



## مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن برش‌های لیموترش به روش تابش مادون قرمز با استفاده از شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی

علیرضا یوسفی<sup>۱\*</sup>، ناصر قاسمیان<sup>۱</sup>، امیر سالاری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب  
۲- استادیار، گروه بهداشت مواد غذایی و آبزیان، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: 95/10/24، تاریخ بازنگری: 95/11/22، تاریخ پذیرش: 95/12/9)

### چکیده

مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن، یکی از راه‌های مناسب برای کنترل زمان و شرایط خشک‌کردن می‌باشد. در این تحقیق، سینتیک خشک‌کردن برش‌های لیموترش با ضخامت‌های 5 و 10 میلی‌متر در یک خشک‌کن مادون قرمز آزمایشگاهی و در دماهای 100، 125، 150 و 175 درجه سانتی‌گراد بررسی شد. برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن برش‌های لیموترش، از 7 مدل ریاضی رایج خشک‌کردن لایه نازک استفاده شد. هم‌چنین برای این بررسی، از روش شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی چهار لایه (یک لایه ورودی، دو لایه مخفی و یک لایه خروجی) استفاده گردید. نتایج نشان داد که شبکه عصبی GMDH هیبریدی بهینه، دارای دقت بالایی در تخمین محتوای رطوبتی برش‌های لیموترش طی فرایند خشک‌کردن بوده که این دقت ( $R^2 = 0/9909$ ) حدود دقت مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل ریاضی به‌کار برده شده بود ( $R^2 = 0/9793-0/9950$ ). بررسی میزان حساسیت محتوای رطوبتی نسبت به متغیرهای ورودی نشان داد که مقدار رطوبت طی خشک‌شدن مادون قرمز به زمان خشک‌شدن بیش از سایر متغیرها حساس است (45 درصد). افزایش دما از 100 به 175 درجه سانتی‌گراد سبب افزایش ضریب نفوذ موثر ( $D_{eff}$ ) از  $9/90 \times 10^{-10}$  به  $2/76 \times 10^{-9} \text{ s/m}^2$  گردید. مقدار انرژی فعال‌سازی برای برش‌های لیموترش  $87/61 \text{ kJ/mol}$  به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: برش‌های لیموترش، شبکه عصبی GMDH، خشک‌کردن مادون قرمز، مدل‌سازی ریاضی.

\* نویسنده مسئول: a\_yousefi@bonabu.ac.ir

## ۱- مقدمه

مانند استفاده از خشک‌کن‌های کابینتی و یا خورشیدی مطرح شده‌اند. البته این روش‌ها نیز با محدودیت‌هایی مواجه هستند. برای نمونه، در برخی مناطق کاربرد خشک‌کن خورشیدی به دلیل کوتاه بودن زمان استفاده از انرژی تشعشعی خورشید چندان میسر نیست و یا خشک کردن با جریان هوای گرم در خشک‌کن کابینتی از جنبه مصرف انرژی و هزینه مربوطه با مشکل مواجه است [3]. بنابراین، استفاده از روش‌هایی مثل خشک کردن به وسیله تابش مادون قرمز می‌تواند در افزایش سرعت خشک کردن این نوع میوه‌ها مؤثر باشد. در طی دهه‌های گذشته، تلاش‌های زیادی برای استفاده صنعتی از مادون قرمز در فرایندهایی مانند صنایع پخت، انجمادزایی، پاستوریزاسیون، حرارت‌دهی و خشک کردن صورت گرفته است، به طوری که اغلب می‌توان از آن‌های مادون قرمز به عنوان جایگزین آن‌های معمولی برای خشک کردن بیش‌تر محصولات کشاورزی استفاده کرد [4]. خشک کردن با مادون قرمز مثل سایر روش‌های خشک کردن به دلیل اختلاف فشار بین داخل و خارج محصول صورت می‌گیرد که نیروی محرکه انتقال رطوبت است. در خشک‌کن‌های تابش مادون قرمز، گرما در درون ماده تولید می‌شود و در نقاطی که رطوبت بیش‌تری دارند متمرکز می‌شود و با افزایش فشار بخار، موجب انتشار رطوبت از آن نقاط به سمت لایه‌های خارجی می‌شود؛ بنابراین، به نظر می‌رسد در این روش خشک کردن، مشکلات مربوط به خشک شدن لایه سطحی و ممانعت از خروج بیش‌تر رطوبت کاهش یابد [5]. هم‌چنین انتظار می‌رود که زمان خشک کردن و هم‌چنین ترک خوردگی و شکستگی ناشی از تنش کششی نیز کاهش یابد. گرمای حاصل از تابش مادون قرمز در مقایسه با انتقال حرارت به روش جابه‌جایی دارای ضریب انتقال حرارت بالاتر، زمان فرایند کوتاه‌تر، مصرف انرژی کم‌تر و کنترل دقیق‌تر فرایند است [4]. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی بر روی خشک کردن میوه‌ها و سبزی‌ها به روش تابش مادون قرمز انجام شده است که از این میان می‌توان به خشک کردن ترکیبی با هوای داغ آناناس [6]، دانه سویا [7]، عنب [8] و میوه به [9] اشاره کرد. روش عمده در خشک کردن به روش تابش مادون قرمز ایجاد برش یا برش‌های نازک از میوه‌ها یا سبزی‌ها است.

