

# بکارگیری روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در بررسی و تخمین برخی مشخصه‌های خشک کردن بادنجان و شلغم در یک خشک‌کن ترکیبی مایکروویو - همرفتی

محمد کاوه\*

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سردشت (ارومیه)، دانشگاه آزاد اسلامی، سردشت (ارومیه)، ایران  
(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۸)

## چکیده

در این پژوهش، به منظور برآورد خواص خشک‌کردن بادنجان و شلغم در یک خشک‌کن مایکروویو- همرفتی از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. فرآیند خشک‌کردن در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C)، سه سطح سرعت هوای ورودی (۱/۵ و ۱/۱ و ۱/۷ m/s) و سه سطح توان مایکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W) در یک خشک‌کن مایکروویو- همرفتی صورت گرفت که این سه پارامتر به عنوان ورودی در پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه، در شبکه‌ی عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای پیش‌بینی نرخ خشک‌کردن و نسبت رطوبت علاوه بر این سه پارامتر از زمان خشک‌کردن نیز به عنوان پارامتر ورودی استفاده شد. برای ایجاد الگوهای آموزشی و ارزیابی فرآیند، از شبکه عصبی پس انتشار پیش‌خور و پیش‌رو با توابع آموزش لونیبرگ - مارکوارت (LM) و تنظیم بیزی (BR) برای آموزش الگوها استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای بادنجان و شلغم به ترتیب  $(3/39 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$  و  $(3/05 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$  حاصل شد. نتایج بررسی‌های شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که شبکه‌ی بهینه پس انتشار پیش‌خور با توپولوژی ۲-۲۰-۲۰-۳ و تابع آموزش لونیبرگ- مارکوارت توانست ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه را به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۹۸۲۱ و ۰/۹۹۵۲ و خطای میانگین مربعات ۰/۰۰۰۱۴ در شرایط مختلف خشک‌کردن بادنجان و شلغم پیش‌بینی نماید. همچنین بیشترین ضرایب تبیین برای پیش‌بینی نرخ خشک‌کردن و نسبت رطوبت به ترتیب ۰/۹۶۹۸ و ۰/۹۹۸۸ با مقدار خطای میانگین مربعات ۰/۰۰۴۵ در شبکه‌ی عصبی پیش‌رو با الگوریتم آموزشی لونیبرگ- مارکوارت به دست آمد.

**کلید واژگان:** بادنجان و شلغم، خشک‌کن مایکروویو- همرفتی، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی ویژه، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

\* مسئول مکاتبات: sirwankaweh@gmail.com

## ۱- مقدمه

بادنجان (*Solanum melongena L.*) یکی از مهم ترین سبزیجات در بازار کشورهای آسیایی و حوزه‌ی دریای مدیترانه می باشد. ایران یکی از بزرگترین تولید کنندگان بادنجان در جهان محسوب می‌شود. بادنجان حاوی انواع مواد شیمیایی گیاهی مانند فنولیک و فلاونوئیدها می‌باشد. از نظر آنتی اکسیدان و ترکیبات فنلی در میان ۱۰ سبزیجات از رتبه‌ی بالایی برخوردار می باشد [۱].

شلغم (*Brassica rapa L.*) به عنوان یکی از سبزیجات قدیمی مورد کشت، با داشتن ویتامین و خواص معدنی برای مصارف انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که قدمت آن به ما قبل تاریخ بر می‌گردد. شلغم در اروپا و ایران و به ویژه در مناطق با آب و هوای سرد تولید می‌شود [۲].

با این حال در حالت عادی عمر مفید این دو محصول برای نگهداری بسیار محدود می‌باشد. بنابراین برای نگهداری این نوع محصولات سبزی از روش‌های متداول خشک کردن برای حفظ انبارمانی و کیفیت نهایی آن‌ها می‌توان استفاده نمود. خشک شده‌ی این محصولات با داشتن خواص دارویی مختلف در انواع مختلف غذاها از جمله سوپ، سس و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

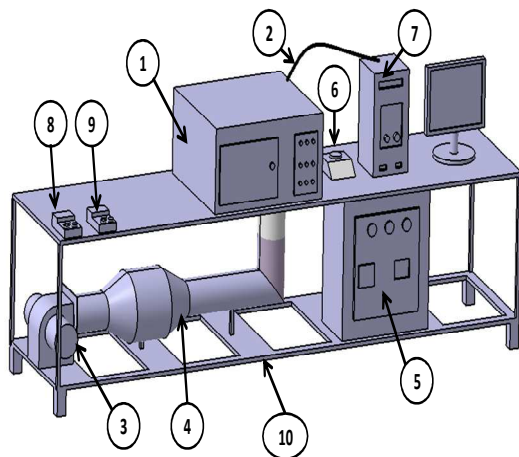
خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی و محصولات کشاورزی است که تا حد زیادی بر کیفیت محصول تاثیرگذار می‌باشد. در خشک کردن علاوه بر جلوگیری از فساد ماده غذایی ناشی از حمله میکروارگانیسم‌ها یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده غذایی به دلیل از دست رفتن رطوبت محصول کاهش می‌یابد و در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری صرفه جویی می‌شود [۳ و ۴]. خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی با استفاده از خشک‌کن‌های میکروویو می‌تواند جانشین مناسبی برای خشک‌کن‌های هوای گرم محسوب شود. فرآیند خشک کردن با استفاده از میکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. لازم به ذکر است بیان گردد که طیف الکترومغناطیسی بین فرکانس‌های ۳۰۰ مگا هرتز تا ۳۰۰ گیگا هرتز نشان‌گر امواج مایکروویو است. با این حال بر خلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرمایش در سراسر ماده غذایی گسترش می‌یابد. خشک‌کن مایکروویو دارای مزیت‌های زیادی از جمله سرعت خشک شدن بالا، بهره‌وری انرژی بالا، کیفیت بهتر محصول و استفاده موثر از فضا می باشد [۵ و ۶]. مطالعات متعددی در

مورد خشک کردن محصولات کشاورزی با خشک‌کن مایکروویو- همرفتی مانند پسته [۷]، لفل سبز [۸]، قارچ [۹] و توت [۱۰] انجام شده است.

در شرایطی که روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته پیچیده باشد، روش‌های مدل سازی ریاضی، با محدودیت‌هایی از جمله انتخاب پارامترها، اعمال پیش فرض‌ها برای حل معادلات و پیچیدگی حل معادلات روبرو خواهد شد. بنابراین بهترین انتخاب استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند است. یکی از این روش‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی است که یک روش غیرالگوریتمی بوده و بر اساس آن بر مبنای آموزش و یادگیری به کمک داده‌ها موجود است [۱۱]. شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از مهمترین روش‌های هوش مصنوعی بوده که در آن با الهام از مدل مغز انسان، ضمن اجرای فرآیند آموزش، اطلاعات مربوط به داده‌ها، در قالب وزن‌های شبکه ذخیره می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم وسیع پردازش اطلاعات با توزیع موازی می‌باشد که مشخصه‌های عملکردی معینی مشابه با شبکه‌های عصبی بیولوژیکی مغز انسان دارد [۱۲].

استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط محققین زیادی از جمله کاوه و همکاران [۱۳]، برای پیش‌بینی نرخ خشک کردن و نسبت رطوبت بادنجان با استفاده از خشک‌کن پیوسته، مهجوریان و همکاران [۱۴]، برای پیش‌بینی نرخ نسبت رطوبت خشک کردن تکه‌های کیوی با استفاده از خشک‌کن همرفتی- هوای داغ و ناز قلیچی و همکاران [۱۵]، برای پیش‌بینی نرخ خشک کردن، نسبت رطوبت خشک کردن هویج با استفاده از خشک‌کن بستر سیال، صمدی و همکاران [۱۶]، برای پیش‌بینی نرخ خشک کردن و نسبت رطوبت خشک کردن سیب با استفاده از خشک‌کن هوای داغ و کاوه و امیری چایجان [۱۷]، برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی ویژه، چروکیدگی، نرخ خشک کردن و نسبت رطوبت بنه با استفاده از خشک‌کن بستر سیال از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده نمودند.

با این حال با توجه به مطالعات صورت گرفته، بررسی‌ای در مورد فرآیند خشک کردن بادنجان و شلغم با خشک‌کن مایکروویو- همرفتی و همچنین تخمین پارامترهای خشک کردن آن‌ها با شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت نگرفته است. با توجه به ضرورت‌های بیان شده هدف از این پژوهش، تعیین و پیش‌بینی مشخصه‌های خشک کردن از جمله ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی ویژه، نرخ خشک کردن و نسبت



**Fig 1** Schematic diagram of laboratory scale microwave – convective dryer: (1) drying chamber (2) air velocity sensor (3) fan and electrical motor, (4) electrical heater, (5) inverter and thermostat, (6) precision balance, (7) computer, (8) thermometer, (9) hygrometer and (10) chassis

اتاقک خشک‌کن شامل یک مجرای پیرکس به قطر ۱۰۰ میلی-متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر بود که در داخل اجاق مایکروویو قرار گرفته بود. استوانه پیرکس (Corning Incorporated, MA, Lowell) دارای قطر خارجی ۳۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۰ میلی‌متر بود که به عنوان محفظه‌ی خشک‌کن همرفتی استفاده شد.

برای توزین نمونه‌ها در حین مراحل خشک‌کردن از یک ترازوی دیجیتال AND GF- 600، ساخت کشور ژاپن با درجه‌ی تفکیک ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد. از یک ترموستات آتیین 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. همچنین برای جلوگیری از تلفات حرارتی، دور کانال منتهی به محفظه با پشم شیشه عایق‌بندی شد. برای انجام آزمایش‌ها از یک مایکروویو پاناسونیک مدل Sharp R-Sharp (I96T, Sharp Electronics) ساخت تایلند با حداکثر توان ۹۰۰W و با درجه‌ی تفکیک (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰) استفاده شد. این مایکروویو قابلیت تنظیم توان در سطوح ۹۰، ۲۷۰، ۴۵۰، ۶۳۰ و ۹۰۰W را داشت. برای اندازه‌گیری دمای محیط و محفظه خشک‌کن و همچنین رطوبت نسبی هوا، از دستگاه رطوبت‌سنج-دماسنج لوترون (Lutron, YK-2005RH, Taiwan) استفاده شد.

رطوبت بادنجان و شلغم پس از خشک‌کردن با خشک‌کن مایکروویو- همرفتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

بادنجان و شلغم تازه با درجه‌ی رسیدگی و رنگ یکنواخت از بازار محلی در شهر همدان خریداری و تهیه گردید. برای جلوگیری از کاهش رطوبت اولیه محصولات، نمونه‌های مورد آزمایش، تا زمان انجام شروع آزمایش‌ها داخل دو پلاستیک مهر و موم شده به صورت جداگانه، در داخل یخچال با دمای  $4 \pm 1^\circ\text{C}$  نگهداری شد. برای انجام آزمایش‌ها، به منظور رسیدن به دمای اتاق، نمونه‌ها دو ساعت قبل از برش‌زدن از یخچال خارج می‌شدند. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کاتر از مقطع عرضی با ضخامت سه میلی‌متر برش داده می‌شد. برای تعیین رطوبت اولیه محصولات از نمونه‌های ورقه‌ای ۲۰ گرمی استفاده شد که به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $70^\circ\text{C}$  با استفاده از روش آون داغ مقدار رطوبت اولیه این محصولات به دست آمد [۲]. رطوبت اولیه برای بادنجان و شلغم با روش آون داغ به ترتیب ۱۰/۲۵، ۹/۹۱ بر پایه‌ی خشک محاسبه شدند.

