

پیش بینی سینتیک خشک کردن توت سفید در خشک کن مایکروویو - هوای داغ: مقایسه بین مدل های ریاضی، شبکه های عصبی مصنوعی و انفیس

محمد کاوه^{۱*}، احمد جهان بخشی^۱، ایمان گل پور^۲، ترحم مصری گندشمن^۳،

یوسف عباسپور گیلانده^۴، شاهپور جاهدی راد^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۴- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۵- بخش علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۱۵)

چکیده

هدف از این پژوهش، تعیین سینتیک، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی فعال سازی، انرژی مصرفی ویژه و همچنین پیش بینی نسبت رطوبت توت سفید در طی فرآیند خشک کردن با خشک کن مایکروویو- هوای داغ به کمک مدل های ریاضی، شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و انفیس (ANFIS) است. خشک کردن محصول در سه دمای ۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C، در سه سرعت جریان هوای ۱، ۰/۵ و ۱/۵ m/s و سه توان مایکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W انجام شد. برای انتخاب یک منحنی خشک کردن مناسب، ده مدل لایه نازک خشک شدن، شبکه های عصبی مصنوعی و انفیس به داده های آزمایشگاهی برازش شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر به ترتیب $3/56 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین مقدار $3/86 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. همچنین کمترین و بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه به ترتیب $48/54 \text{ MJ/kg}$ و $138/88 \text{ MJ/kg}$ محاسبه شد. در میان مدل های ریاضی مورد تحقیق مدل Page بهترین مدل برای تشریح رفتار خشک شدن لایه نازک توت را داشت. نتایج نشان داد مقادیر خطای میانگین مربعات (MSE)، برای مدل های ریاضی، ANN و ANFIS به ترتیب ۰/۰۰۵۹، ۰/۰۰۵۲ و ۰/۰۰۴۴ به دست آمد. بنابراین مدل ANFIS با بیشترین مقدار ضریب همبستگی ($R^2 = 0/99995$) و خطای میانگین مربعات ($MSE = 0/0044$) برای ارزیابی نسبت رطوبت در مقایسه با سایر روش های اجرا شده در این پژوهش به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

کلید واژگان: توت سفید، نسبت رطوبت، ضریب پخش رطوبت موثر، شبکه های عصبی مصنوعی، انفیس.

۱- مقدمه

ایران از دیرباز به دلیل موقعیت آب و هوایی خاص یکی از بزرگترین تولیدکننده های خشکبار در دنیا بوده است. خشکبار یکی از فرآورده های پرمصرف و با ارزش در جهان تلقی می شود. در این میان، توت از خانواده *Moraceae* و شامل ۲۴ گونه و حداقل ۱۰۰ واریته شناخته شده است. در ایران سه گونه توت به نام های توت سفید (*Morus alba*)، توت سیاه (*Morus nigra*) و توت قرمز (*Morus rubra*) با واریته های زیاد وجود دارد [۱]. توت های شسته نشده را می توان چند روز در یخچال نگهداری کرد ولی غالباً از خشک کردن به عنوان روش مؤثر برای نگهداری آن استفاده می شود [۲]. میزان رطوبت بالا در میوه ها، نقش مهمی در ذخیره سازی آن ها ایفا می کند. کاهش رطوبت یا خشک کردن از طریق انتقال هم زمان جرم و حرارت به طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل، حفظ کیفیت و کاهش افت پس از برداشت محصولات کشاورزی به منظور تولید میوه ها و سبزی های خشک مورد استفاده قرار می گیرد [۳ و ۴].

در گذشته، از انرژی خورشید برای خشک کردن انواع محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده می شد اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش وجود دارد که عبارتند از: تغییرات نامناسب در کیفیت غذا، عدم کنترل کافی در فرآیند خشک کردن، طولانی بودن زمان خشک شدن و غیر بهداشتی بودن محصول که استفاده از تکنولوژی جدید در فرآیند خشک کردن را ضروری می سازد [۵]. در خشک کن هوای داغ کل محصول به طور کامل و یکنواخت در معرض خشک کردن قرار می گیرند. اما ایراد این روش مدت زمان طولانی خشک کردن محصول می باشد [۶]. از سوی دیگر در خشک کردن به صورت میکروویو، انرژی تابش در طول خشک شدن در داخل محصول نفوذ کرده اما همه محصول به طور مساوی در معرض تابش توان میکروویو قرار نمی گیرند. اگر چه مدت زمان خشک شدن خیلی کوتاه است اما محصول به طور یکنواخت خشک نمی شوند در نتیجه کیفیت محصول کاهش می یابد [۷]. اما برای غلبه بر مشکلات ارائه شده از خشک کن ترکیبی میکروویو- هوای داغ استفاده می شود. خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی با استفاده از خشک کن های ترکیبی میکروویو- هوای داغ می تواند جانشین مناسبی برای خشک کن های تکی هوای داغ و میکروویو محسوب شود. انرژی

میکروویو در محصول نفوذ کرده و موجب تسهیل خروج حرارت از محصول و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن در مقایسه با خشک کن های تکی می باشد. از مزایای دیگر خشک کن ترکیبی میکروویو- هوای داغ سرعت خشک شدن بالا، بهره وری انرژی بالا، کیفیت بهتر محصول و استفاده مؤثر از فضا می باشد [۸]. مطالعات متعددی در مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با خشک کن میکروویو- هوای داغ مانند کدو [۹]، میوه به [۱۰]، برگ نعناع [۱۱] و سیب [۱۲] انجام شده است.

هدف استفاده از شبیه سازی یا مدل سازی ریاضی در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی در واقع تبدیل کیفیت های فیزیکی و رابطه متقابل این کیفیت ها به کمیت های عددی و روابط ریاضی است. بدین ترتیب یک مدل ریاضی شامل متغیرها و مجموعه معادلات وابسته به آنهاست که می تواند تأثیر متقابل این متغیرها را همانطور که در دنیای واقعی اتفاق می افتد، نشان دهد. از این رو یک مدل ریاضی وسیله بسیار مناسبی در دست تحلیل گری است که با توسل به آن می تواند رفتار یک سیستم را پیش از اعمال واقعی تغییرات پیش بینی کند [۱۳].

اساس روش های هوشمند، استفاده از دانش نهفته در داده های آزمایش، تلاش برای استخراج روابط ذاتی بین آن ها و تعمیم آن در موقعیت های دیگر است. شبکه های عصبی مصنوعی یکی از مهمترین روش های هوش مصنوعی بوده که در آن با الهام از مدل مغز انسان، ضمن اجرای فرآیند آموزش، اطلاعات مربوط به داده ها، در قالب وزن های شبکه ذخیره می شوند. مدل های شبکه عصبی مصنوعی و انفیس به طور موفقیت آمیزی در تخمین مسائل در فرآیندهای طبیعی عمل کرده اند. روش شبکه های عصبی مصنوعی و انفیس نسبت به بسیاری از روش های معمولی آماری و قطعی مزایا دارند. در مقایسه با مدل های رگرسیون خطی، این روش ها مقادیر پیش بینی را ملزم به قرارگیری در اطراف مقدار میانگین نکرده و به همین دلیل تغییر پذیری واقعی داده را حفظ می کنند [۱۴ و ۱۵].

بسیاری از نویسندگان با موفقیت از مدل های ریاضی، ANN و ANFIS برای توصیف ویژگی های خشک شدن بسیاری از محصولات کشاورزی و مواد غذایی استفاده کرده اند. کاوه و همکاران [۱۵] برای پیش بینی نسبت رطوبت، نرخ خشک کردن، ضریب پخش رطوبت و انرژی مصرفی ویژه پسته، کدو

آون با دمای $70 \pm 1^\circ\text{C}$ قرار داده شدند. رطوبت اولیه توت $2/43$ بر پایه خشک به دست آمد.

۲-۱- خشک کن آزمایشگاهی و تجهیزات مورد

استفاده

برای انجام آزمایش‌ها از یک خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ استفاده گردید. خشک‌کن شامل یک دمنده‌ی سانتریفوژ، المنت گرم‌کننده‌ی هوا (نه المنت)، لوله‌های رابط برای جریان و انتقال هوا، محفظه‌ی استوانه‌ای خشک‌کن، مایکروویو، اینورتر (VSD2, ABB Co., Taipei, Taiwan) برای تنظیم سرعت چرخش دمنده و سیستم تنظیم دمای هوای ورودی بود. موتور مورد استفاده از نوع سه فاز، که دارای تعداد دور rpm 2800 و قدرت 250 W بود.

