

مطالعه سرعت فرآیند خشک کردن خلایی - تابشی ورقه‌های سیب‌زمینی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی

نگار حافظی^۱، محمد جواد شیخ داودی^{۲*}، سید مجید سجادی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۲. دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۳. استادیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

در این تحقیق ورقه‌های سیب‌زمینی به صورت تک لایه با استفاده از گرمایش لامپ مادون قرمز تحت شرایط اعمال خلأ در سه سطح توان تابشی ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات، سه سطح ضخامت ورقه ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر و چهار سطح فشار مطلق ۲۰، ۸۰، ۱۴۰ و ۷۶۰ میلی‌متر جیوه در سه تکرار آزمایشی تا رسیدن به محتوای رطوبتی ۰/۶ بر پایه تر، مناسب جهت انبارداری طولانی مدت، خشک شدند. نتایج نشان داد که در ضخامت یکسان ورقه سیب‌زمینی، با افزایش توان لامپ و کاهش فشار مطلق درون محفظه خشک‌کن، مدت زمان لازم جهت خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی کاهش یافته است. از سوی دیگر، در اثر این پدیده چروکیدگی بیشتری در ورقه سیب‌زمینی به وجود آمده است. طبق نتایج به دست آمده در رابطه با تعیین میزان چروکیدگی ورقه با استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌توان بیان کرد که ضخامت ورقه و دمای خشک کردن که ناشی از تابش لامپ مادون قرمز بوده تاثیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۰/۱) بر میزان تغییر شکل ورقه سیب‌زمینی داشته است. همچنین نتایج حاصل از برآورد زمان خشک کردن به عنوان تابعی از توان تابشی مادون قرمز، میزان فشار مطلق، ضخامت ورقه و محتوای رطوبت محصول به کمک شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیونی خطی و غیر خطی نشان داد که مدل شبکه عصبی توانسته است بیشترین ضریب تبیین ($R^2=0/9732$) را در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی خطی ($R^2=0/819$) و غیر خطی ($R^2=0/870$) در رابطه با پیش‌بینی زمان مورد نیاز جهت خشک کردن سیب‌زمینی به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: زمان خشک کردن، چروکیدگی، پردازش تصویر، شبکه عصبی مصنوعی، مدل رگرسیونی

مقدمه

خشک کردن قیل از سرخ کردن سبب کاهش رطوبت کل محصول شده و میزان جذب روغن را محدود می‌سازد (Leeratanarak et al., 2006). امروزه جهت افزایش سرعت خشک کردن، بهبود کیفیت ظاهری محصول خشک شده و نیز بالا بردن راندمان انرژی فرآیند خشک کردن، استفاده از روش‌های ترکیبی گسترش زیادی پیدا کرده است. استفاده از خلأ به همراه گرمایش می‌تواند روش مؤثری برای خشک کردن باشد، زیرا در این حالت بدون نیاز به افزایش زیاد دما، می‌توان به ظرفیت بالایی از تولید محصول خشک شده دست یافت. به این ترتیب می‌توان مواد حساس به دماهای بالا را در مدت زمان کوتاهی به خوبی خشک کرد. در این روش خشک کردن که از خلأ و گرما در کنار یکدیگر استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که تنها از گرمایش استفاده شود، نتیجه بهتری به دست خواهد آمد به خصوص در موادی که دارای خلل و فرج بوده یا سطح مقطع ماده دارای مساحت بسیار بالا باشد.

یکی از راه‌های کاهش ضایعات سیب‌زمینی، خشک کردن مناسب آن و نگهداری آن به صورت خشک شده می‌باشد. سیب‌زمینی خشک شده را می‌توان در مکان‌هایی که مصرف بالایی دارند نظیر رستوران‌ها و هتل‌ها به راحتی در انواع سوپ‌ها و خورش‌ها به کار برد. با توجه به مشکلات نگهداری، حمل و نقل و نوسان فصلی قیمت سیب‌زمینی تازه، تولید فرآورده‌های آماده مصرف نظیر چیپس، خلال، قطعات مکعبی و پودر خشک شده سیب‌زمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از ویژگی‌های مهم خشک کردن سیب‌زمینی، کاهش میزان مصرف و جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن در دمای بالا می‌باشد به علت این که سیب‌زمینی مرطوب در زمان سرخ شدن مقدار زیادی روغن جذب می‌کند. از این رو، استفاده از مرحله پیش

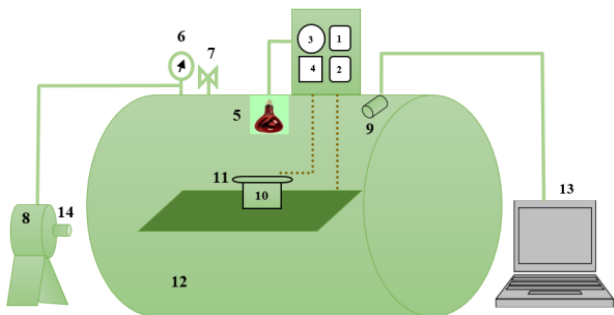
* نویسنده مسئول: mj.davoodi@scu.ac.ir

خصوصیات ساختاری و ظاهری آن متمرکز بوده‌اند. در این پژوهش علاوه بر مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی با مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی، رویکردی دیگر استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت ارائه مدل عصبی و در نهایت انتخاب توپولوژی بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشک کردن این محصول می‌باشد. در زمینه بهبود کیفیت محصول خشک شده نیز به ارزیابی شاخص کیفی چروکیدگی سیب‌زمینی با استفاده از تکنیک پردازش تصویر در دو تیمار استفاده از گرمایش مادون قرمز و تلفیق مادون قرمز و خلا پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

خشک کن آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق از یک خشک‌کن خلایی به همراه وسیله گرمایشی (لامپ مادون قرمز) در مقیاس آزمایشگاهی موجود در کارگاه آموزشی مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز، با طرحواره کلی نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شد. اجزای اصلی دستگاه شامل یک محفظه‌ی استوانه‌ای شکل به حجم ۰/۳۳۵ مترمکعب و قطر مقطع ۶۵ سانتی‌متر از جنس فولاد به همراه یک پمپ خلا پیستونی است. پمپ خلا که توسط یک الکتروموتور تک فاز با ولتاژ ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز و شدت جریان الکتریکی ۵/۱ آمپر چرخانده می‌شد وظیفه تامین خلا درون محفظه را برعهده داشت. درون محفظه تعدادی میله به صورت افقی و موازی با هم جهت قرار دادن ترازو و سینی نمونه تعبیه شده است. به منظور ایجاد شدت تابش‌های مختلف بر روی نمونه از یک لامپ مادون قرمز با توان اسمی ۲۵۰ وات، ولتاژ اسمی ۲۳۰ ولت و طول موج ۱/۱ میکرومتر در گستره طیفی مادون قرمز نزدیک ساخت کشور اسلواکی و شرکت OSRAM استفاده شد.



