



مقایسه پیش‌بینی مدل‌های ریاضی و شبکه‌های عصبی در خشک‌کردن دانه انار

علی متولی^۱ - سعید مینایی^۲ - محمدهادی خوش تقاضا^۲ - محمد کاظمی^۱ - علی محمد نیکبخت^۳

دانشجوی کارشناسی ارشد و ۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس ۳- استادیار دانشگاه ارومیه

ali.motevali62@yahoo.com

چکیده

به منظور ارزیابی و انتخاب مدل مناسب برای روند خشک شدن دانه‌های انار به روش لایه نازک، ده مدل نیمه تئوری و تجربی با داده‌های آزمایشگاهی برازش شد. آزمایش‌ها در سه تیمار شاهد، پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰ و ۲۰۰ وات و در شش سطح دمایی ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ درجه سلسیوس و سه سرعت هوای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه انجام شد. شبکه‌های عصبی پیشرو برای تخمین میزان رطوبت دانه انار بکار گرفته شد. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل‌های ریاضی نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را با داده‌های بدست آمده دارد. مقایسه ضریب تعیین R^2 و MSE نشان داد که شبکه‌های عصبی پیش‌بینی بهتری نسبت به مدل‌های ریاضی دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی، شبکه‌های عصبی، خشک‌کردن لایه نازک، دانه انار

مقدمه

نگهداری مواد غذایی به روش خشک‌کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری می‌باشد. اگر چه خشک‌کردن به وسیله خورشید برای سالیان دراز روش رایج برای خشک‌کردن اکثر مواد غذایی بوده، اما به علت ملاحظات بهداشتی و اقتصادی با روش‌های مختلف از جمله خشک‌کردن با جریان هوای گرم جایگزین گردیده است (Das et al., 2004). در خشک‌کن لایه نازک شدت خشک‌شدن به عوامل زیادی از قبیل دمای هوا، سرعت (دبی) جریان هوا، رطوبت نسبی هوا، مدت زمان در معرض قرار گرفتن محصول در مقابل جریان هوا، فشار هوا، خصوصیات فیزیکی و ساختمانی محصول (رقم، اندازه، میزان رطوبت اولیه، سطح آزاد محصول) و نحوه قرارگیری محصول روی سینی (عمق دانه) بستگی دارد (عسگری اصلی ارده، ۱۳۸۴).

فرایند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین بسامدهای 300MHz و 300GHz نشان‌گر امواج مایکروویو است. برخلاف سیستم‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد (شیفمن، ۱۹۹۲). مطالعات زیادی در مورد خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از مایکروویو مانند خشک‌کردن دانه‌ها توسط ادو و اوتن (۱۹۹۶)، والد و همکاران (۲۰۰۲)، خشک‌کردن سبزیجات، لیتوین و همکاران (۱۹۹۸)، لین و همکاران (۱۹۹۸)، آلیباس (۲۰۰۶) و خشک‌کردن میوه‌جات، تولاسیداس و همکاران (۱۹۹۷)، فانیبو و اوهلسون

(۱۹۹۸) انجام شده است. هر چند مطالعات زیادی در مورد خشک کردن محصولات مختلف با استفاده از جریان هوای داغ و میکروویو وجود دارد اما مطالعات در مورد استفاده از میکروویو برای عملیات پیش تیمار در خشک کردن محصولات کشاورزی کم است.

یکی از جنبه‌های مهم فن آوری خشک کردن به خصوص برای فرآورده‌های صنعتی، مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن است. هدف از مدل‌سازی این است که مناسب‌ترین روش خشک کردن و همچنین بهترین شرایط عملیاتی را برای بدست آوردن یک محصول معین بتوان انتخاب کرد. (یداللهی‌نیا، ۱۳۸۵)

تاکنون مطالعات زیادی در مورد سینتیک خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی انجام شده است از جمله سیمال و همکاران (۲۰۰۵) خشک کردن کیوی، بوزکر (۲۰۰۶) خشک کردن زردآلو، دمیر و همکاران (۲۰۰۷) خشک کردن زیتون، دویماز و پالا (۲۰۰۳) خشک کردن ذرت، شارما و همکاران (۲۰۰۵) خشک کردن ورقه‌های نازک پیاز را مورد آزمایش قرار دادند.