اتاقک خشک‌کن شامل یک مجرای پیرکس به قطر 100 میلی-متر و ارتفاع 200 میلی‌متر بود که در داخل اجاق مایکروویو قرار گرفته بود. استوانه پیرکس دارای قطر خارجی 300 میلی-متر و ارتفاع 280 میلی‌متر بود که به عنوان محفظه‌ی خشک‌کن هوای داغ استفاده می‌شد. برای توزین نمونه‌ها در حین مراحل خشک‌کردن از یک ترازوی دیجیتال AND GF- 600، ساخت کشور ژاپن با درجه‌ی تفکیک $0/001$ گرم استفاده شد. از یک ترموستات آتین ساخت ایران که با ترموکوپل نوع K کار می‌کرد، برای تنظیم دمای هوای ورودی استفاده گردید. برای اندازه‌گیری دبی هوای ورودی محفظه‌ی خشک‌کن، از یک سرعت سنج پره‌ای (Lutron A-M-4202) ساخت کشور تایوان مورد استفاده قرار گرفت. برای جلوگیری از تلفات حرارتی، دور کانال منتهی به محفظه با پشم شیشه عایق-بندی شد. همچنین انجام آزمایش‌ها از یک مایکروویو پاناسونیک مدل (Sharp R-I96T, Sharp Electronics) ساخت تایلند با حداکثر توان 900 W و با درجه‌ی تفکیک $(10, 30, 50, 70, 90)$ استفاده شد. این مایکروویو قابلیت تنظیم توان در سطوح $90, 270, 450, 630$ و 900 W را داشت. برای اندازه‌گیری دمای محیط و محیط و محفظه خشک‌کن و همچنین رطوبت نسبی هوا، از دستگاه رطوبت‌سنج- دماسنج لوترون (Lutron, YK-2005RH, Taiwan) استفاده گردید. برای انجام آزمایش‌ها، دما و رطوبت نسبی محیط به ترتیب بین $27-32$ درجه سلسیوس و $24-33$ درصد اندازه‌گیری شد.

۲-۲- نحوه‌ی انجام آزمایش

و دانه طالبی با استفاده از خشک‌کن بستر سیال از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند. متولی و همکاران [۱۶] مقایسه‌ای بین مدل‌های ریاضی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و را جهت پیش‌بینی نسبت رطوبت و نرخ خشک کردن آلبالو با استفاده از یک خشک‌کن مایکروویو- خلاء انجام دادند. نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی با میزان $R^2=0.9996$ نسبت به بهترین مدل ریاضی (Midilli et al) با مقدار میدلی $R^2=0.9996$ عملکرد بهتری داشت. توکلی پور و همکاران [۱۷] برای پیش‌بینی نسبت رطوبت کدو از دو روش منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند و نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی با عملکرد بهتری نسبت به منطق فازی در پیش‌بینی نسبت رطوبت کدو را داشتند. ضیافروغی و همکاران [۱۸] برای پیش‌بینی محتوای رطوبت خشک کردن میوه به در یک خشک‌کن مادون قرمز با استفاده از مدل‌های ریاضی و ANFIS مطالعه‌ای انجام دادند و نشان دادند که برای پیش‌بینی محتوای رطوبت میوه به مدل انفیس با $R^2=0.9998$ عملکرد بهتری داشت.

بنابراین با توجه به اینکه در مورد به دست آوردن پارامترهای خشک شدن (ضرب پخش رطوبت، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی ویژه) توت سفید با استفاده از خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ و همچنین پیش‌بینی نسبت رطوبت توت سفید با استفاده از مدل‌های ریاضی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و انفیس اطلاعات جامعی در دسترس نمی‌باشد، بنابراین هدف از این پژوهش با توجه به ضروریات بیان شده بررسی خشک‌کردن لایه نازک توت با استفاده از خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ در درجه حرارت‌های $40, 55$ و 70°C در سه سرعت هوای $0/5, 1$ و $1/5$ متر بر ثانیه و توان‌های مایکروویو $270, 450$ و 630 وات می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها توت‌های سفید تازه که از نظر میزان رسیدگی در شرایط یکسانی بودند، تهیه و در یخچال با دمای $1 \pm 3^\circ\text{C}$ نگهداری شدند. سپس حدود ۲ ساعت قبل از انجام آزمایش‌ها از محیط انبار (یخچال) به محیط آزمایشگاه انتقال داده شدند. برای تعیین محتوای رطوبتی از روش استاندارد هوای گرم آون استفاده گردید. برای این منظور نمونه‌های 40 گرمی توت در ۳ تکرار به مدت ۲۴ ساعت درون

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

که در آن MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t محتوای رطوبتی در زمان t ، M_b و M_e به ترتیب، رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی بر پایه‌ی خشک (d.b.) می‌باشند. برای زمان-های طولانی خشک شدن در خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ، مقدار M_e در مقایسه با مقادیر M_t و M_b خیلی کوچک می‌باشد بنابراین این رابطه از فرم زیر پیروی می‌کند [۲۰]:

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

برای مدل‌کردن ریاضی خشک‌شدن توت سفید با استفاده از خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ از ۱۰ مدل ریاضی لایه نازک استفاده شد (جدول ۱).

قبل از شروع آزمایش‌ها، دستگاه خشک‌کن به مدت نیم ساعت برای رسیدن به شرایط تعادل پایدار زودتر روشن می‌شد. آزمایش‌ها با توت‌های سالم در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۵ و ۷۰°C) و سه سطح سرعت هوای ورودی (۰/۵ و ۱ و ۱/۵ m/s) و سه سطح توان مایکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W) صورت گرفت و تغییرات وزنی آن‌ها در فواصل زمانی مشخص، با استفاده از ترازوی دیجیتالی ثبت گردید. تمامی آزمایش‌ها از رطوبت اولیه ۲/۴۳ تا زمانی که رطوبت نهایی آن به ۰/۱ بر پایه‌ی خشک می‌رسید متوقف می‌شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

۲-۳- مدل‌سازی ریاضی منحنی خشک‌کردن

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طول خشک‌کردن توت سفید به وسیله رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید [۱۹]:

Table 1 Thin layer drying models used in modeling of white mulberry (a, b, k, k₁ and n: empirical constants and coefficients in drying models)

Model	Equations	Reference
Demir <i>et al</i>	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	20
Midili <i>et al</i>	$MR = a \exp(-kt)^n + b$	21
Two-term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	11
Logestic	$MR = a / (1 + b \exp(kt))$	22
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	23
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	24
Wang and Sing	$MR = 1 + at + bt^2$	25
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	26
Aghbashlo	$MR = \exp\left(-\frac{at}{1+bt}\right)$	19
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	27

n, a, b, c, k, k₀, k₁

که در آن n تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان خشک‌شدن (s)، r شعاع هندسی توت (m)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت موثر (m²/s). وقتی t افزایش می‌یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می‌شوند در نتیجه خواهیم داشت [۲۸].

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (4)$$

قانون دوم فیک که توسط کرانک برای شرایط لایه نازک در محصولات کروی ارائه شد با نادیده گرفتن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف می‌کند [۲۵]. با فرض اینکه در فرآیند خشک‌کردن، پخش رطوبتی موثر ثابت و شعاعی است می‌توان مقدار آن را از معادله زیر محاسبه نمود:

$$MR = \frac{M_a - M_e}{M_b - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (3)$$

برای توت سفید در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- هوای داغ از روابط زیر به دست می‌آید [۱۳ و ۳۰]:

$$SEC_{con} = (C_{pa} + C_{pv}h_a)Qt \frac{(T_{in} - T_{am})}{m_{vcon}V_h} \quad (10)$$

$$SEC_{mic} = \frac{60Pt}{m_{vmic}} \quad (11)$$

$$SEC_{total} = SEC_{con} + SEC_{mic} \quad (12)$$

که در آن SEC_{con} ، SEC_{mic} و SEC_{total} به ترتیب انرژی مصرفی ویژه هوای داغ، مایکروویو و کل P ، (j/kg) توان مایکروویو (Kw)، C_{pa} و C_{pv} به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه بخار و هوا ($1004/16$ J/kg°C و $1828/8$)، Q هوای ورودی به اتاق خشک‌کن (m^3/min)، t زمان کل خشک‌کردن (دقیقه)، h_a رطوبت مطلق هوا ($kg \text{ vapor}/kg \text{ dry}$)، T_{in} و T_{am} به ترتیب دمای ورودی به خشک‌کن و دمای محیط، m_v مقدار انتقال جرم (kg) و V_h حجم ویژه هوا (m^3/kg) می‌باشد.

۶-۲- شبکه عصبی مصنوعی

یک شبکه‌ی پرسپترون دو و سه لایه با توابع فعال‌سازی مختلف برای تعیین ساختار مطلوب مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۱). به منظور پردازش داده‌های مورد آزمایش از دو شبکه پس انتشار پیش‌خور (FFBP) و پس‌انتشار پیشرو (CFBP) استفاده گردید. همچنین از توابع آموزش لونیگ-مارکواریت (LM) و تنظیم بیزی (BR) برای بهنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد نظر بکار گرفته شد. طی فرآیند آموزش، شبکه‌های عصبی مصنوعی به کمک داده‌های آموزشی، ارتباط بین نرون‌ها را در هر چرخه‌ی آموزش فرا گرفته تا این مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر خروجی مطلوب نزدیک شوند و مقادیر خطای حاصل از مقادیر خطای مشخص شده کمتر گردد. طی فرآیند آموزش شبکه، پارامترهای ترکیبی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها، تعداد چرخه آموزش به روش آزمون و خطا تعیین گردید. خروجی شبکه X_j به صورت زیر مدل می‌شود [۳۱]:

بعد از ساده شدن، معادله بالا را می‌توان به صورت خطی نوشت. با اعمال لگاریتم از طرفین معادله می‌توان آن را به صورت خطی درآورد.