بر اساس آمار و اطلاعات سازمان خواروبار جهانی (سال 2013) سالانه 15 میلیون تن لیموترش در جهان تولید می‌شود که کشور ایران با تولید سالانه 406 هزار تن لیموترش در مقام نهم قرار دارد. عمده تولید جهانی لیموترش به مصرف تازه‌خوری و آبگیری می‌رسد، اما در کشور ایران علاوه بر این موارد لیموترش را خشک کرده و آن را به عنوان «لیمو عمانی» یا «لیمو امانی» به بازار عرضه می‌کنند. این محصول در ایران و کشورهای مدیترانه و خاورمیانه محبوبیت و تقاضای زیادی دارد. میزان ویتامین ث در قسمت خوراکی میوه 280 ppm و در قسمت پوست 336 ppm می‌باشد [1].

امروزه علاوه بر این که خشک کردن راهی برای افزایش ماندگاری مواد غذایی می‌باشد، به عنوان روشی برای بالا بردن ارزش افزوده فراورده‌های غذایی شناخته شده است. خارج کردن آب از یک محصول در شرایط کنترل شده، رطوبت مواد غذایی را تا حد معینی کاهش می‌دهد که این امر سبب کاهش فعالیت آنزیم‌ها و سرعت تغییرات شیمیایی نامطلوب شده و باعث کاهش رشد میکروبی می‌شود. هم‌چنین خارج کردن رطوبت با کاهش حجم و وزن همراه است که از فاکتورهای مهم برای حمل و نقل و نگهداری به‌شمار می‌رود [2]. شاید بتوان مهم‌ترین مشکل خشک کردن لیموترش را جهت تولید لیمو امانی، زمان بر بودن خشک کردن آن به صورت میوه کامل دانست که در روش سنتی آفتابی به حدود 45 روز می‌رسد، زیرا پوسته چرمی لیموترش عامل محدود کننده‌ای در خروج آب و خشک شدن آن است. لیموترش در ایران به‌طور عمده به روش سنتی آفتابی خشک می‌شود و بزرگ‌ترین مشکل روش مذکور این است که زمان رسیدن کامل لیموترش مقارن با شروع فصل سرما و کاهش دما در منطقه رویش آن است، لذا به ناچار عمده محصول جهت خشک کردن به نواحی گرم‌تر منتقل می‌شود. مشکل عمده دیگری که در خشک کردن لیموترش مطرح است وجود ترکیبات تلخ می‌باشد، که یکی از کارکردهای خشک کردن کاهش یا جلوگیری از تولید این عوامل فرار تلخی‌زا می‌باشد [1].

برای افزایش کیفیت و کاهش زمان خشک کردن، روش‌های جدیدتر مانند خشک کردن با جریان هوای گرم و خشک

مدل مدلی را به‌عنوان بهترین مدل جهت پیش‌بینی رطوبت پیشنهاد کردند.