شکل ۱- طرحواره دستگاه خشک‌کن مورد استفاده

- ۱: نمایشگر رطوبت سنج؛ ۲: نمایشگر دما سنج؛ ۳: دایمر لامپ مادون قرمز؛ ۴: ولت‌متر؛ ۵: لامپ مادون قرمز؛ ۶: خلا سنج؛ ۷: شیر تنظیم خلا؛ ۸: پمپ خلا؛ ۹: دوربین؛ ۱۰: ترازوی دیجیتال؛ ۱۱: سینی نمونه‌ها؛ ۱۲: محفظه خلا؛ ۱۳: رایانه؛ ۱۴: مجرای خروج هوا

مجرای خروج هوا

یکی از شاخص‌های کلیدی در فرآیند خشک کردن رسیدن به محتوای رطوبتی مناسب می‌باشد. از آنجایی‌که روش‌های متداول مانند روش‌های آماری بر پایه اصول اولیه برای پیش‌بینی فرآیند، زمان زیادی صرف می‌کند و دقت نتایج به دست آمده از آن‌ها رضایت بخش نیست لذا شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد به این علت که قدرت تامین دقت و سرعت لازم برای پیش‌بینی فرآیند خشک کردن را دارند (Farkas et al., 2000). ساده‌ترین و معمول‌ترین نوع شبکه عصبی که در بسیاری از علوم مهندسی از جمله تحقیق حاضر به کار گرفته شده است، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) می‌باشد. برای حل مسایل غیرخطی^۱ از این شبکه عصبی استفاده می‌شود. شبکه MLP مجموعه‌ای از نورون‌های پایه است که در سه لایه قرار می‌گیرند. این سه لایه با نام‌های لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی شناخته می‌شوند (Menhaj, 2009). در پژوهشی (Shaygani et al., 2011) بر روی توسعه مدل پیش‌بینی زمان خشک شدن موز در طی فرآیند خشک کردن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی کار کردند که برای به دست آمدن تغییرات محتوای رطوبتی با زمان از شبکه‌های چند لایه پس انتشار برگشتی با الگوریتم‌های یادگیری لونیبرگ-مارکواریت، الگوریتم پس انتشار ارتجاعی و الگوریتم گرادینت نزولی مقیاسی، برای آموزش الگوها بهره گرفتند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت نتایج بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها نشان داد. شبکه عصبی با الگوریتم لونیبرگ-مارکواریت با تابع آستانه سیگموئید لگاریتمی در مقایسه با توپولوژی‌های دیگر نتایج بهتری را ارائه کرد. پردازش تصویر روشی برای تبدیل یک تصویر به صورت دیجیتال و انجام برخی از عملیات بر روی آن، به منظور دریافت یک تصویر بهبود یافته و یا برای استخراج برخی از اطلاعات مفید از آن است. در پژوهشی (Yadollahinia & Jahangiri, 2009) از سامانه ماشین بینایی و تکنیک پردازش تصویر برای بررسی چروکیدگی لایه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند خشک شدن استفاده کردند. آنها در سامانه خود تنها تصویر سطح محصول را دریافت می‌کردند. بنابراین مبنای چروکیدگی را تغییرات سطح، محیط، میزان کشیدگی و میزان گردی نمونه‌ها قرار دادند و گزارش کردند که با کاهش محتوای رطوبتی محصول میزان کشیدگی آن افزایش و میزان گردی کاهش می‌یابد. همچنین دریافتند که میزان تغییرات سطح و محیط نسبت به حالت اولیه، رابطه خطی با نسبت محتوای رطوبتی محصول دارد. تحقیقات انجام شده در رابطه با خشک کردن سیب‌زمینی بیشتر در مورد بهبود

شد. رقم پاییزه مارفونا دارای وزن مخصوص ۱/۰۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و $1/35 \pm 19/01\%$ ماده خشک می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها سیب‌زمینی‌ها تا زمان انجام آزمایش جهت کاهش میزان شدت تنفس و تغییرات فیزیولوژی و شیمیایی در سردخانه‌ی دانشکده کشاورزی با دمای ۴ تا ۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵ درصد نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش‌ها تعداد لازم از نمونه‌های سیب‌زمینی را شسته تا مواد خارجی و ذرات خاک، به خوبی از آن جدا گردد. سپس مدتی در آبکش قرار داده شد تا آب آن به طور کامل گرفته شود. بعد از آن سیب‌زمینی، مرحله پوست‌گیری دستی را طی کرده و توسط دستگاه لایه‌کن^۱ دستی به ورقه‌هایی با ضخامت‌های مختلف برش داده شد. جهت یکسان بودن مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی از یک قالب استوانه‌ای فلزی به قطر ۵ سانتی‌متر استفاده شد. در این تحقیق اثر عوامل تاثیرگذار فشار مطلق در چهار سطح فشار مطلق (۲۰، ۸۰، ۱۴۰ و ۷۶۰ میلی‌متر جیوه)، توان تابشی لامپ مادون قرمز در سه سطح (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات) و نیز ضخامت ورقه در سه سطح (۱، ۲ و ۳ میلی‌متر) بر خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی به روش تلفیقی خلأ و مادون قرمز در سه تکرار برای بدست آوردن داده‌های آزمایشی استفاده شد. توزین نمونه‌ها تا زمانی که محتوای رطوبتی سیب‌زمینی به ۶ درصد بر پایه تر برسد ادامه یافت که این میزان رطوبت مناسب نگهداری در انبار برای مدت زمان طولانی است (Sablani and Mujumdar, 2006).

اندازه‌گیری رطوبت

برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت سیب‌زمینی‌ها از روش استاندارد انجمن شیمی آمریکا استفاده گردید. در این حالت، نمونه‌های ۲۵ گرمی به کمک آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند (AOAC, 1990).

تکنیک پردازش تصویر در محاسبه چروکیدگی

تصویرگیری از نمونه ورقه سیب‌زمینی پس از خشک شدن در خشک‌کن مادون قرمز- خلأ با استفاده از روش عکس برداری دیجیتال و تحلیل آن به کمک محیط پردازش تصویر نرم‌افزار متلب انجام گردید. برای تصویربرداری از نمونه‌های خشک شده سیب‌زمینی از یک دوربین دیجیتال مدل SAMSUNG ES55 استفاده شد. زاویه بین عدسی دوربین و محور منبع نوری به گونه‌ای بود که نور منعکس شده به دوربین از منبع نوری نبوده و از محصول دریافت می‌شد. فاصله‌ی مابین دوربین دیجیتال و

در همه تیمارهای آزمایشی لامپ مادون قرمز درون دستگاه به مدت ۱۵ دقیقه جهت یکسان شدن شرایط دمایی درون محفظه قبل از شروع آزمایش‌ها روشن می‌شد. بدیهی است که پیش از شروع کار پمپ خلأ، فشار مخزن با فشار هوای محیط یکسان بود، کار دستگاه با تابش لامپ مادون قرمز برای ایجاد حرارت و به کار انداختن پمپ خلأ جهت تخلیه هوای درون محفظه آغاز می‌شد، در این حالت پمپ خلأ با مکش هوای درون محفظه که ناشی از خروج بخارات حاصل از تبخیر رطوبت در اثر ایجاد گرما درون محصول توسط لامپ مادون قرمز بوده است، سبب کاهش فشار درون محفظه می‌شد. زمان خشک شدن با رسیدن رطوبت محصول به رطوبت نهایی موردنظر و توقف پمپ خلأ، خاموش شدن لامپ و نیز باز کردن شیر تهویه در صورت بسته بودن کامل آن و ورود هوا به درون محفظه متوقف شد. از لامپ مادون قرمز در قسمت فوقانی محفظه خلأ جهت حرارت دادن به محصول و تسریع عمل خشک شدن استفاده شد. ارتفاع نصب لامپ تا سینی نمونه‌ها در یک سری پیش آزمایش‌ها اندازه‌گیری و مقدار ثابت ۱۵ سانتی‌متر تعیین شد. دمای ناشی از تابش نور لامپ به سطح محصول به وسیله یک حسگر دما (SAMWON ENG, SU-105KRR) که در زیر سینی نمونه قرار داشت سنجیده شد. دمای شروع کار جهت انجام آزمایش‌ها (در مدت زمان ۱۵ دقیقه پیش از شروع آزمایش) در تمام تیمارها یکسان و به میزان ۵۰ درجه سلسیوس بود. شرایط خلأ درون محفظه توسط شیر تنظیم خلأ کنترل می‌شد و میزان فشار مطلق مرتباً توسط خلأسنج (WKP-SH01) نصب شده روی قسمت فوقانی محفظه خشک‌کن کنترل گردید. رطوبت نسبی درون محفظه خشک‌کن در شروع آزمایش‌ها به طور میانگین برابر با ۳۵ درصد بود. تغییرات محتوای رطوبتی محصول دائماً از طریق اندازه‌گیری وزن سیب‌زمینی‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۵ گرم (Lutron, GM-1500P, Taiwan) که درون محفظه خشک‌کن جای داده شده بود، سنجیده می‌شد. جهت قرائت لحظه‌ای کاهش وزن سیب‌زمینی‌ها از یک دوربین (Farassoo-FC-2370) نصب شده بر روی سقف محفظه خشک‌کن استفاده گردید که روی صفحه نمایشگر ترازوی دیجیتال تنظیم شده بود و به طور پیوسته تغییرات وزن نمونه‌ای که روی ترازو قرار داشت را نشان می‌داد. دوربین از طریق سیم رابط به رایانه متصل شده بود.