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_a - M_e}{M_b - M_e}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_e}{r^2}\right) \quad (5)$$

با رسم $\ln(MR)$ نسبت به زمان، خطی با شیب K_0 به دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t ، ضریب پخش رطوبت موثر را می‌توان از رابطه ۶ به دست آورد [۱۵].

$$K_1 = \left(\frac{D_{eff}\pi^2}{r^2}\right) \quad (6)$$

۲-۴- انرژی فعال‌سازی

با استفاده از معادله آرینوس رابطه بین دما و ضریب پخش رطوبت موثر حاصل می‌شود که می‌توان انرژی فعال‌سازی را به دست آورد [۲۹].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right) \quad (7)$$

E_a انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، R_g ثابت جهانی گازها که برابر 8.3143 kJ/mol، T_a دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن (K)، D_0 عرض از مبدا که مقدار آن ثابت است. با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله (۷)، معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (8)$$

با رسم نمودار $\ln(D_{eff})$ در مقابل $(1/T_a)$ خطی با شیب K_1 به دست می‌آید:

$$K_1 = \left(\frac{E_a}{R_g}\right) \quad (9)$$

۲-۵- تعیین انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصول توت با استفاده از خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ به عنوان انرژی مصرفی ویژه (SEC_{total}) بیان می‌گردد و

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

می شوند، به طور پی در پی تغییر می کند تا خطا به کمترین مقدار خود برسد. پس از محاسبه هر X_j شبکه تحت یک تابع فعال سازی شروع به اصلاح آن می کند. برای بهینه سازی ساختار شبکه از سه تابع فعال سازی تابع سیگموئید لگاریتمی (LOGSIG)، تابع خطی (PURLIN) و تانژانت هایپربولیک سیگموئید (TANSIG) استفاده شد [۲۲].

$$X_j = \sum_{i=1}^N W_{ij} \times Y_i + b_j \quad (13)$$

برای شبکه های پس انتشار، N تعداد نرون های لایه ی خروجی، W_{ij} وزن بین لایه ی i و j ، Y_i خروجی نرون i ام و b_j مقدار بایاس نرون لایه ی j ام است. طی فرآیند آموزش این وزن ها و مقادیر ثابتی که با آن ها جمع می شود اصطلاحاً بایاس نامیده

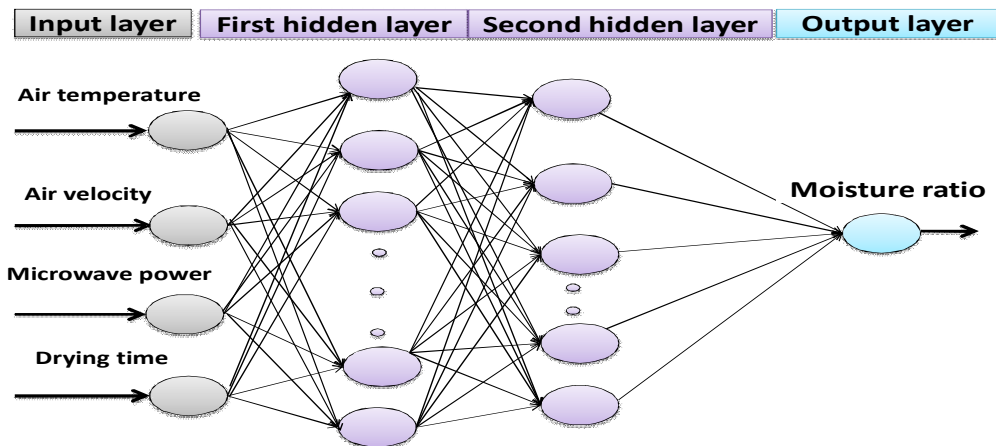


Fig 1 The selected ANN structure with three hidden layers

$$\text{then } f_1 = p_1 T + q_1 V + r_1 U_b + s_1 DT + u_1 \quad (14)$$

Rule 1:if

T is A_2 , V is B_2 , U_b is C_2 and DT is D_2

$$\text{then } f_2 = p_2 T + q_2 V + r_2 U_b + s_2 DT + u_2 \quad (15)$$

که در آن T دمای هوای ورودی (درجه سلسیوس)، V سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)، P توان مایکروویو (وات)، DT زمان خشک شدن (دقیقه)، f نسبت رطوبت، $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2$ نشان دهنده زبانی، $p_1, p_2, q_1, q_2, r_1, r_2, s_1, s_2, u_1, u_2$ ضرایب خطی تابع خروجی، f_1 و f_2 چند جمله ای درجه اول هستند.

۷-۲- انفیس

با ترکیب سیستم استنتاج فازی و الگوریتم های یادگیری شبکه های عصبی مصنوعی، سیستم انفیس قادر به مدل سازی و تحلیل رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی به طور مؤثر از مجموعه داده های مورد استفاده می باشد. رابطه بین ورودی ها و خروجی با استفاده از هر دو داده ورودی- خروجی و قوانین فازی اگر- سپس ساخته شد (شکل ۲). انفیس یک فن عصبی- فازی است که در آن از ادغام بین شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی (FIS) ساخته شده است [۳۲ و ۳۳]. به طور کلی، با استفاده از مدل انفیس با چهار ورودی (T, V, P, DT) و یک خروجی (f) به عنوان مثال، قوانین فازی اگر- سپس می تواند در فرم های زیر بیان شود [۳۴].

Rule 1:if

T is A_1 , V is B_1 , U_b is C_1 and DT is D_1

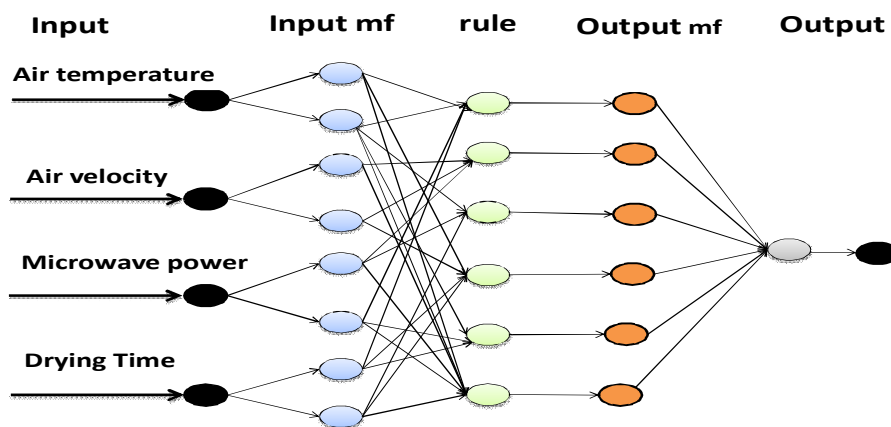


Fig 2 An ANFIS model based on Sugeno-type fuzzy rule

رگرسیون خطی f_i در این لایه تابع می‌باشد و در نهایت نتیجه خروجی در معادله (۲۲) تولید می‌شود [۳۶]:

$$O^4_i = w_i f_i = w_i(p_i T + q_i V + r_i DT + s_i PT + u_i) \quad i=1,2 \quad (22)$$

لایه پنجم (Summation): هر قانون خروجی به لایه خروجی افزوده می‌شود. خروجی کل را می‌توان در معادله (۲۳) به شرح زیر محاسبه کرد:

$$O^5_i = \sum_i w_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i=1,2 \quad (23)$$

در این پژوهش، دو مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی (ANFIS) با استفاده از ۱۱۶۷ مجموعه داده برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت سفید استفاده شد. به منظور مدل‌سازی شبکه، داده‌ها به صورت تصادفی به دو گروه که ۷۵٪ (۸۷۵ داده) آن برای آموزش و ۲۵٪ (۲۹۲ داده) آن برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای ورودی و خروجی و همچنین محدوده آن‌ها برای هر سه مدل در جدول (۲) گزارش شده است. بنابراین هر دو روش ANN و ANFIS با چهار نرون در لایه ورودی (دمای هوا و ورودی، سرعت هوا، توان مایکروویو و زمان خشک کردن) و یک نرون در لایه خروجی (نسبت رطوبت) مورد بررسی قرار گرفت. از نرم‌افزار Neural Network Toolbox MATLAB (ver4.01) نیز برای انجام تحلیل‌ها برای طراحی و ارزیابی ANN و ANFIS برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت در خشک کن مایکروویو- هوای داغ استفاده شد.