یکی از مهمترین روش‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد که با الهام از مدل مغز انسان، ضمن اجرای فرآیند آموزش، اطلاعات مربوط به داده‌ها، در قالب وزن‌های شبکه ذخیره می‌کند، در واقع شبکه‌های عصبی روشی مبتنی بر پردازش اطلاعات و داده‌هاست. (البرزی؛ ۱۳۸۳).

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در سطح وسیعی برای شبیه سازی و پیش بینی پارامترهای مورد نیاز در فرآورده‌های خشک کردن در حال رشد و توسعه است. مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در مورد فرآورده‌هایی که تعریف دقیق و درک خاصی از آنها وجود ندارد، بسیار مؤثر عمل می‌کنند و قادر هستند که هر تابع ریاضی را با دقت قابل قبولی تخمین بزنند. کاهش تأثیر خطای داده‌ها و داده‌های از دست رفته و توانایی پیش‌بینی دو یا چند متغیر وابسته به طور همزمان از جمله مزیت‌های شبکه‌های عصبی است. همچنین نیاز به محاسبات طولانی برای حل معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش‌های عددی نیست، در حالی که در یک شبکه عصبی مصنوعی، نتایج به صورت ضرب ساده ماتریس ورودی در ماتریس وزن به دست می‌آید (Islam et al., 2003).

در زمینه فرآوری محصولات کشاورزی برای پیش بینی پارامترها به کمک شبکه‌های عصبی، تحقیقات زیادی بخصوص در مورد سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی انجام شده است. پیش‌بینی انتقال گرما و جرم در خشک کردن مگنو و کاساوا پرز و همکاران (۲۰۰۴)، مقایسه تخمین رفتار خشک شدن *Echinacea angustifolia* شبکه‌های عصبی با آنالیز رگرسیونی ارتورک و همکاران (۲۰۰۴)، پیش‌بینی فرآیند خشک شدن با کمک میکروویو بر مبنای شبکه عصبی مولینا (۲۰۰۵)، پیش‌بینی سینتیک خشک شدن با شبکه عصبی تومکازاک کامینسکی (۲۰۰۱)، استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی دمای غذا (محصول) در خشک‌کن‌های خورشیدی تریپسی و کومار (۲۰۰۹)، پیش‌بینی خشک شدن گوجه با شبکه عصبی موقرنژاد و نیکزاد (۲۰۰۷) ... بود.

هدف از تحقیق حاضر مقایسه مدل‌های ریاضی با شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی خشک کردن لایه نازک دانه انار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

اماده‌سازی نمونه‌ها

انار تازه ترش از شهرستان جویبار، استان مازندران (شمال ایران) تهیه شد و برای انجام آزمایشات در یخچال در دمای +5 سلسیوس نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه دانه‌های انار، به روش خشک کردن در آون بدست آمد (Doymaz, 2005) این روند 5 بار تکرار شد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت اولیه دانه‌های انار در حدود ۳۳٪ درصد بر پایه خشک می‌باشد. آزمایش‌ها در شش سطح دمایی ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ درجه سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ورودی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و سه نوع پیش‌تیمار (شاهد، پیش‌تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ وات به مدت ۲۰ دقیقه، پیش‌تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات به مدت ۱۰ دقیقه) انجام شد. در طول انجام آزمایش‌ها دمای محیط بین ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا بین ۲۲ تا ۲۷ درصد بود.

۱- مدل‌سازی ریاضی منحنی‌های خشک شدن

برای مدل‌سازی خشک شدن لایه نازک دانه‌های انار از نسبت رطوبت نمونه‌ها در طی خشک شدن استفاده شد. نسبت رطوبت با توجه به رابطه (۱) به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه وابسته است (Doymaz, 2007).

