

پیش‌بینی و مدل‌سازی محتوای رطوبتی توت‌سفید در فرآیند خشک شدن با استفاده از مدل‌های ریاضی و شبکه عصبی مصنوعی

محمد رضا اصغری^۱، رحیم ابراهیمی^{۲*}، داود قنبریان^۳ و بهرام حسین‌زاده سامانی^۴

چکیده

توت‌سفید یکی از میوه‌های سرشار از قند مفید است و خشک‌کردن یکی از راه‌های نگه‌داری این محصول محسوب می‌شود. بررسی روند کاهش محتوای رطوبتی برای پی بردن به زمان و شرایط مناسب خشک شدن محصول ضروری است. در این پژوهش توت‌سفید با استفاده از خشک‌کن جریان هوای گرم در سه سطح دما (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و سه سطح سرعت جریان هوا (۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه) انجام شد. نتایج مقایسه داده‌های افت رطوبت اندازه‌گیری شده با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریاضی نشان داد که مدل پیچ با توجه به R^2 و میزان RMSE پایین می‌تواند برای توصیف و پیش‌بینی سینتیک خشک کردن توت‌سفید به کار رود. نتایج مدل‌سازی با شبکه عصبی نشان داد مدل پیشرو با الگوریتم‌های یادگیری (Trainlm) با ساختار (۱-۲۵-۴) با تابع آستانه (Tansig و Logsig) در مقایسه با توپولوژی‌های دیگر دقت بهتری را ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توت‌سفید، خشک‌کن، شبکه عصبی مصنوعی، محتوای رطوبتی، مدل‌سازی ریاضی.

ارجاع: اصغری م. ر. ابراهیمی ر. قنبریان د. و حسین‌زاده سامانی ب. ۱۳۹۵. پیش‌بینی و مدل‌سازی محتوای رطوبتی توت‌سفید در فرآیند خشک شدن با استفاده از مدل‌های ریاضی و شبکه عصبی مصنوعی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۵(۱): ۲۷-۳۶.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: rahim.ebrahimi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹

مقدمه

ایران از دیرباز به دلیل موقعیت آب و هوایی خاص یکی از بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های خشکبار در دنیا بوده است. خشکبار یکی از فرآورده‌های پرمصرف و با ارزش در جهان تلقی می‌شود. در این میان، توت از خانواده (*Moraceae*) و شامل ۲۴ گونه و حداقل ۱۰۰ وارپته شناخته شده است. در ایران سه گونه توت به نام‌های توت‌سفید (*Morus alba*)، توت سیاه (*Morus nigra*) و توت قرمز (*Morus rubra*) با وارپته‌های زیاد وجود دارد. توت‌های شسته نشده را می‌توان چند روز در یخچال نگهداری کرد ولی غالباً از خشک کردن به عنوان روش مؤثر برای نگهداری آن استفاده می‌شود (دوک، ۱۹۸۳ و کرولیس و همکاران، ۲۰۰۵). در ایران این محصول بیشتر به روش سنتی خشک می‌شود که صرف‌نظر از مشکلات بهداشتی، این شیوه خشک کردن به شرایط آب و هوا وابسته است (جوین، ۲۰۰۶ و خین و همکاران، ۲۰۰۷). روش خشک کردن مکانیکی ضمن سرعت بخشیدن به فرآیند خشک شدن، شرایط بهداشتی خوبی را به همراه دارد. بسته به نوع ماده غذایی و بافت آن سیستم‌های خشک‌کن مختلفی طراحی شده‌اند. یکی از این سیستم‌ها، خشک‌کن جریان هوای گرم است که در این پژوهش از این نوع خشک‌کن استفاده شده است. پژوهش‌های زیادی برای مدل کردن فرآیند خشک کردن انجام شده است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

کاوه و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی خشک شدن توت‌سفید را با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز- جابه‌جایی در سه دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای ۰/۴ متر بر ثانیه و توان‌های مختلف مادون قرمز انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل میدلی و همکاران بهترین مدل برای توصیف رفتار خشک شدن لایه نازک توت در این خشک‌کن است. دویماز (۲۰۰۴b) سینتیک خشک شدن توت‌سفید در خشک‌کن هوای گرم را بررسی کرد و با مقایسه نتایج با ۶ مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن محصولات، به این نتیجه رسید که مدل لگاریتمی منحنی‌های خشک شدن را بهتر از دیگر معادلات توصیف می‌کند. امروزه با توسعه سریع فناوری پردازش رایانه‌ای و ایجاد نرم‌افزارهای مربوطه، از فناوری هوش مصنوعی برای حل مسائل مربوط به مدل‌سازی سامانه‌ها و پیش‌بینی فرآیندها استفاده می‌شود (ساسیلیک