لایه اول (fuzzification): متغیرهای ورودی را به یک مجموعه فازی از طریق توابع عضو تبدیل می‌کند. هر گره در لایه ۱ یک گره تطبیقی است و تابع گره مربوطه به صورت زیر نوشته می‌شود [۳۵]:

$$O^1_{Ai} = \mu_{Ai}(T) \quad i=1,2 \quad (16)$$

$$O^1_{Bj} = \mu_{Bj}(V) \quad j=1,2 \quad (17)$$

$$O^1_{Ci} = \mu_{Ci}(DT) \quad i=1,2 \quad (18)$$

$$O^1_{Dj} = \mu_{Dj}(PT) \quad j=1,2 \quad (19)$$

که در آن، μ_{Ai} ، μ_{Bj} ، μ_{Ci} و μ_{Dj} توابع عضویت از متغیرهای زبانی A، B، C و D هستند. لایه دوم (Multiplication): هر قانون یک گره در ANFIS با استفاده از soft-min یا محصول برای تعیین عامل مقید کردن قانون است. سیگنال ورودی در معادله (۲۰) در این لایه ضرب می‌شود و محصول را خارج می‌کند.

$$O^2_i = w_i = \mu_{Ai}(T) \times \mu_{Bj}(V) \times \mu_{Ci}(DT) \times \mu_{Dj}(PT), \dots \quad i=1,2$$

لایه سوم (Normalization): هر کدام از w_i مقیاس کوچکی از w_i در این لایه هستند. نسبت i^{th} قوانین وزن حاکم بر مجموع نیروی هر قاعده می‌تواند به صورت معادله (۲۱) محاسبه کرد:

$$O^3_i = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1,2$$

که در آن \bar{w} میزان نرمال شدن می‌باشد. لایه چهارم (Defuzzification): هر کدام از w_i مقادیر مربوط به نتیجه

Table 2 input condition for ANN and ANFIS their boundaries for predicting of moisture ratio of mulberry fruit

condition	Symbol	Unit	Category	Min	Max
Air temperature	T	$^{\circ}\text{C}$	Input	40	70
Air velocity	V	m/s	Input	0.5	1.5
Microwave power	P	W	Input	270	630
Drying time	DT	min	Input	0	570
Moisture ratio	MR	-	Output	0.1	1

۳- نتایج و بحث

در شکل (۳) تاثیر افزایش دما و توان مایکروویو بر زمان خشک کردن توت سفید در سرعت های متفاوت خشک کردن گزارش شده است. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش دما، زمان خشک شدن کاهش یافت. که علت این امر افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول می باشد. همچنین با افزایش توان مایکروویو، سرعت خروج رطوبت از میوه توت سریع تر و زمان خشک شدن کاهش می یابد که این روند در توان های بالاتر با شدت بیشتری رخ داد. بر این اساس کمترین زمان خشک شدن برای توت سفید (۱۱۰ min) در توان ۶۳۰ W اتفاق افتاد و بیشترین زمان خشک شدن در توان مایکروویو ۲۷۰ W رخ داد. یکی از دلایلی که منجر به این اتفاق شد این بود که با افزایش توان خروجی از مایکروویو، دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت نمونه ها می شود. به عبارت دیگر توان بالاتر مایکروویو، باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت و کاهش رطوبت شدیدتر می شود [۳۸]. نتایج مشابهی برای محصولات دیگر در خشک کن مایکروویو- هوای داغ از جمله: برنج [۳۹]، فلفل سبز [۴۰]، قارچ [۴۱] و کیوی [۴۲] ثبت شده است.

رطوبت میوه توت برای خشک کن مایکروویو- هوای داغ در شروع خشک شدن (%d.b.) ۲/۴۳ بود. پس از به دست آوردن مقادیر نسبت رطوبت در توان های مایکروویو، دماها و سرعت های مختلف خشک کردن به روش خشک شدن مایکروویو- هوای داغ، ده مدل موجود در جدول (۱) بر منحنی های خشک شدن حاصل از داده های آزمایشی برازش داده شدند.

اصولاً عدم پیش پردازش داده ها باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می گردد. برای دوری از چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان سازی ارزش داده ها برای شبکه، عمل نرمال سازی انجام می شود که این کار مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن ها خواهد شد. برای نرمال سازی داده های مورد استفاده از معادله (۲۴) بهره گرفته شد [۳۷].

$$X_n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (24)$$

که در آن X_n مقدار نرمال شده پارامتر، X_i مقدار واقعی هر پارامتر، X_{\max} بیشینه مقدار پارامتر مورد نظر و X_{\min} کمینه مقدار پارامتر مورد نظر می باشند. شاخص های کمی بسیاری جهت ارزیابی کارکرد شبکه های مورد استفاده و قدرت مدل برای پیش بینی نسبت رطوبت توت سفید مورد استفاده قرار گرفت. معیارهای از جمله ضریب تبیین (همبستگی) (R^2)، شاخص میانگین مربعات خروجی، T_{mean} میانگین مقادیر پیش بینی شده، N تعداد کل داده ها می باشد. خطا (MSE) برای تعیین کیفیت عملکرد شبکه در این پژوهش استفاده شد [۱۵]:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (T_i - T_{mean})^2 \right] - \left[\sum_{i=1}^N (T_i - T_p) \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (T_i - T_{mean})^2 \right]} \quad (25)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_p)^2 \quad (26)$$

در این روابط T_i و T_p مقدار اندازه گیری (واقعی) و خروجی، T_{mean} میانگین مقادیر پیش بینی شده، N تعداد کل داده ها می باشد.

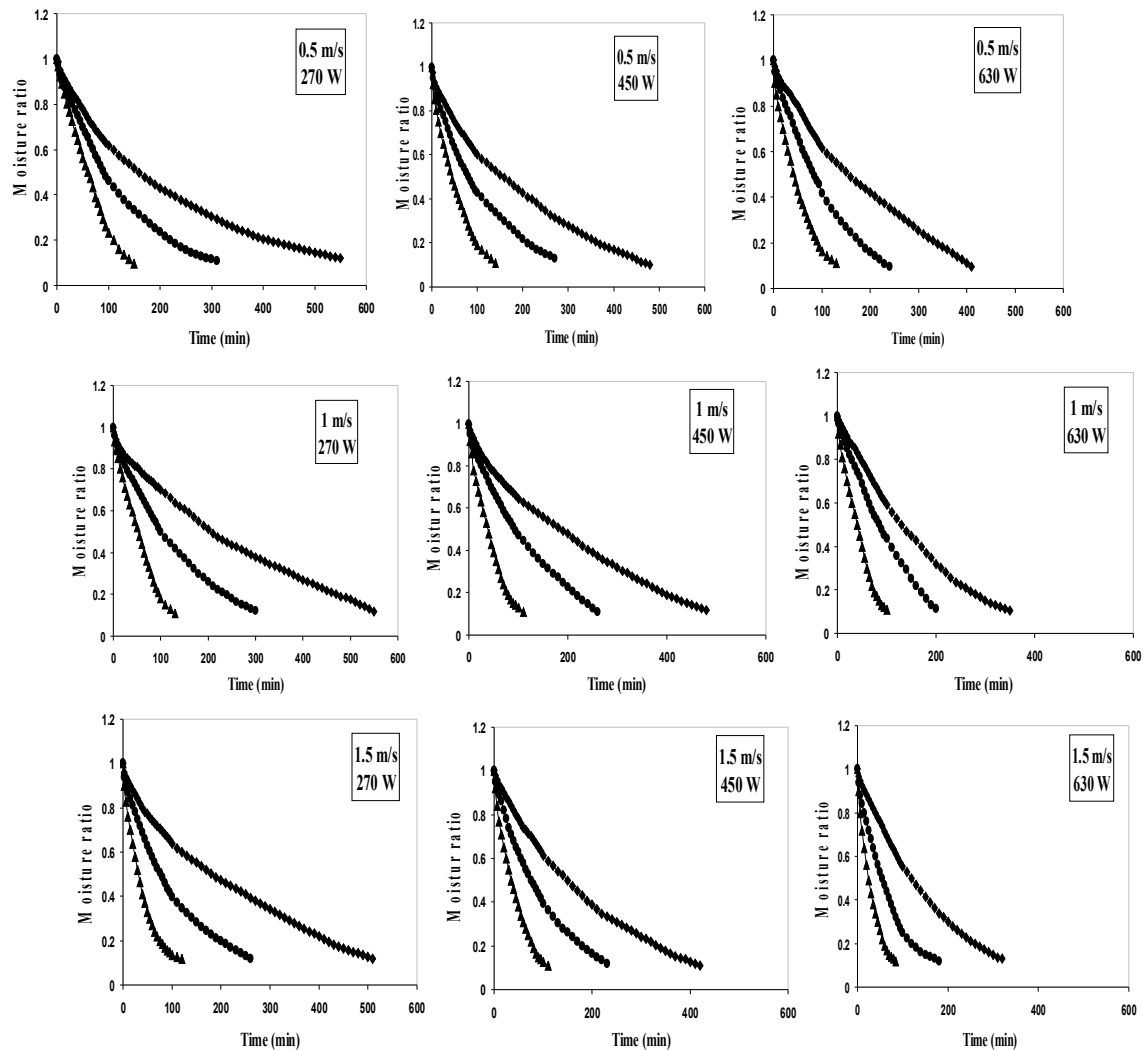


Fig 3 Effect of air temperature (♦ 40 °C, ● 55 °C ▲ 70 °C) on moisture ratio at different level of microwave power and air velocity during drying of white mulberry in microwave- convective dryer

Table 3 The statistical comparison for prediction of thin layer drying of white mulberry

Model	R^2	ε	MSE
Demir <i>et al</i>	0.9952	4.96	0.0251
Midili <i>et al</i>	0.9990	2.56	0.0071
Two- term	0.9987	2.94	0.0090
Logestic	0.9983	3.18	0.0104
Page	0.9992	2.34	0.0059
Logarithmic	0.9970	3.82	0.0154
Wang and Sing	0.9979	3.41	0.0125
Parabolic	0.9962	4.32	0.0194
Aghbashlo	0.9991	2.39	0.0066
Henderson and Pabis	0.9966	4.01	0.0172

مایکروویو- هوای داغ، با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها، پیش‌بینی کرد. ضرایب و شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های موجود در جدول (۳) برای خشک‌کردن توت با خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ به تفکیک آورده شده است.

