

پیش‌بینی برخی خصوصیات حرارتی، فیزیکی و مکانیکی میوه بنه پس از خشک کردن با خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی

ساسان خیاطی^۱، رضا امیری چایجان^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
 ۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
 (تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۷)

چکیده

هدف از این پژوهش، پیش‌بینی برخی خصوصیات حرارتی (ضریب پخش مؤثر رطوبت و انرژی ویژه مصرفی)، فیزیکی (چروکیدگی و تغییرات کلی رنگ) و مکانیکی (نیروی شکست) میوه بنه در طی فرآیند خشک‌کردن با خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی بود. سه عامل مؤثر شامل دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و سرعت تسمه در عملکرد خشک‌کن جریان پیوسته به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ورودی (۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس)، سه سطح سرعت هوای ورودی (۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه) و سه سطح سرعت تسمه (۲/۵، ۶/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه) انجام شد. داده‌های لازم با استفاده از یک خشک‌کن جریان پیوسته نیمه‌صنعتی، جمع‌آوری شد. از شبکه‌های پسانتشار پیشرو و پسانتشار پیشخور با الگوریتم‌های یادگیری لوبنرگ-مارکوارت و تنظیم بیزی برای آموزش استفاده شد. برای پیش‌بینی ضریب پخش مؤثر رطوبت، شبکه پیشخور با تابع تنظیم بیزی، آرایش ۱-۱۳-۱۰-۳ و ۱۰۸ چرخه آموزش با $R^2=0/9999$ مطلوب بود. برای پیش‌بینی انرژی ویژه مصرفی، شبکه پیشخور با تابع آموزش لوبنرگ-مارکوارت، آرایش ۱-۱۰-۳ و ۱۱۷ چرخه آموزش با $R^2=0/9961$ مطلوب بود. بهترین شبکه برای پیش‌بینی چروکیدگی، شبکه پیشخور با تابع تنظیم بیزی، توپولوژی ۱-۶-۳ و ۱۰۱ چرخه با $R^2=0/9926$ آموزش بود. بهترین شبکه برای پیش‌بینی تغییرات کلی رنگ، شبکه پیشخور با تابع آموزش لوبنرگ-مارکوارت با توپولوژی ۱-۶-۳ و ۲۴ چرخه آموزش با $R^2=0/9139$ بود. بهترین شبکه برای پیش‌بینی نیروی شکست، شبکه پیشخور با تابع آموزش تنظیم بیزی، آرایش ۱-۶-۳ و ۶۹ چرخه آموزش با $R^2=0/9990$ بود.

کلید واژگان: ضریب پخش مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی، چروکیدگی، رنگ‌سنجی و نیروی شکست.

* مسئول مکاتبات: amirreza@basu.ac.ir

۱- مقدمه

شبکه‌های عصبی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته شده‌اند که به صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این عناصر از سیستم‌های عصبی زیستی الهام گرفته شده‌اند. در طبیعت، عملکرد شبکه‌های عصبی از طریق نحوه اتصال بین اجزا تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان یک ساختار مصنوعی به تبعیت از شبکه‌های طبیعی ساخت و با تنظیم مقادیر هر اتصال، تحت عنوان وزن اتصال، نحوه ارتباط بین اجزای آن را تعیین کرد [۷]. شبکه‌های عصبی مصنوعی شامل یک الگوی پردازش اطلاعات و ابزاری قدرتمند به منظور شبیه‌سازی، الهام گرفته از نرون‌های بیولوژیک است. با این رویکرد، شبکه‌های عصبی مصنوعی همانند ساختار بیولوژیکی مغز انسان با ترکیب ویژگی‌هایی همچون قدرت یادگیری، تعمیم‌دهی، پردازش موازی و تصمیم‌گیری، قابلیت حل کامل مسائلی پیچیده با ماهیتی خطی یا غیرخطی را خواهند داشت. برای مدل‌سازی رفتار خشک‌کردن سیب در خشک‌کن انجام‌دای از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد [۸]. برای خشک‌کردن لایه نازک قطعات سیب‌زمینی از یک خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی یک طبقه‌ای استفاده شد [۹].

هدف از این پژوهش پیش‌بینی پارامترهای ضریب پخش مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی، تغییرات کلی رنگ، چروکیدگی و نیروی شکست میوه بنه بعد از خشک‌کردن با خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

میوه تازه بنه از جنگل‌های بانه، استان کردستان تهیه شد و برای انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای 1 ± 4 درجه سلسیوس نگهداری شد. از دستگاه خشک‌کن جریان پیوسته نیمه‌صنعتی در این آزمایش‌ها استفاده شد (شکل ۱). دستگاه خشک‌کن دارای سه طبقه می‌باشد که در هر طبقه دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و سرعت حرکت تسمه قابل تغییر هستند. نمونه‌ی میوه بنه برای طی یک سیکل بایستی هر سه طبقه را طی کند. اصول کلی کار این دستگاه بدین صورت می‌باشد که مواد بعد از وارد شدن به ابتدای طبقه اول در مدت زمان مشخص با توجه به سرعت تسمه حرکت کرده و سپس تحت تأثیر وزن خود وارد طبقه دوم می‌شوند و به همین ترتیب از طبقه دوم به طبقه سوم می‌روند. بین طبقات صفحه-

