



## تعیین مدل مناسب سینتیک خشک کردن پیاز قرمز و مقایسه مدل‌های ریاضی سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS)

مریم کریمی مطلق<sup>۱</sup>، بابک بهشتی<sup>۲\*</sup>، علی محمد برقی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استاد تمام، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق، سینتیک خشک کردن، تعیین ضریب نفوذ موثر رطوبت، انرژی فعالسازی و همچنین پیش بینی نسبت رطوبت پیاز قرمز در طی فرآیند خشک کردن با خشک کن - هوای داغ به کمک مدل‌های ریاضی و سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) انجام گرفت. خشک کردن محصول در چهار سطح دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C در سرعت جریان هوای ثابت ۱m/s انجام شد. برای انتخاب یک مدل خشک کردن مناسب، دوازده مدل لایه نازک خشک کردن، همچنین استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین بهترین مدل ریاضی مناسب لایه نازک از رگرسیون غیرخطی و شاخص‌های  $x^2$ , RMSE,  $R^2$  و MRDM در نرم افزار R ویرایش ۲.۶.۳ استفاده گردید. نتایج نشان داد که در میان مدل‌های ریاضی مدل دوجمله‌ای با بیشترین ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا مناسب ترین بود. نتایج انفیس با مقدار ضریب همبستگی  $R^2 = (0/999)$  و خطای  $RMSE = (0/002)$  کمترین ریشه میانگین مربعات خطا، بهتر از مدل‌های ریاضی نسبت رطوبت را پیش بینی کرد. مقدار ضریب نفوذ موثر برای چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰°C به ترتیب (۰/۱۸۴۷۶۶۹)، (۰/۱۹۳۰۷۷۰)، (۰/۲۱۱۶۹۸۸) و (۰/۳۱۳۶۲۵۵)  $m^2/s$  و مقدار انرژی فعالسازی ۱۸۹۰ (kJ/(kg)) بدست آمد.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

کلمات کلیدی:

ضریب نفوذ موثر،  
انرژی فعال سازی،  
مدل ریاضی،  
انفیس،  
نرم افزار R.

DOI: 10.22034/FSCT.19.133.337  
DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.133.27.2

\* مسئول مکاتبات:

beheshti.babak@gmail.com

## ۱- مقدمه

پیاز قرمز حدود ۸۹٪ آب، ۴٪ قند، ۱٪ پروتئین، ۲٪ فیبر و ۰/۱٪ چربی دارد و در هر ۱۰۰ گرم ۱۶۶ کیلو ژول (۴۰ کیلو کالری) انرژی دارد. پیاز قرمز به صورت تازه و خشک مصرف می شود. پیاز خشک شده به عنوان افزودنی و طعم دهنده در مواد غذایی مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. پیاز از ارزش غذایی بالایی برخوردار است و منبع بسیار مهم و مفید در رژیم غذایی برای سلامت بدن می باشد [۲]. خشک کردن رایج ترین فرآیند برای حفظ و نگهداری محصولات کشاورزی است [۳]. در روشهای خشک کردن، عواملی مانند دما و سرعت هوا و رطوبت اولیه و نهایی محصول، رطوبت نسبی و دمای هوای محیط و عمق ماده غذایی بر روی میزان تغییرات رطوبت نسبت به زمان یا همان سینتیک خشک کردن مؤثرند [۴]. منظور از مدل سازی ریاضی در فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی و صنایع غذایی در واقع تبدیل کیفیت های فیزیکی و رابطه متقابل این کیفیت ها به کمیت های عددی و روابط ریاضی است. در مدل های ریاضی متغیرها و مجموعه معادلات وابسته تأثیر متقابل خود را در دنیای واقعی، نشان میدهد. این روش برای پیش بینی تغییرات بسیار مناسب است. سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) یکی از مهمترین روشهای هوش مصنوعی می باشد که در فرآیندهای طبیعی، با ارزیابی و پرسش ها در این فرآیند ها، بطور عملیات موفقیت آمیزی عمل کرده اند. انفیس نسبت به بسیاری از روشهای آماری برتری دارد و در مقایسه با مدل های رگرسیون، برای پیش بینی تغییرات واقعی داده ها، بهتر عمل می کند [۵]. در پژوهشی مدلسازی سینتیک خشک کردن پیاز در یک خشک کن بستر سیال مجهز به کنترل کننده رطوبت انجام گرفت. ورقه های نازک پیاز در این یک خشک کن آزمایشگاهی با سه دمای ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ °C و دو سرعت هوای ۲ و ۳ متر بر ثانیه در رطوبت هوای ثابت خشک گردید. جهت مدل سازی سینتیک خشک کردن از شبکه های عصبی مصنوعی جهت مدل سازی استفاده شد. ضریب همبستگی ۰/۹۹۹۵۶ و میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۰۳۹۳۸۵ با بکارگیری تابع فعال سازی تانژانت سیگموئید هیپربولیکی، الگوی یادگیری لوبنرگ-مارکوات و چرخه یادگیری ۱۰۰۰ اپچ به عنوان بهترین مدل عصبی ارائه گردید. در مجموع می توان گفت ترکیب اصول منطق فازی و شبکه های عصبی مصنوعی روشی مناسب و قابل اطمینان برای

مدل سازی و پیش بینی سینتیک خشک کردن پیاز و محصولات مشابه می باشد [۶]. در تحقیقی پیش بینی سینتیک خشک کردن توت سفید و مقایسه بین مدل های ریاضی، شبکه های عصبی مصنوعی و انفیس انجام گرفت. خشک کردن محصول در سه دمای ۵۵، ۴۰ و ۷۰ °C، سه سرعت جریان هوای ۰/۵، ۱ 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 با داده های آزمایشگاهی برازش شد. نتایج نشان داد مقادیر خطای میانگین مربعات MSE برای مدل ریاضی، ANN و ANFIS به ترتیب ۰/۰۰۵۲، ۰/۰۰۵۹ و ۰/۰۰۴۴ به دست آمد. بنابراین مدل ANFIS با بیشترین مقدار مقدار ضریب همبستگی  $R^2 = (0/99999)$  و خطای میانگین مربعات  $MSE = (0/0044)$  برای ارزیابی نسبت رطوبت در مقایسه با سایر روشهای اجرا شده در این پژوهش، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد [۷]. خشک کردن لایه نازک پیاز قرمز تیره در دماهای مختلف ۵۰، ۶۰ و ۷۰ °C و در چهار سرعت جریان هوا (۲، ۳/۶، ۵/۷ و ۷/۷) متر بر ثانیه انجام شد. مقدار ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دمای هوا خشک کننده و سرعت هوا افزایش یافت. مقادیر میانگین حسابی ضریب نفوذ مؤثر و انرژی فعال سازی در محدوده محصولات کشاورزی بود [۸]. تعداد بسیاری از تحقیقات برای توصیف خشک شدن از محصولات کشاورزی و مواد غذایی از مدل های ریاضی و انفیس با موفقیت استفاده شده است [۹].

