در شرایط مختلف خشک کردن پیش‌بینی نماید. همچنین بیشترین ضریب تبیین برای پیش‌بینی آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت با شبکه پس انتشار پیشورو با توپولوژی ۲-۱۵-۲۰-۵ و تابع آستانه TAN-TAN-TAN و الگوریتم آموزش تنظیم بیزی به ترتیب ۰/۹۸۰۶ و ۰/۹۹۹۵ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن مادون قرمز- جابجایی، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی ویژه، آهنگ خشک

کردن، شبکه‌های عصبی مصنوعی

۱- مقدمه

بزرگترین تولیدکننده و صادرکننده پسته در جهان

می‌باشد. از طرفی دیگر ایران پنجمین تولیدکننده بزرگ آلبالو در جهان پس از کشورهای ترکیه، روسیه، هلند و اوکراین است. میزان تولید آلبالو در کشور ۱۰۵ هزار تن در سال است که ارزش آن بیش از ۶۴ میلیون دلار

پسته از محصولات عمده صادراتی کشور می‌باشد و بیش از ۵۰ درصد میزان تولیدی آن به خارج از کشور صادر می‌گردد. ایران با تولید ۲۳۱ هزار تن پسته در سال به ارزش اقتصادی برابر با ۱/۵ میلیارد دلار

آنجایی که هوا انرژی تشعشعی مادون قرمز را از خود عبور می‌دهد، بدون اینکه هوای محیط گرم شود، انرژی تابش مادون قرمز، محصول مورد نظر را گرم می‌کند (Khir *et al.*, 2011).

یکی از روش‌های مهم در تشریح خشک کردن مواد غذایی، مدل‌سازی ریاضی فرایند خشک کردن است. در مدل‌های تجربی ریاضی همچون مدل پیچ که شکل ساده شده حل تحلیلی قانون دوم فیک است، فرضیات زیادی مانند یکنواختی رطوبت درون نمونه، به تعادل رسیدن رطوبت سطح نمونه با هوای محیط، ثابت بودن ضریب نفوذ، صرف نظر از چروکیدگی و گرادیان‌های دما و فشار در نظر گرفته می‌شود. یکی از روش‌های جایگزین مدل‌های ریاضی، استفاده از مدل‌های ناپارامتری همچون شبکه‌های عصبی مصنوعی است که با استفاده از پارامترهای کاری خشک‌کن، فرایند خشک کردن را به طور دقیق‌تری توصیف و پیش‌بینی می‌کند (Huang and Mujumdar, 1993). در پیش‌بینی فرایند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است (Amiri, Cakmak and Yildiz, 2011). شبکه عصبی مصنوعی با الهام گرفتن از مغز انسان، ضمن اجرای فرایند آموزش، اطلاعات مربوط به داده را در قالب وزن‌های شبکه ذخیره می‌کند. شبکه عصبی مصنوعی، یکی از روش‌های محاسباتی است که به کمک فرایند یادگیری و با استفاده از پردازشگرهایی ساده به نام نورون تلاش می‌کند با شناخت روابط موجود میان داده‌ها، نگاشتی میان فضای ورودی (لایه ورودی) و فضای

برآورد می‌شود (FAO, 2012). بنه، میوه درخت بنه، ریز، مدور و به رنگ سبز تیره است. مغز میوه بنه به پسته شبیه ولی بسیار کوچکتر از آن است. کاربردهای میوه بنه برای خوشبو کردن دوغ و روغن حیوانی و همچنین در درست کردن ترشی از آن استفاده می‌گردد. میوه بنه مصارف دارویی نیز دارد و در کاهش چربی‌های خون و همچنین تقویت فعالیت کبد و طحال مفید می‌باشد (قنبری نیکی و همکاران، ۲۰۱۱).

خشک کردن یکی از مهمترین فرایندهای پس از برداشت محصول‌های کشاورزی است. خشک کردن با هدف حذف اکثریت آب محصول و افزایش مدت نگهداری میوه است و از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ مواد غذایی و محصولات کشاورزی می‌باشد. در طی فرایند خشک کردن، آب از داخل ماده غذایی خارج شده و در نتیجه امکان رشد میکروارگانیسم‌ها و ایجاد واکنش‌های شیمیایی نامطلوب به حداقل رسیده و مدت زمان نگهداری محصول افزایش می‌یابد (Amiri, Chayjan and Kaveh, 2014).

استفاده از انرژی توان تابش مادون قرمز، یکی از روش‌های جدید در خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی است. وقتی که اشعه مادون قرمز به سمت محصول تابانده شود، بسته به نوع محصول و طول موج اشعه تابیده شده، قسمتی از اشعه از محصول عبور کرده، درصدی از آن منعکس می‌شود و بالابخره بخشی هم جذب شده و به داخل محصول نفوذ می‌کند و به انرژی حرارتی تبدیل می‌گردد. سپس محصول به شدت گرم شده و گرادیان حرارتی در داخل جسم در طی مدت کوتاهی به شدت افزایش پیدا می‌کند. از

مطلوب (لایه خروجی) ارائه دهد. لایه یا لایه‌های مخفی، اطلاعات دریافت شده از لایه ورودی را پردازش می‌کند و در اختیار لایه خروجی قرار می‌دهد. هر شبکه با دریافت نمونه‌هایی آموزش می‌بیند (Suryanarayana et al., 2008). استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در سطح وسیعی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای مورد نیاز در فرآیندهای خشک کردن در حال رشد و توسعه است و می‌تواند جایگزین خوبی برای مدل‌سازی تجربی و رگرسیونی باشد. مدل شبکه عصبی مصنوعی در مورد فرآیندهایی که تعریف دقیق و درک خاصی از آنها وجود ندارد، بسیار مؤثر عمل می‌کند و قادر است متغیرهای مجهول را با دقت قابل قبولی تخمین بزند (Tripathy and Kumar, 2008).

هدف از این پژوهش، تعیین و پیش‌بینی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی ویژه، آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت سه محصول پسته، آلبالو و بنه با خشک‌کن مادون قرمز- جابجایی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است که از شبکه‌های پس انتشار پیشخور و پس انتشار پیشرو استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

پسته و آلبالو به صورت جداگانه از میدان میوه و تره‌بار همدان و بنه از باغی در شهرستان سردشت تهیه شدند و تا زمان انجام آزمایشات در یخچال (دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$) نگهداری شدند. برای تعیین رطوبت اولیه آلبالو و بنه، نمونه‌ها ۲۴ ساعت در دمای 70°C در داخل آون قرار گرفتند و مقادیر رطوبت اولیه به ترتیب برای آلبالو و بنه، $2/05$ و $1/16$ بر پایه خشک به دست آمد. رطوبت اولیه پسته نیز با استفاده از آون در دمای

130°C و به مدت ۶ ساعت، $0/47$ بر پایه خشک به دست آمد (ASAE Standard, 2005).

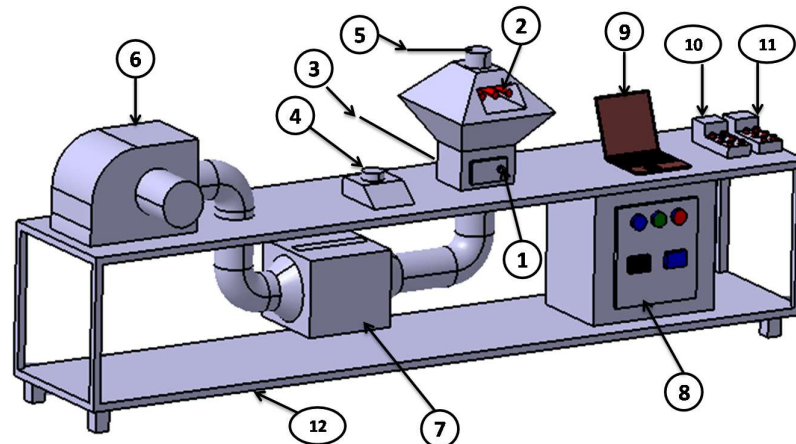
آزمایش‌ها در دانشگاه بوعلی سینا همدان با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز- همرفتی انجام شد (شکل ۱). خشک‌کن شامل چهار لامپ مادون قرمز (Philips model, Flemish, Belgium) با توان هر لامپ ۵۰۰ وات و مجموع ۲۰۰۰ وات که در بخش فوقانی اتاقک خشک‌کن به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر نصب شده‌اند، می‌باشد. برای ایجاد سرعت‌های مختلف هوای ورودی، یک فن گریز از مرکز با اینورتر (Vincker VSD2, ABB Co., Taiwan) مورد استفاده قرار گرفت.