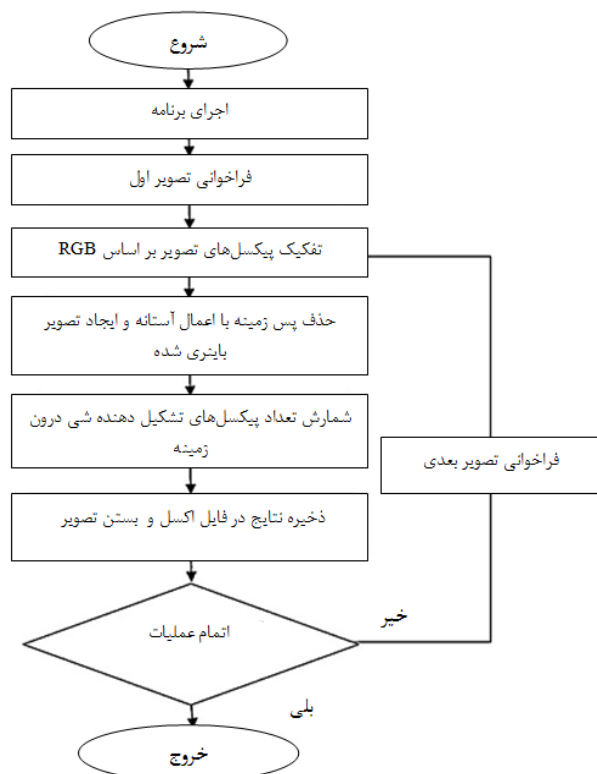
سطوح آزمایشی و آماده سازی محصول

برای انجام این تحقیق از سیب‌زمینی، رقم مارفونا با قطر متوسط ۶۱/۲۵ میلی‌متر تهیه شده از بازار محلی استان همدان استفاده

چروکیدگی محصول استفاده شد (Wang et al., 2014).

$$\% \text{Shrinkage} = \left(1 - \frac{A}{A_0}\right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

A: مساحت نمونه خشک شده (mm^2), A_0 : مساحت اولیه نمونه (قبل از خشک کردن), Shrinkage: درصد چروکیدگی



شکل ۲- فلوجارت اجرای برنامه پردازش تصویر



شکل ۳- تصویر اصلی و باینری شده ورقه سیب‌زمینی پس از اعمال آستانه و کاهش نویز

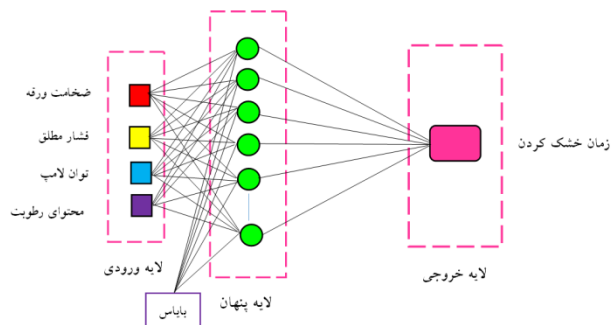
شبکه عصبی مصنوعی به کار رفته و معیارهای مورد ارزیابی

در این تحقیق از یک شبکه عصبی پس انتشار پیشخور با انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم لونیگ-مارکوارت، الگوریتم شبه نیوتن، الگوریتم پس انتشار برگشتی و الگوریتم شیب توأم مقیاس شده جهت پیش‌بینی زمان خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی استفاده گردید. نوع شبکه طراحی شده پرسپترون چند لایه (MLP) بود که در آن لایه ورودی شامل چهار نورون (ضخامت ورقه، توان لامپ مادون قرمز، فشار مطلق و محتوای رطوبت محصول) و لایه خروجی شامل یک نورون (زمان خشک کردن) بود. ساختار این شبکه چند لایه در شکل

نمونه ثابت بود. علاوه بر این شدت منبع نوری قرار گرفته در بالای محصول بایستی یکنواخت باشد که برای این کار از شدت نوری‌های یکسان با مسافت‌های متفاوت منبع نوری از محصول استفاده شد. عکس‌برداری در اتاق تاریک انجام گردید که نور خارجی بر روی نمونه تاثیر نگذارد. برای نورپردازی از ۴ عدد لامپ کم مصرف فلورسنت با توان ۲۳ وات استفاده گردید. زاویه نورپردازی قبل از عکس‌برداری تنظیم شد به گونه‌ای که کمترین میزان سایه‌اندازی روی محصول ایجاد شود. تصاویر گرفته شده در فرمت JPEG و رزولوشن ۹۶ dpi ذخیره شد. در تصاویر محصولات کشاورزی و غذایی معمولاً دو منطقه وجود دارد. پیش‌زمینه که تصویر خود شی است و پس‌زمینه‌ای که شی در آن قرار دارد. بنابراین تصویر مورد بررسی، تصویر دودویی^۱ یا دوسطحی است که در آن پیکسل‌ها تنها ارزش صفر یا یک دارند. این مقادیر به ترتیب به پیکسل‌های متعلق به پیش‌زمینه و پس‌زمینه اختصاص دارند. جهت تخمین مساحت براساس شمارش تعداد پیکسل‌های تصویر در مرحله اول، ابتدا یک نمونه مربعی $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ از ورقه سیب‌زمینی مرطوب برش زده شد سپس تصاویر سطوح خاکستری از روی تصویر رنگی اصلی و بر اساس اجزای قرمز-سبز-آبی^۲ آن تهیه گردید. در مرحله بعد، یک مقدار آستانه به عنوان ملاک تشخیص پیکسل‌های شی از پیکسل‌های پس‌زمینه انتخاب شد، مقدار آستانه از روی هیستوگرام (بافت‌نگار) رنگ‌های اصلی (RGB) محاسبه شد. در این حالت تک تک پیکسل‌های تصویر سطوح خاکستری با مقدار آستانه مقایسه شده و اگر مقدار پیکسل از مقدار آستانه بزرگ‌تر بود به جای آن رنگ سفید و اگر کوچک‌تر بود رنگ سیاه قرار داده می‌شد (شکل ۲). در مرحله بعد، از عملگرهای مورفولوژیکی برای کاهش نویز و پر کردن حفره‌های احتمالی ایجاد شده در درون تصویر باینری استفاده گردید (شکل ۳). پس از آن که تصویر شی مورد نظر از پس زمینه جدا شد، تعداد پیکسل‌های روشن (با ارزش یک) که نماینده شی هستند شمارش شدند. سپس مساحت سطح شی بر اساس مجموع تعداد پیکسل‌ها و تفکیک‌پذیری تصویر بر حسب میلی‌متر مربع محاسبه گردید (Mansouri et al., 2007).