هدف از این پژوهش بررسی سینتیک خشک کردن پیاز قرمز در دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C رسم منحنی های خشک شدن آن و تعیین انرژی فعال سازی و ضریب نفوذ مؤثر در دماهای آزمایش است. همچنین تعیین مدل مناسب خشک شدن پیاز قرمز از بین ۱۲ مدل ریاضی و سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) می باشد.

## ۲- مواد و روش ها

پیاز قرمز از میدان تره بار در شهر ری از استان تهران تهیه شد و پس از آن، پیازها تا زمان شروع آزمایش به یخچال آزمایشگاه با دمای ۵ درجه سلسیوس، منتقل شدند. رطوبت نسبی هوا از طریق آزمایش حباب تر انجام گرفت و از جدول سایکرومتریک تعیین شد. نمونه ها پیاز توسط دستگاه

شدند. آزمایشات خشک شدن تا رسیدن رطوبت محصول به ۲۰٪ بر پایه وزن خشک ادامه پیدا کرد.

نسبت رطوبت MR پیاز قرمز با استفاده از رابطه (۱) به دست می آید:

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

که در آن MR نسبت رطوبت بدون بعد،  $M_t$  مقدار رطوبت محصول در هر زمان،  $M_e$  مقدار رطوبت تعادلی و  $M_0$  مقدار رطوبت اولیه است. برای زمان های طولانی  $M_e$  در مقایسه با مقادیر  $M_0$  و  $M_t$  بسیار کوچک می باشد، بنابراین می توان معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن را به صورت رابطه (۲) نوشت [۱۰].

$$MR = M_t / M_0 \quad (2)$$

آهنگ تبخیر رطوبت پیاز قرمز، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد [۱۱].

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند خشک شدن پیاز قرمز، از ۱۲ مدل مختلف خشک کردن لایه نازک مطابق جدول (۱) استفاده گردید.

اسلایسرمدل (V-Rendesi) قطعه قطعه شدند. برای انجام این پژوهش از خشک کنی با حجم ۱۲ فوت مکعب، ساخت شرکت مهندسی گروک ایران در آزمایشگاه مهندسی بیوسیستم واقع در مجتمع آزمایشگاهی شیخ بهایی، در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی استفاده شد و با استفاده از ترازوی دیجیتال ژاپنی مدل (AND-EK-600) و با دقت  $\pm 0.001 \text{ g}$  نمونه ها توزین شدند. آزمایشات در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار با آزمایش فاکتوریل انجام گردید و به کمک نرم افزار R تجزیه و تحلیل شدند.

## ۲-۱- آماده سازی نمونه ها

قبل از آزمایش نمونه های پیاز قرمز آزمایش از یخچال خارج و به ضخامت ۴ میلی متر قطعه قطعه شدند. نمونه ها و ظروف آزمایش ها توزین گردید و ثبت شدند. خشک کن ۳۰ دقیقه قبل از شروع آزمایش در دمای آزمایش که شامل چهار سطح دمای (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ °C) و سرعت ثابت هوای ۱ متر بر ثانیه بود، قرار گرفت. اندازه گیری رطوبت پیاز قرمز قبل و بعد از خشک کردن انجام گرفت. خشک کردن نمونه ها بصورت لایه نازک صورت گرفت و در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه ای نمونه های آزمایش از خشک کن خارج گردید و با استفاده از ترازوی دیجیتال برای ثبت تغییرات وزن در طول فرآیند توزین

**Table 1** Models used to investigate the Red onion thin layer drying

Model	Model Name	References
$MR = \exp(-kt)$	Newton (lewis)	[12]
$MR = a \exp(-(kt)^n) + b$	Demir et al	[13]
$MR = \exp(-\frac{at}{1+b})$	Aghbashlo	[14]
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	[15]
$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page	[16]
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson & Pabis	[17]
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential	[18]
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang & sing	[17]
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Diffusion approximation	[18]
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logaritmik	[19]
$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	Two term	[18]
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midili et al	[20]

طبق معادله (۷) بدست آید [۲۹].

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \left( -\frac{\pi^2 D_e t}{R_c^2} \right) \quad (6)$$

$$\text{Slop} = -\frac{\pi^2 D_e}{R_c^2} \quad (7)$$

#### ۴-۲- انرژي فعال سازي

رابطه ضريب نفوذ با دما توسط معادله‌ی آرينوس (رابطه (۸)) بيان می‌گردد. [۳۰] با استفاده از رابطه (۸) انرژي فعال سازي را می‌توان دست آورد [۳۱].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

که در آن: انرژي فعال سازي و  $E_a$ (KJ/mol)

ضريب نفوذ مبنا  $D_0$  ( $m^2/s$ )

ثابت گازها برابر  $R$  (J/mol.K)  $\wedge$  ۳۱۴

دمای مطلق (K)  $T$

با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۸)، این رابطه را می‌توان به صورت خطی در آورد و با رسم  $\ln D_{eff}$  در مقابل  $(1/T)$  مقدار  $(E_a/R)$  بصورت ضريب زاویه بدست می‌آید که در رابطه (۹) دیده می‌شود [۳۲].