۳-۱- ضریب پخش رطوبت موثر

سپس مدل‌های خشک‌شدن لایه نازک مختلف با توجه به مقادیر R^2 ، ε و MSE ارزیابی شدند و مدل بهتر بر اساس مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر ε و $RMSE$ انتخاب شد. نتایج حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ارائه شده، نشان داد که تقریباً همه‌ی مدل‌ها مناسبند، اما در کل مدل Page، فرآیند خشک‌شدن لایه نازک توت را در روش

مسئله تاثیر بارز دما و توان مایکروویو در ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر و افزایش ضریب مذکور می باشد. افزایش شدت توان مایکروویو باعث افزایش گرادیان حرارتی لایه سطحی محصول و لایه‌ی زیرین آن شده و سرعت جریان رطوبت داخل محصول را افزایش می‌دهد [۴۱]. بهاتاچاریا و همکاران [۴۱] مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای قارچ در خشک کن مایکروویو- هوای داغ $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ - $16/18 \times 10^{-8}$ به دست آوردند. هوروز و همکاران [۱۲] برای خشک کردن سیب مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در خشک کن مایکروویو- هوای داغ به $3/31 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ - $1/42 \times 10^{-9}$ به دست آورد. سلیم و همکاران [۴۳] بیشترین کمترین ضریب پخش رطوبت موثر برای کلم بروکلی در خشک کن مایکروویو- هوای داغ به ترتیب $10/16 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ - $6/64 \times 10^{-8}$ به دست آوردند. ملکجانی و همکاران [۴۴] برای خشک کردن فندق تحت خشک کردن مایکروویو- هوای داغ میزان ضریب پخش رطوبت موثر را $17/12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ - $3/80 \times 10^{-8}$ به دست آوردند.

محاسبات نشان داد که رابطه مستقیمی بین ضریب پخش رطوبت موثر با دما و توان مایکروویو از محفظه خشک کن وجود داشت. با توجه به شکل (۴) در سرعت ثابت هوا در محفظه خشک کن، میزان ضریب پخش رطوبت موثر با افزایش دمای هوا و افزایش توان مایکروویو، افزایش یافت. با توجه به نتایج، بیشترین میزان ضریب پخش رطوبت موثر به میزان $3/56 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای هوای 70°C و توان مایکروویو 630 W به دست آمد. همچنین کمترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر به میزان $3/86 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ در دمای هوای 40°C و توان مایکروویو 270 W به دست آمد. پایین ترین دما، سرعت هوا و توان مایکروویو سبب کمترین ضریب پخش رطوبت موثر شده و بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در بالاترین دما، سرعت هوا و بیشترین توان مایکروویو اتفاق افتاد. همچنین در روش مایکروویو با افزایش دما، توان مایکروویو و سرعت هوا در فرآیند خشک شدن توت سفید، ضریب پخش رطوبت موثر یک روند افزایشی دارد که تاثیر دما و توان مایکروویو در این امر بارزتر است. دلیل وقوع این

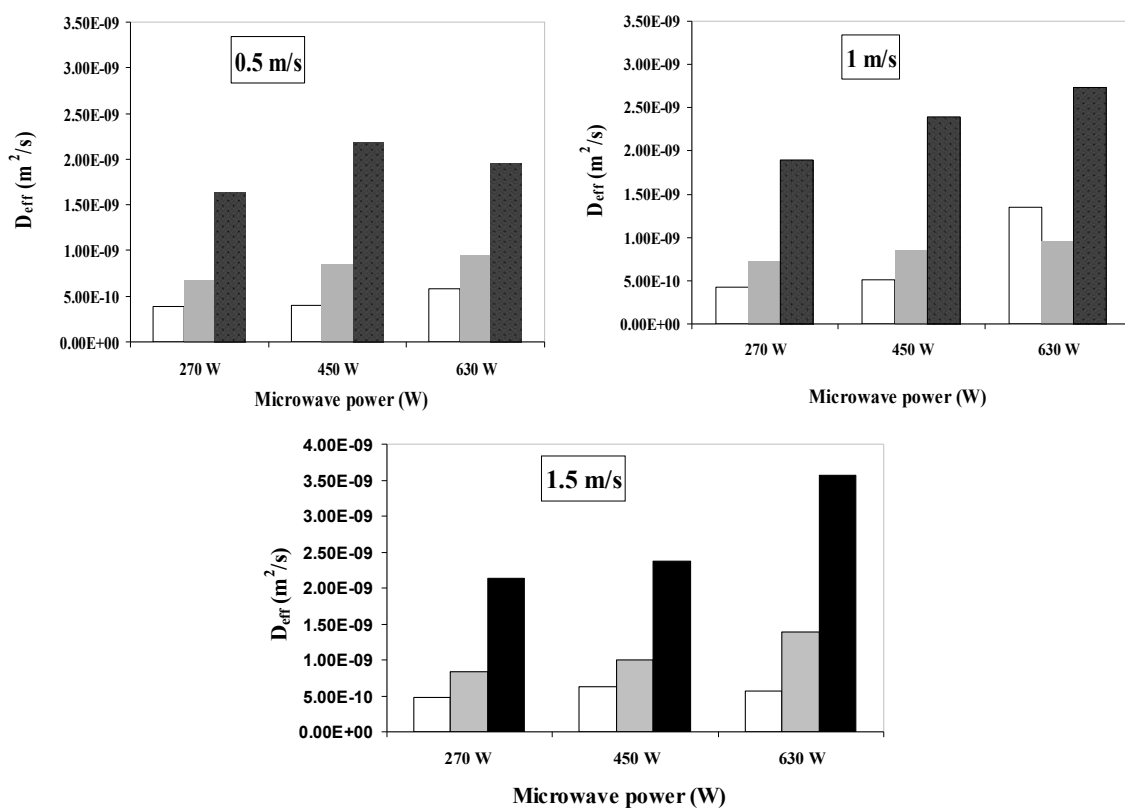


Fig 4 Effective moisture diffusivity for thin layer drying of white mulberry fruit at different levels of air velocities, temperatures (40°C , 55°C and 70°C) and microwave power.

۳-۲- انرژی فعالسازی

میزان انرژی فعالسازی برای محصولات مختلف کشاورزی و مواد غذایی عمدتاً بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول برمول گزارش شده است [۴۵]. انرژی فعالسازی و ضرایب تبیین برای شرایط مختلف خشک کردن در جدول (۴) نشان داده شده است. با رسم نمودار $\ln(\text{Deff})$ در مقابل $1/\text{Tabs}$ خطی با شیب K_2 به دست آمد. مقدار انرژی فعالسازی برای توت بین ۳۱/۱۵

تا ۵۶/۰۵ کیلوژول برمول محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای انرژی فعالسازی در مطالعات دیگر مورد بررسی قرار گرفت. کاوه و همکاران [۱۳] برای بنه در خشک کن هوای داغ مایکروویو مادن قرمز ۱۲/۷۰ تا ۳۲/۲۸ کیلوژول برمول به دست آوردند. همچنین هوروز و همکاران [۱۲] مقدار انرژی فعال-سازی را برای سیب ۱۳/۰۴ تا ۳۳/۵۲ کیلوژول بر مول حساب کردند.

Table 4 Activation energy values and related correlation coefficient for air velocities and microwave power of white mulberry.