در نهایت مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی قبل و بعد از پروسه خشک شدن نسبت به تعداد پیکسل‌های نمونه کالیبره شده، تخمین زده شد. از رابطه (۱) برای محاسبه تغییرات مساحت نمونه خشک شده نسبت به نمونه اولیه و برآورد میزان

1. Binary
2. RGB



شکل ۵- طرحواره کلی شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی زمان خشک کردن

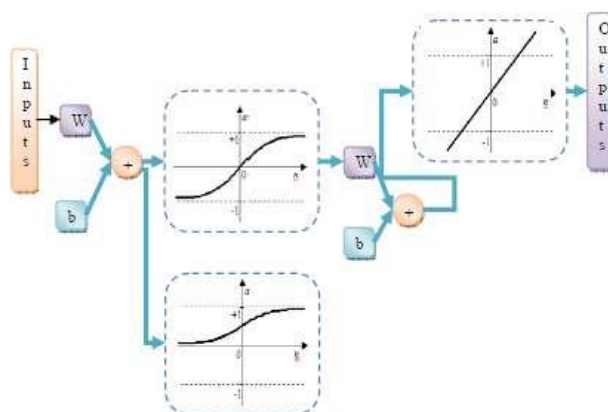
برای یافتن شبکه‌ای با معماری مناسب به کمک الگوریتم‌های آموزشی، از معیارهای ضریب همبستگی (R) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شد. در درجه اول مقادیر ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا در هر یک از شبکه‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفتند که از رابطه (۲) و (۳) برآورد شدند و در نهایت شبکه‌ای مورد پذیرش قرار می‌گرفت که بیشترین ضریب همبستگی و کمترین میانگین مربعات خطا را داشته باشد (Heristev, 1998).

$$MSE = \frac{\sum_{p=1}^M \sum_{i=1}^N (S_{ip} - T_{ip})^2}{n_p \times n_o} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$R = \left(1 - \frac{\sum_{ip=1}^N (S_{ip} - T_{ip})}{\sum_{ip=1}^N (S_{ip} + T_{ip})} \right)^{1/2} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در این معادلات، R و MSE به ترتیب ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا در مرحله آموزش، S_{ip} خروجی شبکه در نورون i ام و الگوی p ام، T_{ip} خروجی مطلوب در نورون i ام و الگوی p ام، n_p تعداد الگوها، n_o تعداد نورون‌های لایه خروجی، N تعداد نورون‌های خارجی و M تعداد الگوهای آموزشی است. وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود از این رو داده‌های ورودی به شبکه بایستی نرمال شود. در صورتی که این مرحله انجام نشود، شبکه در طول فاز آموزش همگرا نخواهد شد و نتایج مطلوب تولید نخواهد شد. از این رو برای نرمالیزه کردن داده‌ها از رابطه (۴) استفاده شده است. که ورودی‌ها را بین ۰ و ۱ استاندارد می‌نماید. در نهایت می‌توان خروجی شبکه را با معکوس نمودن الگوریتم استانداردسازی، به حالت اولیه برگرداند. در این معادله، x داده خام اولیه، x_n داده نرمالیزه شده، x_{min} و x_{max} به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه داده اصلی است.

(۵) نشان داده شده است. بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی با بررسی توپولوژی‌های مختلف شبکه و نیز ارزیابی اختلاف بین خروجی‌های شبکه عصبی و داده‌های آزمایشی انجام گرفت. برای بهینه‌سازی ساختار شبکه عصبی مصنوعی، پارامترهای مختلف شبکه نظیر تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نورون‌ها در هر لایه پنهان مورد ارزیابی قرار گرفتند. به منظور یافتن بهترین توپولوژی مناسب با مسأله خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی از یک لایه پنهان با ۱ تا ۲۵ نورون و ۱۰۰۰ دوره یادگیری استفاده شد همچنین نرخ آموزش و ضریب مومنتوم به ترتیب برای تمامی حالات به صورت پیش فرض ۰/۱ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. در نورون‌های لایه پنهان از دو تابع آستانه تانژانت سیگموئید و لگاریتمی و در لایه خروجی از تابع خطی استفاده گردید (شکل ۴). برای طراحی و آزمون شبکه عصبی مصنوعی از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب^۱ R2014a v8.3 استفاده گردید.



شکل ۴- شماتیک شبکه عصبی با دو تابع آستانه تانژانت سیگموئید و لگاریتمی در لایه پنهان و یک تابع خطی در لایه خروجی

تعداد کل الگوهای ورودی شبکه عصبی بر مبنای روند لحظه‌ای تغییرات رطوبت بر حسب زمان ۲۸۹۹ داده بوده که ابتدا نرمال‌سازی شده و سپس به طور تصادفی به سه قسمت تقسیم شدند یک قسمت برای آموزش^۲ شبکه و قسمت دیگر برای اعتبارسنجی^۳ مدل و نهایتاً قسمت سوم برای تست^۴ شبکه استفاده شده، به کار برده شد (Tripathy & Kumar, 2008). داده‌های مورد استفاده برای آموزش شبکه شامل ۶۰ درصد داده‌ها و باقیمانده داده‌ها ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی و ۲۰ درصد برای تست شبکه به کار گرفته شد.

1. Matlab
2. Training
3. Validation
4. Test

سخت بر روی سطح ورقه سیبزمینی ایجاد گردیده که روند خروج رطوبت از منافذ درون محصول را آهسته تر می کند از این سو میزان تغییر شکل رویه ورقه (خمیدگی) را کاهش می دهد این پدیده در ضخامت های کمتر به صورت عکس دیده شده است (شکل ۷). در رابطه با تعیین میزان چروکیدگی بر مبنای کاهش حجم محصول خشک شده نسبت به حالت اولیه (مرطوب) با استفاده از روش جابجایی مایع (با حلال)، چندین نمونه آزمایشی به کمک این روش مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاصل از این امر نشان داد که ضخامت ورقه اثر چشمگیری بر میزان کاهش حجم نشان داده است به طوری که در ضخامت یک میلی متر به علت کاهش حجم بیشتری نسبت به حالت مرطوب، چروکیدگی کمتری مشاهده شده است. آزمایش ها مربوط به دو روش سنجش این شاخص نشان می دهد که چروکیدگی بر هر دو مینا (کاهش سطح و کاهش حجم) نتایج متفاوتی نشان داده است. به این علت که در روش پردازش تصویر تنها مساحت سطحی نمونه و در روش جابجایی مایع دو بعد ضخامت ورقه و مساحت نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

تعداد نورون های هر لایه پنهان به روش آزمون و خطا مورد بررسی قرار گرفت. پس از انتخاب شبکه مناسب، تعداد بهینه نورون های لایه پنهان و تابع آستانه انتخاب شد.

نتایج و بحث

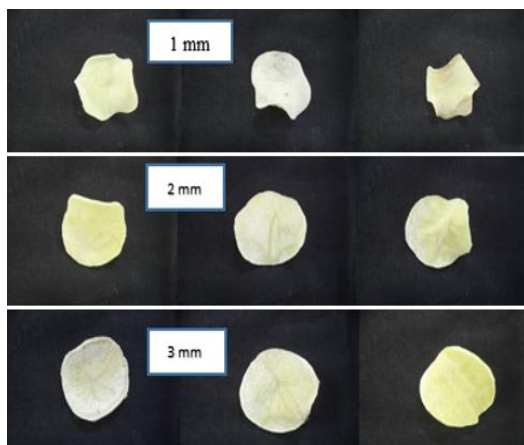
نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری برآورد چروکیدگی ورقه های سیبزمینی به روش پردازش تصویر در جدول (۱) نشان داده شده است. بر این اساس کمترین میزان چروکیدگی (بر مبنای تغییر شکل ورقه سیبزمینی) در ضخامت ورقه سه میلی متر رخ داده است.