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

#### ۵-۲- انفيس

پارامترهای سیستم استنتاج Takagi-Sugeno از روش حداقل مربعات در مدل ANFIS ساخته شد و پنج لایه بوجود آمد. شامل لایه فازی سازی (لایه اول)، لایه قانون (لایه دوم)، لایه نرمال سازی (لایه سوم) لایه فازی سازی، (لایه چهارم) لایه خروجی، (لایه پنجم) سیگنال های ورودی به طور متوالی توسط لایه های فوق پردازش می شوند و خروجی کلی از آخرین لایه به دست می آید [۳۳].

به طور کلی، گرفتن مدل ANFIS با دو ورودی  $x$  و  $y$  یک خروجی  $f$  قوانین فازی *if then* را می‌توان به شکل های زیر بیان کرد.

$$\text{Rule}_1 : \text{If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1; \text{ then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (10)$$

$$\text{Rule}_2 : \text{If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2; \text{ then } f_2 = p_2x + q_2y$$

برای ارزیابی مدل ها از شاخص های آماری که در جدول ۲ آمده است، استفاده گردید.

Table 2 Models evaluation indices

Index	Reference
$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(m_{p_i} - m_i)^2}{N - n}$	( $\chi^2$ ) Chi-square [21]
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_i - m_{p_i})^2}{N}}$	Root Mean Square (RMSE) Error [22]
$MRDM\% = \frac{100}{N} \sum \frac{ m_i - m_{p_i} }{m_i}$	Mean Relative Deviation Modulus (MRDM) [23]
$R^2 = 1 - \frac{\text{Residual SS}}{\text{Corrected total SS}}$	Coefficient Of Determination (R2) [24]

#### ۲-۲- تعیین ضريب نفوذ مؤثر رطوبت

قانون دوم فیک اغلب برای توصیف پدیده ی نفوذ رطوبت به کار میرود که مطابق رابطه (۴) می باشد: [۲۵].

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = D_{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (4)$$

که در آن:  $c$  غلظت ( $Mole/m^3$ )،  $\theta$  زمان  $D_{eff}$ (s) ضريب نفوذ مؤثر ( $m^2/s$ ) و  $Z$  مختصه مکانی (m) است.

با حل معادله فیک برای حالت تخت و بی نهایت (اسلایس پیاز قرمز) از رابطه (۵) استفاده شد: [۲۶].

$$MR = \frac{M_i - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_e t}{L^2}\right) \right] \quad (5)$$

که در آن

$D_e$  ضريب مؤثر رطوبت ( $m^2/s$ )

MR:نسبت رطوبت بدون بعد

$M_i$ :رطوبت محصول در هر زمان برپایه خشک ( $Kg/Kg$ )

$M_e$ :رطوبت تعادلی در دمای ثابت برپایه خشک

( $Kg/Kg$ )

$M_0$ :رطوبت اولیه برپایه خشک ( $Kg/Kg$ )

$L$ :ضخامت محصول (به دلیل تاثیر کم جملات دوم به بعد سری، فقط جمله اول آن در محاسبات استفاده می‌گردد) [۲۷].

#### ۳-۲- ضريب نفوذ مؤثر

با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۵) رابطه شماره (۶) بدست می‌آید [۲۸]، که ضريب نفوذ می‌تواند از شیب این معادله

تابع سیگموئیدی  $dsigmf$  و مثلث  $trimf$  گاوسی  $Gaussmf$ ، تابع سیگموئیدی  $psigmf$  در نظر گرفته شدند. در همین حال، تابع عضویت خروجی استفاده شده یک تابع غیر خطی بود. علاوه بر این، از الگوریتم یادگیری ترکیبی جهت تعیین پارامترهای بهینه Takagi-Sugeno استفاده شد. سیستم استنتاج توانایی پیش بینی مدل های ANFIS ساخته شده با استفاده از ضریب تعیین  $R^2$ ، ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، ارزیابی شد [۳۴]. برای انجام محاسبات ANFIS از Neural Network در نرم افزار R، نسخه 3.6.2 نیز استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

منحنی های خشک شدن در دماهای مختلف آزمایش، در شکل (۱) آورده شده است.

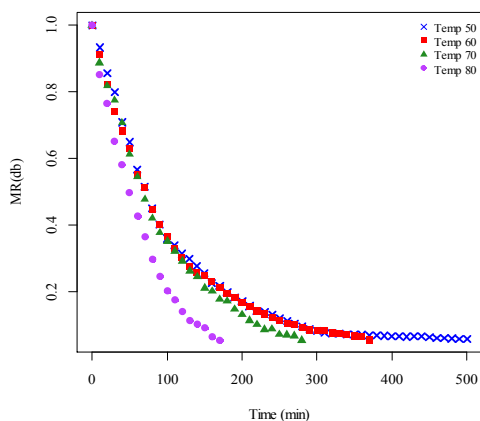


Fig 1 Diagram 1. Red onion drying at different temperatures (50, 60, 70, 80 °C)

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، در شروع روند خشک شدن، رطوبت اولیه اسلایس پیاز و آهنگ ازدست دادن رطوبت زیاد است، به تدریج و با گذشت زمان، میزان رطوبت محصول کمتر شده و آهنگ کاهش رطوبت، به طور طبیعی کاهش می یابد. پیاز بیشتر رطوبت خود را در زمانهای اولیه خشک شدن از دست می دهد. در نتیجه مشخص است با افزایش دما شیب منحنی خشک شدن افزایش پیدا می کند، بطوری که در دمای ۸۰ درجه سلسیوس منحنی با شیب تندی کاهش پیدا کرده است. دلیل احتمالی این امر را می توان کاهش خلل و فرج داخل بافت پیاز و کوچک شدن آنها به

$$y + r_2 \quad (11)$$

که در آن  $A_1, A_2, B_1, B_2$  برچسب های زبانی هستند و  $p_1, p_2, q_1, q_2, r_1, r_2$  ضرایب خطی خروجی هستند تابع  $f_1$  و  $f_2$  چند جمله ای های مرتبه اول هستند. لایه اول فازی سازی متغیرهای ورودی را تبدیل می کند به یک مجموعه فازی از طریق توابع عضویت که در آن دمای (درجه سلسیوس)، زمان خشک شدن (دقیقه)،  $f$  نسبت رطوبت هستند، تبدیل می کند. هر گره در لایه اول یک گره تطبیقی و گره مربوطه است تابع به صورت نوشته می شود. لایه اول (فازی شدن) متغیرهای ورودی  $\mu_{Ai}$  را به یک مجموعه فازی از طریق توابع عضو تبدیل میکند.