سرعت هوا در خشک کردن پسته، $1/16$ ، $2/16$ و $3/35$ متر بر ثانیه، در خشک کردن بنه مقادیر $0/93$ ، $1/76$ و $2/6$ متر بر ثانیه و در خشک کردن آلبالو، $0/5$ ، $1/1$ و $1/7$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شدند. خشک کردن هر سه محصول در دمای هوای ورودی 40 ، 55 و 70 درجه سلسیوس و سه توان 500 ، 1000 و 1500 وات صورت گرفت. در هر آزمایش مقدار 30 گرم نمونه به صورت تک لایه بر روی سینی خشک‌کن قرار داده شد.

نسبت رطوبت (MR) شکل بدون بعد محتوای رطوبتی است و با رابطه (۱) تعریف می‌شود. این پارامتر بیانگر رطوبت محصول در زما t نسبت به رطوبت اولیه محصول است (Sharifian et al., 2012).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

که در رابطه M_t ، M_0 و M_e به ترتیب میزان رطوبت در زمان t ، رطوبت اولیه محصول و رطوبت تعادلی همگی بر حسب (کیلوگرم ماده جامد/ کیلوگرم آب) هستند.



شکل ۱. شماتیک خشک‌کن آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر: ۱. اتاقک خشک‌کن ۲. لامپ‌های مادون قرمز ۳. حسگر درجه حرارت ۴. ترازوی دقیق ۵. حسگر سرعت هوا ۶. فن و الکتروموتور ۷. منبع حرارتی ۸. اینورتر و ترموستات ۹. کامپیوتر ۱۰. رطوبت‌سنج ۱۱. دماسنج ۱۲. شاسی

Fig. 1. Schematic diagram of laboratory scale dryer used in this research: (1) Drying chamber, (2) Infrared lamps, (3) Air temperature sensor, (4) Precision balance, (5) Air velocity sensor, (6) Fan and electromotor, (7) Heat reservoir, (8) Inverter and thermostat, (9) Computer, (10) Hygrometer, (11) Thermometer, (12) Chassis

برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e اعمال فرضیاتی توسط کرانک برای اجسام کروی به صورت رابطه (۴) ارائه شده است (Aghbashlo *et al.*, 2008).

$$\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (4)$$

در این رابطه n تعداد جملات رابطه، t زمان خشک شدن بر حسب ثانیه، r شعاع هندسی میوه بر حسب متر، D_{eff} ضریب پخش مؤثر رطوبت بر حسب متر مربع بر ثانیه است. در صورت طولانی بودن زمان خشک شدن تنها جمله اول سری را می‌توان در نظر گرفت. در این شرایط رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) ساده می‌شود (Kaveh and Amiri Chayjan, 2014).

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (5)$$

با اعمال لگاریتم از طرفین رابطه می‌توان آن را به صورت خطی درآورد (رابطه ۶).

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (6)$$

در مقایسه با مقادیر M_o بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان رابطه (۱) را به صورت رابطه (۲) ساده کرد (Sharifian *et al.*, 2012).

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

آهنگ تبخیر رطوبت عبارت است از مقدار رطوبت خارج شده از واحد سطح ماده‌ی خشک شده در واحد زمان که نشان‌دهنده سرعت تبخیر رطوبت از محصول می‌باشد. آهنگ تبخیر رطوبت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد (Xiao *et al.*, 2010).

$$DR = \frac{(M_{t+dt} - M_t)}{dt} \quad (3)$$

که در این رابطه، (M_{t+dt}) مقدار رطوبت در زمان $(t+dt)$ و M_t میزان رطوبت در زمان t است که بر پایه خشک محاسبه می‌شوند.

قانون دوم فیک انتقال جرم در فرایند خشک کردن را توصیف می‌کند. حل عمومی این قانون با

حال می‌توان ضریب پخش مؤثر رطوبت را از روش شیب محاسبه نمود. در این روش با ترسیم مقدار لگاریتم نسبت رطوبت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در مقابل زمان، خط ثابتی با شیب K_o بدست می‌آید (Sharifian et al., 2012).

$$K_o = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (7)$$

انرژی مصرفی ویژه به صورت مقدار انرژی مصرفی در واحد جرم رطوبت خارج شده از نمونه آزمایشی تعریف می‌شود. در این پژوهش، انرژی مصرفی ویژه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$SEC = Qt \frac{(T_{in} - T_{am})}{60 m_v V_h} (C_{pa} + C_{pv} h_a) \quad (8)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم، C_{pv} و C_{pa} به ترتیب ظرفیت گرمایی بخار آب و هوا و برابر با $1004/16$ و $1828/8$ ، $(J/kg^\circ C)$ ، Q دبی هوای ورودی به اتاقک خشک‌کن بر حسب متر مکعب بر دقیقه، t زمان کل خشک کردن بر حسب دقیقه، h_a رطوبت مطلق هوا $(kg_{vapor}/kg_{dry\ air})$ ، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای هوای ورودی به خشک‌کن و دمای محیط بر حسب درجه سلسیوس، m_v مقدار انتقال جرم بر حسب کیلوگرم و V_h حجم ویژه هوا بر حسب متر مکعب بر کیلوگرم می‌باشد.

۱-۲- طراحی شبکه عصبی مصنوعی

برای پیش‌بینی مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه یک شبکه با چهار نرون در لایه ورودی شامل نوع محصول، سرعت هوای ورودی، دمای هوای ورودی و توان تابشی و با دو نرون در لایه خروجی (ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه) طراحی شد. از طرفی دیگر برای پیش‌بینی مقادیر نسبت

رطوبت و آهنگ خشک کردن شبکه‌ای با پنج نرون در لایه ورودی (نوع محصول، سرعت هوای ورودی، دمای هوای ورودی، توان تابشی و زمان خشک کردن) و با دو نرون در لایه خروجی (نسبت رطوبت و آهنگ خشک کردن) طراحی گردید. توپولوژی شبکه‌های عصبی مورد استفاده همراه با پارامترهای ورودی و خروجی در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. در این تحقیق برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از جعبه‌ی Neural Network Toolbox (ver. 5) نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

برای دستیابی به پاسخ مناسب، دو شبکه پس انتشار پیشرو و پس انتشار پیشخور مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند آموزش توسط شبکه‌های فوق فرآیندی تکراری است که شامل تغییر وزن‌های بین لایه‌های مختلف است و طی آموزش به تدریج به سمت ثبات این وزن‌ها پیش می‌رود، به طوری که خطای بین مقادیر مطلوب (مقدار واقعی) و پیش‌بینی شده به حداقل برسد. برای بهینه‌سازی ساختار شبکه از توابع فعال‌سازی سیگموئید، خطی و تانژانت هیپربولیک به ترتیب با روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) استفاده شد (Demuth et al., 2007).

$$Y_j = \frac{1}{1 + \exp(-X_j)} \quad (9)$$

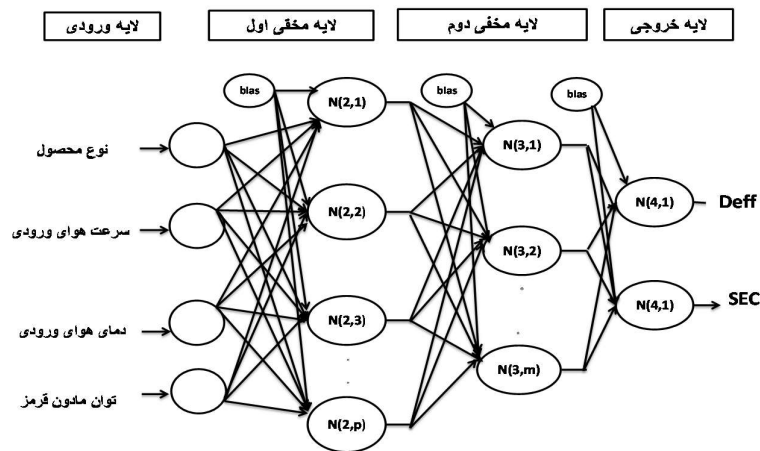
$$Y_j = X_j \quad (10)$$

$$Y_j = \frac{2}{(1 + \exp(-2X_j)) - 1} \quad (11)$$

در این روابط X_j مجموع ورودی‌های وزن‌دار هر یک از نرون‌های لایه ژام است و از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