نتایج نشان داد که ضخامت و توان لامپ بیشترین اثر را بر میزان کاهش شکل سطحی ورقه های سیبزمینی در روش خشک کردن مادون قرمز - خلا داشته است به این صورت که با افزایش توان لامپ و کاهش ضخامت ورقه، در سطح رویه ورقه خشک شده نسبت به حالت تازه کاهش بیشتری مشاهده شده است (شکل ۶). همچنین دیده شد که در ضخامت های بیشتر به علت طولانی شدن زمان و کاهش نرخ خشک شدن، یک لایه

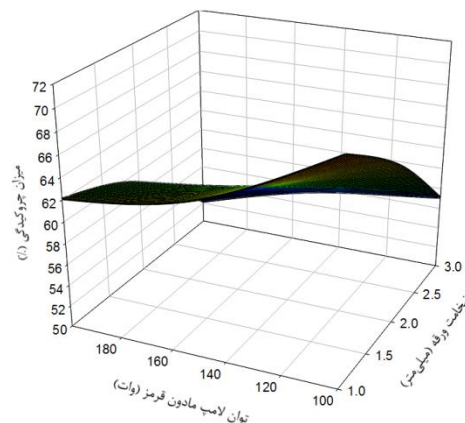
جدول ۱- تجزیه واریانس تاثیر ضخامت ورقه، فشار مطلق و توان لامپ مادون قرمز بر میزان چروکیدگی ورقه سیبزمینی به روش پردازش تصویر

| F | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|-----------|----------------|--------------|------------|-------------------------------|
| ۱۸۷/۸۵۰** | ۱۱۴۹/۹۳۶ | ۲۲۹۹/۸۷۳ | ۲ | ضخامت ورقه |
| ۱۰/۲۲۷* | ۶۲/۶۰۸ | ۱۸۷/۸۲۵ | ۳ | فشار مطلق |
| ۵۷/۰۶۴** | ۳۴۹/۳۲۳ | ۶۹۸/۶۴۶ | ۲ | توان لامپ |
| ۱/۶۲۵ n.s | ۹/۹۴۶ | ۵۹/۶۷۳ | ۶ | ضخامت ورقه × فشار مطلق |
| ۲/۱۵۰ n.s | ۱۳/۱۵۹ | ۵۲/۶۳۷ | ۴ | ضخامت ورقه × توان لامپ |
| ۲/۵۰۴ n.s | ۱۵/۳۲۸ | ۹۱/۹۷۱ | ۶ | فشار مطلق × توان لامپ |
| ۱/۳۷۳ n.s | ۸/۴۰۷ | ۱۰۰/۸۸۶ | ۱۲ | ضخامت × فشار مطلق × توان لامپ |
| | ۶/۱۲۲ | ۴۴۰/۷۵۴ | ۷۲ | اشتباه |
| | | ۳۹۳۲/۲۶۴ | ۱۰۷ | کل |

* اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵٪، ** اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱٪ و n.s عدم وجود اختلاف معنی دار



شکل ۷- تصاویری از ورقه های سیبزمینی پس از طی فرآیند خشک شدن

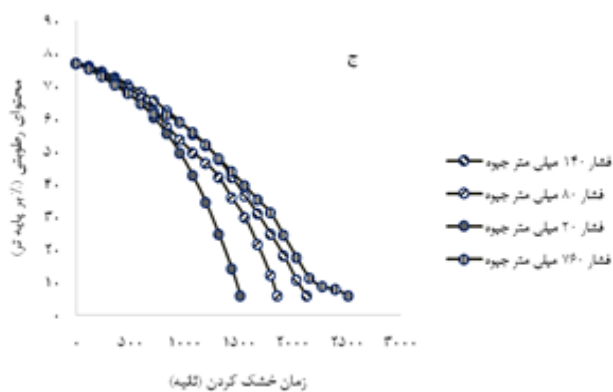
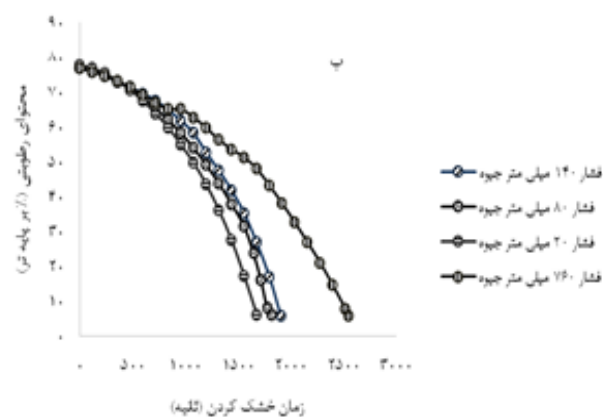
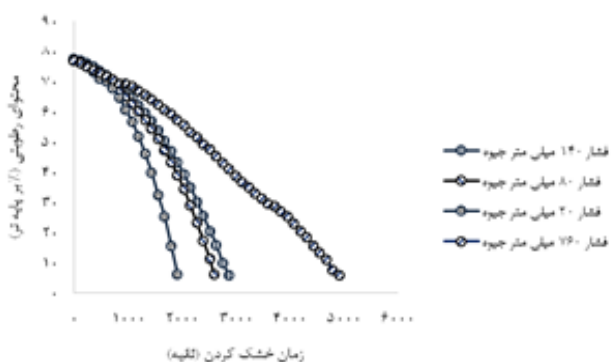


شکل ۶- اثر توان لامپ مادون قرمز و ضخامت ورقه بر شاخص چروکیدگی با استفاده از روش پردازش تصویر

جدول ۲- ضرایب معادله رگرسیون خطی چروکیدگی ورقه سیبزمینی

| مدل | ضرایب غیر استاندارد | | ضرایب استاندارد | t | Sig. |
|------------------------|---------------------|------------|-----------------|---------|--------|
| | B | Std. Error | Beta | | |
| ۱ | ۸۲/۰۶۰ | ۱/۴۰۴ | | ۵۸/۴۵۶ | ۰/۰۰۰ |
| (مقدار ثابت) | | | | | |
| | -۵/۲۸۳ | ۰/۳۶۹ | -۰/۷۱۵ | -۱۴/۳۱۵ | ۰/۰۰۰۱ |
| ضخامت ورقه | | | | | |
| | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۰۶ | ۰/۲۲۵ | ۴/۵۰۰ | ۰/۰۳۴۵ |
| فشار مطلق | | | | | |
| | ۰/۰۶۳ | ۰/۰۰۷ | ۰/۴۲۳ | ۸/۴۶۸ | ۰/۰۰۰۱ |
| توان لامپ مادون قرمز | | | | | |
| متغیر وابسته: چروکیدگی | | | | | |

میان توپولوژی‌های دیگر تعیین گردید. جدول (۳) خلاصه‌ای از بهترین نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.



شکل ۸- منحنی‌های محتوای رطوبتی خشک کردن ورقه‌های سیبزمینی در فشارهای مطلق مختلف و در توان‌های تابشی الف (۱۰۰، ب) ۱۵۰ و ج) ۲۰۰ وات

با استخراج ضرایب معادله از جدول (۲)، رابطه خطی چروکیدگی (Shrinkage) با سه فاکتور ضخامت ورقه سیبزمینی (T)، میزان فشار مطلق (AP) و توان تابشی لامپ مادون قرمز (IP) به صورت زیر است:

$$\text{Shrinkage} = 82.060 - (5.283 \times T) + (0.025 \times \text{AP}) + (0.063 \times \text{IP})$$

$$R = 0.861$$

در رابطه با شاخص کیفی چروکیدگی مطالعات *Eskandari Cherati et al. (2013)* نشان داد که با افزایش زمان خشک شدن روند کاهش مساحت برگه سیبزمینی آهسته‌تر شده و ورقه شکل دایره‌ای خود را حفظ کرده است به گونه‌ای که در انتهای فرآیند زمانی که کاهش نسبت رطوبت به کمتر از ۰/۲ رسید میزان کاهش مساحت به صفر نزدیک شده بود. همچنین مشاهده کردند که دما اثر چشمگیری بر میزان چروکیدگی برگه سیبزمینی داشته به طوری که با افزایش دما میزان چروکیدگی کاهش یافته است.