$$O^1_{Ai} = \mu_{Ai}(X) \quad i=1,2 \quad (12)$$

$$O^1_{Bj} = \mu_{Bj}(Y) \quad j=1,2 \quad (13)$$

در لایه دوم (لایه قانون) در یکدیگر ضرب می شوند و خروجی های حاصل می شود به شکل کلی بیان می شود.

$$O^2_i = W_i \mu_{Ai}(X) * \mu_{Ai}(Y), \dots, i=1,2 \quad (14)$$

لایه سوم نرمال سازی با استفاده از معادله زیر:

$$Q^3_i = W_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad (15)$$

در لایه چهارم برای همبستگی ورودی ها و خروجی در معادله تولید می شود.

$$O^4_i = W_i f_i = W_i (P_i X + q_i Y + r_i) \quad i=1,2 \quad (16)$$

خروجی کلی به صورت زیر محاسبه می شود:

در لایه پنجم قانون خروجی تمام ورودی های را خلاصه می کند و خروجی کلی بصورت زیر:

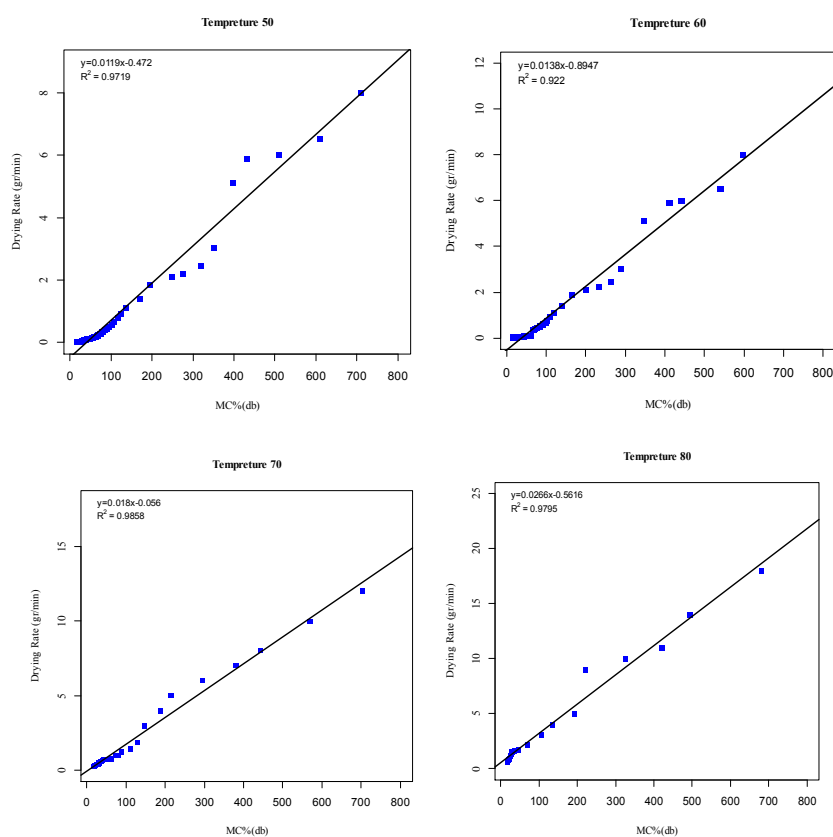
$$Q^5_i = \sum_i W_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad i=1,2 \quad (17)$$

در این پژوهش از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) با استفاده از مجموعه داده برای پیش بینی نسبت رطوبت پیاز قرمز استفاده شد. برای ارزیابی مدل ها، دما زمان خشک شدن به عنوان لایه ورودی و نسبت رطوبت به عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. هشت عملکرد مختلف عضویت، از جمله دوزنقه ای  $gbellmf$ ,  $trapmf$ ، منحنی  $Pipimf$ ، گاوسی دو طرفه  $Gasuss2mf$ ، تفاوت بین دو

این محصول مکانیسم انتشار بخار آب است [۳۶]. با افزایش دمای خشک کردن پتانسیل تبخیر افزایش یافته و دما اثر مستقیم بر انتقال رطوبت از محصول به هوای خشک کننده داشته و سبب کاهش سریع رطوبت پیاز قرمز می شود و زمان خشک شدن آن کاهش می یابد. نتیجه مشابه این تحقیق در خصوص اثر مستقیم دما بر سرعت فرآیند خشک کردن لایه نازک برای برخی از سبزیجات و میوه ها گزارش شده است [۳۷].

شدت خشک شدن پیاز قرمز در دماهای مختلف در برابر مقدار رطوبت در شکل (۲) آورده شده است.

دلیل چروکیدگی دانست. در نتیجه کوچک شدن خلل و فرج، فشار بخار جزئی در داخل پیاز کاهش یافته و مقاومت در قبال از دست دادن رطوبت افزایش می یابد. تقریباً به ازای هر ۱۰ درجه افزایش دما، زمان رسیدن به رطوبت نهایی ۲۰٪ برحسب وزن خشک، ۱۰۰ دقیقه کاهش یافته است. این نتایج با نتیجه سینتیک خشک کردن لایه های نازک هویج مشابه بود [۳۵]. از تحقیقی که بر روی روند تغییرات افت رطوبت نسبت به زمان انجام گرفت، میتوان پی برد که پیاز قسمت عمده رطوبت خود را در دوره سرعت نزولی از دست داده است و این دوره مهمترین دوره خشک کردن این محصول است. پس مکانیسم غالب انتقال رطوبت در طی خشک شدن



**Fig 2** The trend of changes in the drying rate at different temperatures (50, 60, 70, 80 °C)

شدن پیاز قرمز در دماهای مختلف در نرخ نزولی اتفاق افتاده است. همچنین خشک شدن سطح محصول در مراحل انتهایی خشک کردن باعث ایجاد یک مقاومت در انتقال آب به سطح محصول شده که این امر باعث کاهش شدت خشک کردن در مراحل پایانی خشک کردن می شود [۳۰].