### ۲-۲- خشک‌کن آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌ها از یک خشک‌کن مایکروویو- همرفتی موجود در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا همدان استفاده گردید (شکل ۱). خشک‌کن شامل یک دمنده‌ی سانترفوژ، المنت گرم‌کننده‌ی هوا (نه المنت)، لوله‌های رابط برای جریان و انتقال هوا، محفظه‌ی استوانه‌ای خشک‌کن، مایکروویو، اینورتر (Vincker VSD2, ABB Co.)، ساخت تایوان برای تنظیم سرعت چرخش دمنده و سیستم تنظیم دمای هوای ورودی بود. موتور مورد استفاده از نوع سه فاز، که دارای تعداد دور ۲۸۰۰ rpm و قدرت ۲۵۰ W بود.

## ۲-۳- نحوه‌ی انجام آزمایش

قبل از شروع آزمایش‌ها، دستگاه خشک‌کن به مدت نیم ساعت برای رسیدن به شرایط تعادل پایدار زودتر روشن می‌شد. آزمایش‌ها با برش‌های بادنجان و شلغم با ضخامت سه میلی متر در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۵ و ۷۰°C) و سه سطح سرعت هوای ورودی (۱/۵ و ۱/۱ و ۱/۷ 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. در نهایت تمامی فرآیند آزمایش‌ها از رطوبت اولیه ۱۰/۲۵ برای بادنجان و ۹/۹۱ برای شلغم تا زمانی که رطوبت نهایی بادنجان و شلغم بعد از خشک کردن به ۰/۱ بر پایه‌ی خشک می رسید متوقف می‌شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

## ۲-۴- برازش منحنی‌های خشک کردن

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طول خشک کردن دو محصول به وسیله رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید [۱۸]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_b - M_e}$$

که در آن  $MR$  نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$  نسبت رطوبت در زمان  $t$ ،  $M_b$  و  $M_e$  به ترتیب، رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی بر پایه‌ی خشک (d.b.) می‌باشند.

برای زمان‌های طولانی خشک شدن در خشک‌کن مایکروویو-همرفتی، مقدار  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_t$  و  $M_b$  خیلی کوچک می‌باشد بنابراین این رابطه از فرم زیر پیروی می‌کند [۱۹]:

$$MR = \frac{M_t}{M_b}$$

## ۲-۵- محاسبه‌ی نرخ خشک کردن

نرخ تبخیر رطوبت عبارت است از مقدار رطوبت خارج شده از واحد سطح ماده‌ی خشک‌شده در واحد زمان که نشان‌دهنده‌ی سرعت تبخیر رطوبت از محصول می‌باشد. نرخ تبخیر رطوبت با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه شد [۲۱ و ۲۰].

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt}$$

که در آن  $DR$  نرخ خشک کردن (kg water / kg dry matter S)،  $M_{t+dt}$  میزان رطوبت در زمان  $t+dt$  (kg water / kg dry

matter)،  $M_t$  مقدار رطوبت در زمان  $t$  (kg water / kg dry matter) و  $dt$  تغییرات زمانی (min) می‌باشد.

## ۲-۶- تعیین ضریب پخش رطوبت موثر

قانون دوم فیک برای شرایط لایه‌ی نازک در محصولات با فرض ناچیز بودن اثرات دما و مجموع گرادیان فشار می‌توان انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [۲۲]. با فرض اینکه در فرآیند خشک کردن بادنجان و شلغم، ضریب پخش رطوبت موثر ثابت و شعاعی است می‌توان مقدار آن را از رابطه‌ی ۴ محاسبه نمود [۲۳]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_b - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

که در آن که در آن  $n$  تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)،  $t$  زمان خشک شدن (s)،  $L$  نصف ضخامت نمونه‌ها (m) و  $D_{eff}$  ضریب پخش رطوبت موثر ( $m^2/s$ ) است. وقتی  $t$  افزایش می‌یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می‌شوند در نتیجه خواهیم داشت [۲۴]:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_b - M_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right)$$

سپس با رسم  $\ln(MR)$  نسبت به زمان و مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه ۴، ضریب نفوذ را می‌توان به دست آورد.

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)$$

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

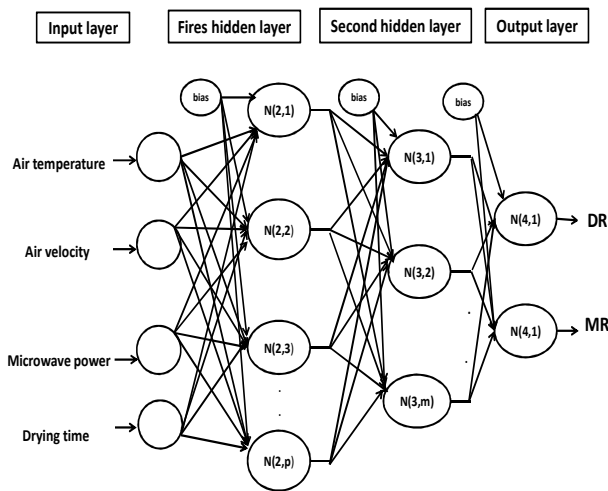
## ۲-۷- تعیین انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز برای خارج کردن یک کیلوگرم آب از محصولات بادنجان و شلغم با استفاده از خشک‌کن مایکروویو-همرفتی به عنوان انرژی مصرفی ویژه ( $SEC_{total}$ ) بیان می‌گردد و برای محصولات بادنجان و شلغم در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-همرفتی از روابط زیر به دست می‌آید [۲۶ و ۲۵]:

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

$$SEC_{mic} = \frac{60Pt}{m_{vmic}}$$

شبکه‌های آموزش‌دیده و بقیه داده‌ها (۷۵٪) به منظور آموزش شبکه انتخاب شدند.



**FIG 2** Selected ANN structure with two hidden layers

یک شبکه‌ی پرسپترون دو و سه لایه با توابع فعال‌سازی مختلف برای تعیین ساختار مطلوب مورد آزمایش قرار گرفت. تعداد نرون‌های لایه‌ی میانی (یک لایه و دو لایه) از سه تا ۲۰ تغییر داده شدند. به منظور پردازش داده‌های مورد آزمایش از دو شبکه پس انتشار پیش‌خور (Feed Forward Back Propagation (FFBP)) و پس انتشار پیشرو (Cascad Forward Back Propagation (CFBP)) استفاده شد. همچنین از توابع آموزش لئونبرگ-مارکواردت (Levenberg-Marquardt (LM)) و تنظیم بی‌زی (Bayesian Regulation (BR)) برای بهنگام‌سازی وزن-های شبکه‌های مورد نظر بکار گرفته شد.

**Table 1** Input parameters for artificial neural networks and their boundaries for prediction of effective moisture diffusivity, specific energy consumption, drying rate and moisture ratio of eggplant and turnip

Parameters	Minimum	Maximum	No. of levels
Microwave power (W)	270	630	3
Air temperature (°C)	40	70	3
Air velocity (m/s)	0.5	1.7	3
Drying time (min)	0	81	-

الگوریتم پس‌انتشار خطا روش اصلی برای بهنگام‌سازی وزن-های شبکه FFBP برای انجام محاسبات است. شبکه‌های پس‌انتشار پیشرو (CFBP): خصوصیات اصلی شبکه مذکور این است که نرون‌های هر لایه به همه نرون‌های قبل متصل است. توابع نگاشت و الگوریتم‌های به‌کار گرفته شده برای شبکه پس‌انتشار پیشرو مشابه شبکه پس‌انتشار

$$SEC_{total} = SEC_{con} + SEC_{mic}$$

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

## ۲-۸- طراحی روند آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی

ساختار عمومی شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در شکل (۲) نشان داده شده است. از این شبکه برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه با سه نرون در لایه-ی اول که برابر با تعداد ورودی‌ها از جمله دمای هوای ورودی، سرعت هوای ورودی و توان می‌کروویو بوده است استفاده شد. برای پیش‌بینی نسبت رطوبت و نرخ خشک‌کردن، لایه‌ی اول چهار نرون داشت که برابر با تعداد ورودی‌ها می-باشد. این ورودی‌ها علاوه بر سه فاکتور ذکر شده زمان خشک‌کردن نیز بود. همچنین در لایه‌ی خروجی از دو نرون (نسبت رطوبت و نرخ خشک‌کردن) استفاده شد. جدول ۱، مختصری از پارامترهای ورودی (مرز و سطوح) شبکه را نشان می‌دهد. به منظور بررسی و ارزیابی شبکه‌های مختلف، پایگاه داده‌ای به دو دسته‌ی آموزش و ارزیابی تقسیم شد. حدود ۲۵٪ کل الگوها به طور تصادفی برای ارزیابی

شبکه‌ی پس‌انتشار پیش‌خور (FFBP): ساختار ایستایی (غیره وابسته به زمان) شبکه‌ی پس‌انتشار پیش‌خور در مسایل مهندسی و محاسبات علمی کاربرد دارد. نرون‌ها که عناصر پردازشگر سیگنال هستند از طریق اتصالات سیناپسی بین لایه-ای پیش‌خور به هم متصل می‌شوند. ارتباط ورودی-خروجی ممکن است به وسیله توابع نگاشت غیرخطی انجام شود.

با استفاده از نرم‌افزار Excel 2010 انجام می‌شود که این کار مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها می‌گردد. برای نرمال-سازی داده‌های مورد استفاده از رابطه (۱۱) بهره گرفته شد.

$$X_n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

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 می‌باشند.

شاخص‌های کمی بسیاری جهت ارزیابی کارکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. معیارهای از جمله ضریب تبیین (همبستگی) ( $R^2$ )، شاخص میانگین مربعات خطا ( $MSE$ )، میانگین خطای مطلق ( $MAE$ ) برای تعیین کیفیت عملکرد شبکه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. شاخص میانگین مربعات خطا، دقت مدل را بر اساس تفاضل بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده، مورد ارزیابی قرار می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله، هر چه قدر این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد، بیانگر اختلاف کمتری بین آن‌ها خواهد بود [۱۴ و ۲۹]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M [S_i - T_i]}{\sum_{i=1}^M [S_i - T_m]}, \quad \left( T_m = \frac{\sum_{i=1}^M S_i}{M} \right)$$

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

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M |S_i - T_i|$$

در این روابط  $S_i$  مقدار پیش‌بینی شده به وسیله شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای الگوی  $i$  ام،  $T_i$  مقدار آزمایشی برای الگوی  $i$  ام،  $T_m$  میانگین مقادیر پیش‌بینی شده،  $S_{ip}$  خروجی شبکه در نرون  $i$  ام و الگوی  $p$  ام،  $T_{ip}$  خروجی هدف در نرون  $i$  ام و الگوی  $p$  ام،  $n_p$  تعداد الگوها،  $n_o$  نرون‌های لایه‌ی خروجی،  $N$  تعداد نرون‌های خروجی و  $n$  تعداد الگوهای آموزش است. شبکه‌های عصبی مصنوعی از چندین لایه تشکیل می‌شوند. لایه‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب لایه‌ی ورودی و لایه‌ی خروجی نام دارند. همچنین بین این دو لایه ممکن است یک یا دو لایه‌ی پنهان وجود داشته باشند. خروجی شبکه  $X_j$  به صورت زیر مدل می‌شود:

پیش‌خور است. نکته قابل توجه این است که به دلیل افزایش پیوندهای بین نورونی، شبکه به کار رفته پیچیده‌تر می‌شود. زیرا حجم محاسبات آن افزایش می‌یابد [۲۷].

الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (LM): الگوریتم مبتنی بر ماتریس هسین، به شبکه اجازه می‌دهند تا با دقت بیشتری الگوها را فرا بگیرد. الگوریتم LM برای آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی از طریق توزیع محاسبات و فضای مورد نیاز، موازی عمل می‌کند و از اینرو سریع‌ترین روش برای آموزش شبکه‌های عصبی پس‌انتشار با ابعاد متوسط (حداکثر چند صد اتصال وزنی و بایاس) است.

الگوریتم تنظیم بیزی (BR): فرایند آموزش شبکه پس‌انتشار با الگوریتم تنظیم بیزی، با توزیع تصادفی وزن‌های اولیه آغاز می‌شود. توزیع تصادفی این پارامترها جهت‌گیری اولیه را قبل از ارائه داده‌ها به شبکه تعیین می‌کند. بعد از ارائه داده‌ها به شبکه بهنگام‌سازی وزن‌های اولیه آغاز می‌شود تا توزیع ثانویه با استفاده از تنظیم بیزی حاصل شود. از آنجایی که داده‌های به کار رفته ممکن است با خطاهای زیادی همراه باشند، روش‌های موثری برای بهبود عملکرد تعمیم، ضروری خواهد بود. از اینرو، روش تنظیم بیزی که شامل تنظیم پیچیدگی شبکه و اصلاح تابع عملکرد است، مناسب است [۲۸].

برای پیش‌بینی نسبت رطوبت و نرخ خشک‌کردن ۹۶۰ داده و برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه تعداد ۵۴ داده استفاده شد که حدود ۲۵ درصد داده‌ها به طور تصادفی برای ارزیابی شبکه آموزش دیده مورد استفاده قرار گرفت.

در طی فرآیند آموزش، شبکه‌های عصبی مصنوعی به کمک داده‌های آموزشی، ارتباط بین نرون‌ها را در هر چرخه‌ی آموزش فرا می‌گیرند تا این مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر خروجی مطلوب نزدیک شوند و مقادیر خطای حاصل از مقادیر خطای مشخص شده کمتر گردد. پارامترهای ترکیبی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها، تعداد چرخه آموزش، در طی فرآیند آموزش شبکه و به روش آزمون و خطا تعیین می‌شوند. از نرم‌افزار Neural Network Toolbox (MATLAB ver4.01) نیز برای انجام تحلیل‌ها برای طراحی و ارزیابی شبکه‌های عصبی مصنوعی مختلف و پیش‌بینی پارامترهای خشک‌کردن استفاده شد.

اصولاً عدم پیش‌پردازش داده‌ها باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. برای دوری از چنین شرایطی و همچنین به منظور یکسان‌سازی ارزش داده‌ها برای شبکه، عمل نرمال‌سازی

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

تابع فعال‌سازی تانزانت  
هایپربولیک

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

برای شبکه‌های پس‌انتشار،  $N$  تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی،  $W_{ij}$  وزن بین لایه‌ی  $i$  و  $j$ ،  $Y_i$  خروجی نرون  $i$  ام و  $b_j$  مقدار بایاس نرون لایه‌ی  $j$  ام است. طی فرآیند آموزش این وزن‌ها و مقادیر ثابتی که با آن‌ها جمع می‌شود اصطلاحاً بایاس نامیده می‌شوند، به طور پی در پی تغییر می‌کند تا خطا به کمترین مقدار خود برسد. پس از محاسبه هر  $X_j$ ، شبکه تحت یک تابع فعال‌سازی شروع به اصلاح آن می‌کند. برای بهینه‌سازی ساختار شبکه از سه تابع فعال‌سازی تابع سیگموئید لگاریتمی، تابع خطی و تانزانت هایپربولیک سیگموئید استفاده شد [۲]:

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

تابع فعال‌سازی سیگموئید

$$Y_j = X_i$$

تابع فعال‌سازی خطی

### ۳- نتایج و بحث ۳-۱- سنتیک خشک‌شدن

تمامی فرآیند آزمایش‌های خشک‌کردن بادنجان و شلغم تازه با محتوای رطوبتی اولیه به ترتیب ۱۰/۲۵٪ و ۹/۹۱٪ بر پایه‌ی خشک انجام گرفت و تا اینکه رطوبت نهایی آن‌ها به حدود ۱۰٪ بر پایه‌ی خشک رسید ادامه یافت. منحنی‌های خشک‌کردن بادنجان و شلغم در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-همرفتی در سه سطح توانی مایکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W)، سه سطح دمایی (۴۰، ۵۵ و ۷۰ °C) و سه سطح سرعت هوای ورودی (۰/۵، ۱/۱ و ۱/۷ m/s) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شدند.

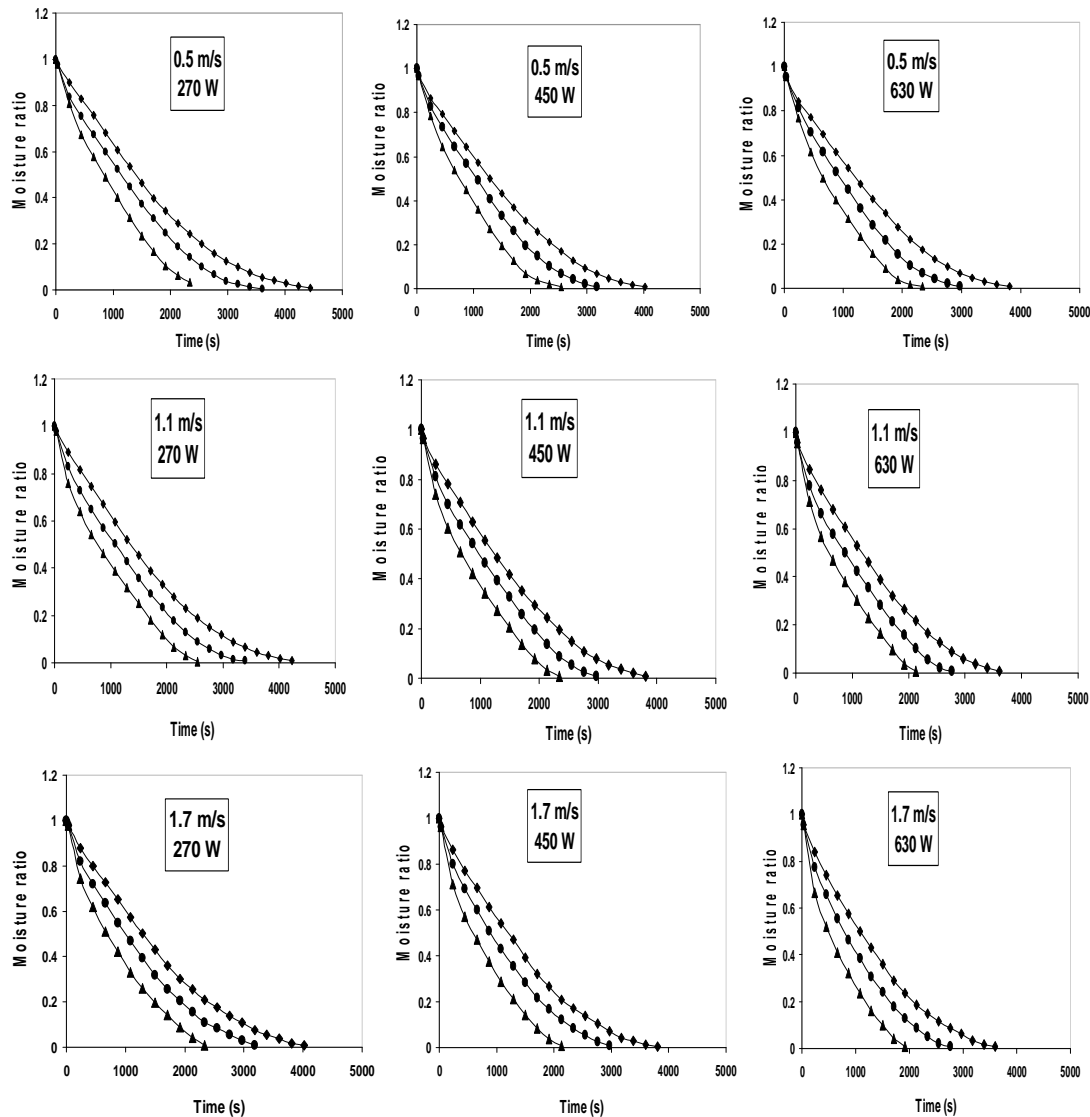
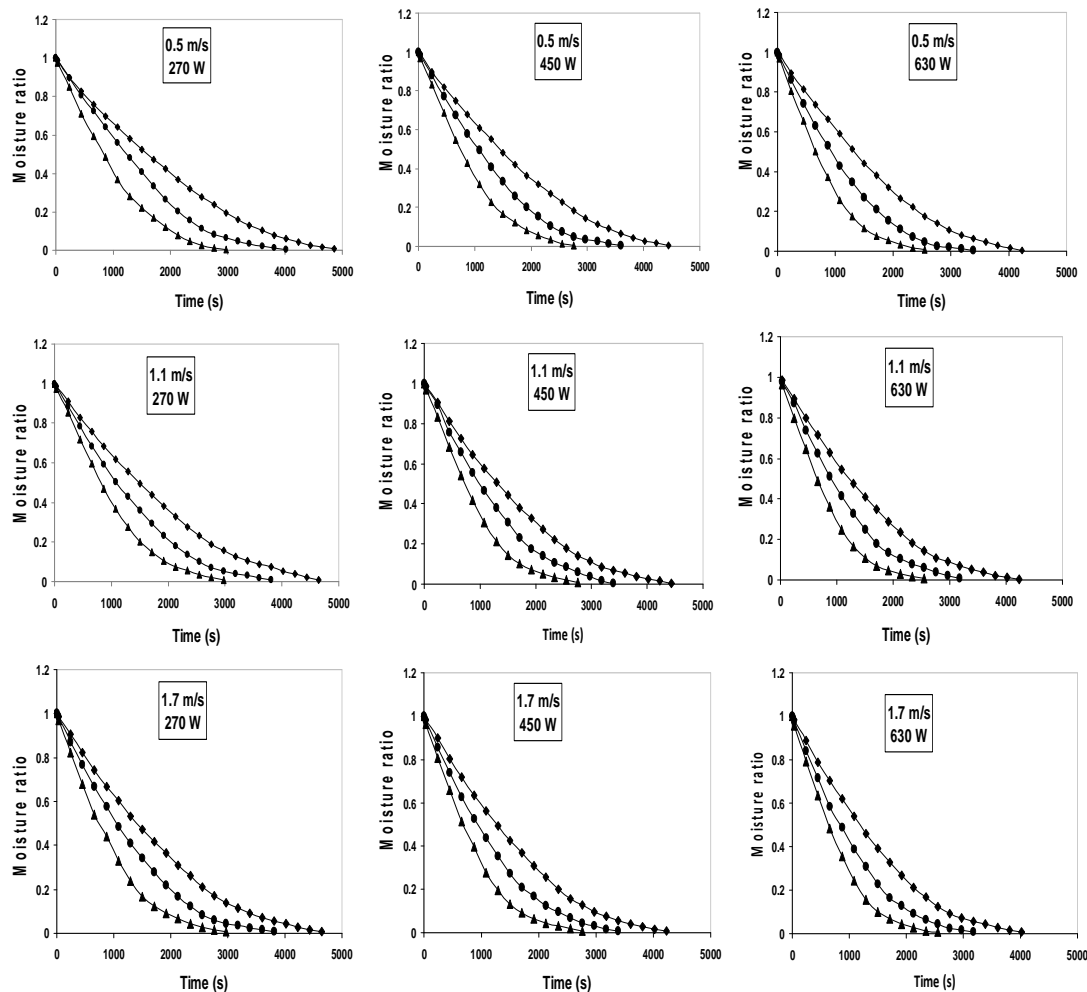


Fig 3 Moisture ratio variation of eggplant fruit under microwave drying process (◆40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C).