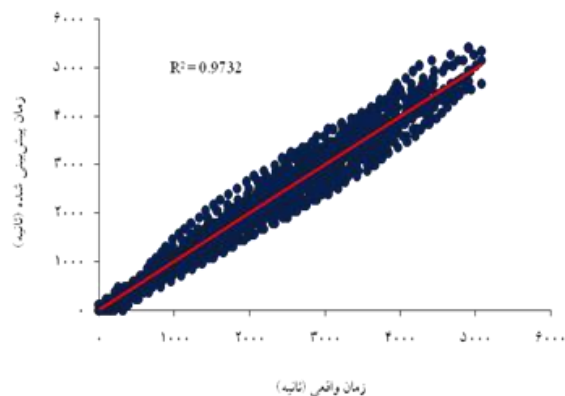
شکل (۸) منحنی‌های خشک شدن ورقه سیبزمینی را در توان‌های تابشی لامپ مادون قرمز و در سطوح مختلف فشار مطلق درون محفظه خشک‌کن نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در ضخامت یکسان ورقه سیبزمینی، با افزایش توان لامپ و کاهش فشار مطلق درون محفظه خشک‌کن، مدت زمان لازم جهت خشک کردن ورقه‌های سیبزمینی کاهش یافته است. به این دلیل که با افزایش گرمای حاصل از تابش اشعه مادون قرمز، آهنگ خشک شدن افزایش و به تبع آن مدت زمان لازم برای خشک کردن ورقه‌های سیبزمینی کاهش می‌یابد (شکل ۹).

برای بررسی عملکرد شبکه پرسپترون چند لایه از توپولوژی‌های مختلف با تعداد نورون‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. این توپولوژی‌ها کاملاً به صورت سعی و خطا انتخاب شدند. پس از آموزش شبکه با توجه به الگوریتم‌های یادگیری مختلف بهترین چیدمان شبکه بر اساس دو معیار R و MSE از

جدول ۳- نتایج ساختارهای مختلف شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی زمان خشک کردن سیب‌زمینی

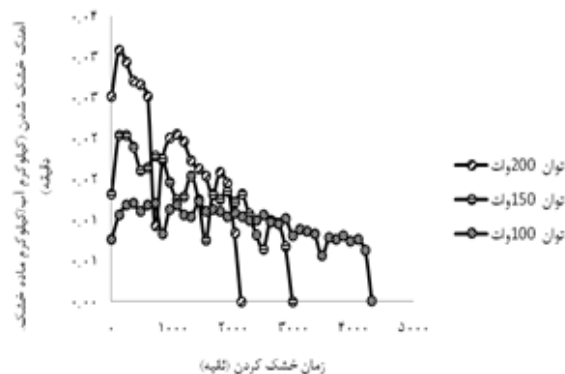
| تابع آستانه | الگوریتم آموزشی | تعداد نورون‌ها در لایه پنهان | | ضریب همبستگی (R) | | | خطای شبکه (MSE) | | زمان شبه‌سازی Epoch (sec) |
|----------------|--------------------|---------------------------------|----------|------------------|---------|--------|-----------------|--------|------------------------------------|
| | | لایه اول | لایه دوم | آموزش | ارزیابی | آزمایش | ارزیابی | آزمایش | |
| Tan | lm | ۱۵ | ۰ | ۰/۹۸۶۰ | ۰/۹۸۱۵ | ۰/۹۸۵۰ | ۰/۰۳۰۳ | ۰/۰۳۵۷ | ۱۰۷ |
| Log | lm | ۱۱ | ۰ | ۰/۹۸۴۰ | ۰/۹۸۲۵ | ۰/۹۸۳۷ | ۰/۰۳۱۱ | ۰/۰۳۴۳ | ۲۵۰ |
| Tan/Log | lm | ۱۱ | ۹ | ۰/۹۸۶۲ | ۰/۹۸۷۴ | ۰/۹۸۷۰ | ۰/۰۲۵۲ | ۰/۰۲۵۷ | ۶۴ |
| Tan | bfg | ۱۱ | ۰ | ۰/۹۷۹۸ | ۰/۹۷۹۳ | ۰/۹۷۸۳ | ۰/۰۴۰۷ | ۰/۰۳۷۲ | ۱۱۴ |
| Log | bfg | ۱۳ | ۰ | ۰/۹۶۸۰ | ۰/۹۶۵۰ | ۰/۹۶۷۸ | ۰/۰۶۷۷ | ۰/۰۶۶۶ | ۱۱۳ |
| Tan/Log | bfg | ۱۲ | ۱۰ | ۰/۹۸۰۹ | ۰/۹۸۰۴ | ۰/۹۸۰۸ | ۰/۰۳۷۱ | ۰/۰۴۰۰ | ۱۳۳ |
| Tan | rp | ۱۴ | ۰ | ۰/۹۵۹۷ | ۰/۹۶۲۱ | ۰/۹۵۴۳ | ۰/۰۸۷۸ | ۰/۰۷۲۱ | ۱۷۹ |
| Log | rp | ۱۵ | ۰ | ۰/۹۷۰۹ | ۰/۹۷۰۸ | ۰/۹۶۷۸ | ۰/۰۵۹۸ | ۰/۰۵۸۱ | ۱۰۹ |
| Tan/Log | rp | ۱۳ | ۹ | ۰/۹۸۰۴ | ۰/۹۸۰۷ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۰۴۳۴ | ۰/۰۴۱۰ | ۱۶۲ |
| Tan | scg | ۱۱ | ۰ | ۰/۹۴۱۷ | ۰/۹۴۸۹ | ۰/۹۴۳۸ | ۰/۱۰۰۲ | ۰/۱۰۵۱ | ۴۲ |
| Log | scg | ۹ | ۰ | ۰/۹۴۷۵ | ۰/۹۴۸۵ | ۰/۹۴۳۳ | ۰/۱۱۳۰ | ۰/۱۰۵۵ | ۴۷ |
| Tan/Log | scg | ۱۵ | ۵ | ۰/۹۲۲۵ | ۰/۹۱۷۰ | ۰/۹۲۰۵ | ۰/۱۴۱۲ | ۰/۱۴۳۱ | ۵۱ |

گروه آموزش، ارزیابی و آزمایش را در بر می‌گیرد برابر با ۰/۹۸۶۵ است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود همه نقاط حول یک خط راست ۴۵ درجه با ضریب تبیین ($R^2=0/9732$) بسیار بالا قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل مذکور می‌توان دریافت که داده‌های آزمایشی و داده‌های حاصل از مدل شبکه عصبی بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی‌های هر دو سری داده روی یکدیگر منطبق شده‌اند و بیانگر همبستگی و همپوشانی بسیار خوب زمان پیش‌بینی شده توسط شبکه در مقابل زمان واقعی در طول فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی است.



شکل ۱۰- میزان دقت پیش‌بینی زمان خشک کردن توسط بهترین شبکه آموزش دیده با زمان واقعی

در جهت پیش‌بینی ضریب تبدیل شلتوک به برنج *Khoshtaghaza et al. (2008)* به این نتیجه دست یافتند که شبکه عصبی مصنوعی با بهترین ساختار ۷-۷-۷-۱ و قاعده یادگیری لونبرگ- مارکوارت با تابع آستانه تانژانت سیگموئید قادر بود بیشترین راندمان تبدیل شلتوک به برنج را با ضریب تبیین ۰/۹۶۵۵ و خطای شبکه ۰/۰۱۹ پیش‌بینی کند.



شکل ۹- تغییرات آهنگ خشک شدن ورقه سیب‌زمینی در مقابل زمان در توان‌های مختلف تابش لامپ مادون قرمز طی فرآیند خشک کردن مادون قرمز- خلاصاً

نتایج حاصل از به کارگیری شبکه عصبی در پیش‌بینی زمان خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی نشان داد که بهترین توپولوژی با چیدمان ۱-۹-۱۱-۴ (۴ نورون در لایه ورودی، تعداد نورون در دو لایه پنهان به ترتیب ۱۱ و ۹ و تعداد نورون در لایه خروجی ۱)، الگوریتم آموزش لونبرگ مارکوارت (lm) و تابع آستانه تانژانت سیگموئید (Tan) و لگاریتمی (Log) با تعداد تکرار (Epoch) ۶۴ حاصل گردیده است. همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود ساختار شبکه عصبی با دو لایه پنهان با تعداد نورون‌های متفاوت، دارای ضریب همبستگی بالاتر و میزان خطای کمتری نسبت به سایر ساختارهای شبکه عصبی می‌باشد. مدت زمان همگرا شدن شبکه عصبی مورد نظر ۳۶/۸۲ ثانیه می‌باشد که بیانگر قابلیت بالای شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی با زمان خشک کردن است که در سیستم‌های خشک‌کن مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب همبستگی (R) کل چیدمان مذکور که هر سه

(X3) و محتوای رطوبت (X4) در مدل‌های رگرسیون خطی و چند جمله‌ای از نوع درجه دو به ترتیب توانسته‌اند ۸۱/۹٪ و ۸۷٪ تغییرات پیش‌بینی مدت زمان لازم برای خشک کردن را توضیح دهند.