داده های حاصل از خشک کردن پیاز قرمز با ۱۲ مدل لایه نازک مطابق جدول (۱) برازش شدند. برای پیدا کردن بهترین

معادله ی رگرسیون خطی نرخ خشک شدن بر حسب مقدار رطوبت در دماهای مختلف تعیین شد و در کنار هر نمودار آورده شده است. این معادله های خطی با توجه به مقدار  $R^2$  از برازش خوبی برخوردار می باشند. با توجه به این معادلات ضریب زاویه معادله خط رگرسیون با افزایش دما افزایش می یابد و این گواهی می دهد که نرخ خشک شدن با افزایش دما، افزایش می یابد. همانطور که در شکل مشاهده میشود خشک

مطابقت را با داده های آزمایش داشتند. مقادیر شاخص های ارزیابی این دو مدل در دماهای مختلف در جدول (۳) آورده شده است. سپس ضرایب (ثابتها) مدل های انتخاب شده به متغیرهای مورد استفاده در فرآیند خشک کردن در جدول ربط داده شد و نتایج در جدول (۴)، گزارش گردید. در جدول ۳ و ۴ مقادیر پارامترهای ثابت مدل دوجمله ای در دماهای مختلف آورده شده است.

مدل و بدست آوردن ضرایب آنها، از روش رگرسیون غیر خطی با استفاده از نرم افزار آماری R نسخه 3.6.2 به روش حداقل مربعات استفاده گردید. از چهار شاخص، مطابق جدول (۲) برای سنجش بهترین مدل استفاده شد. ملاک انتخاب بهترین مدل توصیف کننده رفتار خشک کردن، بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار  $MRDM$  و  $RMSE$  بود. با توجه به مطالب بیان شده از بین ۱۲ مدل، مدل دوجمله ای بهترین

**Table 3** Results of model constant parameters for experiments at different temperatures (50, 60, 70, 80 °C)

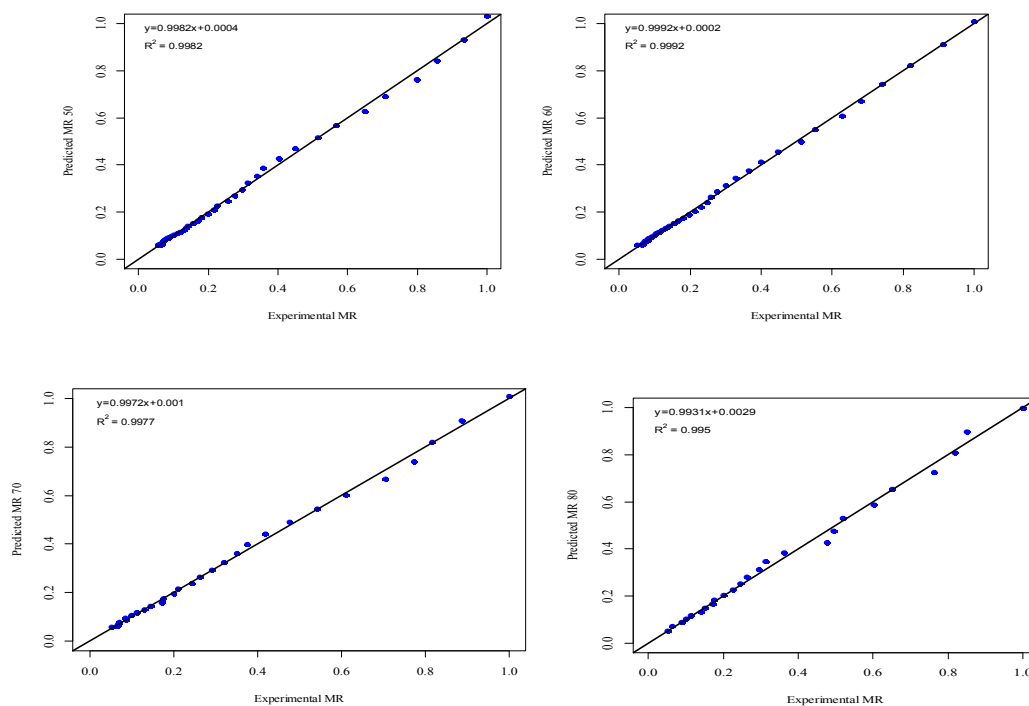
$R^2$	RMSE	$X^2$	MRDM	T(°C)	Model
0.998	0.010715	0.000125	3.194168	50	Two term
0.999	0.007364	6.04E-05	2.592504	60	
0.997	0.013003	0.000197	3.326371	70	
0.995	0.01916	0.000437	3.996987	80	

**Table 4** Results of nonlinear model fitting of the Two term model in experimental treatments (0.05)

B	A	$K_2$	$K_1$	Model Name
1.74e-04	1.00e+00	3.07e-02	1.86e-05	Two term
9.15e-01	9.37e-02	1.87e-04	3.19e-05	50
1.01e+00	2.06e-09	1.72e-04	8.49e-04	60
9.98e-01	1.93e-07	1.77e-04	8.25e-04	70
				80

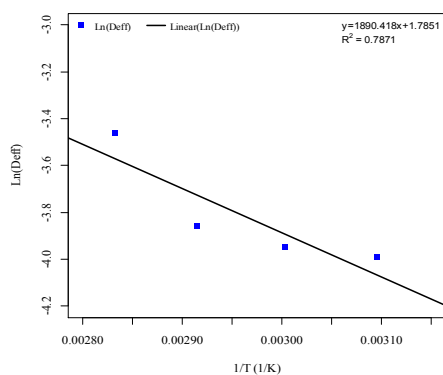
داده های آزمایشی برخوردار هستند. نتایج ارزیابی شاخص های مدل ها نشان داد که مدل های دوجمله ای، میتوانند رفتار خشک شدن پیاز را بهتر توصیف کند.

مقادیر  $MR$  آزمایشی در برابر  $MR$  پیشبینی شده از مدل دوجمله ای در شکل های ۳ آورده شده است. همانطور که از نمودارها مشخص است، مدل های موجود از برازش خوبی با



**Fig 3** The trend of changes in the drying curve of the Two term model at different temperatures (50, 60, 70, 80 °C)

$10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  توسط محققان گزارش شده است [۳۸].