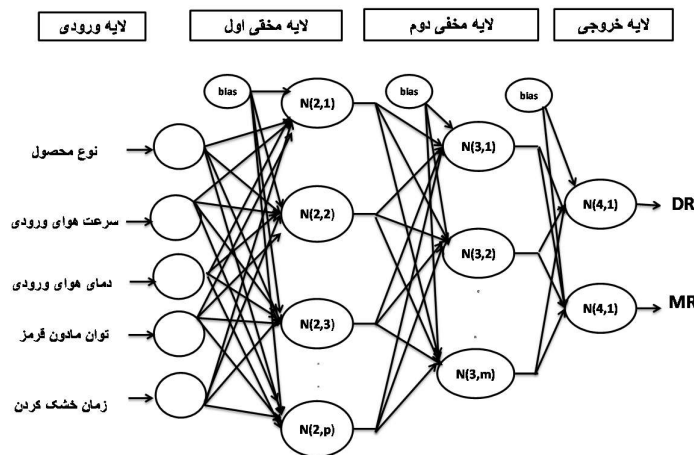
$$X_j = \sum_{i=1}^m W_{ij} \times Y_i + b_j \quad (12)$$

برای شبکه‌های پس انتشار پیشرو و پیشخور، m Y_i خروجی لایه i ام و b_j مقدار بایاس لایه j ام است. تعداد نرون‌های لایه خروجی، W_{ij} وزن بین لایه i و j ،



شکل ۲. توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده برای پیش‌بینی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه

Fig. 2. Schematic structure of the ANN topology for predicting moisture diffusivity and specific energy consumption



شکل ۳. توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده برای پیش‌بینی آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت

Fig. 3. Schematic structure of the ANN topology for predicting drying rate and moisture ratio

برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت مؤثر و انرژی مصرفی تعداد کل داده ۸۱ داده و برای پیش‌بینی نسبت رطوبت و نرخ خشک کردن ۳۴۱۲ داده استفاده شد که حدود ۲۵ درصد داده‌ها به طور تصادفی برای ارزیابی شبکه آموزش دیده مورد استفاده قرار گرفت.

در این تحقیق برای ارزیابی قابلیت تعمیم شبکه و حصول بهترین نتایج، از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2) ، خطای مطلق میانگین (MAE) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده گردید که به ترتیب از روابط (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند.

جهت‌گیری اولیه را قبل از ارائه داده‌ها به شبکه تعیین می‌کند. بعد از ارائه داده‌ها به شبکه بهنگام‌سازی وزن‌های اولیه آغاز می‌شود تا توزیع ثانویه با استفاده از تنظیم بیزی حاصل شود. از آنجایی که داده‌های به کار رفته ممکن است با خطاهای زیادی همراه باشند، روش‌های مؤثری برای بهبود عملکرد تعمیم، ضروری خواهد بود. از این رو، روش تنظیم بیزی که شامل تنظیم پیچدگی شبکه و اصلاح تابع عملکرد است، مناسب است (Amiri Chayjan and Esna-Ashari, 2010).

بررسی قابلیت تعمیم شبکه عصبی آموزش دیده، آخرین مرحله در توسعه شبکه عصبی مصنوعی است. در این مرحله مدل‌های شبکه عصبی آموزش دیده به وسیله مجموعه داده‌های ارزیابی که مستقل از داده‌های آموزش است، مورد آزمون قرار می‌گیرند.

۳- نتایج و بحث

شکل‌های (۴) تا (۶) تأثیر دمای محفظه خشک‌کن و توان تابشی مادون قرمز بر سینتیک خشک شدن لایه نازک پسته، آلبالو و بنه را در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهند. افزایش دمای محفظه خشک‌کن موجب می‌شود که سرعت خروج رطوبت از سه محصول افزایش یافته، آهنگ خشک شدن افزایش یابد و منحنی‌های بدست آمده از تغییرات محتوای رطوبت محصول در واحد زمان دارای روند کاهشی قابل توجهی باشند. تغییرات محتوای رطوبتی در واحد زمان، برای ۸۱ آزمایش در قالب ۲۷ نمودار در شکل‌های (۴) تا (۶) ارائه شده است. در این منحنی‌ها تفاوت زمان مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک پسته، آلبالو و بنه از

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (S_i - T_i)}{\sum_{i=1}^M (S_i - T_m)} \quad (13)$$

$$(T_m = \frac{\sum_{i=1}^M S_i}{M})$$

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M |S_i - T_i| \quad (14)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^N (S_{ip} - T_{ip})^2}{n_p \times n_o}} \quad (15)$$

در این روابط S_i مقدار پیش‌بینی شده به وسیله شبکه عصبی مصنوعی برای الگوی i ام، T_i مقدار آزمایشی برای الگوی i ام، T_m میانگین مقادیر پیش‌بینی شده، S_{ip} خروجی شبکه در نرون i ام و الگوی p ام، T_{ip} خروجی هدف در نرون i ام و الگوی p ام، n_p تعداد الگوها، n_o نرون‌های لایه خروجی، N تعداد نرون‌های خروجی و M تعداد الگوهای آموزش است. الگوریتم‌های آموزش به کار رفته برای بهنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد استفاده عبارتند از:

الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (LM): الگوریتم

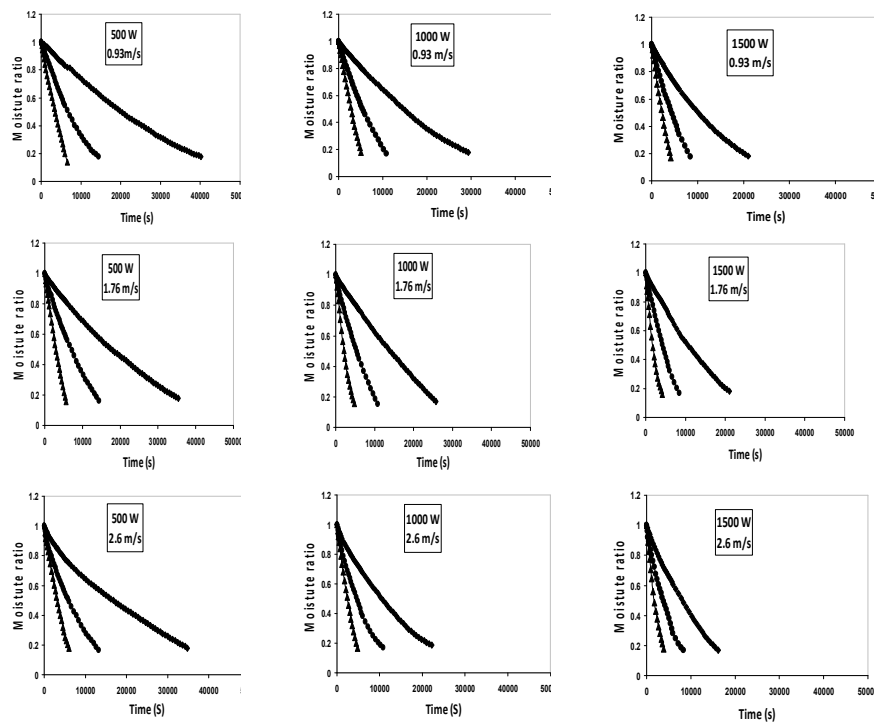
مبتنی بر ماتریس هسین، به شبکه اجازه می‌دهد تا با دقت بیشتری الگوها را فرا بگیرد. الگوریتم LM برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی از طریق توزیع محاسبات و فضای مورد نیاز، موازی عمل می‌کند و از این رو سریع‌ترین روش برای آموزش شبکه‌های عصبی پس انتشار با ابعاد متوسط (حداکثر چند صد اتصال وزنی و بایاس) است. الگوریتم LM اساساً برای بهینه‌سازی غیر خطی بر مبنای حداقل مربعات استفاده می‌شود.