در این تحقیق برای نخستین بار از روش مدل‌سازی شبکه‌های عصبی GMDH برای تخمین محتوای رطوبتی برش‌های لیموترش حین خشک شدن در خشک‌کن مادون قرمز استفاده می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از این مدل با نتایج مدل‌سازی ریاضی مقایسه می‌شود تا کارایی آن مشخص گردد. همچنین مقادیر ضریب نفوذ رطوبت و انرژی فعال‌سازی نیز برای برش‌های لیموترش تعیین شد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- آماده سازی نمونه‌ها

لیموترش مورد نیاز برای انجام آزمایشات از واریته لیموی پرشین رودان بوده و از بازار محلی شهر مشهد تهیه شد. لیموها از لحاظ اندازه و شکل به‌طور تقریب یکسان انتخاب شدند، به‌طوری که متوسط وزن آن‌ها 21/48 گرم و قطر هندسی‌شان 34/07 میلی‌متر بود. نمونه‌ها پس از شستشو با آب خشک شده و سپس به‌وسیله یک تیغ اسلایسر، برش‌هایی دقیق و یکنواخت به ضخامت‌های حدود 5 و 10 میلی‌متر از آن‌ها تهیه شد.

### 2-2- اندازه‌گیری میزان رطوبت

حدود 5 گرم لیموترش اسلایس شده در یک پلیت شیشه‌ای (که ظرف قبلاً خشک و وزن شده بود) قرار داده شد. سپس ظرف در یک آون (Galenkamp, CHF097, UK) در دمای 102 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و فرایند خشک شدن تا زمانی که نمونه‌ها به وزن ثابت برسند ادامه یافت. سپس نمونه‌ها از آون خارج و در دسیکاتور قرار داده شدند و پس از توزین از طریق معادله (1)، مقدار رطوبت آن‌ها محاسبه گردید [17]:

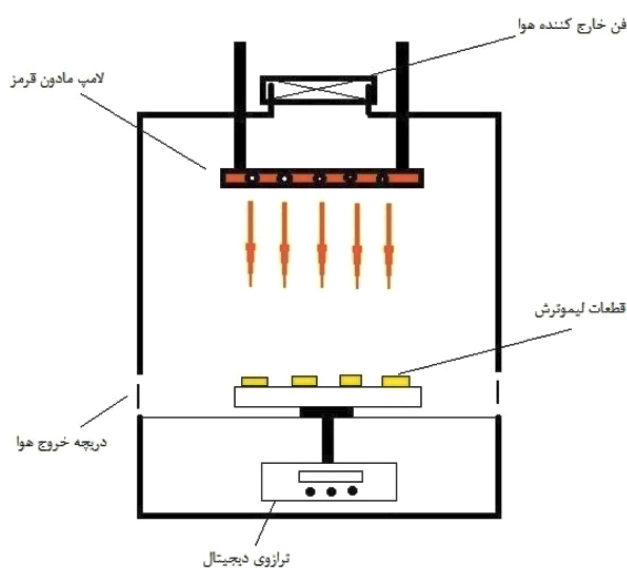
$$W.b.\% = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (1)$$

W.b. % = درصد رطوبت نمونه‌ها بر حسب وزن مرطوب

A: وزن اولیه نمونه

B: وزن نمونه پس از خشک شدن و رسیدن به وزن ثابت

در سال‌های اخیر روش‌های بر پایه شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی محتوای رطوبتی بسیاری از محصولات غذایی و کشاورزی در طول فرایند خشک شدن مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به محصولات نخود سبز [9]، گوجه فرنگی [10]، ذرت [11] و دانه‌های انار [12] اشاره کرد. شبکه‌های عصبی به‌عنوان سیستم‌های غیرخطی به‌شمار می‌آیند که بزرگ‌ترین مشکل آن‌ها این است که وابستگی‌های شناسایی شده پشت ساختار شبکه پنهان می‌ماند [13]. بر عکس شبکه عصبی معمولی، شبکه عصبی GMDH مدلی را که در بین داده‌های تجربی نهفته است را تولید می‌کند. الگوریتم GMDH ورودی‌ها را از طریق شبکه‌های چند جمله‌ای با درجات بالا که اغلب شبکه‌های پیش‌خور و چند لایه هستند، به خروجی‌ها متصل می‌سازد. در این رویکرد، گره‌ها واحدهای مخفی هستند و ضرایب فعال چند جمله‌ای وزن‌هایی هستند که به‌وسیله حداقل مجذور رگرسیون خطی تخمین زده می‌شوند [14]. در سال‌های اخیر استفاده از چنین سیستم‌های خود سازمان یافته‌ای سبب شده است که شبکه‌های عصبی GMDH کاربردهای موفقی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی داشته باشد [15-16]. یوسفی و قاسمیان [17] به بررسی امکان کاربرد روش مدل‌سازی شبکه‌های عصبی GMDH در تخمین محتوای رطوبتی پایای پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش مدل‌سازی دارای کارایی بسیار بالایی در تخمین محتوای رطوبتی بود ( $R^2 = 0/9960$  و  $RMSE = 0/0220$ ). تاکنون تحقیقات محدودی در مورد بررسی سینتیک خشک شدن لیموترش صورت گرفته است. درویشی و همکاران [18] به بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های لیموترش در یک خشک‌کن ترکیبی مایکروویو- هوای داغ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت در بازه  $1/87 \times 10^{-8}$  تا  $3/95 \times 10^{-8} \text{ s/m}^2$  قرار داشت و مقدار انرژی فعال‌سازی 10/91 W/g تعیین شد. ترکی هرچگانی و همکاران [19] به بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های لیموترش در دماهای 50، 60 و 75 درجه سانتی‌گراد در یک آون تهویه‌دار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دمای خشک کردن اثر معنی‌داری بر زمان و سرعت خشک کردن داشت. از بین مدل‌های استفاده شده، آن‌ها