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

که در آن MR رطوبت نسبی (بی‌بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)، M_0 رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) است. طرف چپ معادله، نسبت رطوبت را که مشخص کننده فرآیند خشک کردن است نشان می‌دهد. برای زمان‌های طولانی خشک شدن، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 بسیار کوچک هستند. بنابراین می‌توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت معادله (۲) ساده کرد (Doymaz, 2007).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

در نتیجه در رابطه ساده شده برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. برخی از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزی در جدول (۱) آمده است. نسبت رطوبت‌های بدست آمده طی آزمایشات مختلف با مدل‌های ارائه شده با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2007 برازش داده و برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

جدول ۱. معادلات خشک کردن لایه نازک ارائه شده توسط پژوهشگران برای محصولات کشاورزی

شماره	نام مدل	معادله مدل	منبع
۱	میدیلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Menges and Ertekin. (2005).
۲	ورما و همکاران	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Verma et al (1985)
۳	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	Chhinnan (1984)
۴	لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Dandamrongrak et al (2002)
۵	پیچ اصلاح شده	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Wang et al (2007)
۶	دو جمله‌ای	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Diamente and Munro (1991)
۷	تقریب پنخش	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Ertekin and Yaldiz (2004)
۸	پیچ	$MR = \exp(-kt^n)$	Simal et al (2005)
۹	هندرسون و پابیس اصلاح شده	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Sharma et al (2005)
۱۰	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu (1997)

بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن دانه‌های انار را توصیف کند مدلی است که دارای بیشترین ضریب همبستگی (R^2)، کمترین (SSE) و کمترین ریشه متوسط مربع خطای داده ها (RMSE) باشد.

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre} - MR_{exp,i})^2} \right] \quad (3)$$

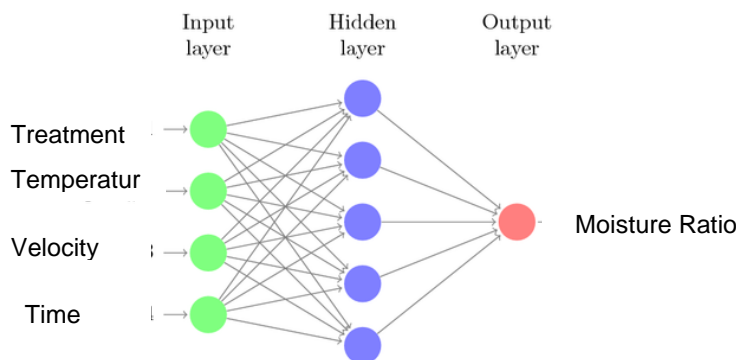
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

در این رابطه ها، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت تجربی نام $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیشگوئی شده نام، N تعداد مشاهدات و m تعداد ثابتهای خشک شدن می باشد.

۲- مدلسازی شبکه عصبی

هر شبکه عصبی از سه لایه ورودی، میانی یا مخفی و خروجی تشکیل شده است. در لایه اول یا ورودی، به تعداد عوامل اولیه و در لایه خروجی به تعداد عوامل نهایی موردنظر، نرون بستگی دارد. لایه مخفی می تواند از یک یا چندین لایه تشکیل شود که تعداد نرون‌های هر لایه آن متغیر است و عموماً به روش سعی و خطا تعیین می شود. چهار عامل دما، سرعت هوا،

تیمار و زمان خشک شدن بصورت چهار نرون در لایه ورودی و مقدار محتوای رطوبتی به عنوان تنها نرون در لایه خروجی مدل‌سازی شد (شکل ۱).



شکل ۱- معماری شبکه عصبی مصنوعی

در این پژوهش از شبکه‌های MLP (MULTI LAYER PERCEPTRON) که در آن تمامی نرون‌ها به یکدیگر وصل باشند استفاده شد. این مدل، به علت سادگی و در عین حال دقت بالا، کاربرد زیادی در شبیه‌سازی خشک شدن دارد. از توابع آستانه مختلفی چون سیگموئیدی، لگاریتمی و خطی و الگوریتم‌های آموزش همراه با نظارت، شبکه‌های پس‌انتشار روبه جلو (FFBP) مانند الگوریتم لونبرگ-مارکوآرت (Levenberg-Marquardt technique) استفاده شد.