میوه بنه (پسته وحشی) مدور و به رنگ سبز و صورتی است. مغز میوه بنه شبیه پسته ولی کوچکتر از آن است. مغز میوه بیش از ۶۵ درصد میوه بنه را تشکیل می‌دهد و میزان روغن آن ۶۰٪ می‌باشد [۱]. خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است که تا حد زیادی بر کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد. در خشک‌کردن علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی ناشی از حمله میکروارگانیسم‌ها یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی کاهش می‌یابد و در هزینه‌های حمل‌ونقل و نگهداری صرفه‌جویی می‌شود [۲]. مدت زمان ذخیره مواد غذایی تابع دو عامل فیزیکی دما و مقدار رطوبت محصول می‌باشد. با کاهش دما، کاهش رطوبت و یا هر دو، می‌توان به میزان قابل‌ملاحظه‌ای زمان این دوره را افزایش داد. کاهش دادن رطوبت به وسیله عملیات خشک‌کردن ممکن می‌باشد. میوه بنه به واسطه رطوبت بالا در زمان برداشت، عمر انبارداری کوتاهی دارد لذا خشک کردن آن جهت افزایش ماندگاری ضروری است. رطوبت بنه در زمان برداشت حدود ۱/۱۷ بر پایه خشک است، اهمیت خشک کردن بنه و کاهش رطوبت آن برای نگهداری طولانی مدت و استفاده از خصوصیات این محصول می‌باشد. پژوهش‌های زیادی در رابطه با خشک‌کردن انواع محصولات کشاورزی با روش‌های گوناگون انجام شده درحالی‌که در مورد خشک‌کن پیوسته اطلاعات کمی در دسترس می‌باشد [۳]. شناخت خواص حرارتی، فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی همواره مورد توجه و علاقه متخصصین کشاورزی و صنایع غذایی بوده است. ضریب پخش مؤثر رطوبت یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی فرآیند خشک‌کردن به حساب می‌آید. نرخ جابجایی رطوبت، به وسیله‌ی ضریب پخش مؤثر رطوبت توضیح داده می‌شود [۴]. شناخت خواص فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی و مواد غذایی مربوط به ماشین‌های کشاورزی، به لحاظ تأثیری که در بخش‌های مختلف ماشین‌آلات در مراحل برداشت، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و فرآوری بر روی محصول ایجاد می‌کند، اهمیت دارد [۵]. اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی برای استفاده در طراحی تجهیزات آسیاب کردن، جابجا کردن، انبار کردن، حمل‌ونقل و فرآوری مفید هستند [۶].

در روابط خشک کردن، محتوای رطوبتی نمونه‌ها بر پایه خشک ۰/۰۰۲±۱/۱۷۴ بر پایه خشک به دست آمد. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی خشک شدن به وسیله رابطه (۱) محاسبه گردید [۱۰]:

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

که در آن MR نسبت رطوبت را نشان می‌دهد (بدون بعد)، M_e رطوبت تعادلی (بر پایه خشک) و M_0 مقدار رطوبت اولیه (بر پایه خشک) است. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقدار M_e در مقایسه با مقادیر M_x و M_0 بسیار کوچک می‌باشد.

۲-۲- ضریب پخش مؤثر رطوبت

قانون دوم فیک که توسط کرانک در محصولات کروی ارائه شد با فرض یکنواختی توزیع رطوبت، می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [۱۱]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن، پخش رطوبتی مؤثر، ثابت و شعاعی است می‌توان مقدار آن را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M_x - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 \left(\frac{x}{r}\right)^2}{r^2 u_c}\right) \quad (2)$$

که در آن n تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)، x موقعیت روی تسمه (m)، r شعاع هندسی میوه بنه (m)، MR نسبت رطوبت، u_c سرعت حرکت تسمه (m/s)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت مؤثر (m²/s) است.

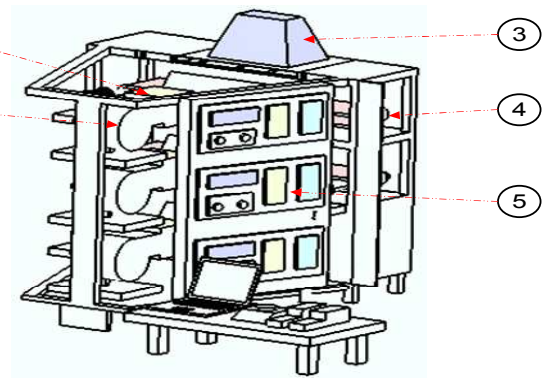
۲-۳- انرژی ویژه مصرفی

برای محاسبه میزان انرژی ویژه مصرفی خشک کردن میوه بنه در خشک کردن پیوسته نیمه صنعتی برای دفع یک کیلوگرم آب از رابطه (۳) استفاده شد [۱۲]:

$$SEC = (C_{pa} + C_{pv} h_a) Q t \frac{(T_{in} - T_{am})}{m_p V_h} \quad (3)$$

که در این رابطه SEC انرژی ویژه مصرفی ویژه در هر دوره خشک شدن (ژول بر کیلوگرم)، C_{pv} و C_{pa} به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه بخار (۱۰۰۴/۱۶ J/kg°C) و هوا (۱۸۲۸/۸ J/kg°C)، Q دبی هوای ورودی به محفظه خشک کن (مترمکعب بر ثانیه)، t زمان کل خشک شدن (ثانیه)،

های شیب‌دار فلزی قرار داده شده تا مواد را برای ورود به هر طبقه هدایت کنند. میوه بنه در سطح لایه‌های بیرونی رطوبت قابل توجهی دارد، از این رو در مرحله اول از اشعه مادون قرمز استفاده شده است که برای کاهش بیشتر رطوبت سطحی کاربرد دارد. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۲/۵، ۶/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. برای اندازه گیری رطوبت نسبی و دمای هوا از یک رطوبت سنج-دما سنج (Lutron TM-903، ساخت تایوان) با درجه تفکیک ۰/۱٪ برای رطوبت نسبی و درجه تفکیک ۱°C برای دما استفاده شد. مقدار رطوبت نسبی و دمای محیط آزمایشگاه در طی آزمایش‌ها به ترتیب ۲۴ تا ۳۴٪ و ۲۴ تا ۳۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد.



شکل ۱ شماتیک دستگاه خشک کن پیوسته نیمه صنعتی (۱- محفظه المنت‌های گرمایی، ۲- فن گریز از مرکز، ۳- خروجی هوای مرطوب، ۴- تسمه نقاله و ۵- تابلو برق و کنترل کننده‌های دستگاه خشک کن)

۲-۱- تعیین رطوبت اولیه و نسبت رطوبت

محصول

به منظور تعیین رطوبت اولیه محصول بر پایه خشک، مقدار معینی از نمونه‌ها در داخل آون قرار داده شدند. نمونه‌های ۲۰ گرمی میوه بنه به طور تصادفی انتخاب و پس از قرار دادن در ظرف پتری، در داخل آون قرار داده شدند. برای اطمینان از صحت میزان رطوبت نمونه‌ها، این آزمایش‌ها در ۵ تکرار انجام شد. دمای آون روی 1 ± 70 درجه سلسیوس تنظیم و نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت بیرون آورده شد و برای اندازه‌گیری رطوبت، توزین گردید. با توجه به لزوم استفاده رطوبت بر پایه خشک

خشک‌کردن)، ΔL^* ، Δa^* و Δb^* تغییرات پارامترهای رنگ قبل و بعد از خشک‌شدن می‌باشند.