با استناد به ضرایب به دست آمده از مدل رگرسیون خطی و مدل رگرسیون غیرخطی چند متغیره، پیش‌بینی مدت زمان لازم برای خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی طبق روابط موجود در جدول (۵) تخمین زده شد.

شکل (۱۱) انطباق زمان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی با مقادیر واقعی مربوط به بهترین توپولوژی (۱-۹-۱۱-۴) را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که انطباق خوبی بین خروجی‌های حاصل از شبکه و خروجی‌های حاصل از آزمایش مشاهده می‌شود به این صورت که یکسان‌ترین زمان پیش‌بینی شده نسبت به زمان واقعی در شرایط آزمایشگاهی، مربوط به شماره الگوی ۲۲۹ بوده است در این الگو تفاوت هر دو زمان ناچیز گزارش شده است.

نتایج تجزیه کوواریانس بر مبنای آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی جهت اندازه‌گیری مدت زمان لازم برای فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی در جدول (۴) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اثر متقابل سه عامل ضخامت ورقه، توان لامپ مادون قرمز و فشار مطلق در سطح ۱٪ بر زمان خشک کردن بسیار معنی‌دار بوده است. رطوبت اولیه در صفت اصلی (مدت زمان انجام آزمایش) اثر می‌گذارد و چون دارای تغییرات نامنظمی می‌باشد بر آزمایش‌ها نیز به‌طور نامنظم اثر می‌گذارد لذا متغیر رطوبت اولیه به عنوان کوواریت در نظر گرفته شد.

در آزمون‌های آماری در صورتی که متغیرها کمی باشند، جهت پیش‌بینی یک متغیر وابسته بر اساس یک یا چند متغیر مستقل از آزمون رگرسیون خطی ساده یا غیرخطی استفاده می‌شود. نتایج استفاده از رگرسیون‌های خطی و غیر خطی چند متغیره در این پژوهش نشان داد که اثر چهار عامل ضخامت ورقه (X1)، میزان فشار مطلق (X2)، توان لامپ مادون قرمز

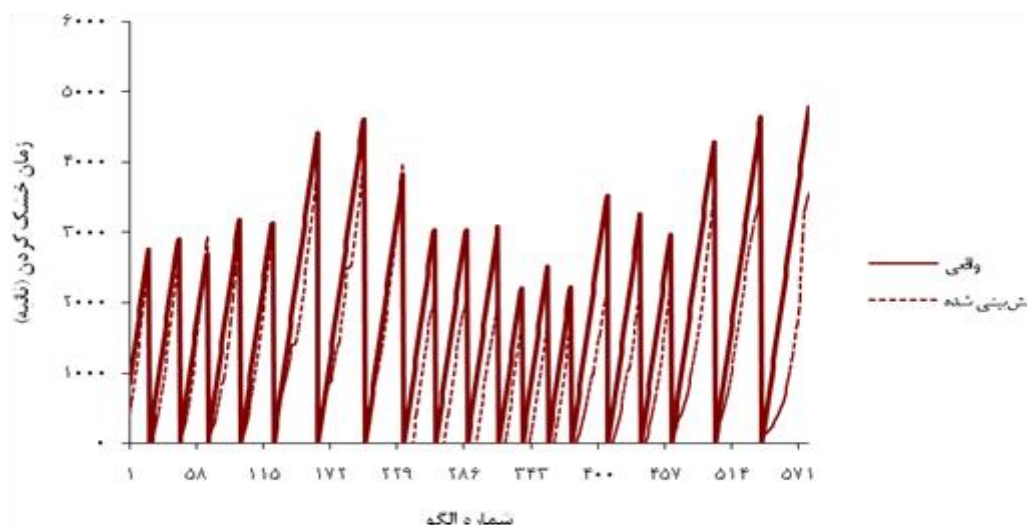
جدول ۴- تجزیه کوواریانس تاثیر ضخامت ورقه، فشار مطلق، توان لامپ مادون قرمز و اثرات متقابل آن‌ها بر مدت زمان خشک کردن

| منبع تغییرات | درجه آزادی | مجموع مربعات | میانگین مربعات | F |
|------------------------------------|------------|---------------|----------------|-----------------------|
| ضخامت ورقه | ۲ | ۲۶۸۲۵۲۷۴/۹۹۳ | ۱۳۴۱۲۶۳۷/۴۹۶ | ۱۷۹/۰۵۱۷** |
| فشار مطلق | ۳ | ۳۳۴۵۶۵۴۶/۸۸۲ | ۱۱۱۵۲۱۸۲/۲۹۴ | ۱۴۸/۸۷۵۸** |
| توان لامپ | ۲ | ۲۷۹۰۰۲۱۷/۹۳۹ | ۱۳۹۵۰۱۰۸/۹۷۰ | ۱۸۶/۲۲۶۶** |
| ضخامت ورقه × فشار مطلق | ۶ | ۱۲۵۸۲۱۲/۰۳۰ | ۲۰۹۷۰۲/۰۰۵ | ۲/۷۹۹۴* |
| ضخامت ورقه × توان لامپ | ۴ | ۶۸۳۰۸۱/۱۶۱ | ۱۷۰۷۷۰/۲۹۰ | ۲/۲۷۹۷ ^{n.s} |
| فشار مطلق × توان لامپ | ۶ | ۳۱۲۹۹۷۶/۶۸۳ | ۵۲۱۶۶۲/۷۸۱ | ۶/۹۶۳۹** |
| ضخامت ورقه × فشار مطلق × توان لامپ | ۱۲ | ۸۷۰۴۶۱۶/۵۵۸ | ۷۲۵۳۸۴/۷۱۳ | ۹/۶۸۳۵** |
| کوواریت (محتوای رطوبت اولیه) | ۱ | ۱۳۱۲۲۰/۹۲۳ | ۱۳۱۲۲۰/۹۲۳ | ۱/۷۵۱۷ ^{n.s} |
| اشتباه | ۷۱ | ۵۳۱۸۵۶۱/۵۲۱ | ۷۴۹۰۹/۳۱۷ | |
| کل | ۱۰۷ | ۱۰۷۴۰۷۷۰۸/۶۹۰ | | |

*اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۵٪، **اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۱٪ و n.s عدم وجود اختلاف معنی‌دار

جدول ۵- معادلات رگرسیون خطی و غیرخطی چند متغیره در پیش‌بینی مدت زمان خشک کردن

| مدل | ضریب تبیین | معادله رگرسیونی چند متغیره |
|---------|------------|---|
| خطی | ۰/۸۱۹ | $T = 4368.077 + 322.521 * X1 - 2.984 * X2 - 6.252 * X3 - 45.502 * X4$ |
| درجه دو | ۰/۸۷۰ | $T = pr1 + pr2 * X1 + pr3 * X2 + pr4 * X3 + pr5 * X4 + pr6 * X1^2 + pr7 * X2^2 + pr8 * X3^2 + pr9 * X4^2$ |