و الیکن، ۲۰۰۶). یکی از روش‌های هوش مصنوعی که در سطح وسیعی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترها در فرآیندهای خشک کردن استفاده می‌شود، شبکه‌های عصبی مصنوعی است که در این پژوهش از آن برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن توت استفاده شده است. پژوهش‌گران بسیاری برای پیش‌بینی نسبت رطوبت و تغییرات کیفی در محصولات کشاورزی از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کرده‌اند به عنوان نمونه زارعین و جلیلیان تبار (۲۰۱۴) در پژوهش مدل‌سازی خشک شدن توت‌سفید در آون مایکروویو را با کمک شبکه‌های عصبی را انجام دادند و نتایج آن‌ها نشان داد که شبکه‌های عصبی می‌تواند پیش‌بینی فرآیند خشک شدن توت‌سفید را با دقت بالایی انجام دهد. همچنین ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی خشک شدن لایه‌های نازک موز را مدل‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد شبکه عصبی با الگوریتم یادگیری Levenberg-Marquardt تابع انتقال sigmoidal با ۲۰ نرون در اولین لایه پنهان و ۱۰ نرون در لایه پنهان دوم بهترین برآورد را در مدل کردن رفتار خشک شدن این محصول داشته است. با توجه به موارد ذکر شده، این پژوهش با هدف پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک شدن توت‌سفید با استفاده از شبکه عصبی و مدل‌های ریاضی و مقایسه‌ی آن‌ها برای تعیین زمان رسیدن به محتوای رطوبتی مناسب و جلوگیری از صرف انرژی بیشتر انجام شد.

مواد و روش‌ها

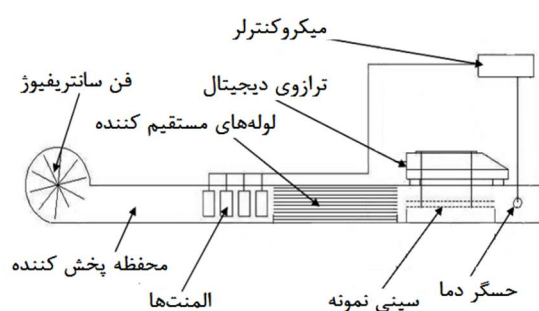
آماده‌سازی نمونه

نمونه‌های توت‌سفید از بازار محلی در شهرکرد خریداری شد و توت‌های نارس و خراب به صورت دستی جدا شدند. سپس نمونه‌های سالم با آب ۱۵ درجه سلسیوس شسته و در ظروف مشبک قرار داده شده تا آب بجا مانده در سطح محصول خشک شده و بر محتوای رطوبتی محصول تأثیر نداشته باشد. نمونه‌ها برای آماده‌سازی و هم‌دمایی اولیه قبل از انجام آزمایش‌ها، در یخچال با دمای ۴+ درجه سلسیوس نگهداری شدند. شایان ذکر است تلاش شد نمونه‌های یکسان و هم‌اندازه برای آزمایش انتخاب شوند.

تعیین میزان محتوای رطوبت نسبی

برای تعیین رطوبت اولیه توت‌سفید، نمونه‌های ۷۰ گرمی

شدند. سپس نمونه‌های توت‌سفید روی بستر خشک‌کن قرار گرفته و جرم نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۲۰ دقیقه‌ای تا رسیدن به رطوبت تعادلی، اندازه‌گیری و در رایانه ثبت شد. دما و رطوبت نسبی محیط اطراف خشک‌کن از متغیرهای تعیین کننده در خشک کردن مواد غذایی هستند. از این رو در هر آزمایش دما و رطوبت نسبی هوای اطراف خشک‌کن به ترتیب با استفاده از دماسنج دیجیتال Testo 925 با دقت ± 0.1 C° و رطوبت سنج Testo 400 با دقت ± 0.1 اندازه‌گیری و ثبت شد. در طول آزمایش‌های خشک کردن، محدوده میانگین تغییرات دمای محیط 28 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا 15 ± 5 درصد تعیین شد. تحلیل آماری به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در دو سطح رطوبت اولیه (1 ± 0.85 ٪ و 1 ± 0.80 ٪) در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت‌های هوای ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه انجام شد (بیلماز و همکاران، ۲۰۱۵؛ زمپلیکاس و همکاران، ۲۰۱۴). تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 17 انجام و کلیه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه شد.



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن آزمایشگاهی جریان هوای گرم

سینتیک خشک کردن

مقدار ضریب‌های ثابت ۱۰ مدل توصیفی خشک شدن محصولات کشاورزی (جدول ۱)، (مانند: n و k , a , b , c) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن توت‌سفید و به کمک ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار MATLAB برازش شدند و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار (R^2), (χ^2) و (RMSE) استفاده شد به این ترتیب مدلی که R^2 بیشتر و χ^2 و RMSE کمتری را داشت به عنوان بهترین مدل در تخمین نسبت رطوبت در فرآیند معرفی شد (لاهاسانی و همکاران، ۲۰۰۴).

به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و خشک شدند (حسینی، ۱۳۸۶) به طوری که تغییر وزنی بین دوبار توزین مشاهده نشد. این کار در ۳ تکرار انجام شد و از رابطه (۱) برای تعیین میزان رطوبت اولیه بر پایه تر استفاده شد (ارسلان و همکاران، ۲۰۰۴). رطوبت اولیه بر پایه تر برای توت‌سفید تازه برداشت شده 1 ± 0.85 ٪ محاسبه شد و رطوبت اولیه نمونه‌هایی که ۲۴ ساعت از برداشت آن‌ها می‌گذشت 1 ± 0.80 ٪ بر پایه تر به دست آمد.

$$M_d = \frac{W_d - M_w}{W_w} * 100 \quad (1)$$

که در آن (M_w) میزان رطوبت بر پایه تر، (W_d) جرم خشک محصول و (W_w) جرم تر محصول است.