تغییرات کلی رنگ (ΔE) که بیان‌کننده تغییرات رنگ میوه بنه در فضای رنگی $L^*a^*b^*$ است [۱۴]، از رابطه (۱۰) محاسبه شد:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (10)$$

۲-۶- نیروی شکست

حد شکستگی دانه، نقطه‌ای در منحنی نیرو- تغییر شکل می‌باشد که در آن حتی با کاهش نیرو میزان تغییر شکل افزایش پیدا کرده و جسم شکسته می‌شود. این نقطه، نقطه گسیختگی ماده را بیان می‌کند. در مورد مواد نرم و سخت، بعد از گسیختگی، تغییر شکل قابل‌توجهی دیده می‌شود. بنابراین در آزمایش‌های مختلف از روی نمودار نیرو-تغییرشکل، حداکثر نیروی شکست دانه ثبت شد. برای انجام آزمایش‌های مکانیکی از دستگاه آزمون مواد Zwick/Roell ساخت کشور آلمان استفاده شد.

۲-۷- شبکه‌های عصبی مصنوعی

برای پیدا کردن بهترین پیش‌بینی، شبکه‌های مختلفی بر داده‌های مذکور اعمال شد. ۲۵٪ از کل داده‌ها برای ارزیابی شبکه‌های آموزش‌دیده استفاده شد. برای طراحی و ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی از نرم‌افزار 7 MATLAB و جعبه‌ابزار Neural Networks Toolbox استفاده شد. پارامترهای ترکیبی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها و تعداد چرخه آموزش در طی فرآیند آموزش شبکه عصبی مصنوعی به روش آزمون و خطا تعیین شد. در این تحقیق از شبکه‌های پس‌انتشار پیشخور^۱ (FFBP) و پس‌انتشار پیشرو^۲ (CFBP) استفاده شد. الگوریتم‌های لوبنبرگ-مارکواریت^۳ (LM) و تنظیم بیزی^۴ (BR) برای بهنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد نظر، بکار گرفته شدند [۱۵].

h_a رطوبت مطلق ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$)، T_{in} دمای هوای ورودی به محفظه خشک‌کن (درجه سلسیوس)، T_{am} دمای هوای محیط (درجه سلسیوس)، m_v جرم آب حذف‌شده (کیلوگرم) و V_h حجم ویژه هوا (مترمکعب بر کیلوگرم) است.

۲-۴- چروکیدگی

چروکیدگی به صورت درصدی از حجم اولیه بیان می‌شود. برای محاسبه چروکیدگی در طی خشک‌شدن، ابتدا قطر میانگین هندسی میوه بنه از رابطه (۴) محاسبه شد. برای اندازه‌گیری ابعاد میوه بنه از کولیس دیجیتالی (Groz EDF-6, USA) با دقت ± 0.02 میلی‌متر استفاده شد. حجم میوه بنه از رابطه (۵) به دست آمد [۱۳].

$$D_g = (A \times B \times C)^{1/3} \quad (4)$$

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_g}{2}\right)^3 \quad (5)$$

که D_g قطر متوسط هندسی (متر)، A ، B و C به ترتیب قطرهای بزرگ، کوچک و متوسط میوه بنه (متر) می‌باشند. V_0 حجم اولیه یا حجم قبل از خشک‌کردن (مترمکعب) است. درصد چروکیدگی به کمک رابطه (۶) محاسبه شد [۱۳].

$$S_b = \frac{(V_0 - V)}{V_0} \times 100 \quad (6)$$

S_b درصد چروکیدگی و V حجم ثانویه یا حجم بعد از خشک‌کردن (مترمکعب) است که مشابه حجم اولیه محاسبه می‌شود.

۲-۵- رنگ

برای به دست آوردن میزان تغییر رنگ میوه بنه در طی فرآیند، رنگ نمونه‌ها قبل و بعد از خشک‌کردن با دستگاه رنگ‌سنج (HP-200, China) اندازه‌گیری شد. پارامترهای رنگ L^* ، a^* و b^* از دستگاه رنگ‌سنج گرفته شد. تغییرات هر یک از پارامترهای رنگ از روابط (۷)، (۸) و (۹) محاسبه شدند.

$$\Delta L^* = L^* - L_0^* \quad (7)$$

$$\Delta a^* = a^* - a_0^* \quad (8)$$

$$\Delta b^* = b^* - b_0^* \quad (9)$$

که L_0^* ، a_0^* و b_0^* پارامترهای اولیه رنگ (قبل از خشک‌کردن)، L^* ، a^* و b^* پارامترهای ثانویه رنگ (بعد از

1. Feed Forward Back Propagation
2. Cascade Forward Back Propagation
3. Levenberg-Marquardt
4. Bayesian-Regulation

۲-۷-۱- طراحی شبکه

شبکه عصبی مصنوعی با سه نرون لایه ورودی (دمای هوا، سرعت هوا و سرعت تسمه) و یک نرون در لایه خروجی (ضریب پخش مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی، چروکیدگی، رنگ یا نیروی شکست) طراحی شد. برای بهینه‌سازی ساختار شبکه از سه تابع فعال‌سازی تابع سیگموئید لگاریتمی^۵، تابع خطی^۶ و تانژانت هایپربولیک سیگموئید^۷ استفاده شد [۱۶].