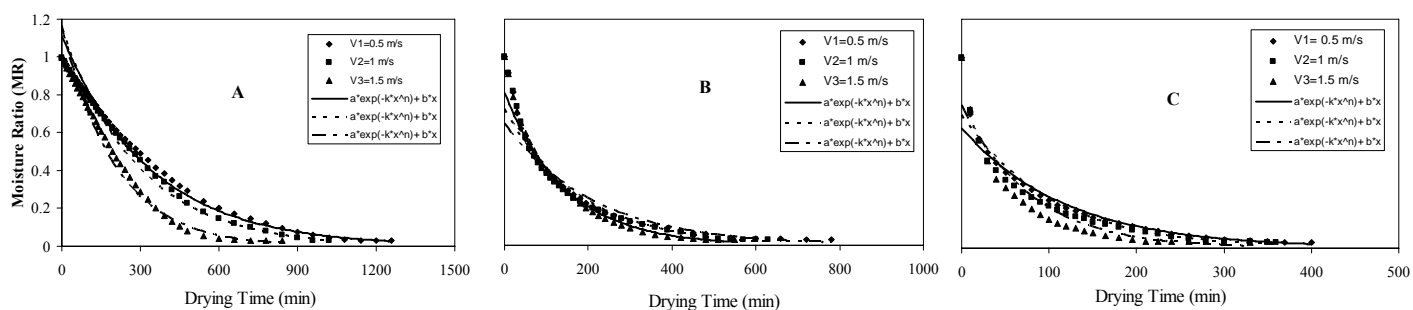
تعداد کل الگوهای ورودی شبکه ۱۴۵۳ است، که ابتدا نرمال‌سازی شده و سپس بصورت تصادفی به سه گروه آموزش (۶۰٪)، ارزیابی (۲۵٪) و تست (۱۵٪) تقسیم بندی شدند. همچنین نرخ آموزش برای تمامی حالات ۰/۲ و میزان مومنتم ۰/۱ در نظر گرفته شد. کد مورد نیاز برای مدل‌سازی شبکه عصبی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2008 توسعه داده شد، بهترین توپولوژی شبکه عصبی بر اساس دو معیار ضریب تعیین R^2 و MSE مشخص گردید. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن دانه‌های انار را توصیف کند آن توپولوژی است که دارای بیشترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین MSE باشد.

نتایج و بحث

مدل‌سازی خشک‌کردن و نتایج حاصل از برازش مدل‌ها

رطوبت اولیه دانه‌های انار ترش که به روش وزنی بدست آمد برابر ۷۳/۱ بر پایه تر (wb) بود. پس از بدست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در دما و سرعت‌های مختلف خشک کردن، مدل‌های معرفی شده در جدول (۱) بر منحنی‌های خشک‌کردن حاصل از داده‌های آزمایشی برازش داده شدند. سپس مدل‌های مختلف خشک‌شدن لایه نازک با توجه به مقادیر R^2 ، $RMSE$ و $RMSE^2$ ارزیابی شدند و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر $RMSE^2$ و $RMSE$ انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه شده نشان داد که تقریباً همه مدل‌ها مناسبند، اما مدل میدیلی، مدل پیچ،

مدل ورما و همکاران و مدل تقریب پخش، با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها، فرآیند خشک شدن دانه‌های انار ترش را پیش‌بینی کردند. ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل میدیلی در سطوح مختلف دما و سرعت باد و در جدول (۲) آمده است. به علت زیاد بودن سطوح آزمایش و شکل‌های حاصله، در این جا به عنوان نمونه تنها برازش مدل میدیلی در دمای ۴۵ درجه سلسیوس در شکل (۱) در سه تیمار شاهد، پیش‌تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ و پیش‌تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات نشان داده شده است.