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) گزارش شده است (آکپینار و همکاران، ۲۰۰۳)، نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن از رابطه (۲) محاسبه شد (دویماز، ۲۰۰۴b):

$$M_R = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن، (MR) نسبت رطوبت، (M) رطوبت در لحظه جاری بر پایه خشک، (M_0) رطوبت اولیه، (M_e) رطوبت تعادلی است. برای محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند مقدار رطوبت تعادلی در مقایسه با رطوبت اولیه و رطوبت جاری بسیار کوچک بوده و از رابطه حذف می‌شود (کایا و همکاران، ۲۰۰۸) بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) ساده می‌شود:

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (3)$$

نحوه اجرای آزمایش

برای انجام آزمایش‌ها از خشک‌کن جریان هوای گرم شکل ۱ استفاده شد، به این صورت که نمونه‌های مورد آزمایش در وسط کانال خشک‌کن، روی ظروفی که از توری ساخته شده بود و روی ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم که در زیر و خارج از کانال تعبیه شده، قرار داده شدند. خشک‌کن آزمایشگاهی مورد استفاده دارای دمنده سانتریفیوژ بوده که هوای گرم را به صورت موازی بر بستر مواد جریان می‌دهد. برای شروع آزمایش ابتدا دستگاه به مدت ۱۵ دقیقه به حالت کار درآمده تا دما و سرعت هوای خشک‌کن ثابت

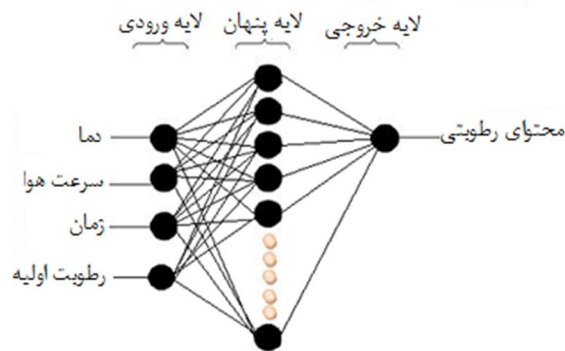
جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای توصیف سینتیک خشک کردن توت‌سفید

منبع	نام مدل	فرمول
یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$
صیاد، ۱۳۸۴	لگاریتمی	$MR = a \times \exp(-kt) + c$
دویماز، ۲۰۰۴	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$
یالدیز و همکاران، ۲۰۰۱	توترم نمایی	$MR = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-kat)$
لاهباسنی و همکاران، ۲۰۰۴	وانگ و سینگ	$MR = 1 + a \times t + b \times t^2$
لاهباسنی و همکاران، ۲۰۰۴	دیفوزیون	$MR = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-kbt)$
صیاد، ۱۳۸۴	هندرسون و پابیس توسعه یافته	$MR = a \times \exp(-kt) + b \times \exp(-gt) + c \times \exp(-ht)$
لاهباسنی و همکاران، ۲۰۰۴	میدلی و همکاران	$MR = a \times \exp(-kt^n) + bt$
تغرل و پهلوان، ۲۰۰۴	ورما و همکاران	$MR = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-gt)$
دویماز، ۲۰۰۴	هندرسون و پابیس	$MR = a \times \exp(-kt)$

مدل‌سازی شبکه عصبی

هر شبکه عصبی از لایه‌های ورودی، میانی یا مخفی و خروجی تشکیل شده است. در لایه ورودی، تعداد نرون به تعداد عوامل اولیه و در لایه خروجی به تعداد عوامل نهایی مورد نظر بستگی دارد. لایه مخفی می‌تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شود که تعداد نرون‌های هر لایه آن متغیر است و به‌طورعموم به روش سعی و خطا تعیین می‌شود (اسچالکوف، ۱۹۹۷). در این پژوهش چهار عامل دما، سرعت هوا، رطوبت اولیه و زمان (مدت زمانی که از شروع خشک شدن صرف شد تا نمونه‌ها به رطوبت تعادلی خود برسند) به عنوان چهار نرون در لایه ورودی و مقدار محتوای رطوبتی به عنوان تنها نرون در لایه خروجی مدل در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در مدل‌سازی شبکه عصبی تعیین ماتریس ورودی و خروجی بسیار مهم است، ابتدا داده‌ها فراخوانده شده و سپس برای هر تیمار عمل میانگین‌گیری انجام شد (خوش تقاضا و همکاران، ۱۳۹۵)، در ادامه ماتریس‌های ورودی و خروجی بر اساس شکل ۲ در نرم‌افزار شبکه مورد استفاده در این پژوهش شبکه‌های چندلایه پرسپترون (MLP) است که به دلیل سادگی و در عین حال دقت بالا، کاربرد زیادی در شبیه‌سازی خشک شدن داشته است (دایوهوف، ۱۹۹۰). از توابع آستانه مختلفی شامل تابع سیگموئیدی (logsig)، لگاریتمی (tansig) و خطی (purelin) و الگوریتم‌های آموزش همراه با نظارت، مانند الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت (trainlm) استفاده و نتایج آن‌ها مقایسه شد. در ابتدا داده‌های ورودی شبکه نرمال‌سازی شده و به صورت تصادفی به سه گروه آموزش (۷۰٪)، ارزیابی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شدند. نرخ آموزش (lr) برای تمامی حالت‌های ۰/۲ و