الگوریتم تنظیم بیزی (BR): فرایند آموزش شبکه

پس انتشار با الگوریتم تنظیم بیزی، با توزیع تصادفی وزن‌های اولیه آغاز می‌شود. توزیع تصادفی این پارامترها

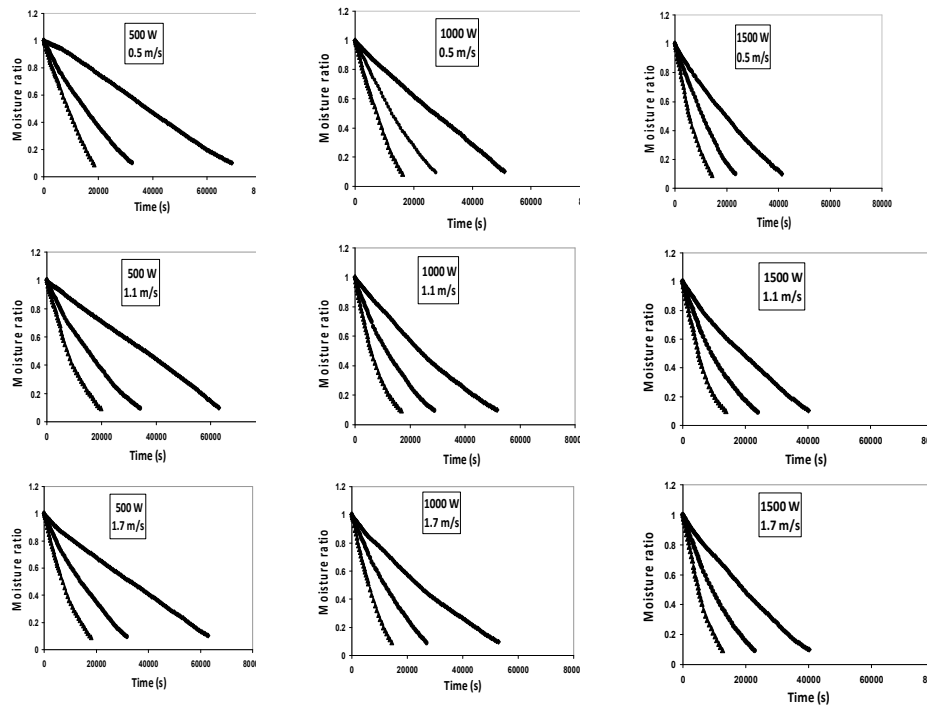
رطوبت‌های ۲/۰۵، ۱/۱۶ و ۰/۴۷ درصد (d.b.) به رطوبت ۰/۲ درصد (d.b.) به وضوح مشخص شده است. افزایش دمای محفظه خشک‌کن موجب شیب بیشتر منحنی‌های بدست آمده گشته و بیانگر سرعت بالای فرآیند می‌باشد. در این روش خشک کردن با افزایش دما از ۴۰ به ۷۰ درجه سلسیوس و افزایش توان تابشی از ۵۰۰ به ۱۵۰۰ وات و همچنین با افزایش سرعت

هوای ورودی برای هر سه محصول زمان خشک شدن به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل محصول و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت، کاهش یافت. نتایج مشابهی برای خشک کردن برنج (Khir *et al.*, 2011)، گوجه فرنگی (Ruiz Celma *et al.*, 2009) و آناناس (Ponkham *et al.*, 2011) گزارش شده است.

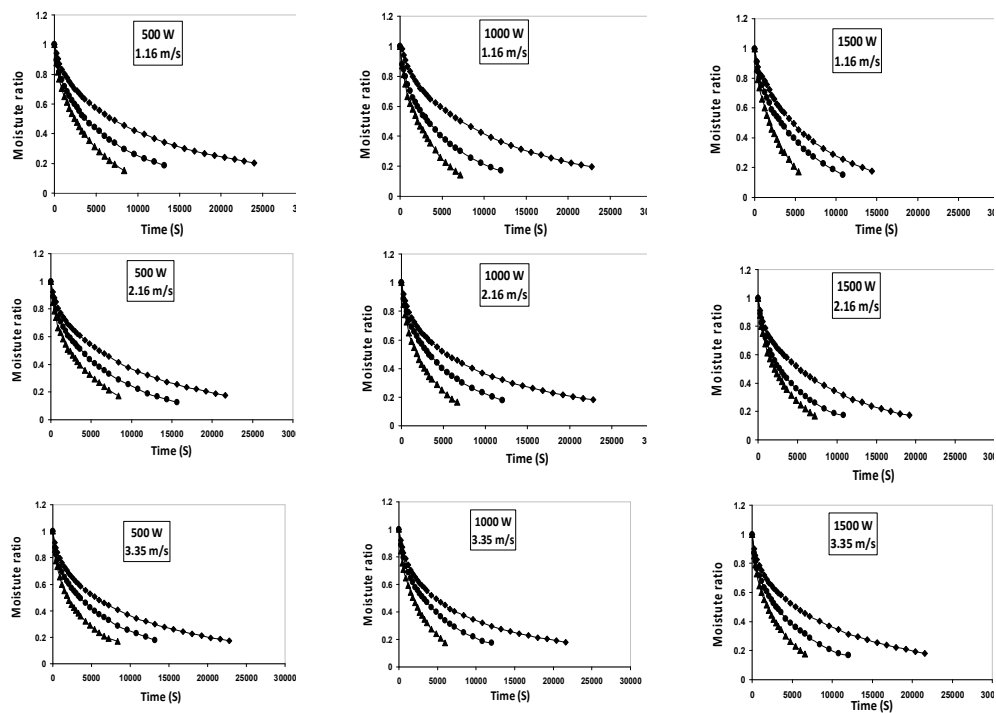


شکل ۴. منحنی‌های نسبت رطوبت- زمان در دماها (۴۰°C ♦ و ۵۵°C ● و ۷۰°C ▲)، سرعت و توان‌های مختلف مادون قرمز برای محصول بنه

Fig. 4. Moisture ratio curves versus time of terebinth fruit at different drying temperatures (♦40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C), air velocities and different infrared powers



شکل ۵. منحنی‌های نسبت رطوبت - زمان در دما (40°C ، 55°C و 70°C)، سرعت و توان‌های مادون قرمز برای آلبالو
Fig. 5. Moisture ratio curves versus time of sour cherry fruit at different drying temperatures (40°C ، 55°C and 70°C), air velocities and different infrared powers