**Fig 4** Activation energy determination

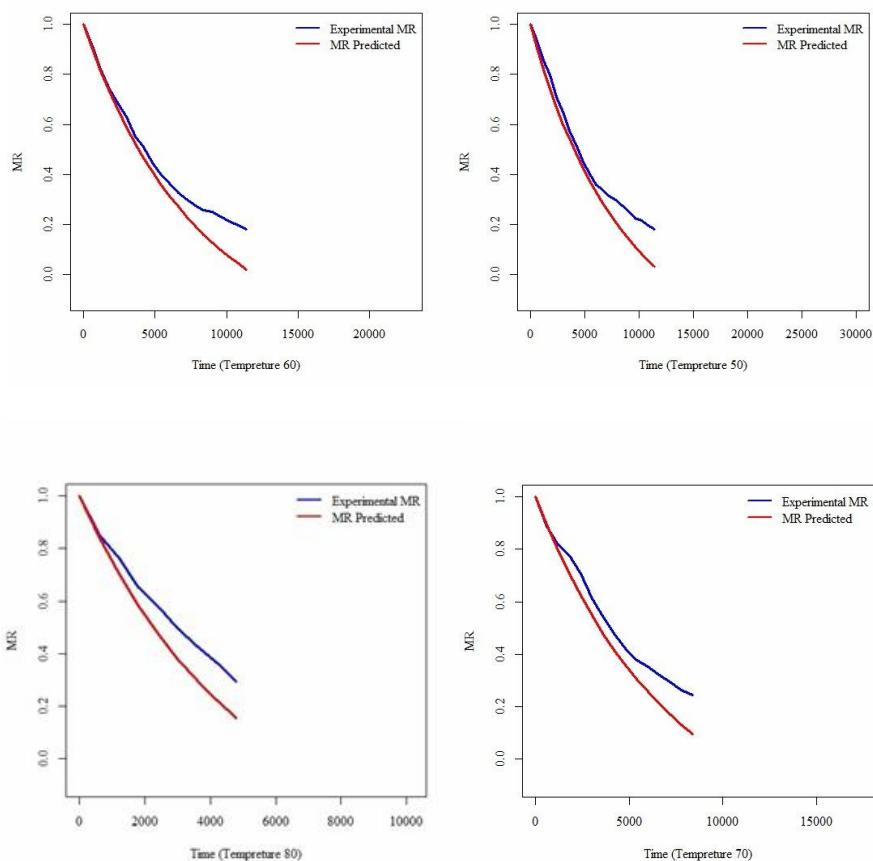
تغییرات دما می تواند بر میزان ضریب نفوذ موثر اثر مستقیم داشته باشد و با افزایش دما مقدار ضریب نفوذ موثر نیز افزایش یابد. تعیین انرژی فعالسازی در شکل (۵) آمده است و مقدار آن از ضریب زاویه خط رگرسیون مقدار  $1890/4 \text{ (kJ/(kg))}$  بدست آمد [۳۹].

مقادیر ضریب نفوذ موثر در دماهای مختلف آزمایش (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ °C) در جدول ۵ نمایش داده شده است. دما بر ضریب نفوذ تاثیر دارد و با افزایش دما، ضریب نفوذ موثر روند افزایشی دارد.

**Table 5** Effective moisture diffusion at different temperatures (50, 60, 70, 80 °C)

Temperature (°C)	$D_{\text{eff}} \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{s})$
50	0.01847669
60	0.01930779
70	0.02116988
80	0.03136255

باتوجه به اینکه با افزایش دما خشک کردن سطح محصول دچار چروکیدگی بیشتری می گردد و لذا سطح جانبی محصول کاهش می یابد اما این تاثیر افزایشی دما در حدی است که سرعت تبخیر رطوبت اثر کاهش سطح جانبی را خنثی کرده بنابراین با افزایش دما ضریب نفوذ موثر افزایش می یابد. نتایج این تحقیق با گزارشهای دیگر محققان سازگار است. مقادیر ضریب نفوذ موثر برای محصولات کشاورزی و مواد غذایی در محدوده  $10^{-11}$  تا



**Fig 5** The effect of different temperatures (50, 60, 70, 80 °C) on the moisture ratio during drying of red onion.



گرفت مدل‌های مختلف انفیس با استفاده از روش آزمون و خطا طراحی شده اند و برای پیش بینی خروجی از قوانین فازی، نتایج انفیس در جدول (۷) خلاصه شده است. این جدول نشان می‌دهد که حداقل RMSE و بالاترین ارزش  $R^2$  توسط الگوریتم انفیس ارائه شده است.

نتایج سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) تأثیر دما، بر چهار سطح (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ °C) بر روی، نسبت رطوبت در حین خشک کردن پیاز قرمز را نشان داده است شکل (۵). در این پژوهش نتایج اطلاعات مربوط به بهترین الگوریتمها و برای پیش بینی انفیس گزارش شده است. در انفیس مانند سایر مدل‌های ریاضی مورد استفاده شد. تجزیه و تحلیل صورت

**Table 7** ANFIS results for trimf membership function

$R^2$	RMSE	Number of functions	Function type
0.999	0.001	2-2-2	trimf
0.999	0.003	2-2-2	gaussmf

محدوده محصولات کشاورزی و مواد غذایی بود [۳۰] و [۴۲]. مقدار انرژی فعالسازی پیاز قرمز ۱۸۹۰ kJ/(kg) بدست آمد. میزان انرژی فعال سازی برای محصولات مختلف کشاورزی مواد غذایی عمدتاً بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول گزارش شده است [۳۹]. براساس مجموعه دادهها، چندین مدل پیشبینی غیرخطی و انفیس و مدل های ریاضی برای تخمین نسبت رطوبت پیاز قرمز طراحی شد. برای طراحی مدل انفیس با یک متغیر خروجی نسبت رطوبت و چهار متغیر ورودی، زمان خشک شدن انجام شد. برای انتخاب بهترین مدل برای پیشبینی دقیق برآورد نسبت رطوبت، مدل ها با همدیگر مقایسه شدند. برای انتخاب بهترین مدل، ضریب تبیین به دست آمده مدل محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مجموعه دادههای آزمایشی، پیشبینی عملکرد مدل ها و ANFIS مدل دو جمله ای بالاتر از مدل‌های دیگر بدست آمد. بنابراین مدل ANFIS در مقایسه با سایر مدل ها ریاضی بهترین نتیجه را در پیشبینی نسبت رطوبت پیاز قرمز داشت [۳۹].