میزان مومنتوم ۰/۱ در نظر گرفته شد. کد مورد نیاز برای شبیه‌سازی شبکه عصبی با نرم‌افزار MATLAB R2012 توسعه داده شد. بهترین توپولوژی شبکه عصبی بر اساس دو معیار (R^2) و (MSE) مشخص شد. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن توت‌سفید را توصیف کند، توپولوژی است که دارای بیشترین (R^2) و کمترین مقدار (MSE) باشد. نحوه محاسبه (R^2) و (MSE) در سایر پژوهش‌ها ارائه شده است (نازقلیچی و همکاران، ۲۰۱۱). Excel ایجاد شد.



شکل ۲- معماری شبکه عصبی مصنوعی

نتایج و بحث

پس از به دست آوردن مقدار نسبت رطوبت در دما و سرعت‌های مختلف خشک کردن، منحنی‌های خشک کردن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش شدند. شکل ۳ منحنی‌های خشک شدن توت‌سفید در دماها و سرعت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با

نتایج بررسی اثر رطوبت اولیه، دما و سرعت جریان هوا بر زمان خشک کردن

پس از محاسبه زمان خشک شدن در شرایط مختلف آزمایش، داده‌های به دست آمده با آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک کاملاً تصادفی در سه تکرار با سه فاکتور رطوبت اولیه در دو سطح ($1 \pm 0.85\%$ و $1 \pm 0.80\%$) و دمای خشک‌کن در سه سطح (۵۰، ۶۰، ۷۰ درجه سلسیوس) و سرعت جریان هوا در سه سطح (۲، ۵، ۱۰ متر بر ثانیه) تجزیه و تحلیل شدند. بر اساس جدول ۲ اثر رطوبت اولیه، دما و سرعت جریان هوا بر روی مدت زمان خشک شدن در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در حالی که اثر متقابل دو پارامتر رطوبت اولیه و دما و دو پارامتر رطوبت اولیه و سرعت جریان هوا و همچنین اثر متقابل سه پارامتر رطوبت اولیه، دما و سرعت هوا معنی‌دار نشده است. همچنین فقط اثر متقابل دو پارامتر دما و سرعت جریان هوا در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است.

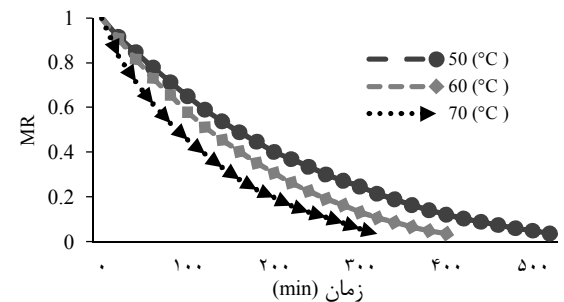
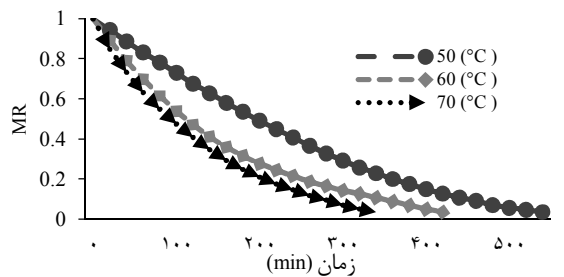
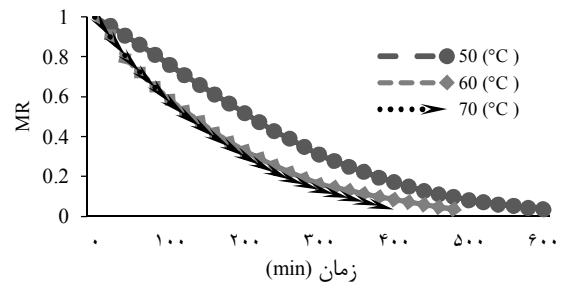
جدول ۲- تجزیه واریانس زمان بر اساس سه فاکتور رطوبت اولیه، سرعت هوا و دمای هوای خشک‌کن

زمان خشک شدن (min)		درجه آزادی	منابع تغییرات
F value	میانگین مربعات		
۱۵۲/۹۱۸ ^{ns}	۴۷۴/۰۷۴	۲	بلوک
۱۱۵/۲۰ ^{**}	۱۷۰۶۶/۶۶۷	۱	رطوبت اولیه
۱۱۱۵/۴۵ ^{**}	۱۶۵۲۵۱/۸۵۲	۲	دما
۱۱۷/۶۵ ^{**}	۱۷۴۲۹/۶۳۰	۲	سرعت
۱/۰۵ ^{ns}	۱۵۵/۵۵۶	۲	رطوبت × دما
۲/۷۵ [*]	۴۰۷/۴۰۷	۴	دما × سرعت
۱/۰۵ ^{ns}	۱۵۵/۵۵۶	۲	رطوبت × سرعت
۰/۷۵ ^{ns}	۱۱۱/۱۱۱	۴	رطوبت × دما × سرعت
	۱۴۸/۱۴۸	۳۶	خطای آزمایش