(۱۱) تابع سیگموئید لگاریتمی

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

(۱۲) تابع خطی

$$Y_j = X_j$$

(۱۳) تابع تانژانت هایپربولیک سیگموئید

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

برای یافتن شبکه‌ای با توپولوژی مناسب به کمک الگوریتم‌های آموزشی، از ضریب همبستگی (R^2)، میانگین مربعات خطا (MSE) و خطای نسبی میانگین (MRE) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ضریب پخش مؤثر رطوبت

بیشترین مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت ($2/34 \times 10^{-11}$) مترمربع بر ثانیه) در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای یک متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه و کمترین مقدار آن ($6/48 \times 10^{-11}$) مترمربع بر ثانیه) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای دو متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. تغییرات دما بیشترین تأثیر را در مقادیر ضریب پخش مؤثر رطوبت داشت به این صورت که با افزایش دما میزان ضریب پخش مؤثر رطوبت افزایش یافت. برای این پدیده می‌توان دو علت را ذکر نمود: ۱- با افزایش دما میزان جنبش مولکولی آب یا بخار آب داخل محصول

افزایش یافته و با سرعت بیشتری در داخل محصول جریان می‌یابد. ۲- با افزایش دما، رطوبت تعادلی سطح محصول با هوای خشک‌کننده کاهش یافته و رطوبت سطح محصول بیشتر کاهش می‌یابد، با کاهش بیشتر رطوبت سطح محصول، گرادیان رطوبت سطح و مرکز محصول بیشتر شده رطوبت با سرعت بیشتری در داخل محصول حرکت کرده و در نتیجه ضریب پخش مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد. در فرآیند خشک‌کردن زرشک و سیب‌زمینی شیرین، در خشک‌کن پیوسته توسط محققین دیگر نتایج مشابه گزارش شد [۱۷ و ۱۸].

افزایش سرعت هوا باعث کاهش مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت در شرایط ثابت دما و سرعت تسمه شد. افزایش سرعت هوا باعث افزایش سرعت انتقال حرارت از داخل محفظه خشک‌کن به محیط گشته و دمای محفظه کاهش می‌یابد که با توجه به مفهوم ضریب پخش مؤثر رطوبت، مقدار آن کاهش یافت. در شرایط ثابت دما و سرعت هوا، افزایش سرعت تسمه مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت را افزایش داد. با افزایش سرعت حرکت تسمه، نمونه‌ها نسبت به قبل بیشتر تکان می‌خورند و در همه جهات در معرض هوای داغ قرار می‌گرفتند و در نتیجه نمونه‌ها بیشتر گرم می‌شدند و با توجه به تأثیر دما که ذکر شد مقدار ضریب پخش مؤثر رطوبت با افزایش سرعت تسمه افزایش یافت. مقادیر به دست آمده برای ضریب پخش مؤثر رطوبت در جدول ۱ ارائه شده است.

برای دستیابی به ساختار بهینه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ضریب پخش مؤثر رطوبت، شبکه‌هایی با آرایش‌های مختلف و تعداد نرون‌های متفاوت در لایه (های) میانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. چندین آرایش از MSE کمتر و R^2 بالاتری برخوردار بودند که در قالب دو ساختار پیشرو (CFBP) و پیشخور (FFBP) در جدول ۲ ارائه شده است. در بین آرایش‌ها، شبکه پیشخور با تابع تنظیم بیزی، آرایش ۱-۱۳-۱۰-۳، ۱۰۸ چرخه آموزش، $MSE = 5/34 \times 10^{-7}$ و $R^2 = 0/9999$ و $MRE = 0/0003$ آرایش مطلوب بود.

5. Logsig
6. Purelin
7. Tansig

جدول ۱ مقادیر ضریب پخش مؤثر رطوبت برای میوه بنه در شرایط مختلف آزمایش در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی

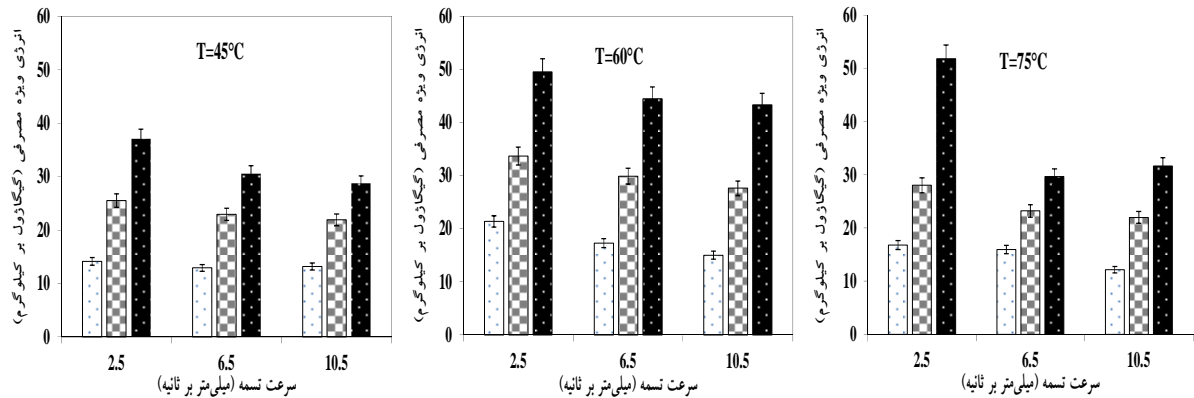
دمای هوا (درجه سلسیوس)	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	سرعت تسمه (میلی‌متر بر ثانیه)	ضریب پخش مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)
		۲/۵	$۸/۰۶ \times ۱۰^{-۱۱}$
	۱	۶/۵	$۸/۲۰ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۱۰/۵	$۸/۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۲/۵	$۶/۹۷ \times ۱۰^{-۱۱}$
۴۵	۱/۵	۶/۵	$۷/۰۲ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۱۰/۵	$۷/۶۵ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۲/۵	$۶/۴۸ \times ۱۰^{-۱۱}$
	۲	۶/۵	$۶/۶۶ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۱۰/۵	$۶/۷۱ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۲/۵	$۱/۰۵ \times ۱۰^{-۱۰}$
	۱	۶/۵	$۱/۲۹ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۱۰/۵	$۱/۳۲ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۲/۵	$۹/۵۵ \times ۱۰^{-۱۱}$
۶۰	۱/۵	۶/۵	$۱/۰۷ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۱۰/۵	$۱/۱۵ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۲/۵	$۹/۵۴ \times ۱۰^{-۱۱}$
	۲	۶/۵	$۹/۸۲ \times ۱۰^{-۱۱}$
		۱۰/۵	$۱/۱۱ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۲/۵	$۱/۸۶ \times ۱۰^{-۱۰}$
	۱	۶/۵	$۲/۱۴ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۱۰/۵	$۲/۳۴ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۲/۵	$۱/۷۱ \times ۱۰^{-۱۰}$
۷۵	۱/۵	۶/۵	$۲/۰۷ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۱۰/۵	$۲/۳۱ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۲/۵	$۱/۳۳ \times ۱۰^{-۱۰}$
	۲	۶/۵	$۲/۰۱ \times ۱۰^{-۱۰}$
		۱۰/۵	$۲/۱۲ \times ۱۰^{-۱۰}$