## ۴- مقایسه مدل‌های ریاضی و

### ANFIS

در این پژوهش مدل‌های ریاضی و ANFIS برای پیشبینی نسبت رطوبت پیاز قرمز مورد بررسی قرارگرفت و برای تعیین مدل مناسب کمترین و مربعات خطا و MRDM ضریب تعیین استفاده شد. با مقایسه جدول های (۳) و (۷)، مدل انفیس در این تحقیق بهتر از مدل های ریاضی داده های آزمایش را پیش بینی می کند. نتایج تحقیق های مشابه نشان داد که برای پیش بینی سینتیک خشک کردن توت سفید بین مدل ریاضی، شبکه عصبی مصنوعی و ANFIS [۴۰] و پیش بینی نسبت رطوبت کدو شبکه های عصبی مصنوعی با توجه به مقدار  $R^2$  بالاتر و RMSE کمتر و همچنین مقدار خطای کمتر عملکرد بهتری برای پیش بینی این پارمترها دارد [۴۱].

## ۵- نتیجه گیری

رفتار خشک کردن پیاز قرمز در خشک کن آزمایشگاهی در دماهای (۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ °C) و سرعت ثابت (۱ متر بر ثانیه) بررسی شد. دما های هوای خشک کن عوامل مهمی در محاسبه زمان خشک شدن، میزان ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعالسازی در خشک شدن محصول بودند. همچنین برای پیشبینی رطوبت محصول از دوازده مدل ریاضی استفاده شد که نتایج نشان داد مدل دو جمله ایبهترین مدل ریاضی برای پیش بینی بود. همچنین مقدار ضریب نفوذ موثر برای چهار دمای ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ °C به ترتیب (۰/۱۸۴۷۶۶۹، ۰/۰۱۹۳۰۷۷۰، ۰/۰۲۱۱۶۹۸۸ و ۰/۰۳۱۳۶۲۵۵)  $m^2/s$  که با افزایش دما ضریب نفوذ موثر افزایش یافت و تغییرات آن در

## ۶- منابع

- [1] Arsalan D, Özcan MM. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. *LWT-Food Science and Technology*. 2010; 43(7): 1121–1127.
- [2] Begherloo M, Heidari R, Ghaderpour S, Jamei R. Antioxidant activities of the methanolic extracts of several varieties of Iranian onion and theirs scavenging effect on free radicals. *Journal of Food Research*. 2011; 21(4): 455–465. [full text in Persian]
- [3] Mühlbauer, W. 2020. *Drying Atlas: Drying Kinetics and Quality of Agricultural Products*. England: Woodhead Publishing; 1st

- drying process of apple slices. : Drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect, Heat and Mass Transfer. 54: 425–436
- [13] Kaveh, M., Amiri Chayjan, R. 2016. Modeling Thin-Layer Drying of Turnip Slice Under Semi-Industrial Continuous Band Dryer. Journal of Food Processing and Preservation. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12778>
- [14] Kayran, S., Doymaz, İ. 2016. Infrared drying and effective moisture diffusivity of apricot halves: Influence of pretreatment and infrared power. Journal of Food Processing and Preservation, 41(2): 1-8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12827>
- [15] Coradi, P. C., Borém, F. M., Rodrigues Reinato, C. H. 2017. Mathematical modeling of drying the pulped coffee (*Coffea arabica* L.) at different air conditions. Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial. 11(2): 2397-2416. DOI:10.3895/rbta.v11n2.3166
- [16] Kurozawa, L. E., Azoubel, P. M., Xidieh Murr, F. E. Park, K. J. 2011. Drying kinetic of fresh and osmotically dehydrated mushroom (*Agaricus blazei*). J. Food Process Eng., 35(2), 295–313.
- [17] Doymaz I., Kipcak, A. S., Piskin, S. 2015. Microwave drying of green bean slices: Drying kinetics and physical quality, Czech Journal of Food Science 33(4): 367-376.
- [18] Naghavi, Z., Moheb, A., Ziaei-rad, S. 2010. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. Energ. Convers. Manage. 51: 258–264.
- [19] Murthy, K., Manohar, B. 2013. 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.
- [20] Kayran, S., 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.
- [21] AL-Khuseibi, M., Shyam S. S., Perera, C. O. 2005. Comparison of water blanching and high hydrostatic pressure effects on drying kinetics and quality of potato. Dry. Technol, 23(12): 2449–2461
- [22] AOAC. 1990. Official Methods of edition is an imprint of Elsevier.
- [4] Wan Daud W D,. 2008. Fluidized Bed Dryers-Recent Advances. Journal of Advanced Powder Technology 19:403-418.
- [5] Kaveh M, Jahanbakhshi A, golpour I, Mesri Gandshmin T, Abbaspour-Gilandeh Y, Jahedi Rad S. Prediction of white mulberry drying kinetics in microwave- convective dryer: A comparative study between mathematical model, artificial neural network and ANFIS. FSCT. 2019; 16 (88) :201-219 URL: <http://fsct.modares.ac.ir/article-7-15649-fa.html>
- [6] Ganjeh, M., Jafari, S.M., Ghanbari, V., Dezyani, M., Ezzati, R., Soleimani, M. (2013) Modeling the drying kinetics of onion in a fluidized bed drier equipped with a moisture controller using regression, fuzzy logic and artificial neural networks methods. Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology Vol. 7, No. 5: 399- 406
- [7] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A. I, Golpour, I., Mesri Gandshmin, T., Abbaspour-Gilandeh, Y., Jahedi Rad, Sh. (2019). Prediction of white mulberry drying kinetics in microwave convective dryer: A comparative study between mathematical model, artificial neural network and ANFIS. Journal of food science and technology (Iran) .JFST No. 88, Vol. 16, June 2019
- [8] Bhong, M.G., Kale, V. M. 2020. Drying mechanism of Indian dark red onion slices at high velocity. AIMS Agriculture and Food, , 5(2): 245–Volume 5, Issue 2, 245–261. DOI: 10.3934/agrfood.2020.2.
- [9] Kaveh, M., AmiriChayjan, 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).
- [10] Eshtiagh, A., Zare. D. 2015. Modeling of thin layer hot air-infrared drying of green peas. D of Thin Layer Hot Air-Infrared Drying of Green Pea. Agricultural Engineering International: CIGR Journal,, 23(4), 246-258.
- [11] Eshtiagh, A. 2013. Modeling and validation of green peas drying process in a hot-air infrared dryer. Unpublished M.S. Thesis. Shiraz University. Shiraz, Iran.
- [12] Horuz E., Bozkurt, H., Karatas, H., Maskan, M. 2018. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole

- [33] Roman MC, F. M. ( 2019). Convective drying of yellow discarded onion (Angaco INTA): Modelling of moisture loss kinetics and effect on phenolic compounds. *Inf Process Agric*.
- [34] Akbarpour H, Mohajeri M, Akbarpour M (2016) Pore diameter of and nanoporous anodic alumina: experimental study and application of ANFIS MLR. *Chemometr Intell Lab* 153:82-91
- [35] Ghanbari, M., Sahraeian, S. M. 2020. Investigation and Analysis of Drying Kinetics of Carrot. *Quarterly Research Journal of Technical and Vocational University*. Vol. 17, No. 2: 121-128.
- [36] Islam, M. R., Sablani, S. S., Mujumdar, A. S. 2003. Artificial neural network model for prediction of drying rates. *Journal of Drying Technology*. 21(9): 1867-1884.
- [37] Akpinar, E. K. 2006. Determination of suitable thin layer drying for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*. 73:75- 84.
- [38] Doymaz, I. (2011). Drying of eggplant slice in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35: 280-289.
- [39] 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.
- [40] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour Gilandeh, Y., Taghinezhad, E. and Moghimi, M.B.F. (2018). The effect of ultrasound pretreatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7): e12868
- [41] 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
- [42] Abasi, S., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H. 2014. Investigation of kinetics and energy consumption of thin layer drying of corn. *Journal of agricultural machinery*. Volume 4, Number 1:97-107.
- Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA.
- [23] Arumuganathan, T., Manikantan, M. R., Rai, R. D., Anandakumar, S., Khare, V. 2009. Mathematical modeling of drying kinetics of milky mushroom in a fluidized bed dryer. *International. Agrophysics*. 23(1): 1-7.
- [24] Bingol, G., Pan, Z., Roberts, J. S., Devres, Y. O., Balaban, M. O. 2008. Mathematical modelling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 1(2),46-54.
- [25] Aghbashlo, M. Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. 2009. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. *Energy Conversation and Management*, 50, 1348-1355.
- [26] Garcia-Martinez E., Igual, M., Martin-Esparza, M. E., Martinez-Navarrete, N. 2013. Assessment of the bioactive compounds, color, and mechanical properties of apricots as affected by drying treatment. *Food and Bioprocess Technology*. 6:3247-3255.
- [27] Doymaz I (2006) Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *J Food Eng* 76(2):212-217
- [28] Incedayi, B., Tamer, C.E., Sinir, G.O., Suna, S., Copur, O.U. 2016. Impact of different drying parameters on color, b-carotene, antioxidant activity and minerals of apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Food Science and Technology*. 36(1):171-178.
- [29] Sun, J., Hu, X., Zhao, G., Wu, J., Wang, Z., Chen, F., Liao, X. 2007. Characteristics of thin-layer infrared drying of apple pomace with and without hot air-drying. *Food Science and Technology International*. 13:91-97.
- [30] Mujumdar, A. S. 2000. *Drying Technology in agriculture and food sciences*. sciences Publishers, INC, 313 P.
- [31] Salehi, F. K. 2016. Investigation of Mass Transfer Kinetics in Combined Infrared-Hot Air Dryer for Eggplant slices. *Food Innovation Technology*, 7: 53-60 (In Persian).
- [32] Puente-Díaza, L., Ah-Hen, K., Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Di Scala, K. 2013. Combined Infrared-Convective Drying of Murta (*Ugni molinae* Turcz) Berries: Kinetic Modeling and Quality Assessment. *Drying Technology: An International Journal*, 31: 329.



## Determining the appropriate model of red onion drying kinetics and comparing mathematical models of Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

Karimi Motlagh, M. <sup>1</sup>, Beheshti, B. <sup>2\*</sup>, Borghei, A, M. <sup>3</sup>

1. PhD Student, Department of Agricultural Mechanization Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Full Professor, Department of Biosystems Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

### ABSTRACT

In this research, The kinetics of drying, The Determining The effective Moisture Diffusivity, Activation Energy, And also the prediction of the moisture ratio of red onion during the dry process with dryer-hot air drying were carried out with the help of mathematical models and fuzzy neural inference system (ANFIS). The experiments were performed at four levels of temperature at 50, 60, 70 and 80 0C and a constant air flow rate of 1 m/s . To select a suitable drying model, twelve thin layer drying models were used, as well as using fuzzy neural inference system R Software version 3.6.2. The results showed that among the mathematical models, The binomial model with the highest coefficient of explanation and the lowest root mean square error was the most suitable. The results of the correlation coefficient value ( $R^2 = 0.999$  and error)  $RMSE = (0.002)$  the lowest root mean square error It predicted the humidity ratio better than mathematical models. Effective Moisture Diffusivity for four temperatures (40,50,60 and 70° C), were (0.03136255, 0.0211698, 0.0193770, 0.001847669)  $m^2/s$  Respectively and The amount of activation energy was 1890 (kJ/(kg.K)).

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2022/ 09/ 09  
Accepted 2023/ 01/ 29

#### Keywords:

Moisture diffusivity,  
Activation energy,  
Mathematical Model,  
ANFIS,  
R Software.

**DOI: 10.22034/FSCT.19.133.337**  
**DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.133.27.2**

\*Corresponding Author E-Mail:  
[beheshti.babak@gmail.com](mailto:beheshti.babak@gmail.com)