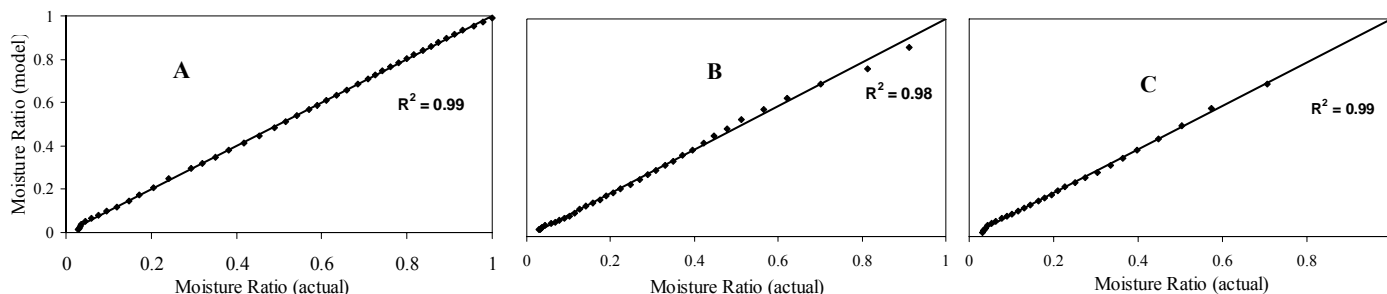
شکل ۲- منحنی‌های خشک شدن لایه نازک دانه انار در دمای ۴۵ درجه سلسیوس در (A) تیمار شاهد (B) تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ وات (C) تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات به همراه خطوط پیش‌گویی شده توسط مدل میدیلی در سرعت‌های مختلف هوا

جدول ۲- ضرایب و شاخص‌های آماری مدل میدیلی در سطوح مختلف دما و سرعت هوا

T(°C) V(m/s)	45	50	55	60	65	70
تیمار شاهد						
	R ²	SSE	R ²	SSE	R ²	SSE
0.5	0.999	0.000874	0.999	0.0038	0.999	0.00164
1	0.999	0.00258	0.998	0.0149	0.999	0.00093
1.5	0.999	0.00353	0.997	0.0073	0.998	0.00351
پیش‌تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ وات						
	R ²	SSE	R ²	SSE	R ²	SSE
0.5	0.996	0.006801	0.998	0.004	0.998	0.00326
1	0.997	0.009282	0.998	0.002	0.999	0.00125
1.5	0.999	0.0017	0.999	0.009	0.994	0.01227
پیش‌تیمار میکروویو با توان ۲۰۰ وات						
	R ²	SSE	R ²	SSE	R ²	SSE
0.5	0.999	0.000972	0.995	0.005	0.996	0.00498
1	0.998	0.002341	0.996	0.004	0.999	0.00110
1.5	0.999	0.001032	0.997	0.004	0.998	0.00232

شکل ۳ مقایسه بین نسبت‌های رطوبتی به دست آمده از آزمایش را در مقابل نسبت‌های رطوبتی پیش‌بینی شده با مدل میدیلی در دما و سرعت‌های آزمایش شده به ترتیب برای تیمار شاهد (A)، پیش‌تیمار میکروویو با توان ۱۰۰ W (B) و W

۲۰۰ (C) را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است خطی با زاویه ۴۵ درجه به داده‌ها برازش شده است که نشان دهنده دقت مدل میدیلی در پیش‌بینی تغییرات نسبت رطوبتی دانه انار در شرایط آزمایش می‌باشد.



شکل ۲. مقایسه بین نسبت رطوبتی حاصل از آزمایش با نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده توسط مدل میدیلی (A) تیمار شاهد (B) پیش - تیمار مایکروویو با توان ۱۰۰W (C) پیش‌تیمار مایکروویو با ۲۰۰ W