جدول ۲ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد ضریب پخش مؤثر رطوبت

شبکه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R ²	MRE	چرخه آموزش
FFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱	$۳/۹۰ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۹۸۰	۰/۰۰۰۸	۳۶
	BR	Tansig	۳-۱۰-۱	$۲/۲۱ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۹۳۰	۰/۰۲۰۵	۱۵
	BR	Tansig	۳-۱۰-۱	$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۴۶	۶۴
CFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱۳-۱	$۵/۳۴ \times ۱۰^{-۷}$	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۳	۱۰۸
	LM	Tansig	۳-۱۰-۱	$۳/۹۷ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۲۲۶	۰/۰۸۵۱	۲۵
	BR	Tansig	۳-۱۰-۸-۱	$۲/۸۰ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۹۰۹	۰/۰۰۳۱	۲۴
	BR	Tansig	۳-۱۱-۱	$۱/۴۲ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۸۶۸	۰/۰۰۱۴	۱۷
		Tansig	۳-۷-۴-۱	$۱/۱۸ \times ۱۰^{-۳}$	۰/۹۸۰۲	۰/۰۰۳۹	۲۲

۳-۲- انرژي ویژه مصرفی

شکل ۲ مقادیر انرژي ویژه مصرفی خشک‌کردن میوه بنه در شرایط مختلف خشک‌کن پیوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۲ مقادیر انرژی ویژه مصرفی برای خشک کردن میوه بنه در شرایط مختلف خشک‌کن پیوسته نیمه صنعتی (□ ۱ متر بر ثانیه، □ ۱/۵ متر بر ثانیه و ■ ۲ متر بر ثانیه)

تسمه در شرایط ثابت دما و سرعت هوا مدت زمان کلی خشک‌کردن را کاهش می‌داد و با توجه به تأثیر مستقیم زمان در میزان انرژی ویژه مصرفی مقدار آن کاهش پیدا کرد. محققین دیگر در بررسی انرژی ویژه مصرفی فرآیند خشک‌کردن زرشک و در بررسی انرژی مصرفی غده‌های سیر در خشک‌کن مایکروویو و به نتایج مشابه دست یافتند [۱۷ و ۱۹].

در بین آرایش‌ها برای پیش‌بینی انرژی ویژه مصرفی، شبکه پیشخور با تابع آموزش لونیبرگ-مارکوارت، آرایش ۱-۱۰-۳، ۱۱۷ چرخه آموزش، $MSE = 2/32 \times 10^{-5}$ ، $R^2 = 0/9961$ و $MRE = 0/0020$ آرایش مطلوب بود. جدول ۳ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد انرژی ویژه مصرفی را نشان می‌دهد. پیش‌بینی انرژی ویژه مصرفی با استفاده از شبکه عصبی توسط محققین دیگر انجام شده است [۲۰].

۲-۴- چروکیدگی

بیشترین مقدار چروکیدگی (۱۶۷۰٪) در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای یک متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. همچنین کمترین مقدار آن (۱۲/۳۴٪) نیز در دمای ۴۵ درجه سلسیوس سرعت هوای دو متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شد.

با افزایش دما از ۴۵ به ۶۰ درجه سلسیوس مقادیر انرژی ویژه مصرفی افزایش یافت ولی در افزایش دما از ۶۰ به ۷۵ درجه سلسیوس مقادیر انرژی ویژه مصرفی روند مشخصی نداشت. با توجه به شکل ۲ افزایش سرعت هوا مقادیر انرژی ویژه مصرفی را افزایش می‌دهند و افزایش سرعت حرکت تسمه باعث کاهش انرژی ویژه مصرفی بود. بیشترین مقدار انرژی ویژه مصرفی (۵۱/۸ گیگا ژول بر کیلوگرم) در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای دو متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. کمترین مقدار انرژی ویژه مصرفی (۱۲/۹ گیگا ژول بر کیلوگرم) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای یک متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۱۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه گردید. افزایش دمای هوا، آنتالپی هوای ورودی را افزایش داده، افزایش آنتالپی میزان انتقال جرم و حرارت را افزایش می‌دهد. در نتیجه مصرف انرژی افزایش پیدا کرد. نتایج مشابه توسط محققین دیگر گزارش شد [۱۲ و ۱۷].

با افزایش سرعت هوا سطح محصول خنک شده، دمای آن کاهش یافته و زمان خشک‌شدن افزایش می‌یابد. در نتیجه انرژی ویژه مصرفی نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین به دلیل کاهش سطح مؤثر جریان هوا و نمونه‌ها، کمترین میزان انرژی مصرفی در سرعت‌های پایین به دست آمد. افزایش سرعت

جدول ۳ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد انرژی ویژه مصرفی خشک‌کردن میوه بنه در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی

شبکه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R ²	MRE	چرخه آموزش
FFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱	۲/۳۲×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۹۶۱	۰/۰۰۲۰	۱۱۷
	BR	Tansig	۳-۱۰-۴-۱	۱/۰۵×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۳۱	۴۶
CFBP	LM	Tansig	۳-۱۵-۱	۲/۳۸×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۹۴۹	۰/۰۱۳۳	۴۴
	BR	Tansig	۳-۱۳-۸-۱	۱/۱۵×۱۰ ^{-۳}	۰/۹۸۳۱	۰/۰۰۸۸	۲۳
	LM	Tansig	۳-۷-۱	۵/۹۸×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۹۱۶	۰/۰۰۷۳	۳۵
	BR	Tansig	۳-۷-۴-۱	۶×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۹۳۲	۰/۰۰۹۴	۱۹
	BR	Tansig-Purelin	۳-۲-۵-۱	۸/۱۸×۱۰ ^{-۳}	۰/۸۷۴۲	۰/۰۲۰۷	۳۴
	BR	Tansig-Purelin	۳-۴-۱	۹/۷۰×۱۰ ^{-۳}	۰/۸۶۲۲	۰/۰۲۹۴	۱۱