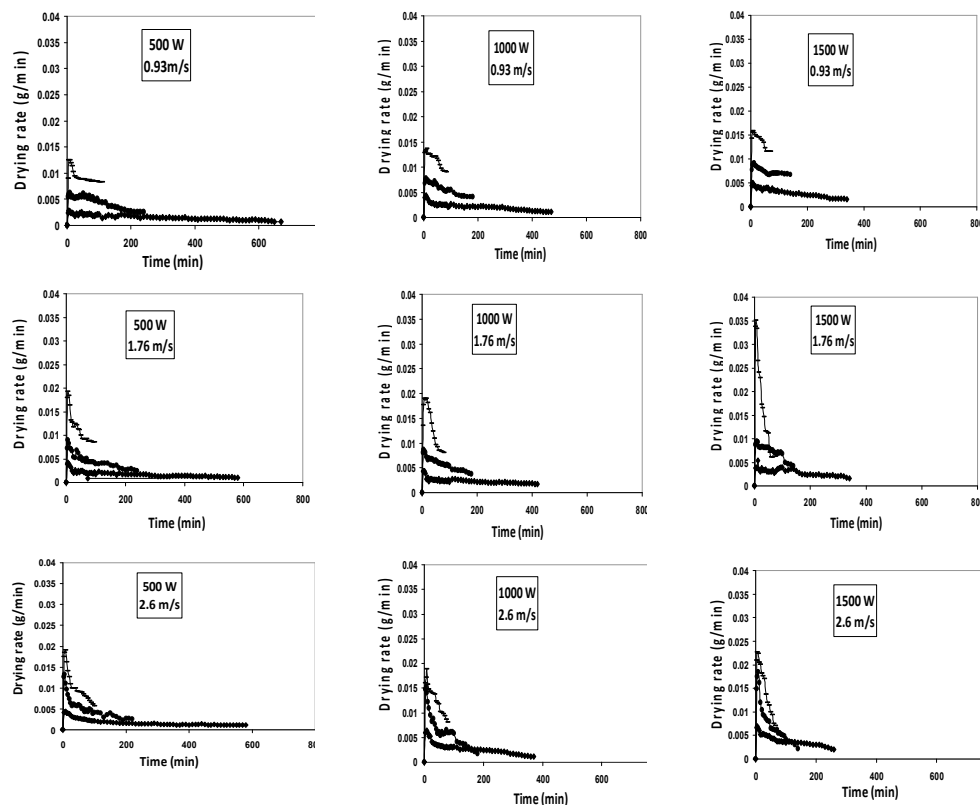


شکل ۶. منحنی‌های نسبت رطوبت - زمان در دما (40°C ، 55°C و 70°C)، سرعت و توان‌های مختلف مادون قرمز برای محصول پسته

Fig. 6. Moisture ratio curves versus time of pistachio fruit at different drying temperatures (40°C ، 55°C and 70°C), air velocities and different infrared powers

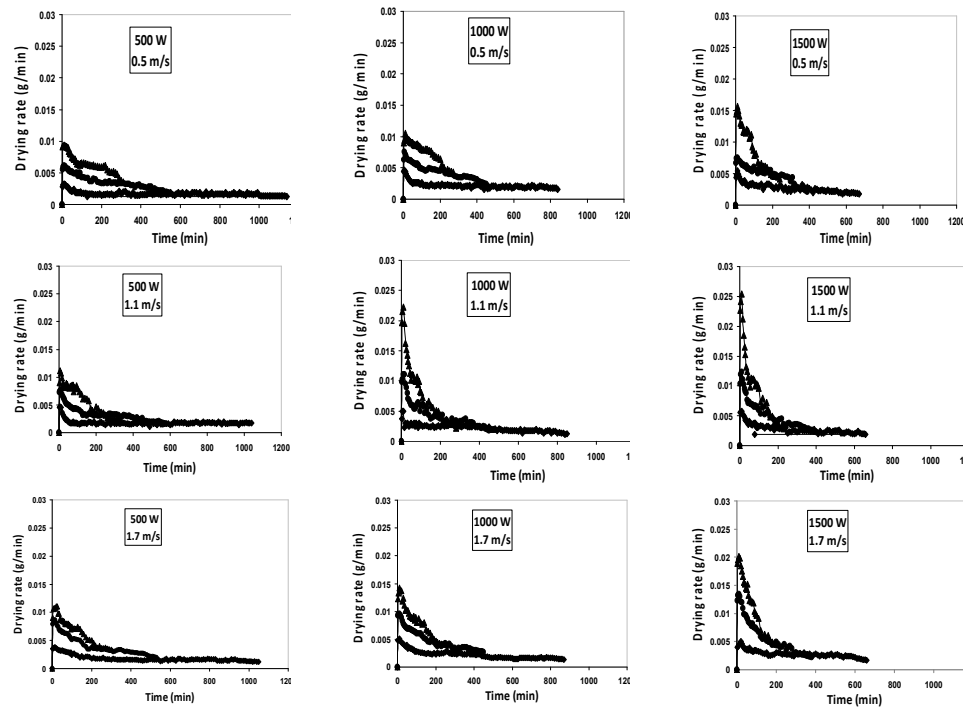
رطوبت سطح ماده کاهش می‌یابد و نفوذ آب از درون ماده به سطح شروع می‌شود که از این لحظه به بعد، نفوذ رطوبت کنترل‌کننده آهنگ تبخیر است؛ لذا آهنگ خشک شدن کاهشی می‌گردد. با افزایش دما، افزایش توان تابشی و افزایش سرعت هوای ورودی میزان از دست دادن رطوبت بیشتر شده و در نتیجه آهنگ خشک شدن نیز افزایش یافته است. زیرا با افزایش دما، افزایش توان تابشی و افزایش سرعت هوای ورودی لایه سطحی سریعتر رطوبت خود را از دست می‌دهد. نتایج مشابهی برای خشک کردن خرمالو (Doymaz, 2012)، زیتون (Meziane, 2011) و انار (Doymaz, 2011) گزارش شده است.

نتایج حاصل از آهنگ خشک کردن سه محصول پسته، آلبالو و بنه به ترتیب در شکل‌های (۷) تا (۹) آمده است. ملاحظه می‌گردد که در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است، بتدریج با پیشرفت زمان، محتوای رطوبتی محصول کاهش پیدا کرده و آهنگ کاهش رطوبت کاهشی می‌یابد. محصول، عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه فرآیند خشک کردن از دست می‌دهد و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم است. همچنین در زمان‌های اولیه خشک شدن، به علت افزایش دمای ماده و وجود آب کافی در سطح ماده، آهنگ خشک شدن افزایشی است، تا اینکه



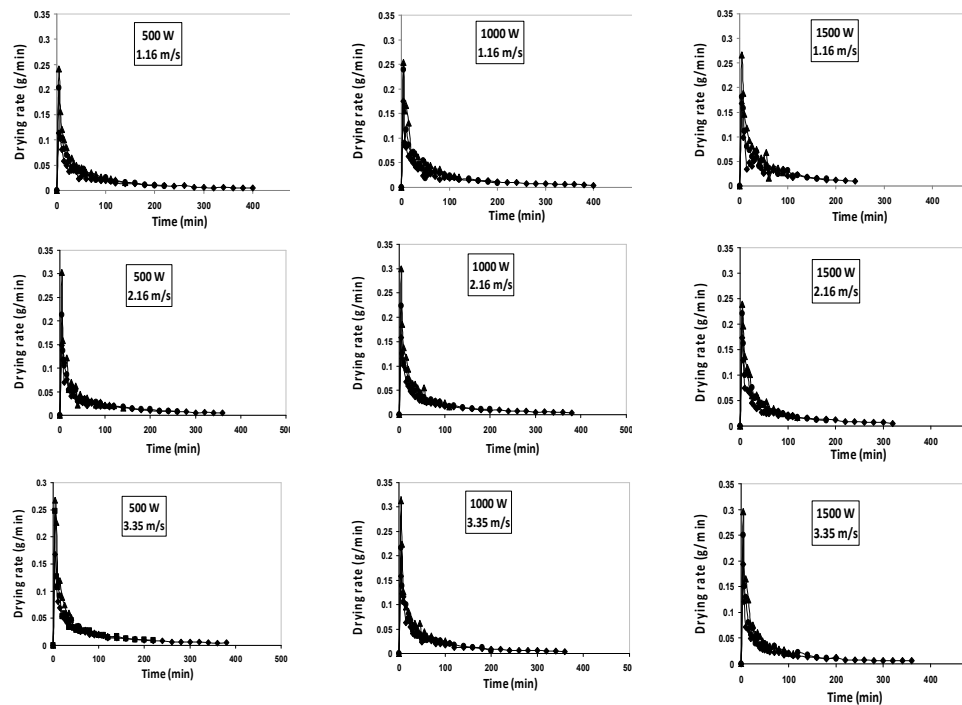
شکل ۷. آهنگ خشک کردن بنه در مقابل زمان برای دماها (♦ ۴۰ °C، ● ۵۵ °C و ▲ ۷۰ °C)، سرعت‌ها و توان‌های مختلف تابشی

Fig. 7. Drying rate curves versus time of terebinth fruit at different drying temperatures (♦ 40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C), air velocities and different infrared powers