شکل (۱) طرح شماتیک دستگاه خشک‌کن مادون قرمز آزمایشگاهی

بر این اساس میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها حدود  $84/06 \pm 0/2$  درصد تعیین شد. فرایند خشک‌شدن تا رطوبت حدود  $10 \pm 0/1$  درصد انجام گرفت.

نسبت به رطوبت اولیه نشان می‌دهد و از معادله (2) به دست آمد:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \quad (2)$$

که در این معادله  $M$  میزان رطوبت در هر لحظه از زمان خشک‌کردن،  $M_0$  میزان رطوبت اولیه و  $M_e$  میزان رطوبت تعادلی است. لازم به ذکر است که به دلیل کوچک بودن رطوبت تعادلی می‌توان از آن صرفه نظر کرد و معادله را به صورت  $M/M_0$  نوشت [17]. به منظور مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌شدن برش‌های لیموترش در خشک‌کن مادون قرمز از 7 مدل ریاضی رایج برای محصولات با لایه نازک استفاده شد (جدول 1). لازم به ذکر است که برای انجام مدل‌سازی ریاضی از جعبه ابزار curve fitting نرم افزار برنامه نویسی Matlab (نسخه 2013) استفاده گردید.

#### 2-4-2- مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی GMDH

شبکه عصبی GMDH حاوی مجموعه‌ای از نرون‌ها است که از پیوند جفت‌های مختلف از طریق یک چند جمله‌ای درجه دوم به وجود می‌آیند. شبکه با ترکیب چند جمله‌ای‌های درجه دوم حاصل از تمامی نرون‌ها تابع تقریبی  $f$  را با خروجی  $Y_i$  برای

#### 2-3- خشک‌کن مادون قرمز

خشک‌کن مادون قرمز آزمایشگاهی (شکل 1) دارای یک لامپ مادون قرمز گازی با المان فلزی و توان 1300 وات بود. محل لامپ بالای نمونه‌ها و در فاصله 20 سانتی‌متری از آن‌ها قرار داشت. جهت جابه‌جایی هوا و خروج رطوبت از محفظه خشک‌کن، از یک فن مکشی استفاده شد و دو دریچه در بالای فن مکنده ایجاد گردید. در این خشک‌کن شدت تابش لامپ قابل کنترل بوده و بر مبنای تنظیم شدت تابش به روش آزمون و خطا، فرایند خشک‌کردن در چهار دمای 100، 125، 150 و 175 درجه سانتی‌گراد انجام شد. کنترل دما با استفاده از ترموکوبل نوع T (Model MT-29/1, PHYSITEMP, USA) انجام گردید. تغییرات رطوبت برش‌های لیموترش به وسیله توزین آن‌ها در زمان‌های مختلف خشک‌کردن با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت  $\pm 0/01$  تعیین شد.