**Fig 4** Moisture ratio variation of turnip fruit as a function of drying time at different air velocities and microwave power (◆40 °C, ● 55 °C and ▲ 70 °C).

که طولانی‌ترین زمان فرآیند مربوط به خشک کردن با دمای ۷۰ °C و کوتاه‌ترین زمان فرآیند مربوط به دمای ۷۰ °C بود. با این حال میزان کاهش رطوبت، به علت بیشتر شدن انرژی جنبشی مولکول‌ها و افزایش انتقال جرم، افزایش یافت. نتایج مشابهی در خشک کردن زالزالک [۲۵]، کلم بروکلی [۳۰]، گوجه فرنگی [۳۱]، کدو [۳۲] و کیوی [۳۳] گزارش شده است. در حالت کلی در خشک‌کن مایکروویو-همرفتی برای هر دو محصول (بادنجان و شلغم) کمترین زمان خشک شدن به ترتیب ۳۵/۵ min و ۴۲ در توان مایکروویو ۶۳۰ W و دمای ۷۰ °C و سرعت ۱/۷ m/s اتفاق افتاد.

### ۳-۲- نرخ خشک کردن

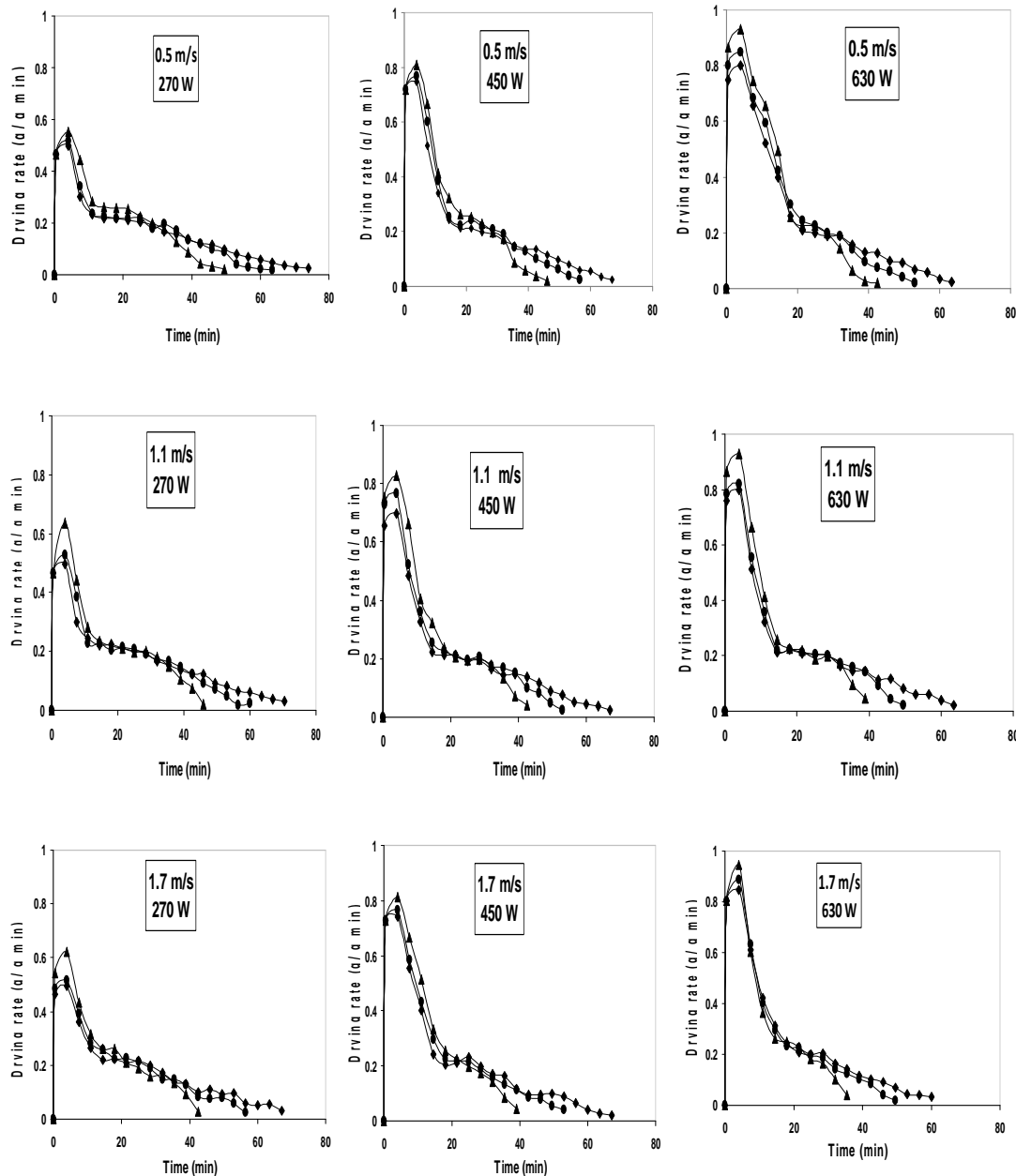
در شروع فرآیند خشک کردن برای هر دو محصول، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و نرخ از دست دادن رطوبت زیاد بود، بتدریج با پیشرفت زمان خشک شدن، محتوی رطوبت محصول به طور طبیعی کاهش پیدا کرده و نرخ رطوبت به طور طبیعی

شکل ۳ و ۴ نمودار مربوط به نسبت رطوبت و زمان خشک کردن می باشد. با توجه به شکل، نتایج نشان داد که با افزایش توان مایکروویو، سرعت خروج رطوبت از بادنجان و شلغم سریعتر شده و زمان خشک شدن کاهش یافت. این روند در توان‌های بالاتر با شدت بیشتری رخ داد. بر این اساس کمترین زمان خشک شدن برای هر دو محصول بادنجان (۳۲ min) و شلغم (۴۲/۵ min) در توان ۶۳۰ W برای هر دو محصول اتفاق افتاد و بیشترین زمان خشک شدن در توان مایکروویو W ۲۷۰ به دست آمد. 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 نمونه‌ها می‌شود. به عبارت دیگر توان بالاتر مایکروویو، باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت و کاهش رطوبت شدیدتر می‌شود. همچنین با افزایش دمای ورودی، زمان خشک کردن محصولات کاهش یافت به گونه‌ای

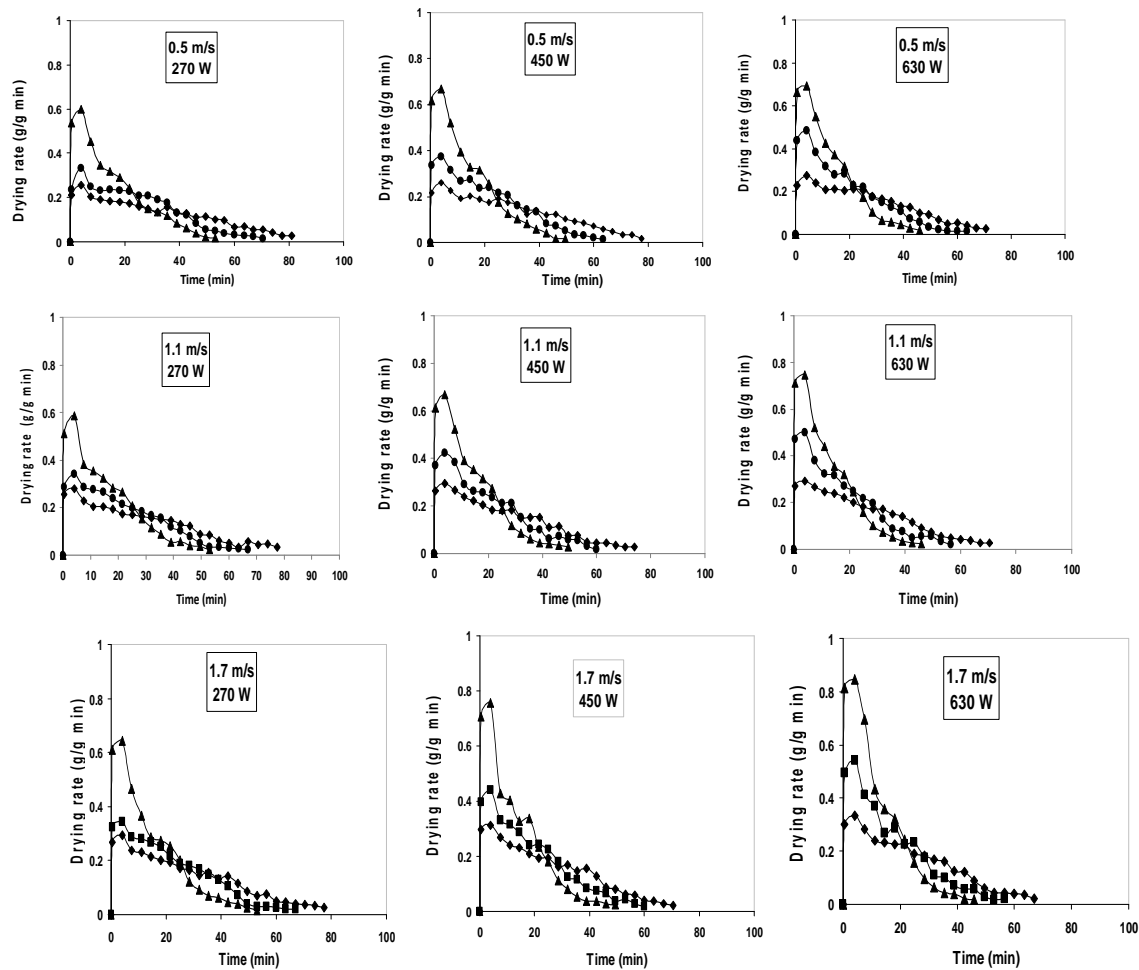


در حوالی سطح ماده کاهش می‌یابد و نفوذ آب از درون ماده به سطح شروع می‌شود که از این لحظه به بعد نفوذ رطوبت، کنترل کننده‌ی نرخ خشک شدن می‌گردد، لذا نرخ خشک شدن به طور طبیعی کاهش می‌گردد (شکل های ۵ و ۶). نتایج مشابهی برای محصولات مختلف کشاورزی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو از جمله لوبیا سبز [۱۹]، لیمو شیرین [۲۴]، کدو [۳۲] و گوجه فرنگی [۳۴] در طول مرحله خشک شدن مشاهده شده است.