می‌ریزد و چروکیدگی ایجاد می‌شود. نتایج به دست آمده مشابه نتایج به دست آمده برای محصول پاپایا بود [۲۱]. در بین آرایش‌ها، شبکه پیشخور با تابع تنظیم بیزی، آرایش ۱-۴-۶-۳، ۱۰۱ چرخه آموزش، $MSE=1/0.2 \times 10^{-4}$ و $R^2=0/9926$ بهترین ضریب همبستگی ۰/۹۸۷ و مقدار $MAE=0/738$ با دو لایه پنهان و تعداد هشت نورون توسط محقق دیگر در پیش‌بینی میزان چروکیدگی میگو به دست آمد [۱۶]. جدول ۴ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد چروکیدگی میوه بنه را نشان می‌دهد. در شبکه CFBP با تابع آموزش تنظیم بیزی هیچ آرایش مناسبی جهت پیش‌بینی چروکیدگی میوه بنه به دست نیامد.

در شرایط ثابت سرعت هوا و سرعت تسمه با افزایش دما میزان چروکیدگی بیشتر می‌شد. نتایج نشان داد که اثر دما بر درصد چروکیدگی در سطح یک درصد معنی‌دار است. ولی اثر متقابل پارامترها معنی‌دار نشده است. در بیان این حالت می‌توان گفت که چروکیدگی به رطوبت وابسته است و با افزایش دما، محصول سریعتر رطوبت خود را از دست می‌دهد. تبخیر سریعتر رطوبت موجب چروکیدگی بیشتر محصول می‌شود. زیرا طی فرایند خشک‌شدن، آب بین سلولی به طور مرتب جدا می‌شود و هوا جایگزین آن می‌گردد و باعث تنش در ساختار سلولی می‌شود. در نتیجه بافت قادر به نگهداری شبکه ساختمانی نمی‌باشد، به طوری که ساختمان بیرونی سلول فرو

جدول ۴ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد چروکیدگی میوه بنه در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی

شبکه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R ²	MRE	چرخه آموزش
FFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱	۳/۲۶×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۴۵۴	۰/۰۰۲۱	۱۷
	BR	Tansig	۳-۳-۱	۵/۵۸×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۷۳۲	۰/۰۰۰۸	۳۲
CFBP	LM	Tansig	۳-۶-۱	۴/۹۸×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۸۴۵	۰/۰۰۰۹	۱۱۰
	BR	Tansig	۳-۶-۴-۱	۱/۰۲×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۹۲۶	۰/۰۰۰۱	۱۰۱
	LM	Purelin-Tansig	۳-۸-۵-۱	۱/۳۹×۱۰ ^{-۴}	۰/۹۷۶۰	۰/۰۰۱۱	۳۳
	BR	Purelin-Tansig	۳-۳-۲-۱	۹/۴۳×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۸۷۲	۰/۰۰۰۷	۸۰

میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. همچنین کمترین تغییرات شاخص L^* (۰/۱۲) در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای یک متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. بیشترین تغییرات شاخص a^* (۱۳/۵۳) در

۲-۵- رنگ

بیشترین تغییرات شاخص L^* (۱۶/۷۲) در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۶/۵

این گونه می‌توان بیان کرد که، طی خشک‌شدن کاروتن‌ها اکسیده می‌شوند که با تغییراتی در وضع سیستم مزدوج و ترانس پیوندهای دوگانه آن همراه است. در نتیجه اکسیداسیون، از شدت رنگ کاروتن کاسته می‌شود. در اثر حرارت ممکن است رنگ‌دانه سبز کلروفیل تجزیه شود و به فئوفیتین تبدیل گردد که رنگ آن قهوه‌ایی مایل به سبز است. آنتوسیانین‌ها نیز در فرآیند خشک‌کردن صدمه می‌بینند. ممکن است واکنش‌های قهوه‌ایی شدن غیر آنزیمی (مایلارد) نیز در تغییرات رنگ مؤثر باشد.

در بین آرایش‌ها شبکه FFBP در تابع لونبرگ-مارکوارت، با آرایش ۱-۷-۶-۳، ۲۴ چرخه آموزش، $MSE=6/32 \times 10^{-5}$ و $R^2=0/9139$ و $MRE=0/0199$ آرایش مطلوب بود. جدول ۵ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تغییرات کلی رنگ میوه بنه را نشان می‌دهد. با تابع تنظیم بیزی، در شبکه‌های FFBP و CFBP آرایش مناسبی جهت برآورد تغییرات کلی رنگ به دست نیامد. برای تغییرات کلی رنگ بامیه در یک خشک‌کن میکروویو شبکه‌ای با تابع سیگنوید با آرایش ۴-۶-۳، ضریب همبستگی ۰/۸۸۳، خطای مطلق میانگین ۰/۸۸۵ پیشنهاد شد [۲۲]. برای پیش‌بینی تغییرات کلی رنگ در خشک‌کردن سیب یک شبکه پیشخور با ضریب همبستگی ۰/۹۸۷ ارائه شد [۲۳].

جدول ۵ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تغییرات کلی رنگ میوه بنه در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی

شبکه	توابع آموزش	توابع محرک	آرایش شبکه	MSE	R^2	MRE	چرخه آموزش
FFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱	$3/94 \times 10^{-4}$	۰/۹۰۲۸	۰/۰۲۷۱	۱۴
		Tansig	۳-۶-۷-۱	$6/32 \times 10^{-5}$	۰/۹۱۳۹	۰/۰۱۹۹	۲۴
		Tansig	۳-۱۰-۱	$1/61 \times 10^{-2}$	۰/۹۰۳۹	۰/۰۲۳۲	۱۲
CFBP	LM	Tansig	۳-۱۰-۱۲-۱	$3/04 \times 10^{-2}$	۰/۹۱۲۳	۰/۰۲۲۸	۶