#### 2-4-2- مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لیموترش

##### 1-4-2- مدل‌سازی ریاضی

برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن مادون قرمز برش‌های

مقادیر محاسبه شده  $Y$  و برای هر جفت متغیر ورودی  $x_j$  و  $x_i$  کمینه شود. مجموعه ای از چند جمله ای ها با استفاده از معادله (6) ساخته می شوند، که ضرایب مجهول همه آن ها، با استفاده از روش حداقل مربعات (LS) از حل ماتریس معادله (7) به دست می آیند:

$$Aa=Y \quad (7) \quad Y_i = f(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{im}) \quad i = (1, 2, 3, \dots, M) \quad (3)$$

در اینجا  $a$  بردار مجهول پارامترها از نوع تابع چندگانه درجه دوم است که به صورت مجموعه نشان داده شده در معادله (8) بیان می گردد:

$$a = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \quad (8) \quad \omega = \sum_{i=1}^M [Y(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}) - y_i]^2 \quad (4)$$

$$y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_M\}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_{1p} & X_{1q} & X_{1p} X_{1q} & X_{1p}^2 & X_{1q}^2 \\ 1 & X_{2p} & X_{2q} & X_{2p} X_{2q} & X_{2p}^2 & X_{2q}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{Mp} & X_{Mq} & X_{Mp} X_{Mq} & X_{Mp}^2 & X_{Mq}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ساختار شبکه های عصبی GMDH را می توان از کمینه سازی یک تابع هدف به دست آورد. تابع هدف بر اساس میانگین مربعات خطا بین مقادیر حقیقی و پیش بینی شده کمینه می گردد، به عبارتی دیگر:

شکل عمومی اتصال بین متغیرهای ورودی و خروجی را می توان با استفاده از تابع چند جمله ای به شکل معادله (5) بیان کرد:

$$Y = a + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (5)$$

در رابطه (9)،  $y$  بردار داده های حقیقی است. بنابراین بردار پارامترهای مجهول به صورت رابطه (11) می باشد:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (11)$$

که چند جمله ای ایواخنکو نامیده می شود. در بسیاری از موارد کاربردی از شکل درجه دوم و دو متغیره این چند جمله ای به صورت معادله (6) استفاده می شود:

$$Y = G(X_i, X_j) = a + a_1 X_i + a_2 X_j + a_3 X_{ij} + a_4 X_i^2 + a_5 X_j^2 \quad (6)$$

بنابراین ضرایب مجهولات رابطه (6) طبق رابطه (11) محاسبه می شود [20].

در معادله بالا  $a_i$  ضرایب مجهول با تکنیک های رگرسیونی به دست می آیند، به طوری که اختلاف بین خروجی واقعی  $y$  و

**جدول (1)** مدل های ریاضی مورد استفاده جهت مدل سازی فرایند خشک شدن مادون قرمز برش های لیموترش

معادله مدل	نام مدل
$MR = \exp(-kt)$	نیوتن
$MR = \exp(-kt^n)$	پیچ
$MR = \exp(-kt)^n$	پیچ اصلاح شده
$MR = a \exp(-kt)$	هندرسون و پابیس
$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	دوجمله ای
$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	میدیلی

## 3-4-2- تعیین کارایی مدل‌ها

$\pi$  معادله (14) می‌باشد [21]:

$$MR = \frac{\lambda}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (14)$$

که در این رابطه MR نسبت رطوبت،  $D_{eff}$  ضریب انتشار موثر  $m^2/s$ ، نصف ضخامت ورقه‌ها  $m$  و  $n$  عدد صحیح مثبت می‌باشد که برای زمان‌های طولانی خشک کردن  $n$  برابر 1 است. لذا رابطه فوق به صورت رابطه (15) ساده می‌شود:

$$MR = \frac{\lambda}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (15)$$

در این پژوهش برای برش‌های لیموترش فرض شده است، انتقال حرارت فقط در یک سطح صورت می‌گیرد. تغییر در ساختار منافذ مواد غذایی ضریب نفوذ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در فراورده‌های متخلخل‌تر، ضریب نفوذ به دلیل امکان تحرک بیش‌تر رطوبت، بالاتر است. دما مهم‌ترین عامل خارجی موثر بر ضریب نفوذ طی فرایند خشک کردن می‌باشد. وابستگی ضریب نفوذ با دما با استفاده از معادله‌ی آرنیوس نشان داده می‌شود. انرژی فعال سازی از طریق رسم منحنی ضریب نفوذ موثر رطوبت نسبت به عکس دمای مطلق تعیین شده، با استفاده از رابطه (16) مشخص می‌شود [22]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273/15)}\right) \quad (16)$$

که در این رابطه  $E_a$  انرژی فعال سازی  $R$  ثابت جهانی گاز  $T$  دمای مطلق و  $D_0$  نفوذ موثر در غلظت بالای مایع می‌باشد.