×× معنی دار در سطح ۱٪ و × معنی دار در سطح ۵٪ و ns عدم معنی‌دار

میانگین زمان خشک شدن بر اساس دماها و سرعت‌های مختلف با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد مقایسه شد و با توجه به نتایج جدول ۳ دماهای بالای خشک‌کن در مدت زمان خشک شدن محصول تأثیر بیشتری نسبت به سرعت جریان هوا داشته است به طوری که در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ۲/۵ متر بر ثانیه، زمان خشک‌شدن توت‌سفید ۶۲ درصد از دمای ۵۰ درجه سلسیوس با همان سرعت جریان هوای ۲/۵ متر بر ثانیه کوتاه‌تر است. همچنین زمان خشک شدن محصول در سرعت جریان هوای ۲/۵ متر بر ثانیه در دمای

پیشرفت زمان، محتوای رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش یافته است. منحنی آهنگ خشک شدن محصول در ابتدای فرآیند به دلیل تبخیر رطوبت سطحی با شیب زیادی به صورت نزولی و پس از این زمان به دلیل شروع نفوذ آب از درون ماده به سطح با شیب کمتری نزولی است، همچنین با افزایش دما، زمان خشک‌کردن به دلیل افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول کاهش می‌یابد (امیرنجات و خوش تقاضا، ۱۳۸۷) و اثر دما بر زمان خشک شدن نسبت به سرعت هوای خشک‌کن بیشتر بوده است. روند کاهش رطوبت تحت شرایط مختلف آزمایش نشان داد که در خشک‌کن جریان هوای گرم با افزایش سرعت جریان هوا، زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده آن است که با افزایش سرعت جریان هوا فشار بخار محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری روبرو خواهد بود و با سرعت بیشتری خارج می‌شود (تغرل و پهلوان، ۲۰۰۴).



شکل ۳- منحنی محتوای رطوبتی خشک شدن توت‌سفید در دماهای مختلف و سرعت‌های الف) ۱/۵، ب) ۲ و ج) ۲/۵ متر بر ثانیه

جدول ۳- مقایسه میانگین زمان خشک شدن در سرعت‌ها و دماهای مختلف هوای خشک‌کن

زمان خشک شدن (min)			دما (°C)
۲/۵ (m/s)	۲ (m/s)	۱/۵ (m/s)	
۵۲.°c	۵۴.°b	۶۰.°۳ ^a	۵۰
۴۰.°c	۴۲.°۷ ^d	۴۸.°۷ ^d	۶۰
۳۲.°۷ ^h	۳۴.°g	۴۰.°۳ ^f	۷۰

استخراج مدل سینتیک خشک شدن توت‌سفید

برای توصیف سینتیک خشک شدن توت‌سفید در رطوبت اولیه $±1.85\%$ و $±1.80\%$ نسبت رطوبت در سه دمای هوای عبوری ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سرعت هوای ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه به دست آمد و با هر یک از مدل‌های جدول ۱ برازش داده شد. ضریب‌ها و شاخص‌های آماری بهترین مدل‌ها از بین مدل‌های مذکور در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

۷۰ درجه سلسیوس نسبت به سرعت جریان هوای ۱/۵ متر بر ثانیه در همان دما ۲۴ درصد کوتاه‌تر است. در روش خشک کردن با جریان هوای گرم، زمان لازم برای گرم کردن کل جرم محصول تا دمای تبخیر از طریق رسانای گرما به درون آن، به دلیل هدایت گرمایی پایین آن، طولانی است و از طرفی چون خشک‌شدن محصول ابتدا در لایه خارجی آن انجام می‌شود، سطح ماده خشک شده و نفوذپذیری آن کاهش پیدا می‌کند. این لایه سخت شده، مانعی در مقابل پخش رطوبت در سطح محصول می‌شود و خروج رطوبت را از محصول طولانی می‌کند (امیرنجات و خوش تقاضا، ۱۳۸۷).

جدول ۴- مقایسه مدل‌های برازش شده با رطوبت $±1.85\%$ در دماها و سرعت‌های هوای مختلف

سرعت	نام مدل	۷۰°C			۶۰°C			۵۰°C		
		RMSE	R ²	χ ²	RMSE	R ²	χ ²	RMSE	R ²	χ ²
۱/۵	پیچ	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۰۹۵
	لگاریتمی	۰/۱۵۶۰	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۴۰	۰/۳۹۲	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۰۳۶	۰/۹۹۶۴	۰/۰۱۹۱
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۱۴	۰/۹۹۸۴	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۰۴۶	۰/۹۹۸۹	۰/۰۲۱۶	۰/۰۰۰۲۳	۰/۹۹۷۷	۰/۰۱۵۱
۲	پیچ	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱۱۷	۰/۰۰۰۱۶	۰/۹۹۹۷	۰/۰۱۳۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۹۵	۰/۰۱۴۲
	لگاریتمی	۰/۰۶۳۰	۰/۹۹۸۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۸۷	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۹۹۸۲	۰/۰۱۳۳
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۹۴۷	۰/۰۲۱۹	۰/۰۰۱۳	۰/۹۸۳۶	۰/۰۳۶۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۶۶
۲/۵	پیچ	۰/۰۰۰۵۵	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱۶۱	۰/۰۰۰۲۶	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۱۳
	لگاریتمی	۰/۶۹۹۴	۰/۹۹۲۳	۰/۰۰۸۴	۰/۳۲۹۰	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۵۷	۰/۱۰۹۰	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۳۳
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۹۸۹۴	۰/۰۳۰۸	۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹۱۹	۰/۰۲۶۵	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۹۹۷۳	۰/۰۱۵۵