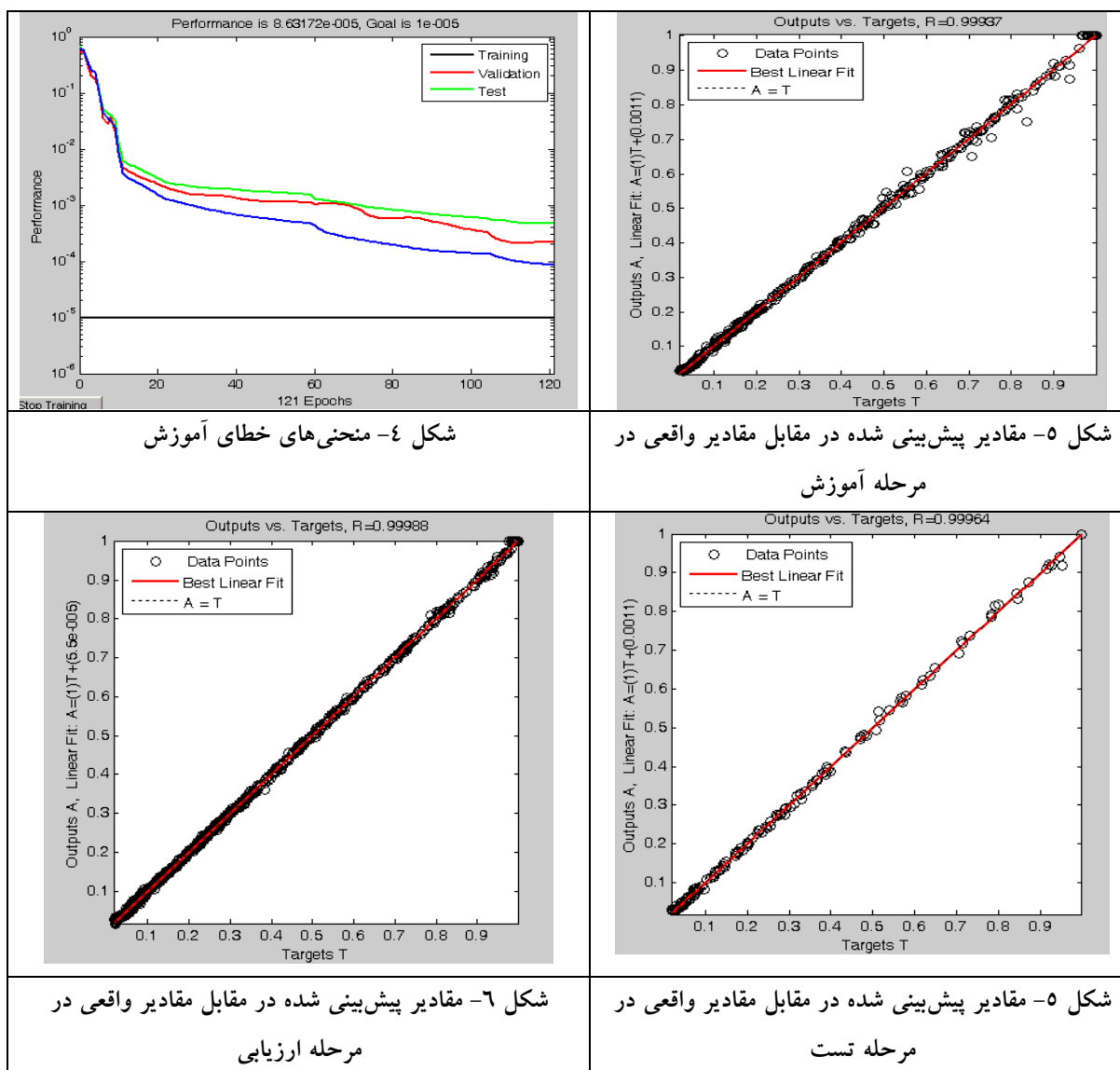
نتایج حاصل از مدل‌سازی خشک‌کردن به کمک شبکه‌های عصبی برای بررسی عملکرد شبکه MLP چند لایه از توپولوژی‌های مختلف با تعداد نرون‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله اول بعد از آموزش شبکه بهترین توپولوژی بر اساس MSE, R از میان توپولوژی‌های مختلف تعیین شد (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج حاصل از ارزیابی‌های مختلف شبکه عصبی

Activation function	Neurons in hidden layer1	Neurons in hidden layer2	Training error	R(training)	R(validation)	R(test)	Epoch
Log/Tan	15	0	0.00096252	0.9973	0.9958	0.9976	100
Log/Tan	20	0	0.00066865	0.9984	0.9977	0.9976	119
Log/Tan	25	0	0.00200737	0.9993	0.9993	0.9984	386
Log/Tan	30	0	0.00195448	0.9989	0.9967	0.9984	154
Log/Tan	15	20	0.00012409	0.9998	0.9978	0.9980	87
Log/Tan	20	25	0.00050378	0.9992	0.9984	0.9990	85
Log/Tan	25	15	0.00015112	0.9996	0.9998	0.9996	120
Log/Tan	30	20	0.0006565	0.9947	0.9816	0.9945	51
Log/Tan	25	25	0.0103882	0.9993	0.9985	0.9983	56