## 5-2- آنالیز داده‌ها

آزمون‌ها در سه تکرار انجام شدند و میانگین و انحراف معیار داده‌ها تعیین گردید. آنالیز واریانس داده‌ها با استفاده از نرم افزار آنالیز آماری SPSS (نسخه 21) و مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون دانکن و در سطح اطمینان 95 درصد انجام شد. اثر متغیرهای دمای خشک کردن، 100، 125، 150 و 175 درجه سانتی‌گراد و ضخامت برش‌ها، 5 و 10 میلی‌متر

برای انتخاب مدل مناسب توصیف کننده سینتیک خشک کردن، از پارامترهای آماری ضریب تبیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید. در نهایت مدل خشک کردن دارای حداکثر  $R^2$  و حداقل RMSE به‌عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن انتخاب شد. معادله پارامترهای آماری ذکر شده به‌صورت روابط (12) و (13) تعریف می‌شوند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

در این معادلات  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبتی آزمایشگاهی در هر لحظه از زمان،  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده در هر لحظه از زمان، میانگین نسبت رطوبتی آزمایشگاهی، میانگین نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده و  $N$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

## 5-2- محاسبه ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

انتقال جرم طی خشک کردن مواد غذایی فرایندی پیچیده و شامل مکانیسم‌های مختلفی مانند نفوذ مولکولی، حرکت در لوله‌های مویین، نفوذ مایع در خلل و فرج ماده جامد، نفوذ بخار در منافذ حاوی هوا و جریان هیدرودینامیکی و یا انتشار سطحی می‌باشد. نفوذ رطوبت از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده فرایند خشک کردن می‌باشد. هنگامی که مکانیسم‌های مختلفی در انتقال موثر می‌باشند، بررسی هر مکانیسم و اندازه‌گیری میزان انتقال جرم در هر یک دشوار می‌باشد. از این رو در چنین فرایندهایی از توصیف نفوذ موثر و برای بیان مفهوم آن از قانون فیک استفاده می‌شود. محاسبه ضریب نفوذ موثر با استفاده از قانون دوم فیک ابزاری جهت توصیف فرایند خشک کردن و مکانیسم‌های ممکن درانتقال رطوبت درون مواد غذایی می‌باشد. حل تحلیلی معادله فیک به‌صورت

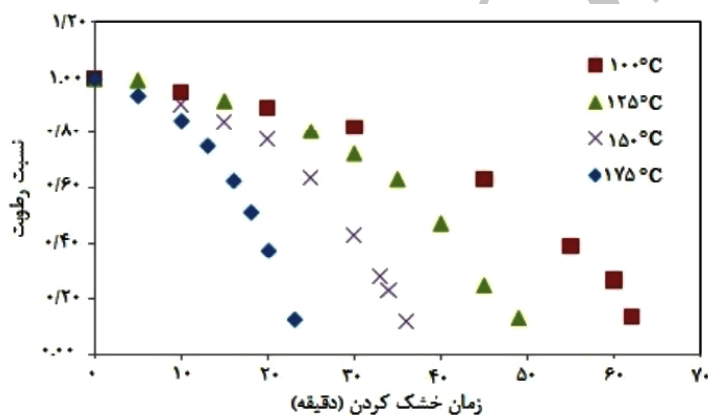
بر روی میزان رطوبت نیز مورد آنالیز قرار گرفت.