جدول ۵- مقایسه مدل‌های برازش شده با رطوبت $±1.80\%$ در دماها و سرعت‌های هوای مختلف

سرعت	نام مدل	۷۰°C			۶۰°C			۵۰°C		
		RMSE	R ²	χ ²	RMSE	R ²	χ ²	RMSE	R ²	χ ²
۱/۵	پیچ	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۷	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۹۹۴	۰/۰۲۱
	لگاریتمی	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۸۷	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۹۹۸۶	۰/۰۱۱۶
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۱	۰/۹۸۷۹	۰/۰۳۲۶	۰/۴۴۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۷۶
۲	پیچ	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۶	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۹۹۴	۰/۰۱۹۳
	لگاریتمی	۰/۰۱۳۰	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۸۸	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۰۰۲	۰/۹۹۷۵	۰/۰۱۵۴
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۶۷	۰/۰۱۷۷	۰/۰۰۰۰۲	۰/۹۹۷۷	۰/۰۱۴۴	۰/۰۰۰۰۹	۰/۹۹۹۰	۰/۰۰۹۸
۲/۵	پیچ	۰/۰۰۰۰۶	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹۹۰	۰/۰۲۸۲	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۱	۰/۰۲۴۶
	لگاریتمی	۰/۰۷۰۲	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۸۴	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۹۲
	وانگ و سینگ	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۸۸۸	۰/۰۳۲۸	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۰۴	۰/۰۲۸۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۳۱	۰/۰۱۳۷

توت‌سفید در خشک‌کن خورشیدی داشت، مدل لگاریتمی را به عنوان بهترین مدل اعلام کرد. در پژوهشی که پژوهش‌گران روی خشک شدن میوه‌های آبدار داشتند، مدل پیچ در پیش‌بینی فرآیند خشک شدن میوه‌های آبدار موفقیت‌آمیز تعیین کردند (کاراتانوس و بلسیتیس، ۱۹۹۹).

نتایج شبکه عصبی

برای بررسی عملکرد شبکه MLP از توپولوژی‌های مختلف با تعداد نرون‌های مختلف استفاده شد و این توپولوژی‌ها کاملاً به صورت سعی و خطا انتخاب و شبیه‌سازی شدند. در مرحله اول بعد از آموزش شبکه، بهترین توپولوژی بر اساس MSE و R^2 از میان توپولوژی‌های مختلف به دست آمد. جدول ۶ خلاصه‌ای از بهترین نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

در تمامی آزمایش‌ها، از بین ۱۰ مدل جدول ۱ سه مدل پیچ، وانگ و سینگ و لگاریتمی به عنوان مدل‌های مناسب انتخاب شدند. با عمل میانگین‌گیری از بین این سه مدل، مدل پیچ به عنوان بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک شدن توت‌سفید تعیین شد و مدل‌های لگاریتمی و وانگ و سینگ بعد از مدل پیچ همخوانی خوبی نسبت به دیگر مدل‌ها برای توصیف سینتیک خشک شدن توت‌سفید داشتند. مقدار R^2 ، χ^2 و RMSE برای مدل پیچ برای رطوبت $\pm 1.85\%$ به ترتیب ۰/۹۹۹۸، ۰/۰۰۰۱۳ و ۰/۰۰۰۹ و برای رطوبت $\pm 1.80\%$ نیز به ترتیب ۰/۹۹۹۵، ۰/۰۰۰۱۹ و ۰/۰۱۵ بوده است.

پژوهش‌گران دیگری نیز در بررسی سینتیک خشک شدن توت سیاه با استفاده از پیش تیمارهای مختلف مدل پیچ را معرفی کرده‌اند (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۳). آکپینار (۲۰۰۸) در پژوهشی که روی مدل‌سازی خشک شدن

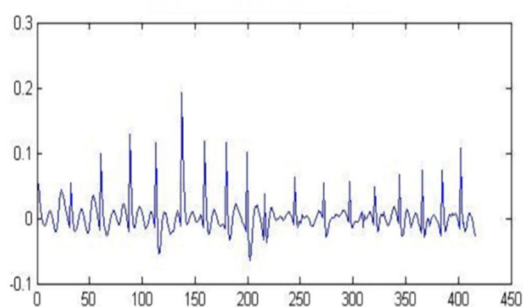
جدول ۶- نتایج ساختارهای مختلف شبکه عصبی خشک کردن توت‌سفید