شکل ۸. آهنگ خشک کردن آلبالو در مقابل زمان برای دماها (♦ ۴۰ °C، ● ۵۵ °C و ▲ ۷۰ °C)، سرعت‌ها و توان‌های مختلف تابشی

Fig. 8. Drying rate curves versus time of sour cherry fruit at different drying temperatures (♦ 40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C), air velocities and different infrared powers



شکل ۹. آهنگ خشک کردن پسته نسبت به زمان در دماهای (♦ ۴۰ °C، ● ۵۵ °C و ▲ ۷۰ °C)، سرعت‌ها و توان‌های تابشی

Fig. 9. Drying rate curves versus time of pistachio fruit at different drying temperatures (♦ 40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C), air velocities and different infrared powers

با افزایش دما و توان تابشی، رطوبت نسبی محصول کاهش می‌یابد. افزایش دما و افزایش توان تابشی در محفظه خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و کاهش رطوبت را تشدید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ رطوبت با دما و توان تابشی وجود دارد (جدول ۱). ضریب نفوذ رطوبت، به دما و ترکیب مواد بستگی دارد؛ در این تحقیق ترکیب میوه‌های پسته، آلبالو و بنه در آزمایش‌ها ثابت بوده، لذا دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ رطوبت مربوط به دما و توان‌های تابشی مختلف اعمال شده می‌باشد. جدول (۱) نشان می‌دهد که در سرعت ثابت، میزان ضریب نفوذ رطوبت با افزایش دمای هوا و افزایش توان تابشی افزایش می‌یابد. پایین‌ترین دما و توان سبب کمترین مقدار ضریب نفوذ رطوبت شده و بیشترین مقدار ضریب نفوذ رطوبت در بالاترین دما و توان تابشی اتفاق افتاده است. همچنین با افزایش سرعت هوای ورودی مقدار ضریب پخش رطوبت مؤثر برای هر سه محصول در دما و توان‌های ثابت تقریباً روند افزایشی دارد. مقادیر ضریب نفوذ رطوبت پسته از $3/59 \times 10^{-10}$ تا $1/75 \times 10^{-9}$ ، آلبالو از $1/17 \times 10^{-10}$ تا $7/30 \times 10^{-10}$ و برای بنه از $6/20 \times 10^{-11}$ تا $7/30 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه تغییر کرد. مقدار ضریب نفوذ رطوبت ۸۲ درصد از محصولات غذایی و کشاورزی در بازه 10^{-8} تا 1×10^{-11} متر مربع بر ثانیه است (Marinos-Kouris and Maroulis, 2006). مقادیر محاسبه شده ضریب نفوذ در تحقیق حاضر نیز تقریباً در بازه مذکور است.

انرژی مصرفی ویژه برای سه محصول پسته، آلبالو و بنه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده در جدول (۲) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که انرژی مصرفی در خشک کردن دو محصول آلبالو و پسته با افزایش دما، افزایش پیدا کرده است؛ اما در محصول بنه با افزایش دما، انرژی مصرفی کاهش پیدا کرده است. با افزایش سرعت هوای ورودی در هر سه محصول انرژی مصرفی افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش توان مادون قرمز انرژی مصرفی در دو محصول بنه و آلبالو کاهش یافته، ولی برای پسته با افزایش توان مادون قرمز مقدار انرژی مصرفی افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای پسته برابر با 8209 مگا ژول بر کیلوگرم در سرعت هوای ورودی $3/35$ متر بر ثانیه، دمای 70 درجه سلسیوس و توان تابشی 1500 وات، برای آلبالو برابر با $891/16$ مگا ژول بر کیلوگرم در سرعت هوای ورودی $1/6$ متر بر ثانیه، دمای 65 درجه سلسیوس و توان تابشی 500 وات و برای بنه بیشترین مقدار انرژی مصرفی ($7077/04$ مگا ژول بر کیلوگرم) در سرعت هوای ورودی $2/6$ متر بر ثانیه، دمای هوای ورودی 40 درجه سلسیوس و توان مادون قرمز 500 وات به دست آمدند. نتایج بدست آمده برای محصول بنه، مشابه با نتایج گزارش شده در خشک کردن همان محصول به وسیله خشک‌کن بستر سیال (Amiri Chayjan and Kaveh, 2014) است.

جدول ۱. تأثیر درجه حرارت، توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2/s) در خشک کردن بنه، آلبالو و پسته

Table 1. The effect of temperature, infra-red power and air velocity on moisture diffusivity (m^2/s) in the drying of terebinth, sour cherry and pistachio

نوع محصول		سرعت هوای ورودی (m/s)		بنه		آلبالو		پسته	
		۲/۶	۱/۷۳	۰/۹۳		۱/۷	۱/۱	۰/۵	
	۴۰ °C -۵۰۰ W	۶/۴۳×۱۰ ^{-۱۱}	۶/۸۸×۱۰ ^{-۱۱}	۶/۱۹×۱۰ ^{-۱۱}		۱/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۱۷×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۲۴×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۵۹×۱۰ ^{-۹}
	۴۰ °C -۱۰۰۰ W	۱/۱۱×۱۰ ^{-۱۰}	۹/۵۹×۱۰ ^{-۱۱}	۸/۳۱×۱۰ ^{-۱۱}		۱/۵۷×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۶۴×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۵۰×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۸۷×۱۰ ^{-۹}
	۴۰ °C -۱۵۰۰ W	۱/۶۳×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۲۶×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۱۵×۱۰ ^{-۱۰}		۲/۳۱×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۲۲×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۰۷×۱۰ ^{-۱۰}	۶/۶۱×۱۰ ^{-۹}
	۵۵ °C -۵۰۰ W	۱/۹۱×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۷۲×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۸۰×۱۰ ^{-۱۰}		۲/۶۹×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۰۳×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۵۸×۱۰ ^{-۱۰}	۶/۸۰×۱۰ ^{-۹}
	۵۵ °C -۱۰۰۰ W	۲/۵۱×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۵۴×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۲۴×۱۰ ^{-۱۰}		۳/۳۹×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۹۵×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۴۲×۱۰ ^{-۱۰}	۸/۰۳×۱۰ ^{-۹}
	۵۵ °C -۱۵۰۰ W	۳/۴۰×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۰۸×۱۰ ^{-۱۰}	۲/۷۶×۱۰ ^{-۱۰}		۳/۷۳×۱۰ ^{-۱۰}	۳/۵۱×۱۰ ^{-۱۰}	۴/۱۲×۱۰ ^{-۱۰}	۹/۲۶×۱۰ ^{-۹}
	۷۰ °C -۵۰۰ W	۴/۱۹×۱۰ ^{-۱۰}	۵/۰۴×۱۰ ^{-۱۰}	۴/۰۰×۱۰ ^{-۱۰}		۵/۰۱×۱۰ ^{-۱۰}	۴/۷۰×۱۰ ^{-۱۰}	۴/۳۵×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۲۰×۱۰ ^{-۹}
	۷۰ °C -۱۰۰۰ W	۵/۹۲×۱۰ ^{-۱۰}	۶/۶۸×۱۰ ^{-۱۰}	۴/۷۶×۱۰ ^{-۱۰}		۶/۶۹×۱۰ ^{-۱۰}	۶/۰۶×۱۰ ^{-۱۰}	۵/۴۱×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۴۳×۱۰ ^{-۹}
	۷۰ °C -۱۵۰۰ W	۷/۲۹×۱۰ ^{-۱۰}	۷/۲۴×۱۰ ^{-۱۰}	۶/۱۸×۱۰ ^{-۱۰}		۸/۱۳×۱۰ ^{-۱۰}	۷/۳۱×۱۰ ^{-۱۰}	۵/۹۱×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۷۴×۱۰ ^{-۹}

جدول ۲. تأثیر درجه حرارت، توان مادون قرمز و سرعت هوای ورودی بر انرژی مصرفی ویژه (MJ/kg) در خشک کردن بانه،

آلبالو و پسته

Table 2. The effect of temperature, power infra-red and air velocity on specific energy consumption (MJ/kg) in the drying of terebinth, sour cherry, and pistachio