### 3- نتایج و بحث

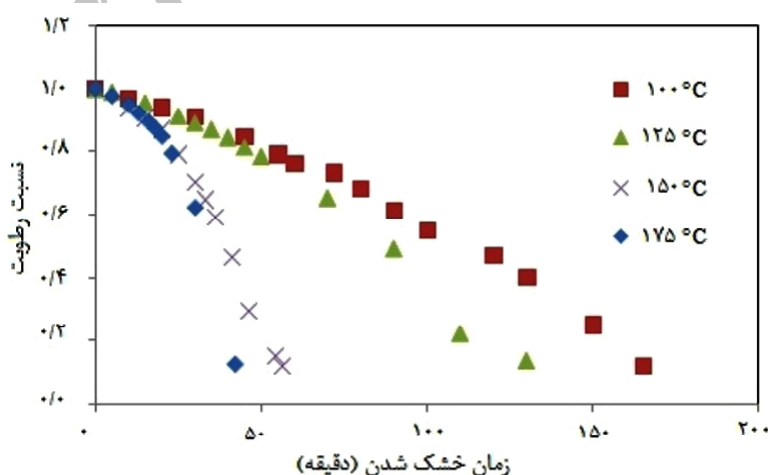
#### 3-1- بررسی منحنی خشک شدن

(شکل 2). از سویی دیگر، در ضخامت 10 میلی‌متر این کاهش زمان بیان شده به ترتیب برابر با 35، 79 و 93 دقیقه تعیین شد (شکل 3). نتایج آنالیز آماری نشان داد که در هر ضخامت از برش‌ها، مقدار رطوبت به دست آمده در چهار دما با هم اختلاف معنی‌دار آماری داشتند ( $p < 0/05$ ). همچنین اثر ضخامت بر میزان رطوبت به دست آمده در هر دما نیز معنی‌دار بود ( $p < 0/05$ ). نتایج هم‌چنین نشان داد که در هر ضخامت، زمان رسیدن به رطوبت نهایی ( $10 \pm 0/1$  درصد بر پایه مرطوب) در دماهای مختلف با هم تفاوت معنی‌دار آماری داشتند ( $p < 0/05$ ). همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سرعت خشک کردن در این روش نسبت به روش‌های خشک کردن با هوای داغ بسیار بالاست که این امر اهمیت کاربرد اشعه مادون قرمز جهت خشک کردن را نشان می‌دهد. این سرعت بالای

شکل‌های 2 و 3 داده‌های نسبت رطوبت به دست آمده برای برش‌های لیموترش را در چهار دمای مورد آزمایش و به ترتیب برای ضخامت‌های 5 و 10 میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک زمان خشک شدن ثابت، با افزایش دمای خشک کردن زمان رسیدن به رطوبت نهایی (حدود 10 درصد) کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای نمونه‌های با ضخامت 5 میلی‌متر افزایش دما از 100 درجه سانتی‌گراد به 125، 150 و 175 درجه سانتی‌گراد سبب کاهش زمان خشک شدن به میزان به ترتیب 13، 22 و 39 دقیقه گردید



شکل (2) منحنی خشک شدن برش‌های لیموترش به روش تابش مادون قرمز در دماهای مختلف (ضخامت 5 میلی‌متر)



شکل (3) منحنی خشک شدن برش‌های لیموترش به روش تابش مادون قرمز در دماهای مختلف (ضخامت 10 میلی‌متر)

هیبریدی برای تخمین میزان محتوای رطوبتی برش‌های لیموترش استفاده شد. برای این منظور از 84 داده آزمایشگاهی به‌دست آمده به‌صورت تصادفی، 90 درصد این داده‌ها برای آموزش و 10 درصد برای تست شبکه استفاده گردید. بعد از بهینه‌سازی شبکه، ساختار پیشنهادی به‌صورت یک لایه ورودی و 2 لایه مخفی و یک لایه خروجی ارائه شد. تعداد نرون بهینه‌سازی شده برای لایه مخفی اول 6 نرون و برای لایه مخفی دوم 3 نرون تعیین شد. مدل بهینه‌سازی شده برای تخمین میزان نسبت رطوبت در جدول (3) گزارش گردید.

این مدل رابطه بین ورودی‌ها و خروجی سیستم را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دما، ضخامت و زمان خشک شدن به‌عنوان ورودی و میزان نسبت رطوبت به‌عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شد. عملکرد آموزش و تست شبکه به‌وسیله قدرمطلق انحراف میانگین (AAD%) بر اساس رابطه (17) ارزیابی گردید:

$$\%AAD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i^{\text{model}} - Y_i^{\text{actual}}}{Y_i^{\text{actual}}} \right| \quad (17)$$

که بالانویس actual و model به‌ترتیب به میزان نسبت رطوبت آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده اشاره دارد. تعدادی از نتایج (خروجی) واقعی و پیش‌بینی شده به همراه قدرمطلق انحراف میانگین متناظر با آن‌ها در جدول (4) نشان داده شده است. این جدول بیانگر اختلاف بین نتایج واقعی (آزمایشگاهی) و نتایج حاصل از مدل‌سازی می‌باشد که نزدیکی و دقت بسیار بالای مدل پیشنهادی توسط روش شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی را برای تخمین میزان نسبت رطوبت نشان می‌دهد.