تابع آستانه	قاعده آموزش	تعداد نرون‌ها لایه پنهان	خطای شبکه (MSE)		R^2	
			آموزش	ارزیابی	آموزش	ارزیابی
Log/Pur	Trainlm	۱۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹۹۷
Log/Pur	Trainlm	۱۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۹۳
Log/Pur	Trainlm	۲۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۹۹۹۹۷
Log/Pur	Trainlm	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱۳	۰/۹۹۹۹۳
Log/Tan	Trainlm	۱۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۹۹۹۹۸
Log/Tan	Trainlm	۱۸	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۹۶
Log/Tan	Trainlm	۲۰	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۹۹۷
Log/Tan	Trainlm	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۹۹۹۹۹
Tan/Pur	Trainlm	۱۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۳۸	۰/۹۹۹۸۲
Tan/Pur	Trainlm	۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۹۹۹۹۶
Tan/Pur	Trainlm	۲۰	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۹۹۷
Tan/Pur	Trainlm	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۹۹۹۹۸
Tan/Tan	Trainlm	۱۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۹	۰/۹۹۹۹۴
Tan/Tan	Trainlm	۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۹۹۸
Tan/Tan	Trainlm	۲۰	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۸	۰/۹۹۹۹۵
Tan/Tan	Trainlm	۲۵	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹۹۶

نتایج حاصل از به کارگیری شبکه عصبی با توپولوژی‌های مختلف نشان داد که بهترین توپولوژی دارای ساختاری دولایه (یک لایه پنهان و یک لایه خروجی) با معماری (۱-۲۵-۴)، از شبکه MLP با الگوریتم یادگیری لوبنبرگ-مارکوارت و توابع آستانه Logsig و Tansig بود. این توپولوژی تغییرات محتوای رطوبتی را با میزان

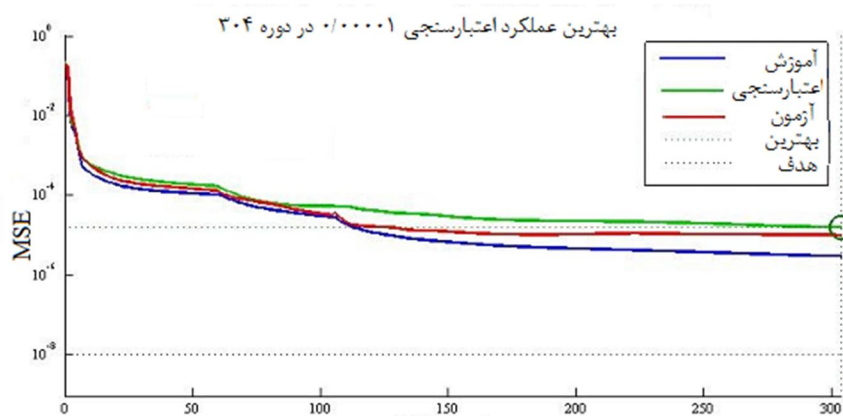
نتایج حاصل از به کارگیری شبکه عصبی با توپولوژی‌های مختلف نشان داد که بهترین توپولوژی دارای ساختاری دولایه (یک لایه پنهان و یک لایه خروجی) با معماری (۱-۲۵-۴)، از شبکه MLP با الگوریتم یادگیری لوبنبرگ-مارکوارت و توابع آستانه Logsig و Tansig بود. این توپولوژی تغییرات محتوای رطوبتی را با میزان

دارای دقت خوبی در تخمین رطوبت در هنگام خشک شدن است (خوش‌تقاضا و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل ۴- منحنی میزان خطای شبکه برای کل داده‌ها

($MSE=0/00001$) نشان از عملکرد خوب شبکه دارد. پژوهش‌گران در پژوهشی با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با الگوریتم پس‌انتشار خطا مشخص کردند که شبکه‌های عصبی به طور مؤثر قادر به پیش‌بینی خواص فیزیکی و شیمیایی خشک کردن آب اسپری شده توت سیاه و سفید هستند (فضائی و همکاران، ۲۰۱۳). در پژوهشی دیگر که روی پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک‌شدن لایه نازک قارچ خوراکی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی پس‌انتشار انجام شد، نتایج نشان داد که شبکه (MLP) با الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکوارت



شکل ۵- منحنی بهترین عملکرد اعتبارسنجی

مدل‌سازی ریاضی، مدل پیچیده‌تر از مدل‌های دیگر توانست رفتار خشک شدن توت‌سفید را توصیف کند. مدل پیچیده قادر بود رفتار خشک شدن نمونه‌های با محتوای رطوبتی $1 \pm 0.85\%$ را با توجه به مقادیر ($R^2=0/9998$) و ($RMSE=0/009$) بهتر از نمونه‌های با محتوای رطوبتی $1 \pm 0.80\%$ با توجه به مقدار ($R^2=0/9995$) و ($RMSE=0/01$) برآورد کند. برای مدل‌سازی روند خشک شدن توت‌سفید با شبکه عصبی ابتدا در هر تابع فعال‌سازی بهترین تفکیک داده‌ها تعیین شد، در فرآیند بعدی از بهترین ترکیب تقسیم‌بندی داده‌ها برای هر تابع فعال‌سازی استفاده و الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکوارت برای آموزش شبکه انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد شبکه با ساختار تک لایه با ۲۵ نرون در لایه پنهان و تابع فعال‌سازی

نتیجه‌گیری

مدل‌سازی ریاضی با توجه به بیشترین میزان ($R^2=0/9999$) و کمترین خطای نسبی ($MSE=0/000009$) نسبت به توپولوژی‌های دیگر دارای توان عملیاتی بالاتری در پیش‌بینی روند خشک شدن است. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌سازی ریاضی دارای دقت بالاتری در پیش‌بینی فرآیند خشک شدن است و شبکه عصبی به عنوان یک سیستم غیر خطی می‌تواند عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی خشک شدن محصول به عنوان یک روش غیرتخریبی و سریع در سیستم‌های کنترل اتوماتیک خشک کردن در مقیاسه با کنترل‌کننده‌های کلاسیک داشته باشد، که این امر می‌تواند به صرفه‌جویی در انرژی و زمان منجر شده و از طرف دیگر محصول نهایی مطلوب‌تری را ایجاد کند.