نتایج حاصل از به‌کارگیری شبکه عصبی با توپولوژی‌های مختلف نشان داد که بهترین توپولوژی دارای ساختاری با معماری ۱-۱۵-۲۵-۴ (۴ نرون در لایه ورودی، تعداد نرون در دو لایه پنهان به ترتیب ۲۵ و ۱۵ و تعداد نرون در لایه خروجی ۱)، از شبکه MLP با الگوریتم یادگیری LM و تابع استانه Tansig با چرخه آموزش ۱۲۰ بود. این توپولوژی تغییرات محتوای رطوبتی را با ضریب تعیین ۰/۹۹۹۸ و خطای آموزش ۰/۰۰۰۱۵ پیش‌بینی کرد. نتایج بدست آمده نشان از قابلیت شبکه عصبی به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی تغییرات محتوای رطوبتی با زمان است که می‌تواند در سیستم‌های کنترل خشک‌کن به‌کار رود..

در ادامه برای تحقیق دقیق تر بروی مدل‌ها از آنالیز رگرسیونی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج خروجی شبکه عصبی استفاده شد که در شکل‌های (۵ تا ۸) نشان داده شده است. بهترین همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی و داده‌های آزمایشگاهی برای مراحل آموزش، ارزیابی و تست به ترتیب 0.99937 ، 0.99988 و 0.99964 بدست آمد.



با مقایسه شکل ۲ (نمودارهای نسبت رطوبت حاصل از پیش‌بینی مدل میدلی در تیمارهای مختلف) و شکل ۷ (نمودار نسبت رطوبت حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی) می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های عصبی نسبت رطوبت حاصل از خشک-شدن دانه‌های انار را با دقت و خطای کمتری نسبت به مدل‌های ریاضی پیش‌بینی می‌کند. نتایج این تحقیق با نتایج سایر پژوهشگران موقرنژاد و نیکزاد (۲۰۰۷) و ارنتورک و همکاران (۲۰۰۴) شباهت داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که انجام عملیات پیش‌تیمار با استفاده از مایکروویو با توان‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ وات، زمان خشک‌شدن دانه‌های انار را نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه شده نشان داد که تقریباً همه مدل‌ها مناسبند، اما مدل میدیلی با $R^2=0/9998$ و $SSE=0/0681$ دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در فرآیند خشک‌شدن دانه‌های انار داشت. افزون بر این آهنگ ثابت خشک‌شدن (k) در مدل میدیلی با انجام عملیات پیش‌تیمار افزایش یافت به طوری که بیشترین مقدار آن در پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۲۰۰ وات برابر با ۰/۰۹۱۲۸ گرم بر دقیقه بدست آمد. بهترین توپولوژی از شبکه MLP با الگوریتم یادگیری LM و تابع استانه Tansig ۱-۲۵-۴ با ضریب تعیین ۰/۹۹۹۸ و خطای آموزش ۰/۰۰۰۱۵ بدست آمد. نتایج نشان داد که شبکه‌های عصبی پیشرو تخمین بهتری نسبت به اکثر مدل‌های ریاضی دارد.

منابع و مأخذ

البرزی، م. ۱۳۸۳. آشنایی با شبکه عصبی مصنوعی، چاپ دوم. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
 عسگری اصلی ارده، ع (۱۳۸۴). تکنولوژی بعد از برداشت غلات، حبوبات، میوه‌جات، سبزیجات. (تالیف چاکراورتی، آ.، آ. سینگ)، ترجمه، موسسه فرهنگی انتشاراتی یاوران. اردیبهشت. ۴۸۴ص.
 یداللهی‌نیا، ع. ۱۳۸۵. استخراج مدل خشک‌شدن شلتوک در خشک‌کن لایه نازک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مکانیک ماشین‌های کشاورزی. دانشکده مهندسی بیوسیستم دانشگاه تهران.