Air velocity (m/s)	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1.5	1.5	1.5
Microwave power (W)	270	450	630	270	450	630	270	450	630
Activation energy (E_a) (kJ/mol)	42.77	50.91	44.32	45.92	31.30	44.50	55.05	46.95	39.66
Coefficient of determination (R^2)	0.9745	0.9932	0.9657	0.9567	0.9706	0.9737	0.9983	0.9829	0.9621

۳-۳- انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه محاسبه شده برای توت سفید در شکل (۵) آورده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش دمای هوا و توان مایکروویو، مقدار انرژی مصرفی ویژه کاهش یافت. این نتیجه مشابه نتایجی است که خوش تقاضا و همکاران [۴۵] در مطالعه انجام شده بر روی سویا گزارش نمودند. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه (۱۳۸۰/۸۸ مگاژول برکیلوگرم) دمای ۴۰ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۲۷۰ وات و سرعت هوای ۰/۵ متر بر ثانیه و کمترین مقدار انرژی مصرفی ویژه (۴۸/۵۴) مگاژول برکیلوگرم در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، توان مایکروویو ۶۳۰ وات و سرعت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه به دست آمد. با افزایش دمای هوای ورودی و توان مایکروویو، زمان

خشک شدن کاهش پیدا کرد بنابراین انرژی مصرفی ویژه کاهش می یابد. علت کاهش مصرف انرژی در دماهای بالا و توان های مایکروویو بالا نسبت به توان های مایکروویو و دماهای ورودی پایین این است که رطوبت محصول سریعتر تبخیر شده و زمان خشک شدن به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافت و در اثر کاهش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافت [۲۹]. مقدار انرژی مصرفی ویژه برای بنه در خشک کن هوای داغ مایکروویو اینفرارد ۱۲۷/۶۲ تا ۶۷۸/۹۰ مگا ژول بر کیلو گرم توسط کاوه و همکاران [۱۳] به دست آمد. همچنین داس و اورورا [۴۶] برای خشک کردن قارچ در خشک کن مایکرو هوای داغ میزان انرژی مصرفی ویژه را ۱۲/۸۳ MJ/kg تا ۱۰۸/۹۶ ثبت کردند.

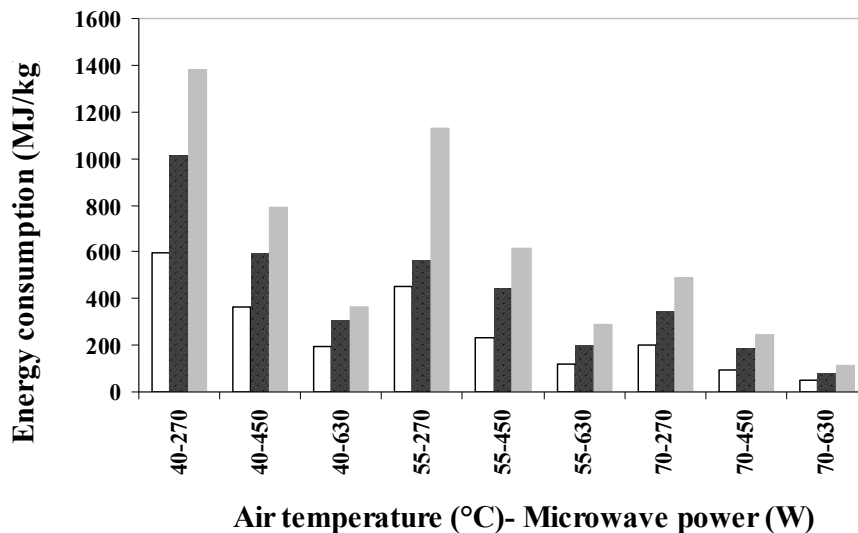


Fig 5 Specific energy consumption for thin layer drying of white mulberry fruit at different levels of air temperatures, velocities (\square 0.5 m/s, \blacksquare 1m/s and \square 1.5 m/s) and microwave power.

بهترین نتایج برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت با توپولوژی TANSIG - LOGSIG - آستانه ۱۶-۱۶-۴ و تابع آستانه TANSIG - LOGSIG - LM می‌باشد که در این ساختار مقادیر MSE و R^2 به ترتیب ۰/۹۹۹۳ و ۰/۲۲۰۰/۰۰۵۲ و به دست آمد.

۳-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

جدول (۵) لیست از بهترین شبکه‌های عصبی با توپولوژی، توابع آستانه و الگوریتم‌های مختلف کاربردی برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت سفید در خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ را نشان می‌دهد. در میان توپولوژی‌های مختلف ارائه‌شده

Table 5 Best selected topologies including training algorithm, different layers and neurons for FFBP and CFBP for moisture ratio

Network	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	R^2	Epoch
FFBP	LM	TAN-LOG-TAN	4-16-16-1	0.0052	0.9993	134
FFBP	BR	LOG-TAN-PUR	4-15-14-1	0.0111	0.9981	99
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	4-8-8-1	0.0095	0.9985	153
CFBP	BR	TAN-TAN-TAN	4-11-11-1	0.0119	0.9979	131

ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی نسبت رطوبت توت در شرایط مختلف می‌باشد که دارای دقت بالا با هزینه و زمان کم می‌باشد. پژوهش‌های قبلی در مورد خصوصیات خشک‌کردن محصولات دیگر مانند کبوی [۳۱]، آویشن [۴۷] و برنج [۴۸] با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بیانگر این موضوع می‌باشند.

شکل (۶) نمودار مقایسه مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی با مقادیر واقعی تجربی مورد نظر را برای نسبت رطوبت توت در یک خشک‌کن مایکروویو- هوای داغ را نشان می‌دهد. که بر اساس نتایج حاصله، بیشترین مقدار ضریب تبیین برای پیش‌بینی نسبت رطوبت ۰/۹۹۹۳ به دست آمد. با این حال می‌توان اظهار داشت که شبکه‌های عصبی یک

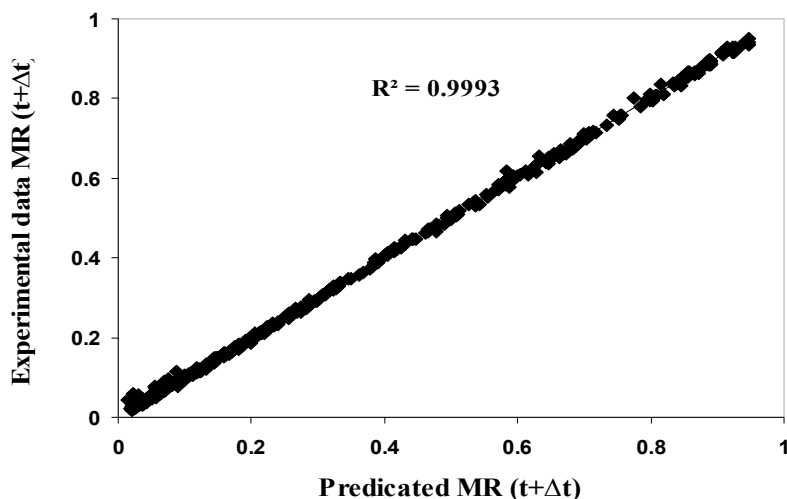


Fig 6 Predicted values of MR using ANN versus experimental values for testing data set

۳-۵- انفیس

در این پژوهش نتایج یک مطالعه تجربی و کاربرد ANFIS برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت استفاده شد. اطلاعات مربوط به بهترین الگوریتم‌ها و نتایج برای ANFIS در جدول (۶) گزارش شده است.

در تجزیه و تحلیل ANFIS، مانند سایر مدل‌های مورد استفاده، بهترین معماری باید طراحی شود. برای دستیابی به این هدف، مدل‌های مختلف ANFIS با استفاده از روش آزمون و خطا طراحی شده‌اند تا تعداد قوانین فازی در پیش‌بینی خروجی تعیین شود. این مدل از هشت نوع تابع عضویت، *psigmf*، *gbellmf*، *Gaussmf*، *Gasuss2mf*، *pimf*، *dsigmf* و *trapmf* استفاده کرد. تعداد قوانین تابع عضویت‌ها از ۳ تا ۵ متغیر بود. تابع عضویت گاوسی به‌عنوان یک تابع عضویت به‌طور گسترده در مدل‌سازی ANFIS مورد استفاده قرار گرفت. مشاهده شد که نوع *trimf* که با توجه به مقادیر R^2 و MSE نسبت به انواع تابع عضویت‌ها بسیار مناسب است. در نهایت، ۳ قوانین فازی برای هر ورودی از تعداد دیگری از قوانین فازی فراتر رفته است. بنابراین، تعدادی از ۸۱ قوانین فازی (۳×۳×۳×۳) بهترین عملکرد و برآورد را برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت در خشک‌کن مایکروویو - هوای داغ را نشان داد (جدول ۷). نتایج ANFIS در جدول (۷) خلاصه شده است.

Table 6 Information of the best models for MR in ANFIS model

Characteristics	MR
Fuzzy structure	Sugeno-type
First FIS for training	Genfis1
MFs to each input	3-3-3-3
Type of MFs for each input	trimf
Epoch	1000
Type of MFs for each output	Linear
Training algorithm	Hybrid
Number of inputs	4
No. of output MFs	81
Number of training data pairs	785
Number of testing data pairs	292
Number of fuzzy rules	81

این جدول نشان می‌دهد که حداقل (MSE) و بالاترین ارزش (R^2) توسط الگوریتم ANFIS ارائه شده است. این ANFIS قادر به پیش‌بینی نسبت رطوبت با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۹۹۵ بود. همچنین، مقدار MSE برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت ۰/۰۰۴۴ به‌دست آمد. نتایج پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای تابع عضویت *trimf* در شکل (۷)

۰/۹۹۹۵ بود. همچنین، مقدار MSE برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت ۰/۰۰۴۴ به‌دست آمد. نتایج پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای تابع عضویت *trimf* در شکل (۷)

دست آمده برای پیش بینی نسبت رطوبت میوه به $R^2=0/9998$ و $RMSE=0/0041$ گزارش نمودند.