نوع محصول	سرعت هوای ورودی (m/s)	۴۰ °C - ۵۰۰ W	۴۰ °C - ۱۰۰۰ W	۴۰ °C - ۱۵۰۰ W	۵۵ °C - ۵۰۰ W	۵۵ °C - ۱۰۰۰ W	۵۵ °C - ۱۵۰۰ W	۷۰ °C - ۵۰۰ W	۷۰ °C - ۱۰۰۰ W	۷۰ °C - ۱۵۰۰ W
بانه	۰/۹۳	۲۴۵۵/۵۷	۲۳۸۷/۸۲	۲۳۲۸/۳۸	۲۰۲۵/۶۹	۱۷۴۹/۱۴	۱۷۱۹/۵۵	۱۳۹۵/۱۵	۱۲۳۰/۴۶	۱۱۶۲/۰۳
	۱/۷۳	۴۰۷۴/۴۳	۴۰۷۱/۲۰	۳۹۵۴/۸۵	۳۹۱۶/۷۳	۳۳۳۵/۴۳	۳۲۰۶/۳۲	۲۴۳۴/۷۰	۲۲۹۱/۲۵	۲۲۰۶/۹۵
	۲/۶	۷۰۷۷/۰۴	۶۷۷۱/۹۹	۶۵۱۶/۵۲	۵۲۰۵/۱۲	۴۹۵۷/۰۲	۴۶۷۴/۵۲	۳۸۶۷/۲۵	۳۶۱۳/۱۹	۳۴۲۷/۴۵
آلبالو	۰/۵	۹۴/۷۱	۷۰/۶۱	۵۶/۱۱	۲۵۱/۸۷	۳۰۹/۱۱	۱۶۴/۰۶	۲۸۱/۹۷	۲۲۹/۳۰	۲۲۰/۱۸
	۱/۱	۱۹۹/۷۲	۱۵۳/۹۳	۱۱۵/۱۷	۵۷۰/۸۵	۴۷۸/۲۷	۳۷۵/۷۹	۵۹۹/۹۴	۴۵۳/۳۹	۳۷۴/۳۶
	۱/۶	۲۹۹/۷۰	۲۳۱/۴۲	۱۶۱/۶۱	۸۲۵/۶۲	۷۳۹/۰۳	۶۰۲/۵۴	۸۹۱/۱۶	۶۸۲/۱۲	۵۷۵/۲۷
پسته	۱/۱۶	۲۲۸/۷	۴۶۲/۱	۶۷۰/۷	۱۰۹۰/۱۵	۱۰۹۲/۲	۱۱۷۹/۵	۲۲۵۵/۴۱	۱۲۶۹/۱۲	۳۳۳۷/۹
	۲/۲۶	۶۱۳/۱۷	۸۱۶/۲	۷۵۳/۷	۱۲۱۲/۰۱	۱۱۲۸/۱۳	۱۱۴۷/۰۴	۵۶۲۰/۹۷	۳۹۱۰/۸۹	۶۳۶۱/۱۵
	۳/۳۵	۶۸۶/۰۱	۸۴۰/۳	۸۴۶/۹	۱۵۶۷/۹	۱۴۲۶/۱۷	۱۸۱۸/۷۶	۷۳۸۱/۴۶	۶۵۰۶/۴۶	۸۲۰۸/۹۸

TAN و چرخه آموزش ۳۸ دارای کمترین میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۳۸) و بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۷۳۵) برای ضریب نفوذ رطوبت و ۰/۹۹۱۳ برای انرژی مصرفی ویژه است. این نتایج در جدول (۳) آورده شده است.

از طرف دیگر در پیش‌بینی آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت، کاربرد الگوریتم LM و BR به همراه شبکه‌های FFBP و CFBP نشان داد که توپولوژی ۲-۱۵-۲۰-۵ در شبکه CFBP با تابع آستانه TAN-TAN و چرخه آموزش ۷۶ دارای کمترین میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۰۰۰۵) و بیشترین مقدار ضریب تبیین ۰/۹۹۹۵ برای نسبت رطوبت و ۰/۹۸۰۶ برای آهنگ خشک کردن است. این نتایج در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول خلاصه‌ای از بهترین ساختار توپولوژی شبکه‌های عصبی، توابع آستانه و الگوریتم‌های مختلف کاربردی در پیش‌بینی خشک کردن پسته، آلبالو و بانه نشان داده شده است. در واقع

پیش‌بینی همزمان پارامترهای ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با انرژی مصرفی ویژه و همچنین آهنگ خشک کردن با نسبت رطوبت در هر سه محصول به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شد. از دو شبکه FFBP و CFBP برای به دست آوردن جواب مناسب استفاده شد. در پیش‌بینی ضریب نفوذ رطوبت و انرژی مصرفی ویژه، استفاده از الگوریتم LM به همراه شبکه‌های FFBP و CFBP نشان داد که توپولوژی ۲-۶-۴ (۴ نرون در لایه ورودی، ۶ نرون در لایه دوم، ۶ نرون در لایه سوم و ۲ نرون در لایه خروجی) در شبکه FFBP با تابع آستانه TAN-PUR-TAN و چرخه آموزش ۲۲ دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۰۲۲) و بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۸۱۲) برای ضریب نفوذ رطوبت و ۰/۹۹۴۶ برای انرژی مصرفی ویژه است. همچنین استفاده از الگوریتم BR به همراه شبکه‌های FFBP و CFBP نشان داد که توپولوژی ۲-۶-۴ در شبکه FFBP با تابع آستانه TAN-TAN

می‌توان اظهار داشت که شبکه عصبی یک ابزار قدرتمند
 برای مدل‌سازی فرایند خشک کردن پسته، آلبالو و بنه
 در شرایط مختلف است که از دقت بالایی برخوردار است
 و با هزینه پایین قابل انجام است. پژوهش‌های قبلی در

جدول ۳. نتایج آرایش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تغییرات ضریب نفوذ رطوبت و انرژی مصرفی ویژه
 Table 3. The results of the different arrangements of ANN in estimating moisture diffusivity and specific energy consumption

شبهه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R ² (Deff)	R ² (SEC)	چرخه آموزش
FFBP	LM	TAN-PUR-TAN	۴-۶-۶-۲	۰/۰۰۰۲۲	۰/۹۸۱۲	۰/۹۹۴۶	۲۲
		LOG-TAN-TAN	۴-۴-۴-۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۹۷۵۶	۰/۹۹۳۸	۲۵
		TAN-LOG-PUR	۴-۱۰-۸-۲	۰/۰۰۰۸۱	۰/۹۶۳۴	۰/۹۹۲۲	۱۰
	BR	TAN-TAN-TAN	۴-۶-۶-۲	۰/۰۰۰۳۸	۰/۹۷۳۵	۰/۹۹۱۳	۳۸
		PUR-LOG-TAN	۴-۱۰-۱۰-۲	۰/۰۰۰۴۴	۰/۹۷۳۴	۰/۹۹۰۹	۴۴
		LOG-PUR-TAN	۴-۶-۵-۲	۰/۰۰۰۸۶	۰/۹۶۸۹	۰/۹۸۵۴	۲۹
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	۴-۵-۵-۲	۰/۰۰۰۳۲	۰/۹۶۷۵	۰/۹۹۰۳	۱۵
		TAN-PUR-TAN	۴-۱۰-۸-۲	۰/۰۰۰۶۱	۰/۹۶۹۵	۰/۹۹۳۲	۱۳
		TAN-LOG-PUR	۴-۶-۵-۲	۰/۰۰۰۲۷	۰/۹۷۴۵	۰/۹۹۴۳	۱۱

جدول ۴. نتایج آرایش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تغییرات آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت محصولات
 Table 4. The results of the different arrangements of ANN in estimating drying rate and moisture ratio of products