۲-۶- نیروی شکست

نیروی گسیختگی برای میوه بنه قبل از خشک‌کردن (۷۶/۹۷ نیوتن) به دست آمد. بعد از خشک‌کردن بیشترین مقدار نیروی شکست (۱۱۲/۶۸ نیوتن) در دمای ۷۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۶/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. همچنین کمترین مقدار نیروی شکست (۸۰/۱۵ نیوتن) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس، سرعت هوای یک متر بر ثانیه و سرعت تسمه ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست

آمد. در همه آزمایش‌ها با افزایش دما در شرایط ثابت سرعت هوا و سرعت تسمه میزان نیروی شکست افزایش یافت. یکی از دلایل تأثیر افزایش دما بر نیروی شکست دانه، احتمالاً این است که دمای بیشتر باعث مقاوم‌تر شدن دانه می‌شود زیرا دمای بالاتر باعث می‌شود محصول سریعتر رطوبت از دست دهد و آب موجود در بافت میوه سریع تبخیر شده و بافت میوه نیز به سرعت انقباض پیدا می‌کند که با فشار ترگر قابل مقایسه است. با افزایش دما و فشار ترگر، تنش سلولی افزایش پیدا می‌کند و این افزایش تنش سلولی باعث افزایش سفتی بافت

میوه بنه را نشان می‌دهد. بهترین شبکه برای پیش‌بینی نیروی شکست میوه بنه، شبکه پس انتشار پیشخور (FFBP) با تابع آموزش تنظیم بیزی، آرایش ۳-۸-۶-۱، $MSE=1/61 \times 10^{-5}$ ، $MRE=0/0204$ و $R^2=0/9990$ چرخه آموزش بود.

می‌شود، بنابراین نیروی شکست را افزایش می‌دهد. این نتایج مشابه نتایج محققین دیگر در خشک‌کردن آلوئه‌ورا و ماهی مرکب می‌باشد [۲۴ و ۲۵].
جدول ۶ نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی برای نیروی شکست

جدول ۶ نتایج آرایش‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد نیروی شکست میوه بنه در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی

چرخه آموزش	MRE	R ²	MSE	آرایش شبکه	توابع محرک	توابع آموزش	شبکه
۵۳	۰/۰۲۳۳	۰/۹۹۷۶	۱/۹۸×۱۰ ^{-۵}	۳-۹-۱	Tansig	LM	FFBP
۱۹	۰/۰۲۱۰	۰/۹۹۷۶	۵/۱۶×۱۰ ^{-۵}	۳-۵-۶-۱	Tansig		
۱۷	۰/۰۲۲۷	۰/۹۹۸۳	۹/۷۵×۱۰ ^{-۵}	۳-۸-۱	Tansig	BR	
۶۹	۰/۰۲۰۴	۰/۹۹۹۰	۱/۶۱×۱۰ ^{-۵}	۳-۸-۶-۱	Tansig		CFBP
۴۵	۰/۰۲۳۵	۰/۹۹۳۳	۲/۹۹×۱۰ ^{-۵}	۳-۱۰-۱	Tansig	LM	
۱۳	۰/۰۲۱۷	۰/۹۸۷۹	۲/۲۸×۱۰ ^{-۴}	۳-۵-۸-۱	Tansig		
۱۵	۰/۰۲۱۸	۰/۹۸۴۵	۱/۵۵×۱۰ ^{-۳}	۳-۳-۲-۱	Tansig	BR	
۲۳	۰/۰۲۴۲	۰/۹۳۹۸	۲/۹۳×۱۰ ^{-۳}	۳-۶-۸-۱	Purelin-Tansig		

توپولوژی ۱-۷-۶-۳، ۲۴ چرخه آموزش و تابع آستانه TANSIG در شبکه FFBP دارای خطای آموزشی $10 \times 6/32$ ، خطای نسبی میانگین ۰/۰۱۹۹ و ضریب تعیین ۰/۹۱۳۹ بود. همچنین بهترین شبکه برای پیش‌بینی نیروی شکست میوه بنه، شبکه FFBP با تابع آستانه TANSIG، آرایش ۳-۸-۶-۱، دارای خطای آموزشی $10 \times 1/61$ ، ضریب تعیین ۰/۹۹۹۰، خطای نسبی میانگین ۰/۰۲۰۴ و ۶۹ چرخه آموزش بود.

۳- نتیجه گیری

شبکه عصبی مصنوعی روشی مناسب برای نگاشت غیرخطی است که برای پیش‌بینی متغیرهای ضریب پخش مؤثر رطوبت، انرژی ویژه مصرفی، چروکیدگی، تغییرات کلی رنگ و نیروی شکست میوه بنه در خشک‌کن پیوسته نیمه‌صنعتی به کمک سه پارامتر ورودی دمای هوا، سرعت هوا و سرعت تسمه استفاده شد. در بین آرایش‌ها برای پیش‌بینی ضریب پخش مؤثر رطوبت، شبکه پیشخور با تابع تنظیم بیزی، آرایش ۱-۱۳-۱۰-۳، ۱۰۸ چرخه آموزش، $MSE=5/34 \times 10^{-7}$ ، $R^2=0/9999$ و $MRE=0/0003$ آرایش مطلوب بود. در بین آرایش‌ها برای پیش‌بینی انرژی ویژه مصرفی، شبکه پیشخور با تابع آموزش لونبرگ-مارکوارت، آرایش ۱-۱۰-۳، ۱۱۷ چرخه آموزش، $MSE=2/32 \times 10^{-10}$ و $R^2=0/9961$ آرایش مطلوب بود. بهترین شبکه عصبی برای آموزش داده‌های چروکیدگی و پیش‌بینی آن، شبکه‌ای با توپولوژی ۱-۴-۶-۳ با ۱۰۱ چرخه آموزش و تابع آستانه TANSIG در شبکه FFBP دارای خطای آموزشی $10 \times 1/02$ و خطای نسبی میانگین ۰/۰۰۰۱ و بیشترین ضریب تعیین ۰/۹۹۲۶ بود. بهترین شبکه عصبی برای پیش‌بینی تغییرات کلی رنگ، شبکه با

۴- سپاسگزاری

از مرکز استعداد‌های درخشان دانشگاه بوعلی سینا برای تامین بخشی از هزینه ساخت دستگاه قدردانی می‌شود. از آقای حامد همایونفر دانش‌آموخته مقطع کارشناسی رشته مکانیک ماشینهای کشاورزی برای ساخت دستگاه سپاسگزاری می‌شود.