منابع

۱. امیرنجات ح. و خوش تقاضا م. ه. ۱۳۸۷. مدل‌سازی ریاضی خشک‌شدن لایه نازک قارچ خوراکی. پنجمین کنگره ملی مهندسی کشاورزی و مکانیزاسیون. ۴۲(۱): ۵۳-۶۱.
۲. حسینی ز. ۱۳۸۶. روش‌های متداول در تجزیه مواد غذایی. انتشارات دانشگاه شیراز. ۲۱۰ ص.
۳. خوش تقاضا م. ه. حسین‌زاده سامانی ب. فیاضی ا. و امیرنجات ح. ۱۳۹۵. پیش‌بینی محتوای رطوبتی خشک‌شدن لایه نازک قارچ خوراکی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی پس انتشار. فصلنامه علوم و صنایع غذایی. ۵۰(۱۳): ۱۷۱-۱۸۲.
۴. صیاد م. ۱۳۸۴. اثر دما و سرعت هوای خشک‌کن روی سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های سیب به صورت لایه نازک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۸۹ ص.
۵. کاوه م. امیری چایجان ر. و خیاطی س. ۱۳۹۲. بررسی خصوصیات خشک‌شدن توت‌سفید با استفاده از خشک‌کن مادون قرمز- جابجایی. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
6. Akpinar E. Midilli A. and Bicer Y. 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Energ Convers Manag.* 44(10): 1689-1705.
7. Akpinar E. K. 2008. Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *Journal of Mechanical Science and Technology.* 22(8): 1544-1553.
8. Arslan O. Erzen M. Sinan S. and Ozensoy O. 2004. Purification of mulberry (*Morus alba*) polyphenol oxidase by affinity chromatography and investigation of its kinetic and electrophoretic properties. *Food chemistry.* 88(3): 479-484.
9. Dayhoff J. E. 1990. *Neural Network Principles.* Prentice-Hall International, U.S.A.
10. Duke J. A. 1983. *Handbook of Energy Crops.* Centre for New Crops & Plants Products, Purdue University.
11. Doymaz I. 2004a. Convective air drying characteristic of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering.* 61(3): 359-364.
12. Doymaz I. 2004b. Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering.* 61(3): 41-346.
13. Ebrahimi M. A. Mohtasebi S. S. Rafiee. Sh. and Hoseinpour S. 2014. Modeling and Estimation of Banana Slice Browning during Drying using Artificial Neural Network. *International Journal of Research in Agricultural Sciences.* 1(1): 2348-3997.
14. Esmaeili Adabi M. Nikbakht A. M. Motevali A. and Mousavi Seyedi S. R. 2013. Investigation of Black Mulberry Drying Kinetics Applying Different Pretreatments. *Journal of Agricultural Science and Technology.* 15(1): 23-34.
15. Fazaeli M. Emam Z. Omid M. and Kalbasi A. 2013. Prediction of the Physicochemical Properties of Spray-Dried Black Mulberry (*Morus nigra*) Juice using Artificial Neural Networks. *Food Bioprocess Technol.* 6(2): 585-590
16. Guine R. 2006. Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioprocess Processing.* 84(3): 179-185.
17. Krulis M. Kuhnert S. Leiker M. and Rohm H. 2005. Influence of energy input and initial moisture on physical properties of microwave-vacuum dried strawberries. *European Food Research and Technology.* 221(6): 803-808.
18. Kaya A. Aydin O. and Dincer I. 2008. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). *Journal of Food Engineering.* 88(3): 323-330.
19. Khin M. M. Zhou W. and Yeo S. Y. 2007. Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating material and their textural properties. *Journal of Food Engineering.* 81(3): 514-522.
20. Karathanos T. and G Belessiotis. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried Fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 74(4):355- 361.
21. Lahsasni S. M. Kouhila. and Mahrouz. M. 2004. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering.* 29(2): 211-224.
22. Nazghelichi T. Kianmehr M. h. and Aghbashlo M. 2011. Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network. *Journal of food science and technology.* 48(5): 542-550.
23. Sacilik K. and Elicin. A. K 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering.* 73(3): 281-289.
24. Schalkoff R. J. 1997. *Artificial neural networks,* McGraw-Hill. 422 p.
25. Togrul I. T. and pehlivan D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetic of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering.* 65(3): 413-425.

26. Tzempelikos D. A. Vouros A. P. Bardakas A. V. Filios A. E. and Margaris D. P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 3: 79-85.
27. Yaldiz O. C. Ertekin and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26(5): 457-465.
28. Yilmaz F. M. Yuksekkaya S. Vardin H. and Karaaslan M. 2015. The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2(1): 1-8.
29. Zarein M. and Jaliliantabar F. 2014. ANN Modeling of White Mulberry Drying by Microwave Oven. *Advances in Environmental Biology*. 8(16): 172-178.