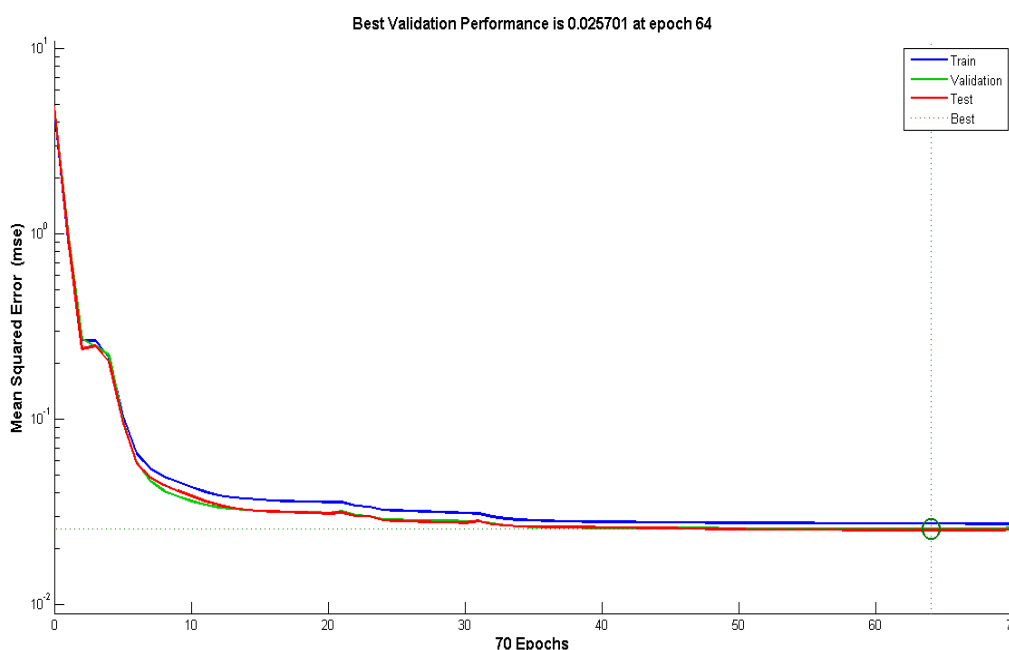


شکل ۱۱- انطباق زمان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی آموزش دیده با مقادیر واقعی

در شکل (۱۲) روال آموزش در صورتی که خطای مجموعه‌ی ارزیابی در ۶ تکرار متوالی افزایش یابد، متوقف می‌شود. این توقف در تکرار ۶۴ رخ داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای میانگین مربعات مقدار کوچکی است و خطای مجموعه آموزش، ارزیابی و آزمایش دارای رفتار مشابهی هستند؛ تا تکرار ۷۰، بهترین کارایی شبکه در مورد داده‌های ارزیابی به وقوع پیوسته است و هیچ بیش‌برازشی رخ نداده است.

جدول ۶- پارامترهای مدل غیرخطی از نوع درجه دوپارامتر

| مقدار | خطای استاندارد |
|-------|----------------|
| pr1 | ۵۱۸۵/۷۶۳ |
| pr2 | ۶۰۴/۸۴۸ |
| pr3 | -۱۲/۳۲۱ |
| pr4 | -۳۰/۶۱۷ |
| pr5 | -۲/۵۳۴ |
| pr6 | -۶۹/۷۵۵ |
| pr7 | ۰/۰۶۸ |
| pr8 | ۰/۰۸۲ |
| pr9 | -۰/۴۸۵ |



شکل ۱۲- روند آموزش شبکه عصبی در بهترین چیدمان با افزایش دوره یادگیری

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک ابزار قدرتمند، می‌تواند پارامترهای اساسی فرآیند خشک کردن را با دقت بالایی تخمین بزند. مناسب‌ترین ساختار شبکه عصبی جهت پیش‌بینی مدت زمان لازم برای خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی با توپولوژی ۴-۱۱-۹-۱ به همراه توابع فعال‌سازی تانژانت سیگموئید و لگاریتمی با ضریب تبیین ۰/۹۷۳۲ بهترین نتایج را نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی و غیر خطی بکار رفته در این تحقیق ارائه نموده است. در رابطه با چروکیدگی نیز می‌توان بیان داشت که در ضخامت‌های کمتر به علت اینکه زمان خشک شدن ورقه سیب‌زمینی کوتاه‌تر و سرعت تبخیر آن سریعتر بوده در نتیجه تغییرات سطحی بیشتری در ورقه دیده شده است.

REFERENCES

- AOAC. (1990). Official Methods of Analysis, No. 934-06. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- Eskandari Cherati, F., Shekofteh, M. & Hosseinpur, Y. (2013). The study shrinkage potato slices during drying of thin layer. *7th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. Shiraz. (in Farsi)
- Farkas, I., Reményi, P., & BirÓ, B. (2000). A neural network topology for modeling grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26, 147-158.
- Heristev, R.M. (1998). *The ANN book*. GNU Public License. USA.
- Khoshtaghaza, M.h., Amiri chajjan, R., Montazer, G.h. & Minaei, S. (2008). Prediction of head rice yield in fixed bed drying using artificial neural networks. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 8 (2), 135-156. (in Farsi)
- Leeratanarak, N., Devahastin, S. & Chiewchan, N. (2006). Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques. *Journal of Food Engineering*, 77, 635-643
- Mansouri, Y., Minaei, S. & Tavakoli hashtjin, T. (2007). Evaluation of determining the area of agricultural and food products from digital images. *Journal of Food Science and Technology*, 3 (1), 41-57. (in Farsi)
- Menhaj, M.B. (2009). *Fundamentals of neural networks (computational intelligence)*. Volume 1, 8th Edition. Publishing Center, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic). 715 pages. (in Farsi)
- Sablani, S.S. & Mujumdar, A.S. (2006). *Drying of potato, sweet potato, and other roots*. Handbook of Industrial Drying. Chapter 27.
- Shaygani soltan pour, R., Golmohammadi, A.S., Farahpour, P. & Khaliphe, A. (2011). Development of a model to predict the drying time during the drying process using banana artificial neural network. *First International conference on modelling of plant, soil, water and air*. International Centre for Science and Advanced Technology and Environmental Sciences. Shahid Bahonar University of Kerman. (in Farsi)
- Tripathy, P. & Kumar, S. (2008). Neural network approach for food temperature prediction during solar drying. *International Journal of Thermal Science*, 48, 1452-1459.
- Wang, Z., Zhu, W., Xu, D. & Du, J. (2014). Measurement and Study on Drying Shrinkage Characteristic of Tobacco Lamina Based on Computer Vision. *International Federation for Information Processing*. Part 1, 419, 306-314.
- Yadollahinia, A. & M. Jahangiri. (2009). Shrinkage of potato slice during drying. *Journal of Food Engineering*, 99, 52-58.

با توجه به شبکه عصبی انتخاب شده جهت پیش‌بینی زمان خشک کردن سیب‌زمینی که به صورت ۴-۱۱-۹-۱ می‌باشد، ماتریس وزن برای بردار ورودی به لایه پنهان اول یک ماتریس هسین ۴×۱۱ (اتصال ۴ نورون ورودی به ۱۱ نورون لایه پنهان) و برای لایه پنهان اول به لایه پنهان دوم به صورت یک ماتریس هسین ۹×۱۱ (اتصال ۱۱ نورون لایه پنهان اول به ۹ نورون لایه پنهان دوم) همچنین ماتریس وزن مربوط به لایه پنهان دوم به لایه خروجی به صورت ماتریس هسین ۱×۹ (اتصال ۹ نورون لایه پنهان دوم به ۱ نورون لایه خروجی) خواهند بود. علاوه بر این، ماتریس بایاس برای بردار ورودی به لایه پنهان اول به صورت یک ماتریس هسین ۱×۱ و برای لایه پنهان اول به لایه پنهان دوم به صورت یک ماتریس هسین ۹×۱ همچنین بردار بایاس لایه پنهان دوم به لایه خروجی نیز به صورت یک ماتریس هسین ۱×۱ می‌باشد.