۵- منابع

- [1] Sedaghat, N. and Tavakoli, J. (2011). Qualitative properties of pistacia atlantica kernels (var Mutica) under different storage conditions and packaging. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 7 (1): 17-26.
- [2] Nadhari, W.N.A.W., Hashim, R., Sulaiman, O. and Jumhuri, N. (2014). Drying kinetics of oil palm trunk waste in control atmosphere and

- [15] Demuth, H. and Beale, M. (2003). Neural Network Toolbox for Matlab- Users Guide Version 4.1. The Mathworks Inc, USA.
- [16] Niamnuy, C., Kerdpi boon, S. and Devahastin, M. (2012). Artificial neural network modeling of physicochemical changes of shrimp during boiling. *LWT - Food Science and Technology*, 45: 110-116.
- [17] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. 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 berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49: 2865-2871.
- [18] Singh, N.J. and Pandey, R.K. (2012). Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bio-products Processing*, 90: 317-322.
- [19] Sharma, G.P. and Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 609-617.
- [20] Nazghelichi, T., Aghbashlo, M. and Kianmehr, M.H. (2011). Optimization of an artificial neural network topology using coupled response surface methodology and genetic algorithm for fluidized bed drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75: 84-91.
- [21] Kurozawa, L.E., Hubinger, M.D., and Park, K.J. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108: 43-50.
- [22] Al-Sulaiman, M.A. (2011). Prediction of quality indices during drying of okra pods in a domestic microwave oven using artificial neural network model. *African Journal of Agricultural Research*, 6(12): 2680-2691.
- [23] Scala, K.D., Meschino, G., Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Roura, S. and Mascheroni, R. (2013). An artificial neural network model for prediction of quality characteristics of apples during convective dehydration. *Food Science and Technology*, 33(3): 411-416.
- [24] Garcia-Segovia, P., Moggetti, C., Anders-Bello, A. and Martinez-Monoz, J. (2010). Osmotic dehydration of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Journal of Food Engineering*, 97 (2): 154-160
- [25] Vega-Galvez, A., Miranda, M., Claveria, R., Quispe, I., Vergara, J., Uribe, E., Paez, H., and Scala, K.D. (2011). Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*). *LWT- Food Science and Technology*, 44: 16-23.
- open air convection drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68: 14-20.
- [3] Celma, A.R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I. and Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behavior of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80 (4): 1261-1271.
- [4] Bakal, S.B., Gedam, K.H. and Sharma, G.P. (2010). Drying characteristics and kinetics of fluidized bed dried potato. *Agricultural and Food Science*, 19: 127-135.
- [5] Kilickan, A. and Guner, M. (2008). Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L) under compression loading. *Journal of Food Engineering*, 87: 222-228.
- [6] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and Tabil, L.G. (2005). Some physical properties of Pistachio (*Pistachio vera* L.) nut and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 72 (1): 30-38.
- [7] Kia, S.M. 2010. *Soft Computation in MATLAB*. Tehran, Kian Rayane Sabz. pp. 140-142.
- [8] Menlik, T., Ozdemir, M.B. and Kirmaci, V. (2010). Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 37: 7669-7677.
- [9] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A. (2009). Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conversion and Management*, 50: 1348-1355.
- [10] Jena, S. and Sahoo, A. (2013). ANN modeling for diffusivity of mushroom and vegetables using a fluidized bed dryer. *Particology*, 11 (5): 607- 613.
- [11] Crank, J. (1975). *Mathematics of Diffusion*. (2nd Ed.) London: Oxford University Press.
- [12] Koyuncu, T., Pinar, Y. and Lule, F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc) fruits. *Journal of food engineering*, 78: 1471-1475.
- [13] Ghanem, N., Mihoubi, D., Kechaou, N. and Mihoub, N.B. (2012). Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. *Industrial Crops and Products*, 40: 167-177.
- [14] Fritzen-Freire, C.B., Prudencio, E.S., Amboni, R.D.M.C., Pinto, S.S., Negrao-Murakami, A.N. and Murakami, F.S. (2012). Microencapsulation of bifidobacteria by spray drying in the presence of prebiotics. *Food Research International*, 45: 306-312.

Prediction of some thermal, physical and mechanical properties of terebinth fruit after semi-industrial continuous drying using artificial neural networks

Khayati, S.¹, Amiri Chayjan, R.^{2*}

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

2. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

(Received: 93/4/23 Accepted: 93/8/7)

The purpose of this study was prediction of thermal (effective moisture diffusivity and specific energy consumption), physical (shrinkage and color) and mechanical properties (rupture force) of terebinth fruit in a semi industrial continuous dryer using artificial neural networks (ANNs). Three effective factors on thermal, physical and mechanical properties, were air temperature, air velocity and belt linear speed as independent variables. Experiments were conducted with a semi industrial continuous dryer in temperature levels of 45, 60, 75 °C, air velocity levels of 1, 1.5 and 2 m/s and belt linear speed levels of 2.5, 6.5, 10.5 mm/s. Necessary data were collected using a the semi-industrial continuous dryer. Feed and cascade forward back propagation networks with learning algorithms of Levenberg-Marquardt and the Bayesian regulation were used to train the patterns. To predict the effective moisture diffusivity, feed forward networks with the Bayesian regulation, topology of 3-10-13-1 and 108 training cycles with $R^2=0.9999$ was optimal arrangement. The optimal topology to predict the specific energy consumption was 3-10-1 with feed forward network, Levenberg-Marquardt algorithm, 117 training cycles and $R^2=0.9961$. The best network for shrinkage prediction was feed forward network with the Bayesian regulation algorithm, topology of 3-6-4-1, 101 training cycles and $R^2=0.9926$. To predict the total color change, feed forward networks with the Levenberg-Marquardt algorithm, topology of 3-6-7-1, 24 training cycles and $R^2=0.9139$ was the optimal arrangement. The best network to predict the rupture force was feed forward network trained with the Bayesian regulation, topology of 3-8-6-1, 69 training cycles and $R^2=0.9990$.

Keywords: Diffusivity, Specific energy consumption, Shrinkage, Colorimeter, Rapture force.

* Corresponding author E-Mail Address: amirireza@basu.ac.ir