- Adu B; Otten L (1996). Diffusion characteristics of white beans during microwave drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(1), 61–69.
- Alibas, I., (2006). Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying. *Drying Technology*, 24, 1425–1435.
- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4–6), 121–126.
- Bozkır, O., (2006). Thin-layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering*, 77: 146–151.
- Chhinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. *Transactions of the ASAE*, 27, 610–615.
- Dandamrongrak, R., Young, G., and Mason, R. (2002). Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 95, 139–146.
- Das, I., Das, S. K. and Bal, S., (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. *Journal of Food Engineering*, 68: 249-255.
- Demir, V., T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu. (2007). Mathematical modelling of convection drying of green table olives. *Biosystems engineering*, 98: 47 – 53.
- Diamente, L. M., and Munro, P. A., (1991). Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*, 26, 99.
- Doymaz, I and M. Pala. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60 : 125–130.
- Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering* 78, 591–596.
- Doymaz, I. (2007). Air drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food engineering*. 78, 1291-1297.

- Erenturka, K., Erenturkb, S. and Tabile, L.G. (2004) A comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of *Echinacea angustifolia* : regression analysis and neural network. *Computers and Electronics in Agriculture* 45; 71–90.
- Ertekin, C., and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349–359.
- Funebo T; Ohlsson T., (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38, 353–367.
- Hernandez-Perez, J.A., Garca-Alvarado, M.A., Trystram, G. and Heyd . B. (2004). Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5; 57–64.
- Islam, M. R., Sablain, S. S. and Mujumdar A. S. 2003. An artificial network model for prediction of drying rate. *Drying Technology*, 20: 325- 334.
- Lin T M; Durance T D; Seaman C H., (1998). Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 4, 111–117.
- Litvin S; Mannheim C H; Miltz J (1998). Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 36, 103–111.
- Menges, H. O and C. Ertekin. (2005). Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*. 177: 119-125.
- Movagharnjad, K. and Nikzad, M. (2007). Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture* 59; 78–85.
- Pedren, J.L., o-Molinaa,T., Monzo'-Cabrereraa, J., Toledo-Moreob, A. and Sa'nchez- rna'ndez, D.(2005). A novel predictive architecture for microwave-assisted drying processes based on Neural Networks. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32; 1026–1033.
- Schiffman, R.F., 1992, Microwave processing in the U.S. food industry. *Food Technology*, 50–52: 56.
- Sharma G. P., R. C. Verma and P. Pankaj .(2005) .Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* .Vol 171. 282-286.
- Sharma G. P., R. C. Verma and P. Pankaj .(2005) .Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Journal of Food Engineering* .Vol 171. 282-286.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., Rossello, C., (2005). Use of Exponential, Page's and Diffusional models to simulate the drying Kinetics of Kiwi Fruit. *Journal of Food Engineering*. 66: 323–328.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., Rossello, C., (2005). Use of Exponential, Page's and Diffusional models to simulate the drying Kinetics of Kiwi Fruit. *Journal of Food Engineering*. 66: 323–328.
- Tomczak, E. and Kaminski. W. (2001) Drying kinetics simulation by means of artificial neural networks. *Handbook of Conveying and Handling of Particulate Solids*. Elsevier Science B.V.
- Tripathy, P.P. and Kumar, S. (2009) Neural Network approach for food temperature prediction during solar drying. *International Journal of Thermal Sciences* 48; 1452–1459.
- Tulasidas T N; Ratti C; Raghavan G S V (1997). Modelling of microwave drying of grapes. *Canadian Agricultural Engineering*, 39(1), 57–67.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., and Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296–301.
- Walde S G; Balaswamy K; Velu V; Rao D G (2002). Microwave drying and grinding haracteristics of wheat (*Triticum aestivum*). *Journal of Food Engineering*, 55, 271–276.
- Wang, Z., J. Sun, X. Liao, F. Chen, G. Zhao, J. Wu, and X. Hu. (2007). Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40:39–46.

Abstract

Ten semi theoretical and empirical models were fitted to the experimental data to evaluate and select the best model for thin-layer drying of pomegranate arils. Experiments were conducted at six temperature levels of 45, 50, 55, 60, 65 and 70 °C and three levels of air velocity (0.5, 1 and 1.5 m/s). Microwave pretreatments were used for samples and the results were compared to those of control (no pretreatments). Regression analysis of mathematical models showed that the Midili model fitted best to the measured data. However, regarding R^2 and MSE criteria, neural network modeling yielded a better prediction of pomegranate arils moisture ratio during drying of arils compared to all the mathematical models studied.

Keywords: Mathematical models, neural networks, thin layer drying, pomegranate arils