کاهش یافت. محصولات (بادنجان و شلغم)، عمده رطوبت خود را در لحظات اولیه فرآیند خشک کردن از دست دادند و زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقیمانده لازم است (شکل های ۵ و ۶). همچنین در زمان‌های اولیه خشک شدن، به علت افزایش دمای ماده، افزایش سرعت هوای ورودی و وجود آب کافی در حوالی سطح ماده و به علت افزایش ضریب جابه جایی و کاهش فشار بخار و دور کردن رطوبت از اطراف نمونه‌ها، نرخ خشک شدن افزایشی است، تا اینکه آب



**Fig 5** Variation of drying rate as a function of time (min) at various air temperature ( $\blacktriangle$  40 °C,  $\bullet$  55°C and  $\blacklozenge$  70 °C) drying of eggplant fruit



**Fig 6** Effect of temperature levels ( $\blacklozenge$  40°C,  $\bullet$  55°C and  $\blacktriangle$  70°C), microwave powers and air velocities on drying rate of turnip slices as a function of drying time.

شلغم، توسط معادله (۷) محاسبه شد و در جدول (۲) نشان داده شده است.

### ۳-۳- ضریب پخش رطوبت موثر

مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر ( $D_{eff}$ ) برای بادنجان و

**Table 2** The effect of air temperature, microwave power and air velocity on moisture diffusivity ( $m^2/s$ ) in the drying of eggplant and turnip.

Product type	Air velocity (m/s)	270 w- 40°C	450 w- 40°C	630 w- 40°C	270 w- 55°C	450 w- 55°C	630 w- 55°C	270 w- 70°C	450 w- 70°C	630 w- 70°C
Eggplant	0.5	$1.52 \times 10^{-9}$	$1.69 \times 10^{-9}$	$1.82 \times 10^{-9}$	$2.04 \times 10^{-9}$	$2.10 \times 10^{-9}$	$2.30 \times 10^{-9}$	$2.57 \times 10^{-9}$	$2.80 \times 10^{-9}$	$3.09 \times 10^{-9}$
	1.1	$1.59 \times 10^{-9}$	$1.74 \times 10^{-9}$	$1.84 \times 10^{-9}$	$2.05 \times 10^{-9}$	$2.15 \times 10^{-9}$	$2.37 \times 10^{-9}$	$2.63 \times 10^{-9}$	$2.87 \times 10^{-9}$	$3.14 \times 10^{-9}$
	1.7	$1.66 \times 10^{-9}$	$1.89 \times 10^{-9}$	$1.92 \times 10^{-9}$	$1.98 \times 10^{-9}$	$2.18 \times 10^{-9}$	$2.45 \times 10^{-9}$	$2.71 \times 10^{-9}$	$3.14 \times 10^{-9}$	<b><math>3.39 \times 10^{-9}</math></b>
Turnip	0.5	<b><math>1.37 \times 10^{-9}</math></b>	$1.52 \times 10^{-9}$	$1.64 \times 10^{-9}$	$1.87 \times 10^{-9}$	$2.11 \times 10^{-9}$	$2.31 \times 10^{-9}$	$2.52 \times 10^{-9}$	$2.67 \times 10^{-9}$	$2.91 \times 10^{-9}$
	1.1	$1.39 \times 10^{-9}$	$1.59 \times 10^{-9}$	$1.73 \times 10^{-9}$	$1.89 \times 10^{-9}$	$2.14 \times 10^{-9}$	$2.35 \times 10^{-9}$	$2.57 \times 10^{-9}$	$2.71 \times 10^{-9}$	$2.89 \times 10^{-9}$
	1.7	$1.64 \times 10^{-9}$	$1.11 \times 10^{-9}$	$1.76 \times 10^{-9}$	$1.94 \times 10^{-9}$	$2.16 \times 10^{-9}$	$2.40 \times 10^{-9}$	$2.66 \times 10^{-9}$	$2.77 \times 10^{-9}$	<b><math>3.05 \times 10^{-9}</math></b>

**Table 3** The effect of air temperature, microwave power and air velocity on specific energy consumption (MJ/kg) in the drying of eggplant and turnip.

Product type	Air velocity (m/s)	270 w- 40°C	450 w- 40°C	630 w- 40°C	270 w- 55°C	450 w- 55°C	630 w- 55°C	270 w- 70°C	450 w- 70°C	630 w- 70°C
Egg-plant	0.5	126.56	102.87	91.59	117.36	101.01	87.80	104.55	98.58	<b>86.47</b>
	1.1	149.52	141.51	139.59	148.62	140.48	136.79	143.92	130.70	115.60
	1.7	<b>194.37</b>	190.28	189.68	183.11	180.83	178.22	172.69	150.04	146.32
Turnip	0.5	99.35	91.76	83.70	87.38	81.22	79.38	81.79	77.35	<b>73.18</b>
	1.1	136.84	126.60	121.43	132.10	117.52	116.97	125.12	108.60	88.32
	1.7	<b>180.01</b>	172.93	167.30	164.01	158.37	153.74	152.17	140.95	116.55

**Table 4** The results of the different arrangements of ANN in estimating moisture diffusivity and specific energy consumption

Net-work	Training algo-rithm	Threshold function	Number of layers and neu-rons	MSE	R <sup>2</sup> (Deff)	R <sup>2</sup> (SEC)	MAE (Deff)	MAE (SEC)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-TAN	<b>3-20-20-2</b>	<b>0.00014</b>	<b>0.9821</b>	<b>0.9952</b>	<b>3.68×10<sup>-11</sup></b>	<b>71.88</b>	<b>42</b>
		PUR-LOG-TAN	3-16-15-2	0.00027	0.9784	0.9941	4.14×10 <sup>-11</sup>	84.24	34
		TAN-LOG-TAN	3-15-10-2	0.00068	0.9678	0.9917	7.55×10 <sup>-11</sup>	104.76	18
	BR	TAN-TAN-PUR	3-14-12-2	0.00044	0.9755	0.9929	4.66×10 <sup>-11</sup>	89.69	27
		PUR-TAN-TAN	3-20-2	0.00095	0.9624	0.9884	8.14×10 <sup>-11</sup>	118.06	69
		TAN-TAN-TAN	3-20-10-2	0.00106	0.9619	0.9868	8.25×10 <sup>-11</sup>	127.66	47
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	3-10-8-2	0.00032	0.9775	0.9934	4.28×10 <sup>-11</sup>	87.18	25
		TAN-TAN-LOG	3-15-15-2	0.00061	0.9695	0.9928	7.36×10 <sup>-11</sup>	97.66	19
		TAN-PUR-TAN	3-5-5-2	0.00098	0.9619	0.9872	8.33×10 <sup>-11</sup>	121.28	17

**Table 5** The results of the different arrangements of ANN in estimating drying rate and moisture ratio of eggplant and turnip

Net-work	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	R <sup>2</sup> (MR)	R <sup>2</sup> (DR)	MAE (MR)	MAE (DR)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-PUR	4-20-20-2	0.00011	0.9983	0.9687	0.0047	0.0094	177
		PUR-TAN-TAN	4-15-15-2	0.00037	0.9903	0.9598	0.0128	0.0163	89
		TAN-LOG-LOG	4-20-15-2	0.00015	0.9951	0.9652	0.0068	0.0112	182
	BR	LOG-TAN-TAN	4-18-18-2	0.00021	0.9936	0.9631	0.0089	0.0126	145
		TAN-LOG-PUR	4-20-20-2	0.00032	0.9915	0.9618	0.0106	0.0141	55
		TAN-TAN-TAN	4-15-10-2	0.00012	0.9977	0.9681	0.0051	0.0098	128
CFBP	LM	<b>TAN-TAN-LOG</b>	<b>4-20-20-2</b>	<b>0.00010</b>	<b>0.9988</b>	<b>0.9698</b>	<b>0.0045</b>	<b>0.0087</b>	<b>135</b>
		TAN-PUR-TAN	4-20-2	0.00033	0.9911	0.9611	0.0112	0.0149	192
		LOG-TAN-LOG	4-10-10-2	0.00012	0.9975	0.9665	0.0052	0.0099	287
	BR	TAN-TAN-TAN	4-16-16-2	0.00019	0.9940	0.9638	0.0083	0.0122	144
		TAN-TAN-TAN	4-10-8-2	0.00013	0.9966	0.9662	0.0058	0.0104	75
		LOG-PUR-TAN	4-15-2	0.00018	0.9944	0.9643	0.0078	0.0118	177

ورودی و بیشترین مقدار توان مایکروویو می‌باشد. ضریب پخش رطوبت موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. با افزایش توان مایکروویو، دمای داخل محفظه خشک‌کن افزایش پیدا کرد. در نتیجه میزان ضریب پخش رطوبت موثر در توان‌های بالاتر افزایش نمود [۲۶ و ۲۵]. دلیل وقوع این مسئله تاثیر بارز توان مایکروویو و دمای هوای ورودی در ایجاد جنبش مولکولی، افزایش بخار آب داخل محصولات، افزایش مکش سطحی و کاهش رطوبت تعادلی سطح محصولات در افزایش ضریب پخش رطوبت موثر می‌باشد. نتایج مشابه بدست آمده در سایر پژوهش‌هایی که با خشک‌کن مایکروویو انجام شده در مورد دیگر محصولات کشاورزی هم مشاهده شد که برای گوجه فرنگی در توان‌های مایکروویو ۱/۱۳، ۲/۰۸ و ۳/۱۱ W و در دماهای ورودی ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C، ضریب پخش رطوبت موثر بین ۱/۶۸×۱۰<sup>-۹</sup> تا ۵۲/۲۰×۱۰<sup>-۹</sup> m<sup>2</sup>/s بدست آمد [۳۶]. برای فارچ خوراکی در محدوده‌ی توان

با توجه به جدول (۲) بیشترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر برای بادنجان و شلغم به ترتیب ۳/۳۹ × ۱۰<sup>-۹</sup> و ۳ m<sup>2</sup>/s<sup>-۹</sup> در ۳/۰۵ × ۱۰ W توان مایکروویو و ۶۳۰ °C دمای هوای ورودی و سرعت هوای ورودی ۱/۷ m/s به دست آمد. در روش خشک‌کردن ترکیبی مایکروویو-همرفتی با افزایش دما و توان مایکروویو و سرعت هوای ورودی در فرآیند خشک شدن بادنجان و شلغم، میزان ضریب پخش رطوبت موثر افزایش یافت که اثر توان مایکروویو و دما بارزتر بود. معمولاً مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر در آزمایش‌ها برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی در محدوده‌ی بین ۱۰<sup>-۱۱</sup> و ۱۰<sup>-۹</sup> m<sup>2</sup>/s می‌باشد که مقادیر به دست آمده برای هر بادنجان و شلغم در این محدوده می‌باشد [۳۵]. کمترین مقادیر ضریب پخش رطوبت موثر در سرعت‌های مختلف هوا در پایین‌ترین دما و کمترین توان مایکروویو بدست آمد و بیشترین ضریب پخش رطوبت موثر مربوط به بالاترین دمای هوای

## ۳-۴- انرژی مصرفی ویژه

انرژی مصرفی ویژه برای هر دو محصول بادنجان و شلغم در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- همرفتی از رابطه (۱۰) محاسبه شد. روند مصرف انرژی برای دو محصول بادنجان و شلغم در دماهای هوای ورودی و توان‌های مایکروویو و سرعت‌های مختلف خشک‌کن مایکروویو- همرفتی در جدول (۳) نشان داده شده است.