نشان داده شده است. در تحقیقات مشابهی ضیا فروغی و همکاران [۱۸] برای پیش بینی نسبت رطوبت میوه به از خشک کن مادون قرمز و مدل انفیس استفاده نمودند. آن‌ها مقادیر به-

Table 7 ANFIS results for trimf membership function

The type of membership function for each entry	Number of membership functions for each entry	MSE	R^2
trimf	3-3-3-3	0.0044	0.9995
trapmf	3-3-3-3	0.0054	0.9993
gaussmf	3-5-3-3	0.0074	0.9990

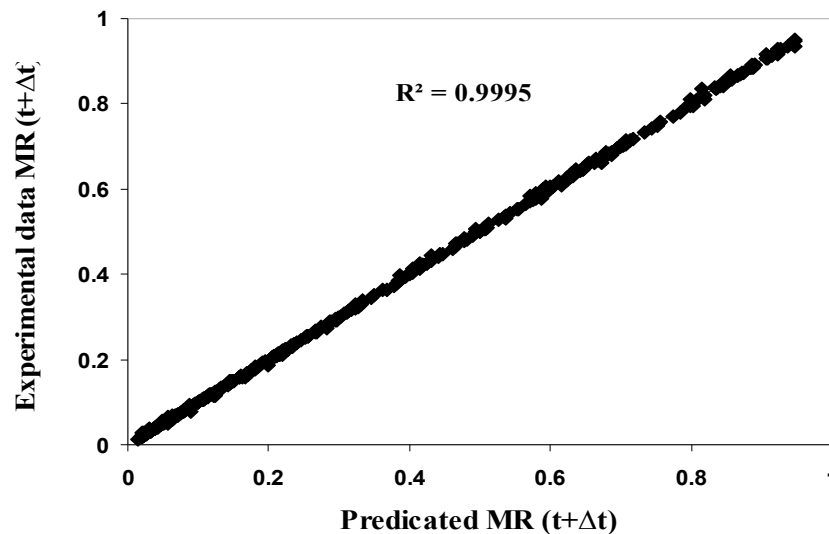


Fig 7 Predicted values of MR using ANFIS versus experimental values for testing data set

برای پیش بینی نسبت رطوبت کدو استفاده کرده‌اند و بیان کرده‌اند که شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به مقدار R^2 بالاتر و $RMSE$ و همچنین مقدار خطای کمتر عملکرد بهتری دارد. کاوه و همکاران [۴۹] در کاربرد مقایسه‌ای بین شبکه‌های عصبی مصنوعی و انفیس برای پیش بینی نسبت رطوبت بادام گزارش داده‌اند که مدل انفیس عملکرد بهتری برای پیش بینی نسبت رطوبت بادام دارد. همچنین در مطالعه ای دیگر کاوه و همکاران [۵۰] در کاربرد مقایسه‌ای بین شبکه‌های عصبی مصنوعی و انفیس برای پیش بینی ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه سیب زمینی، سیر و طالبی گزارش داده‌اند که مدل انفیس عملکرد بهتری برای پیش بینی این پارامترها دارد.

۶-۳- مقایسه مدل‌های ریاضی، شبکه‌های

عصبی مصنوعی و ANFIS

در این مطالعه تلاش شده است تا قابلیت مدل‌های ریاضی، ANN و ANFIS برای پیش‌بینی نسبت رطوبت توت سفید مورد بررسی قرار گیرد. به منظور اندازه‌گیری عملکرد از معادلات توسعه یافته، سه تابع آماری میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. جدول (۸) مقادیر مدل‌های ریاضی، ANN و ANFIS را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول (۷) دقت مدل ANFIS در این تحقیق بیشتر از ANN و مدل‌های ریاضی است. توکلی پور و همکاران [۱۷] از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی

Table 8 Comparing the different method used to predicting the moisture ratio

Model	Statistic criteria		
	R^2	MSE	ε
Page	0.9992	0.0059	2.34
ANN	0.9993	0.0052	2.22
ANFIS	0.9995	0.0044	1.84

- Mechanics of Agricultural, 1(1): 11-15. (In Farsi).
- [2] 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
- [3] Coşkun, S., Doymaz, İ., Tunçkal, C. and Erdoğan, S. (2017). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6): 1863-1871
- [4] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. and Nazghelichi, T. (2011). Modelling the carrot thin-layer drying in a semi-industrial continuous band dryer. *Czech Journal of Food Science*, 29(5): 528-538
- [5] Cakmak, G. and Yıldız, C. (2011). The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89:103-108.
- [6] Benmakhlouf, N., Azzouz, S., Monzó-Cabrera, J., Khdhira, H. and ELCafsi, A. (2017). Controlling mechanisms of moisture diffusion in convective drying of leather. *Heat and Mass Transfer*, 53(4): 1237- 1245.
- [7] Momenzadeh, L., Zomorodian, A. and Mowla, D. (2011). Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using artificial neural network. *Food and Bioproduct Processing*, 89: 15-21.
- [8] Sharifian, F., Motlagh, A.M. and Nikbakht, A.M. (2012). Pulsed microwave drying kinetics of fig fruit (*Ficus carica* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 6(10): 1441-1447.
- [9] Seremet, L., Botez, E., Nistor, O., Andronoiu, D.G. and Mocanu, G. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195: 104-109
- [10] Dehghannya, J., Hosseinlar, S. and Heshmati, M.K., (2018) Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45: 132-151.
- [11] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Pirbalouti, A.G. and Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical

۴- نتیجه گیری

رفتار خشک کردن توت سفید در خشک کن آزمایشگاهی مایکروویو- هوای داغ در دماهای ۴۰، ۵۵ و ۷۰°C، سرعت- های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و توان مایکروویو ۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ وات بررسی شد. دمای هوای ورودی و توان مایکروویو عوامل مهمی در محاسبه زمان خشک شدن، میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی مصرفی ویژه در خشک شدن توت سفید بودند. همچنین برای پیش بینی رطوبت توت از ده مدل ریاضی استفاده شد که نتایج نشان داد مدل Page بهترین مدل برای پیش بینی بود. همچنین مقادیری برای ضریب پخش رطوبت موثر پیدا شد که بیشترین مقدار آن $3/56 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و کمترین مقدار $3/86 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمد. بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر در دمای هوای ۷۰°C و توان مایکروویو ۶۳۰W به دست آمد و کمترین مقدار آن در دمای هوای ۴۰°C و توان مایکروویو ۲۷۰W به دست آمد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای توت سفید به ترتیب ۱۳۸۰/۸۸ مگاژول بر کیلوگرم به دست آمد. بر اساس مجموعه داده ها، چندین مدل پیش بینی غیرخطی (ANN و ANFIS) و مدل های ریاضی برای تخمین نسبت رطوبت توت سفید طراحی شد. برای طراحی دو مدل (ANN و ANFIS) با یک متغیر خروجی (نسبت رطوبت) و چهار متغیر ورودی (سرعت هوای ورودی، دمای هوای ورودی، توان مایکروویو و زمان خشک شدن) انجام شد. برای انتخاب بهترین مدل برای پیش بینی دقیق برای برآورد نسبت رطوبت، مدل های توسعه یافته با همدیگر مقایسه شدند. برای انتخاب بهترین مدل، ضریب تبیین به دست آمده و مجموع رتبه بندی برای هر مدل محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مجموعه داده های آزمایشی، پیش بینی عملکرد مدل ANFIS ($R^2=0/9995$) بالاتر از مدل های Page ($R^2=0/9992$) و ANN ($R^2=0/9993$) به دست آمد. بنابراین مدل ANFIS در مقایسه با سایر مدل ها بهترین نتیجه را در پیش بینی نسبت رطوبت توت سفید داشت.