شبهه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R ² (MR)	R ² (DR)	چرخه آموزش
FFBP	LM	TAN-PUR-TAN	۵-۱۵-۱۰-۲	۰/۰۰۰۳۲۲	۰/۹۹۸۳	۰/۹۶۶۱	۱۸۲
		LOG-TAN-PUR	۵-۱۰-۸-۲	۰/۰۰۰۳۷۳	۰/۹۹۵۳	۰/۹۵۹۸	۹۹
		TAN-LOG-PUR	۵-۸-۸-۲	۰/۰۰۰۲۵۰	۰/۹۹۴۱	۰/۹۵۹۸	۴۰
	BR	LOG-TAN-TAN	۵-۱۵-۱۰-۲	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۹۹۹۲	۰/۹۶۹۷	۲۰۵
		TAN-TAN-TAN	۵-۱۰-۱۰-۲	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۹۹۸۵	۰/۹۶۶۹	۱۳۴
		TAN-LOG-TAN	۵-۱۵-۱۵-۲	۰/۰۰۰۰۱۴	۰/۹۹۹۱	۰/۹۶۸۷	۵۹
CFBP	LM	LOG-LOG-TAN	۵-۲۰-۲۰-۲	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۹۹۹۵	۰/۹۷۰۵	۱۸۸
		TAN-PUR-PUR	۵-۱۵-۱۵-۲	۰/۰۰۰۳۶۳	۰/۹۹۶۸	۰/۹۶۱۱	۲۸۷
		LOG-TAN-TAN	۵-۲۰-۱۵-۲	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۹۹۹۴	۰/۹۷۰۱	۱۷۹
	BR	TAN-TAN-TAN	۵-۲۰-۱۵-۲	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹۵	۰/۹۸۰۶	۷۶
		LOG-TAN-TAN	۵-۵-۵-۲	۰/۰۰۰۱۱۵	۰/۹۹۸۹	۰/۹۶۷۴	۱۳۶
		LOG-LOG-TAN	۵-۱۵-۱۰-۲	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۹۹۸۹	۰/۹۶۸۴	۱۵۲

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تخمین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی مصرفی ویژه، آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت در فرایند خشک کردن سه محصول پسته، آلبالو و بنه با خشک‌کن مادون قرمز- جابجایی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت گرفت. نتایج نشان داد که شبکه پس انتشار پیشخور با توپولوژی ۲-۶-۴ و تابع TAN-PUR-TAN و الگوریتم آموزش لونیگ-مارکوارت قادر است ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه را به ترتیب با

ضریب تبیین ۰/۹۹۴۶ و ۰/۹۸۱۲ و خطای میانگین مربعات ۰/۰۰۰۲۲ در شرایط مختلف خشک کردن پیش‌بینی نماید. همچنین بیشترین ضریب تبیین برای پیش‌بینی آهنگ خشک کردن و نسبت رطوبت با شبکه پس انتشار پیشرو با توپولوژی ۲-۱۵-۲۰-۵ و تابع آستانه TAN-TAN-TAN و الگوریتم آموزش تنظیم بیزی به ترتیب ۰/۹۸۰۶ و ۰/۹۹۹۵ به دست آمد.

۵- فهرست منابع

1. Agbashlo, M., Kianmehr, M.H. and Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of beriberi fruit (*Berberidaceae*). Energy Convers. Manage. 49: 2865-2871.
2. Amiri Chayjan, R. and Esna-Ashari, M. 2010. Comparison between artificial neural networks and mathematical models for estimating equilibrium moisture content in raisin. Agric. Eng. Int: CIGR Journal. 12(1): 158-166.
3. Amiri Chayjan, R. and Kaveh, M. 2014. Physical parameters and kinetic modeling of fix and fluid bed drying of terebinth seeds. J. Food Process. Pres. 38: 1307-1320.
4. ASAE STANDARD. 2005. Standard for Measurement of Moisture in Grain and Seed, Agricultural Engineering Yearbook, St. Joseph, MI. 564p.
5. Cakmak, G. and Yildiz, C. 2011. The prediction of seedy grape drying rate using a neural network method. Comput. Electron. Agr. 75: 132-138.
6. Demuth, H., Beale, M. and Hagan, M. 2007. Neural network toolbox 5. The MathWorks, Natick, MA, USA.
7. Doymaz, I. 2011. Experimental study on drying characteristics of pomegranate peels. Food Sci. Biotechnol. 20(4): 965-970.
8. Doymaz, I. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki L.*). Energy Convers. Manage. 56: 199-205.
21. FAO. Statititcal database.2012. Available From: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.

10. Ghanbari Niaki, A., Fathi, R., Shahandeh, F., Yazdani, M. and Hajizadeh, A. 2011. The effect of endurance training and *Pistacia atlantica* (bene) extraction on resting plasma visfatin and lipids levels in female rats. *Daneshvar Medicine*. 94: 1-11 (in Farsi).
11. Huang, B. and Mujumdar, A. S. 1993. Use of neural network to predict industrial dryer performance. *Dry. Technol.* 11: 525-541.
12. Kaveh M., and Amiri Chayjan, R. 2014. Predication of some physical and drying properties of terebinth seed (*Pistacia atlantica* L.) using artificial neural networks. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 13(1): 65-78.
13. Khir, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B.R. and Mohamed, S. 2011. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *LWT-Food Sci. Technol.* 44: 1126-1132.
14. Marinos-Kouris, D. and Z.B. Maroulis. 2006. Transport properties in the drying of solids. *In: A. S. Mujumdar (ed.) Handbook of Industrial Drying*. 3rd edn. CRC press, USA. Pp. 82-114.
15. Menlik, T., Özdemir, M.B. and Kirmaci, V. 2010. Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. *Expert Syst. Appl.* 37: 7669-7677.
16. Meziane, S. 2011. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. *Energy Convers. Manage.* 52: 1644-1649.
17. Ponkham, K., Meeso, N., Soponronnarit, S., Siriamornpun, S. 2011. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food Bioprod. Process.* 90(2): 155-164.
18. Ruiz Celma, A., Cuadros, F. and López-Rodríguez, F. 2009. Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Food Bioprod. Process.* 87(4): 282-291.
19. Sharifian, F., Motkagh, A.M. and Nikbakht, A.M. 2012. Pulsed microwave drying kinetics of fig fruit (*Ficus carica* L.). *Aust. J. Crop Sci.* 6: 1441-1447.
20. Singh, N.J. and Pandey, R.K. 2011. Neural network approaches for prediction of drying kinetics during drying of sweet potato. *Agric. Eng. Int: CIGR Journal*. 13(1): 1-7.
21. Suryanarayana, I., Braibanti, A., Rao, R.S., Ramam, V.A., Sudarsan, D. and Rao, G.N. 2008. Neural networks in fisheries research. *Fish. Res.* 92: 115-139.
22. Tripathy, P.P. and Kumar, S. 2008. Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *Int. J. Therm. Sci.* 48: 1452-1459.
23. Xiao, H.W., Pang, C.L., Wang, L.H., Bai, J.W., Yang, W.X. and Gao, Z. J. 2010. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosyst. Eng.* 105: 233-240.

Predication of Some Drying Properties of Pistachio, Sour Cherry, and Terebinth Fruit Using Artificial Neural Networks

M. Kaveh^{1*}, R. Amiri-Chayjan²

¹*MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan,, Iran*

²*Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran*

*Corresponding author E-mail: sirwankaweh@gmail.com

Received: 2015-09-12

Accepted: 2016-05-08

Abstract

The purpose of this study was to estimate the amounts of effective moisture diffusivity, energy consumption, drying rate and relative humidity in drying processes of pistachio, sour cherry, and terebinth fruit using infrared-convection dryer with artificial neural networks. In order to predict these parameters, five factors were used such as product type, air velocity, air temperature, infrared power, and drying time. Several networks and algorithms were used for training and evaluation models. The feed forward back-propagation topology was 4-6-6-2 structured with the training algorithm of Levenberg-Marquardt (LM) and transfer functions of TAN-PUR-TAN. It predicted the effective moisture diffusivity and energy consumption with R^2 of 0.9946 and 0.9812, respectively, and mean-square error of 0.00022. The highest determination coefficients for predicting drying rate and moisture ratio were 0.9806 and 0.9995, respectively by using 5-20-15-2 topology and transfer functions of TAN-TAN-TAN.

Key words: *Infrared-convection dryer, Effective moisture diffusivity, Energy consumption, Moisture ratio, Artificial neural networks*