مایکروویو ۲۵۰ تا ۳۰۰۰ W، محدوده دمای ۵۰ تا ۷۰ °C و در سرعت هوای ورودی ۱ m/s، ضریب پخش رطوبت موثر بین  $11/09 \times 10^{-8}$  تا  $12/39 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s بدست آمد [۹]. همچنین برای زالزالک در محدوده‌ی توان مایکروویو ۲۷۰-۶۳۰ W، محدوده دمای ۴۰ تا ۷۰ °C و سرعت هوای ورودی ۰/۴ تا ۱/۷ m/s، ضریب پخش رطوبت موثر بین  $9/29 \times 10^{-9}$  تا  $8/81 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s حاصل شد [۲۵].

**Table 2** The effect of air temperature, microwave power and air velocity on moisture diffusivity (m<sup>2</sup>/s) in the drying of eggplant and turnip.

Product type	Air velocity (m/s)	270 w-40°C	450 w-40°C	630 w-40°C	270 w-55°C	450 w-55°C	630 w-55°C	270 w-70°C	450 w-70°C	630 w-70°C
Egg-plant	0.5	<b>1.52×10<sup>-9</sup></b>	1.69×10 <sup>-9</sup>	1.82×10 <sup>-9</sup>	2.04×10 <sup>-9</sup>	2.10×10 <sup>-9</sup>	2.30×10 <sup>-9</sup>	2.57×10 <sup>-9</sup>	2.80×10 <sup>-9</sup>	3.09×10 <sup>-9</sup>
	1.1	1.59×10 <sup>-9</sup>	1.74×10 <sup>-9</sup>	1.84×10 <sup>-9</sup>	2.05×10 <sup>-9</sup>	2.15×10 <sup>-9</sup>	2.37×10 <sup>-9</sup>	2.63×10 <sup>-9</sup>	2.87×10 <sup>-9</sup>	3.14×10 <sup>-9</sup>
	1.7	1.66×10 <sup>-9</sup>	1.89×10 <sup>-9</sup>	1.92×10 <sup>-9</sup>	1.98×10 <sup>-9</sup>	2.18×10 <sup>-9</sup>	2.45×10 <sup>-9</sup>	2.71×10 <sup>-9</sup>	3.14×10 <sup>-9</sup>	<b>3.39×10<sup>-9</sup></b>
Turnip	0.5	<b>1.37×10<sup>-9</sup></b>	1.52×10 <sup>-9</sup>	1.64×10 <sup>-9</sup>	1.87×10 <sup>-9</sup>	2.11×10 <sup>-9</sup>	2.31×10 <sup>-9</sup>	2.52×10 <sup>-9</sup>	2.67×10 <sup>-9</sup>	2.91×10 <sup>-9</sup>
	1.1	1.39×10 <sup>-9</sup>	1.59×10 <sup>-9</sup>	1.73×10 <sup>-9</sup>	1.89×10 <sup>-9</sup>	2.14×10 <sup>-9</sup>	2.35×10 <sup>-9</sup>	2.57×10 <sup>-9</sup>	2.71×10 <sup>-9</sup>	2.89×10 <sup>-9</sup>
	1.7	1.64×10 <sup>-9</sup>	1.11×10 <sup>-9</sup>	1.76×10 <sup>-9</sup>	1.94×10 <sup>-9</sup>	2.16×10 <sup>-9</sup>	2.40×10 <sup>-9</sup>	2.66×10 <sup>-9</sup>	2.77×10 <sup>-9</sup>	<b>3.05×10<sup>-9</sup></b>

**Table 3** The effect of air temperature, microwave power and air velocity on specific energy consumption (MJ/kg) in the drying of eggplant and turnip.

Product type	Air velocity (m/s)	270 w-40°C	450 w-40°C	630 w-40°C	270 w-55°C	450 w-55°C	630 w-55°C	270 w-70°C	450 w-70°C	630 w-70°C
Egg-plant	0.5	126.56	102.87	91.59	117.36	101.01	87.80	104.55	98.58	<b>86.47</b>
	1.1	149.52	141.51	139.59	148.62	140.48	136.79	143.92	130.70	115.60
	1.7	<b>194.37</b>	190.28	189.68	183.11	180.83	178.22	172.69	150.04	146.32
Turnip	0.5	99.35	91.76	83.70	87.38	81.22	79.38	81.79	77.35	<b>73.18</b>
	1.1	136.84	126.60	121.43	132.10	117.52	116.97	125.12	108.60	88.32
	1.7	<b>180.01</b>	172.93	167.30	164.01	158.37	153.74	152.17	140.95	116.55

خشک شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت و در اثر کاهش زمان خشک شدن، انرژی مصرفی به طور قابل ملاحظه-ای کاهش یافت. با افزایش سرعت هوا سطح محصول خنک شده، دما آن کاهش پیدا می کند در نتیجه انرژی مصرفی ویژه نیز افزایش می یابد. همچنین به دلیل کاهش سطح موثر جریان هوا و نمونه‌های بادنجان و شلغم کمترین مقدار انرژی مصرفی در سرعت‌های پایین به دست آمد. پژوهشگران دیگر نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند [۳۷، ۶، ۲۵، ۲۶].

## ۳-۵- شبکه‌های عصبی مصنوعی برای نسبت

## رطوبت و نرخ خشک کردن

شبکه‌های عصبی پس‌انتشار پیشرو و پیش‌خور برای پیش بینی نرخ خشک کردن و نسبت رطوبت با استفاده از ۹۶۰ الگو آموزش داده شدند. الگوریتم‌ها با استفاده از نگاشت غیر خطی بین پارامترهای ورودی (توان مایکروویو، سرعت هوای

بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای بادنجان و شلغم به ترتیب ۱۹۴/۳۷ و ۱۸۰/۰۱ MJ/kg در توان مایکروویو ۲۷۰ W و دمای ۴۰ °C و سرعت هوای ورودی ۱/۷ m/s به دست آمد. انرژی مصرفی ویژه مورد نیاز با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای ورودی، کاهش پیدا کرد، در صورتی که با افزایش سرعت هوای ورودی، میزان انرژی مصرفی ویژه افزایش پیدا نمود. با افزایش دمای هوای ورودی و توان مایکروویو، زمان خشک شدن کاهش پیدا کرد بنابراین باعث کاهش انرژی مصرفی ویژه شد. انرژی مصرفی تابع عوامل مختلفی مانند توان مایکروویو، سرعت هوای ورودی، دمای محیط، گرمای نهان تبخیر آب، گرمای ویژه هوا و دمای هوای ورودی بود [۲۶، ۶]. علت کاهش مصرف انرژی در دماهای بالا و توان‌های مایکروویو بالا و سرعت‌های پایین تر نسبت به توان‌های مایکروویو و دماهای ورودی پایین و سرعت‌های بالا این است که آب آزاد محصول سریعتر تبخیر شده و زمان

این نتیجه را حاصل نمود که توپولوژی ۲-۲۰-۲۰-۴ در شبکه CFBP با تابع فعال‌سازی TAN-TAN-LOG دارای کمترین خطای آموزشی (۰/۰۰۰۱۰)، کمترین مقدار میانگین مربعات برای نسبت رطوبت (۰/۰۰۴۵) و نرخ خشک کردن (۰/۰۰۸۷) و بیشترین مقدار ضریب تبیین برای نسبت رطوبت (۰/۹۹۸۸) و نرخ خشک کردن (۰/۹۶۹۸) با چرخه‌ی آموزش ۱۳۵ بود (جدول ۴).

ورودی، دمای هوای ورودی و زمان خشک‌کردن) و پارامترهای خروجی (نرخ خشک‌کردن و نسبت رطوبت) آموزش داده شدند. تعداد نرون‌های پنهان با اضافه شدن در لایه‌های پنهان به جای X و Y با استفاده از معماری ۲-y-۴ و ۲-y-x-۴ به ترتیب برای شبکه با یک و دولایه پنهان تغییر داده شدند. کاربرد الگوریتم LM به همراه شبکه‌های CFBP و FFBP

**Table 4** The results of the different arrangements of ANN in estimating moisture diffusivity and specific energy consumption

Net-work	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	R <sup>2</sup> (Deff)	R <sup>2</sup> (SEC)	MAE (Deff)	MAE (SEC)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-TAN	3-20-20-2	0.00014	0.9821	0.9952	3.68×10 <sup>-11</sup>	71.88	42
		PUR-LOG-TAN	3-16-15-2	0.00027	0.9784	0.9941	4.14×10 <sup>-11</sup>	84.24	34
		TAN-LOG-TAN	3-15-10-2	0.00068	0.9678	0.9917	7.55×10 <sup>-11</sup>	104.76	18
	BR	TAN-TAN-PUR	3-14-12-2	0.00044	0.9755	0.9929	4.66×10 <sup>-11</sup>	89.69	27
		PUR-TAN-TAN	3-20-2	0.00095	0.9624	0.9884	8.14×10 <sup>-11</sup>	118.06	69
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	3-20-10-2	0.00106	0.9619	0.9868	8.25×10 <sup>-11</sup>	127.66	47
		TAN-TAN-TAN	3-10-8-2	0.00032	0.9775	0.9934	4.28×10 <sup>-11</sup>	87.18	25
		TAN-TAN-LOG	3-15-15-2	0.00061	0.9695	0.9928	7.36×10 <sup>-11</sup>	97.66	19
		TAN-PUR-TAN	3-5-5-2	0.00098	0.9619	0.9872	8.33×10 <sup>-11</sup>	121.28	17

**Table 5** The results of the different arrangements of ANN in estimating drying rate and moisture ratio of eggplant and turnip

Net-work	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	R <sup>2</sup> (MR)	R <sup>2</sup> (DR)	MAE (MR)	MAE (DR)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-PUR	4-20-20-2	0.00011	0.9983	0.9687	0.0047	0.0094	177
		PUR-TAN-TAN	4-15-15-2	0.00037	0.9903	0.9598	0.0128	0.0163	89
		TAN-LOG-LOG	4-20-15-2	0.00015	0.9951	0.9652	0.0068	0.0112	182
	BR	LOG-TAN-TAN	4-18-18-2	0.00021	0.9936	0.9631	0.0089	0.0126	145
		TAN-LOG-PUR	4-20-20-2	0.00032	0.9915	0.9618	0.0106	0.0141	55
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	4-15-10-2	0.00012	0.9977	0.9681	0.0051	0.0098	128
		TAN-TAN-LOG	4-20-20-2	0.00010	0.9988	0.9698	0.0045	0.0087	135
		TAN-PUR-TAN	4-20-2	0.00033	0.9911	0.9611	0.0112	0.0149	192
	BR	LOG-TAN-LOG	4-10-10-2	0.00012	0.9975	0.9665	0.0052	0.0099	287
		TAN-TAN-TAN	4-16-16-2	0.00019	0.9940	0.9638	0.0083	0.0122	144
		TAN-TAN-TAN	4-10-8-2	0.00013	0.9966	0.9662	0.0058	0.0104	75
		LOG-PUR-TAN	4-15-2	0.00018	0.9944	0.9643	0.0078	0.0118	177

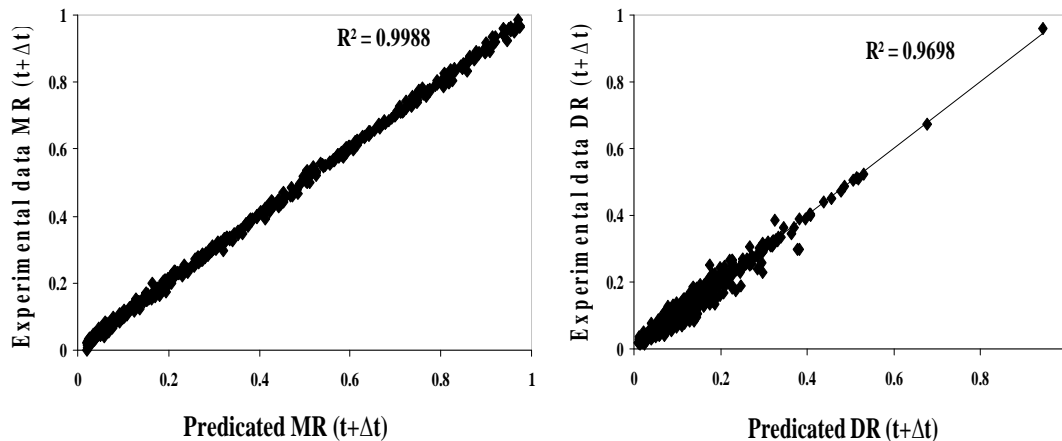
عملکرد را در پیش بینی نرخ خشک‌کردن و نسبت رطوبت داشت (جدول ۴).