۵- منابع

- [1] Azadbakht, M., Rezaei Asl, A., Asghari, A. and Gholikhani, A. (2013). Evaluation of drying processs of White mulberry using microwave oven. *Journal of Researches in*

- [20] Kaveh, M. and Amiri Chayjan, R. (2017). Modeling thin-layer drying of turnip slices under semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, e12778.
- [21] Beigi, M. (2017). Thin layer drying of wormwood (*Artemisia absinthium* L.) leaves: dehydration characteristics, rehydration capacity and energy consumption. *Heat and Mass Transfer*, 53(8): 2711-2718.
- [22] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R. and Nikbakht, A.M. (2017). Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer*, 53(6): 2045–2059.
- [23] Junqueira, J.R.D.J., Correa, J.L.G., Oliveira, H.M.D., Avelar, R.I.S. and Pio, L.A.S. (2017). Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. *LWT - Food Science and Technology*, 82: 404- 410.
- [24] Jiang, J., Dang, L., Tan, H., Pan, B. and Wei, H. (2017). Thin layer drying kinetics of pre-gelatinized starch under microwave. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 72: 10-18.
- [25] Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A. and Mahrouz M. (2017). Drying characteristics and kinetics solar drying of moroccan rosemary leaves. *Renewable Energy*, 108: 303-310.
- [26] Doymaz, I. (2012). Drying of potato slices: Effect of pretreatments and mathematical modeling. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(4): 310-319.
- [27] Lakshmi, D.V.N., Muthukumar, P., Layek, A. and Nayak, P.K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120: 23- 34.
- [28] Lopez, J., Vega-Galvez, A., Rodríguez, A., Uribe, E. and Díaz, P. (2017). Vacuum drying of Chilean murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: Effect of temperature on kinetic parameters and assessment of energy consumption. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5): e13162.
- [29] Arabi, M., Faezipour, M.M., Layeghi, M., Khanali M. and Hosseinabadi M.Z. (2017). Evaluation of thin-layer models for describing drying kinetics of poplar wood particles in a fluidized bed dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5): e12778.
- [12] Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H. and Maskan, M. (2018). Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat and Mass Transfer*. 54(2): 425-436.
- [13] Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E. and Mohammadigol, R. (2018). Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat and Mass Transfer*, 45(7): 1879-1899.
- [14] Movagharnejad, K. and Nikzad, M. (2007). Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Computers and electronics in agriculture*, 59(1), 78-85.
- [15] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R. and Khezri, B. (2018). Modeling drying properties of pistachio nuts, squash and cantaloupe Seeds under fixed and fluidized bed using data-driven models and artificial neural networks. *International Journal of Food Engineering*. 14(1): DOI: 10.1515/ijfe-2017-0248. (In Press)
- [16] Motavali, A., Najafi, G.H., Abbasi, S., Minaei, S. and Ghader, A. (2013). Microwave–vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks. *Journal of Food Science and Technology*, 50(4):714–722.
- [17] Tavakolipour, H., Mokhtarian, M. and Kalbasi-Ashtari, A. (2014) Intelligent monitoring of zucchini drying process based on fuzzy expert engine and ANN. *Journal of Food Process Engineering*, 37(5): 474- 481.
- [18] Ziaforoughi, A., Yousefi, A.R. and Razavi, S.M.A. (2016). A comparative modeling study of quince infrared drying and evaluation of quality parameters. *International Journal of Food Engineering*, 12(9): 901-910.
- [19] Kayran, S. and Doymaz, I. (2017). Determination of drying kinetics and physicochemical characterization of apricot pomace in hot-air dryer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130(2): 1163-1170.

- oven. *Heat and Mass Transfer*, 53(6): 2117-2127.
- [39] Jiao, A., Xu, X. and Jin, Z. (2014). Modelling of dehydration–rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, 92(3): 259-265.
- [40] Lechtanska, J.M., Szadzinska, J. and Kowalski, S.J. (2015). Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chemical Engineering and Processing*, 98: 155–164.
- [41] Bhattacharya, M., Srivastav, P.P. and Mishra, H.N. (2015). Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Food Science and Technology*, 52(4): 2013-2022.
- [42] Izli, N., Izli, G. and Taskin, O. (2017). Drying kinetics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity properties of kiwi dried by different methods. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1): 64-74.
- [43] Salim, N.S.M.D., Gariépy, Y. and Raghavan, V. (2017). Hot air drying and microwave-assisted hot air drying of broccoli stalk slices (*Brassica oleracea L. Var. Italica*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3): e12905.
- [44] Malekjani, N., Emam-Djomeh, Z., Hashemabadi, S.H. and Askari, G.R. (2017). Modeling thin layer drying kinetics, moisture diffusivity and activation energy of hazelnuts during microwave-convective drying. *International Journal of Food Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0100>. (In Press)
- [45] Khoshtaghaza, M.H., Darvishi, H. and Minaei, S. (2015). Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8): 4749- 4760.
- [46] Das, I. and Arora, A. (2018). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*, 223: 208- 219.
- [47] Rodríguez, J., Clemente, G. Sanjuán, N. and Bon, J. 2014. Modelling drying kinetics of thyme (*Thymus vulgaris L.*): Theoretical and empirical models, and neural networks. *Food Science and Technology International*, 20: 13-22.
- Particulate Science and Technology, 35(6): 723-730.
- [30] Motevali, A. and Tabatabaei, S.R. (2017). A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. *Journal of Cleaner Production*, 154: 445-461.
- [31] Mahjoorian, A., Mokhtarian, M. Fayyaz, N. Rahmati, F. Sayyadi, S. and Ariaii. P. (2017). Modeling of drying kiwi slices and its sensory evaluation. *Food Science and Nutrition*, 5: 466-473.
- [32] Motahari-Nezhad, M. and Mazidi. M. S. (2016). An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for prediction of thermal contact conductance between exhaust valve and its seat. *Applied Thermal Engineering*, 105: 613-621.
- [33] Tao, Y., Li, Y., Zhou, R., Chu, D.T., Su, L., Han Y. and J. Zhou. (2016). Neuro-fuzzy modeling to predict physicochemical and microbiological parameters of partially dried cherry tomato during storage: effects on water activity, temperature and storage time. *Journal of Food Science and Technology*, 53: 3685-3694.
- [34] Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M. and Mousazadeh, H. (2014). Development of an intelligent system based on ANFIS for predicting wheat grain yield on the basis of energy inputs. *Information Processing in Agriculture*, 1(1): 14-22.
- [35] Bassar, H., Karami, H., Shamshirband, S., Akib, S., Amirmojahedi, M., Ahmad, R., Jahangirzadeh, A. and Javidnia, H. (2015). Hybrid ANFIS–PSO approach for predicting optimum parameters of a protective spur dike. *Applied Soft Computing*, 30: 642-649.
- [36] Al-Mahasneh, M., Aljarrah, M., Rababah, T. and Alu'datt, M. (2016). Application of hybrid neural fuzzy system (ANFIS) in food processing and technology. *Food Engineering Reviews*, 8: 351-366.
- [37] Armaghani, D.J., Mohamad, E.T., Hajihassani, M., Yagiz, S. and Motaghedi, H. (2016). Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances. *Engineering with Computers*, 32(2): 189-206.
- [38] Horuz, E., Bozkurt, H., Karatas, H. and Maskan, M. (2017). Drying kinetics of apricot halves in a microwave-hot air hybrid

- under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7): e12868.
- [50] Kaveh, M., Sharabiani, V. R., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad E., Abbaspour-Gilandeh, Y., and Golpour, I. (2014). ANFIS and ANNs model for prediction of moisture diffusivity and specific energy consumption potato, garlic and cantaloupe drying under convective hot air dryer. *Information Processing in Agriculture*. 5: (2018) 372–387.
- [48] Beigi, M., Torki-Harchegani, M. and Mahmoodi-Eshkaftaki, M. (2017). Prediction of paddy drying kinetics: A comparative study between mathematical and artificial neural network modeling. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 23(2): 251–258.
- [49] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E. and Moghimi, M.B.F. (2018). The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel

Prediction of white mulberry drying kinetics in microwave-convective dryer: A comparative study between mathematical model, artificial neural network and ANFIS

Kaveh, M. ^{1*}, Jahanbakhshi, A. ¹, Golpour, I. ², Mesri Gandshmin, T. ³,
Abbaspour-Gilandeh, Y. ⁴, Jahedi Rad, Sh. ⁵

1. Ph.D. student, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Ph.D. student, Department of Biosystems Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran.
3. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
4. Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
5. Department of Agricultural Sciences, University of Payam Noor, Tehran, Iran.

(Received: 2018/04/08 Accepted:2019/05/05)

The aim of this study was to determine the kinetics, effective moisture diffusivity, activation energy, specific energy consumption, and also predict the moisture content of white mulberry during the drying process with microwave-hot air dryer using mathematical models, Artificial Neural Networks (ANN) and Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). Drying process was accomplished in three temperature levels (40, 55, and 70°C), three inlet air velocity levels (0.5, 1 and 1.5 m/s) and three microwave power levels (270, 450 and 630 W). To estimate the moisture ratio of white mulberry, 10 mathematical models, ANN and ANFIS were used to fit the experimental data of thin-layer drying. The results showed, the maximum and minimum effective moisture diffusivity during drying was calculated 3.56×10^{-9} and 3.86×10^{-10} m²/s, respectively. Also, the minimum and maximum effective moisture diffusivity during drying was achieved 48.54 and 1380.88 Mj/kg, respectively. Among the mathematical models under study, the Page model was the best model for describing the behavior of the thin layer of white mulberry drying. The mean square error (*MSE*) values for the mathematical models, ANN, and ANFIS were 0.00059, 0.0052 and 0.0044, respectively. Therefore, the ANFIS model with the highest Correlation Coefficient ($R^2=0.99995$), the least percentage of mean relative error ($\epsilon=1.84$) and mean square error ($MSE=0.0044$) were used to evaluate the moisture ratio in comparison with other methods implemented in this research Selected as the best model.

Keywords: White mulberry, Moisture ratio, Effective moisture diffusivity, Artificial neural network, ANFIS.

* Corresponding Author E-Mail Address: sirwankaweh@uma.ac.ir