در این جدول خلاصه‌ای از بهترین ساختار توپولوژی شبکه‌های عصبی، توابع آموزش و الگوریتم‌های مختلف کاربردی در پیش‌بینی خشک‌کردن بادنجان و شلغم نشان داده شده است. در واقع می‌توان اظهار داشت که شبکه‌ی عصبی یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن بادنجان و شلغم

همچنین نتایج نشان داد که شبکه FFBP با الگوریتم آموزشی BR و توپولوژی ۲-۱۰-۱۵-۴ با تابع فعال‌سازی TAN-TAN-TAN دارای کمترین خطای آموزشی با مقدار (۰/۰۰۰۱۲)، کمترین مقدار میانگین مربعات برای نسبت رطوبت (۰/۰۰۵۱) و نرخ خشک کردن (۰/۰۰۹۸) و بیشترین مقدار ضریب تبیین برای نسبت رطوبت (۰/۹۹۷۷) و نرخ خشک کردن (۰/۹۶۸۱) با چرخه‌ی آموزش ۱۲۸ بهترین

شکل ۷، نمودار مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه و مقادیر واقعی تجربی و بیشترین مقادیر ضریب تبیین برای پیش‌بینی نسبت رطوبت و نرخ خشک‌کردن را نشان می‌دهد که بر اساس نتایج حاصله، بیشترین مقدار ضریب تبیین برای پیش‌بینی نسبت رطوبت ۰/۹۹۸۸ و برای نرخ خشک‌کردن ۰/۹۶۹۸ به دست آمد.

در شرایط مختلف است که از دقت بالایی برخوردار است و با هزینه پایین قابل انجام است. پژوهش‌های قبلی در مورد خصوصیات خشک‌کردن محصولات دیگر مانند بنه [۳۸ و ۱۷] انبه [۳۹] و کدو سبز [۴۰] نیز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی بیانگر این موضوع می‌باشند.



**Fig 7** Predicted values of moisture ratio and drying rate using artificial neural networks versus experimental values for testing data set for eggplant and turnip

و انرژی مصرفی ویژه برای محصولات بادنجان و شلغم، شبکه‌هایی با آرایش‌های مختلف و تعداد نرون‌های متفاوت در لایه(های) میانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. چندین آرایش از MSE کمتر و  $R^2$  بالاتری برخوردار بودند که در قالب دو ساختار پیش‌رو (CFBP) و پیش‌خور (FFBP) در جدول (۵) برای خشک‌کن مایکروویو-همرفتی ارائه شده است.

### ۳-۶- شبکه‌های عصبی مصنوعی برای ضریب

#### پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه

شبکه‌های عصبی پس‌انتشار پیش‌رو و پیش‌خور برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه آموزش داده شدند. برای دست‌یابی به ساختار بهینه شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر

**Table 4** The results of the different arrangements of ANN in estimating moisture diffusivity and specific energy consumption

Network	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	$R^2$ (Deff)	$R^2$ (SEC)	MAE (Deff)	MAE (SEC)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-TAN	3-20-20-2	<b>0.00014</b>	<b>0.9821</b>	<b>0.9952</b>	$3.68 \times 10^{-11}$	<b>71.88</b>	<b>42</b>
		PUR-LOG-TAN	3-16-15-2	0.00027	0.9784	0.9941	$4.14 \times 10^{-11}$	84.24	34
		TAN-LOG-TAN	3-15-10-2	0.00068	0.9678	0.9917	$7.55 \times 10^{-11}$	104.76	18
	BR	TAN-TAN-PUR	3-14-12-2	0.00044	0.9755	0.9929	$4.66 \times 10^{-11}$	89.69	27
		PUR-TAN-TAN	3-20-2	0.00095	0.9624	0.9884	$8.14 \times 10^{-11}$	118.06	69
		TAN-TAN-TAN	3-20-10-2	0.00106	0.9619	0.9868	$8.25 \times 10^{-11}$	127.66	47
CFBP	LM	TAN-TAN-TAN	3-10-8-2	0.00032	0.9775	0.9934	$4.28 \times 10^{-11}$	87.18	25
		TAN-TAN-LOG	3-15-15-2	0.00061	0.9695	0.9928	$7.36 \times 10^{-11}$	97.66	19
		TAN-PUR-TAN	3-5-5-2	0.00098	0.9619	0.9872	$8.33 \times 10^{-11}$	121.28	17

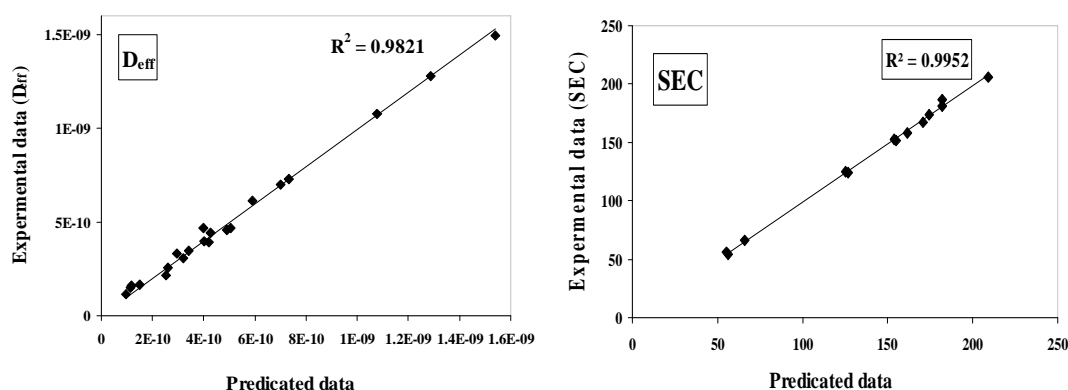
**Table 5** The results of the different arrangements of ANN in estimating drying rate and moisture ratio of eggplant and turnip

Net-work	Training algorithm	Threshold function	Number of layers and neurons	MSE	R <sup>2</sup> (MR)	R <sup>2</sup> (DR)	MAE (MR)	MAE (DR)	Epoch
FFBP	LM	TAN-TAN-PUR	4-20-20-2	0.00011	0.9983	0.9687	0.0047	0.0094	177
		PUR-TAN-TAN	4-15-15-2	0.00037	0.9903	0.9598	0.0128	0.0163	89
		TAN-LOG-LOG	4-20-15-2	0.00015	0.9951	0.9652	0.0068	0.0112	182
	BR	LOG-TAN-TAN	4-18-18-2	0.00021	0.9936	0.9631	0.0089	0.0126	145
		TAN-LOG-PUR	4-20-20-2	0.00032	0.9915	0.9618	0.0106	0.0141	55
		TAN-TAN-TAN	4-15-10-2	0.00012	0.9977	0.9681	0.0051	0.0098	128
CFBP	LM	<b>TAN-TAN-LOG</b>	<b>4-20-20-2</b>	<b>0.00010</b>	<b>0.9988</b>	<b>0.9698</b>	<b>0.0045</b>	<b>0.0087</b>	<b>135</b>
		TAN-PUR-TAN	4-20-2	0.00033	0.9911	0.9611	0.0112	0.0149	192
		LOG-TAN-LOG	4-10-10-2	0.00012	0.9975	0.9665	0.0052	0.0099	287
	BR	TAN-TAN-TAN	4-16-16-2	0.00019	0.9940	0.9638	0.0083	0.0122	144
		TAN-TAN-TAN	4-10-8-2	0.00013	0.9966	0.9662	0.0058	0.0104	75
		LOG-PUR-TAN	4-15-2	0.00018	0.9944	0.9643	0.0078	0.0118	177

ضریب نفوذ رطوبت و ۰/۹۹۵۲ برای انرژی مصرفی ویژه) است. همچنین استفاده از الگوریتم آموزش BR به همراه شبکه‌های FFBP و CFBP نشان داد که توپولوژی ۲-۱۲-۳-۱۴ در شبکه‌ی FFBP با تابع فعالسازی TAN-TAN-PUR و چرخه‌ی آموزش ۲۷ دارای کمترین میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۳۸) و بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۷۵۵) برای ضریب نفوذ رطوبت و ۰/۹۹۲۹ برای انرژی مصرفی ویژه) است. این نتایج در جدول (۵) آورده شده است.

شکل ۸ بیشترین مقدار ضریب تبیین برای پیش‌بینی (الف) ضریب پخش رطوبت موثر و (ب) انرژی مصرفی ویژه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار ضریب تبیین برای پیش‌بینی ضریب پخش رطوبت موثر ۰/۹۸۲۱ و برای انرژی مصرفی ویژه ۰/۹۹۵۲ می‌باشد.

پیش‌بینی همزمان پارامترهای ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با انرژی مصرفی ویژه در هر دو محصول (بادنجان و شلغم) به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شد. از دو شبکه‌ی FFBP و CFBP برای به دست آوردن جواب مناسب استفاده شد. در پیش‌بینی ضریب نفوذ رطوبت و انرژی مصرفی ویژه، استفاده از الگوریتم آموزش LM به همراه شبکه‌های FFBP و CFBP نشان داد که توپولوژی ۲-۲۰-۳-۲۰ (۳ نرون در لایه‌ی ورودی شامل توان مایکروویو، دمای هوای ورودی و سرعت هوای ورودی، ۲۰ نرون در لایه‌ی دوم، ۲۰ نرون در لایه‌ی سوم و دو نرون در لایه‌ی خروجی شامل ضریب نفوذ مؤثر رطوبت با انرژی مصرفی ویژه) در شبکه FFBP با تابع فعالسازی TAN-TAN-TAN و چرخه‌ی آموزش ۴۲ دارای کمترین مقدار میانگین مربعات خطا (۰/۰۰۱۴) و بیشترین مقدار ضریب تبیین (۰/۹۸۲۱) برای

**FIG 8** Predicted values of effective moisture diffusivity ( $D_{eff}$ ) and specific energy consumption (SEC) using artificial neural networks versus experimental values for testing data set for eggplant and turnip

نرخ خشک کردن ۰/۹۶۹۸ با تابع فعالسازی TAN-TAN-LOG با تابع آموزشی LM بود. با تمامی نتایج بدست آمده مشخص شد که شبکه‌ی عصبی مصنوعی می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند در پیش‌بینی خصوصیات خشک‌کردن بادنجان و شلغم در خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-همرفتی موثر باشد.

## ۵- منابع

- [1] Aydogdu, A., Sumnu G., Sahin, S. (2015). Effects of Microwave-Infrared Combination Drying on Quality of Eggplants. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (6): 1198–1210.
- [2] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R. (2016). Modeling thin-layer drying of turnip slices under semi-industrial continuous band dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*. Doi:10.1111/jfpp.12778 (in Press).
- [3]. Kara, C., Doymaz, I. (2015). Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of drying curves of apple pomace. *Heat and Mass Transfer*, 51 (7): 983–989.
- [4] Afolabi, T. J., Tunde-Akintunde, T. Y., Adeyanju J. A. (2015). Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pre-treated cocoyam slices. *Journal of Food Science and Technology*, 52 (5): 2731–2740.
- [5] Li, Z. Y., Wang R. F., Kudra. T. (2011). Uniformity Issue in Microwave Drying. *Drying Technology*, 29: 652–660.
- [6] Kumar, D., Prasad, S., Murthy. G.S. (2014). Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 51(2): 221-232.
- [7] Kouchakzadeh, A., Shafeei, S. (2010). Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conversion and Management*, 51: 2012–2015.
- [8] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., Najafi, G., Nargesi, F. (2013). Mathematical modeling of green pepper drying in microwave-convective dryer. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15: 457- 465.
- [9] Bhattacharya, M., Srivastav, P.P., 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
- [10] Zielinska, M., Michalska. A. (2016). Microwave-assisted drying of blueberry (Vac-

شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهند که نقاط داده‌های تست اطراف یک خط مستقیم با شیب  $45^\circ$  می‌باشند و این نشان‌دهنده مناسب بودن شبکه‌های استفاده شده در پیش‌بینی و تحلیل سیستیک خشک‌کردن (نسبت رطوبت و نرخ خشک کردن)، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی ویژه بادنجان و شلغم در خشک‌کن مایکروویو-همرفتی است. شبیه‌سازی و کنترل فرآیند در فن‌آوری خشک‌کردن همیشه با توجه به تغییرات زمانی و ویژگی‌های غیر خطی آن کاملاً به چالش کشیده می‌شود، بنابراین روش شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند یک روش جایگزین روش‌های معمول در برآورد بالاتر دقت در یک محدوده‌ی گسترده‌تر خصوصیات خشک‌کردن محصولات باشد.

در مدل سازی ریاضی برای پیش‌بینی یک خروجی تنها یک مدل تجربی مورد نیاز است. در حالی که در بهینه‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی با استفاده از مجموعه‌ای از وزن‌ها برای تمام پارامترهای خشک‌کردن به طور همزمان در خروجی می‌توان استفاده نمود [۳۸].

## ۴- نتیجه گیری

رفتار خشک شدن بادنجان و شلغم به صورت لایه نازک در خشک‌کن مایکروویو-همرفتی در سه توان مایکروویو (۲۷۰، ۴۵۰ و ۶۳۰ W)، سه دمای هوای ورودی (۴۰، ۵۵ و  $70^\circ\text{C}$ )، سه سرعت هوای ورودی (۰/۵، ۱/۱ و  $1/7\text{ m/s}$ ) بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش توان مایکروویو و دمای هوای ورودی، زمان خشک شدن بادنجان و شلغم کاهش می‌یابد. کمترین زمان خشک شدن مربوط به توان مایکروویو  $630\text{ W}$ ، دمای  $70^\circ\text{C}$  و سرعت هوای ورودی  $1/7\text{ m/s}$  بود. ضریب نفوذ رطوبت موثر در خشک‌کن مایکروویو-همرفتی برای بادنجان  $1/52 \times 10^{-9}$  تا  $3/39 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  و برای شلغم  $1/36 \times 10^{-9}$  تا  $3/05 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. بیشترین مقدار انرژی مصرفی ویژه برای بادنجان و شلغم به ترتیب  $194/37$  و  $180/01\text{ Mj/kg}$  حاصل شد. برای پیش‌بینی ضریب نفوذ رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه، شبکه FFBP با تابع آموزش LM و تابع فعالسازی TAN-TAN-TAN با ضرایب تبیین  $0/9952$  و  $0/9821$  بهترین عملکرد را حاصل نمود. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین مقدار ضریب تبیین برای پیش‌بینی نسبت رطوبت  $0/9988$  و برای



- [20] Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., Minaei, S. (2012). Comparison of mathematical models and artificial neural network for prediction of drying kinetics of mushroom in microwave- vacuum drier. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 18 (2): 283–293.
- [21] Zhu, A., Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72: 345–351.
- [22] Mujaffar, S., Sankat, C.K. (2015). Modeling the Drying Behavior of Unsalted and Salted Catfish (*Arius* sp.) Slabs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39 (6): 1385–1398.
- [23] Lemus-Mondaca, R., Vega-Galvez, A., Moraga, N.O., Astudillo, S., (2015). Dehydration of *Stevia rebaudiana* Bertoni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features Authors. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(5): 508–520.
- [24] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H., Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. *International Agrophysics*, 28: 1-6.
- [25] Amiri Chayjan, R., Kaveh, M., Khayati, S. 2015. Modeling drying characteristics of hawthorn fruit under microwave- convective conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39: 239–253.
- [26] Khoshtaghaza, M.H., Darvishi, H., 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.
- [27] Demuth, H., Beale, M., Hagan, M. (2007) "Neural network toolbox 5". The MathWorks, Natick, MA, USA.
- [28] Kocabas, F., Korkmaz, M., Sorgucu, U., Donmez, S. (2010) Modeling of heating and cooling performance of counter flow type vortex tube by using artificial neural network. *International Journal of Refrigeration* 33: 963–972.
- [29] Sarimeseli, A., Coskun M.A., Yuceer. M. (2014). Modeling Microwave Drying Kinetics of Thyme (*Thymus Vulgaris* L.) Leaves Using ANN Methodology and Dried Product Quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1): 558–564
- [30] Salim, N.S.M., Garipey, Y., Raghavan. V. (2016). Hot Air Drying and Microwave-Assisted Hot Air Drying of Broccoli Stalk (*Brassica oleracea* var. capitata L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry*, 1: 212:671-680.
- [11] Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., Mujumdar, A.S. (2015). Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review. *Drying Technology*, 33 (12): 1397-1462.
- [12] Silva, B.G.D., Fileti, A.M.F., Taranto, O.P. (2015). Drying of Brazilian Pepper-Tree Fruits (*Schinus terebinthifolius* Raddi): Development of Classical Models and Artificial Neural Network Approach. *Chemical Engineering Communications*, 202:1089–1097.
- [13] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., Nikbakht, A.M. (2016). Mass transfer characteristics of eggplant slices during length of continuous band dryer. *Heat and Mass Transfer*, DOI 10.1007/s00231-016-1961-8 (In Press).
- [14] Mahjoorian, A., Mokhtarian, M., Fayyaz, N., Rahmati, F., Sayyadi, S., Ariaii, P. (2016). Modeling of drying kiwi slices and its sensory evaluation. *Food Science and Nutrition*. DOI: 10.1002/fsn3.414.
- [15] Nazghelichi, T., Kianmehr, M.H., Aghbashlo, M. (2011). Predict ion of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*, 48(5): 542 – 550.
- [16] Samadi, S.H., Ghobadian, B., Najafi, G.H., Motevali, A., Faal. S. (2013). Drying of Apple Slices in Combined Heat and Power (CHP) Dryer: Comparison of Mathematical Models and Neural Networks. *Chemical Product and Process Modeling*, 8(1): 41– 52.
- [17] Kaveh, M., Amiri Chayjan R. (2015). Mathematical and neural network modelling of terebinth fruit under fluidized bed drying. *Research in Agriculture Engineering*, 61 (2): 55–65.
- [18] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., Esna-Ashari, M. (2015). Thermal and physical properties modelling of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under solar drying. *Research in Agriculture Engineering*, 61(4): 150–161 (2015)
- [19] Doymaz, I., Kipcak, A.S., and Piskin. S. (2015). Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality. *Czech Journal of Food Sciences*, 33(4): 367–376.

- [36] Workneh, T.S., Oke, F.O. (2013). Thin Layer Modelling of Microwave-Convective Drying of Tomato Slices. *International Journal of Food Engineering*, 9(1): 75–90
- [37] Kantrong, H., Tansakul A., Mittal, G.S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12): 3594–3608.
- [38] Kaveh, M., and Amiri Chayjan, R. 2014. Predication of some physical and drying properties of terebinth seed (*Pistacia atlantica* L.) using artificial neural networks. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 13: 65–78.
- [39] Murthy, T.P.K., Manohar, B. (2014). Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*. 51(12): 3712–3721.
- [40] Tavakolipour, H., Mokhtarian, M., 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.
- Slices (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 10.1111/jfpp.12905.
- [31] Izli, N., Isik, E. (2015). Color and Microstructure Properties of Tomatoes Dried by Microwave, Convective, and Microwave-Convective Methods. *International Journal of Food Properties*, 18: 241–249.
- [32] Seremet (Ceclu), L., Botez, E., Nistor, O.V., Andronoiu, D.G., Mocanu. G.D. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195: 104–109.
- [33] Izlil, N., Izli, G., Taskin, O. (2016). Drying kinetics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity properties of kiwi dried by different methods. *Journal of Food Measurement and Characterization*, DOI 10.1007/s11694-016-9372-6. (In Press)
- [34] Celen S., Kahveci, K. (2013). Microwave Drying Behaviour of Tomato Slices. *Czech Journal of Food Sciences*, 31 (2): 132–138.
- [35] Zielinska M., Zapotoczny P., Alves-Filho O., Eikevik T.M., Blaszcak W. (2013). A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas. *Journal of Food Engineering*, 115: 347–356.

## Using artificial neural networks (ANNs) method in investigation and estimation of some drying characteristics of eggplant and turnip in a combined microwave – convective dryer

Kaveh, M. \*

1. Young Researchers and Elite Club, Sardasht (Urmia) Branch, Islamic Azad University, Sardasht (Urmia), Iran

(Received: 2016/09/29 Accepted: 2016/11/08)

In this research work, in order to estimate the drying properties of eggplant and turnip in a combined microwave-convection dryer it was used artificial neural network method in order to estimate the Drying process was accomplished in three temperature levels (40, 55, and 70 °C), three inlet air velocity levels (0.5, 1.1 and 1.7 m/s) and three microwave power levels (270, 450 and 630 W) in a combined microwave-convection dryer that the three parameters were utilized as input in predicting the effective moisture diffusion coefficient and specific energy consumption in artificial neural network. A feed forward and cascade forward back propagation neural network with training functions of Levenberg - Marquardt (LM) and Bayesian Regulation (BR) for training of patterns. According to results, the highest value of the effective moisture diffusion coefficient for eggplant and turnip was obtained  $3.39 \times 10^{-9}$  and  $3.05 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, respectively. Results of ANN investigations showed that the optimum feed forward back propagation network with 3-20-20-2 topology and training function of Levenberg – Marquardt could predict the effective moisture diffusion coefficient and specific energy consumption with determination coefficients of 0.9821 and 0.9952 and mean square error of 0.00014 in various drying conditions of eggplant and turnip. Also the highest determination coefficients for prediction of drying rate and moisture ration obtained 0.9698 and 0.9988 with the value of mean square error of 0.0045 in cascade back propagation neural network with training algorithm of Levenberg – Marquardt.

**Keywords:** Eggplant and turnip, Microwave-convection dryer, Effective moisture diffusion coefficient, Specific energy consumption, ANN.

---

\*Corresponding Author E-Mail Address: sirwankaweh@gmail.com