شکل‌های 4 و 5 به‌ترتیب داده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده را که به‌ترتیب برای آموزش دادن و تست کردن شبکه عصبی GMDH هیبریدی به‌کار رفته بود را نشان می‌دهد. شکل (4) بیانگر عملکرد مناسب مدل پیشنهادی برای داده‌های آموزش و تست است. جهت سنجش عملکرد مدل باید نتایج آن را با داده‌های تست که قبلاً استفاده نشده بررسی کرد که این بررسی در شکل (5) نشان داده شده است. از شکل (5) می‌توان دریافت که مدل پیشنهادی دقت بسیار بالایی برای پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی دارد به‌طوری‌که مقدار ضریب

خشک شدن توسط اشعه مادون قرمز برای سایر محصولات مانند شلتوک [23]، دانه بلارد [24] و میوه به [3] نیز گزارش شده است.

### 2-3- مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌شدن

مقادیر ثابت‌های حاصل از برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ریاضی ذکر شده در جدول (1) و نتایج محاسبات آماری مربوط به دماهای مختلف در جدول (2) نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای آماری مربوط به مدل‌های استفاده شده در این تحقیق، مشاهده شد که از بین مدل‌های ریاضی، مدل پیچ در تمامی دماهای خشک‌کردن با مادون قرمز کارایی بالاتری داشت. مقادیر پارامترهای آماری  $R^2$  و RMSE به‌دست آمده برای این مدل در بازه دمایی 100-175 درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب 0/9793-0/9950 و 0/0119-0/0371 بود. این نتایج نشان می‌دهد که از مدل پیچ می‌توان به‌صورت کارآمدی در تخمین محتوای رطوبتی برش‌های لیموترش چین خشک شدن در خشک‌کن مادون قرمز استفاده کرد.

تورات و همکاران [25] مدل‌سازی ریاضی و تجربی لایه نازک خشک‌کردن زنجبیل را انجام دادند. آزمایش‌ها در یک خشک‌کن تحت خلاء و در 4 دمای متفاوت 40، 50، 60 و 65 درجه سانتی‌گراد انجام شد. نتایج نشان داد که مدل دوجمله‌ای برازش بهتری نسبت به 5 مدل دیگر انتخاب شده با داده‌های آزمایشگاهی دارد. کینگزلی و سینگ [26] داده‌های حاصل از خشک‌کردن لایه نازک انار را در دماهای 50، 55 و 60 درجه سانتی‌گراد، با مدل‌های ریاضی مختلف مدل‌سازی کردند، که در این تحقیق مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل ارائه شد. شرما و همکاران [27]، در تحقیقی ورقه‌های نازک پیاز را در یک خشک‌کن لایه نازک که انرژی گرمایی آن توسط اشعه مادون قرمز تأمین می‌شد، خشک کردند. داده‌های حاصل از آزمایش با 8 مدل ریاضی مدل‌سازی گردید. پس از تجزیه تحلیل داده‌های به‌دست آمده، مدل پیچ به‌عنوان بهترین مدل برای خشک کردن ورقه‌های نازک پیاز پیشنهاد شد.

### 3-3- مدل‌سازی شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی سینتیک خشک‌شدن

در این تحقیق هم‌چنین از شبکه‌های عصبی GMDH



جدول (2) نتایج برازش داده های آزمایشگاهی خشک شدن مادون قرمز برش های لیموترش با مدل های ریاضی مختلف

نام مدل	دما (°C)	R <sup>2</sup>	RMSE
Newton	100	0/9148	0/0610
	125	0/7703	0/1358
	150	0/7900	0/1310
	175	0/8817	0/0629
Page	100	0/9945	0/0146
	125	0/9793	0/0371
	150	0/9850	0/0328
	175	0/9950	0/0119
Modified Page	100	0/9148	0/0610
	125	0/7703	0/1359
	150	0/7900	0/1310
	175	0/8817	0/0629
Henderson and Pabis	100	0/9088	0/7451
	125	0/7548	0/1255
	150	0/7712	0/1197
	175	0/8737	0/0557
Two-term	100	0/9088	0/0503
	125	0/7601	0/1245
	150	0/9207	0/0707
	175	0/9289	0/0418
Logarithmic	100	0/9437	0/0413
	125	0/8378	0/1016
	150	0/8639	0/0916
	175	0/9365	0/0566
Midilli et al.	100	0/9746	0/0286
	125	0/8307	0/1078
	150	0/8196	0/1094
	175	0/9696	0/0273

تعیین  $R^2 = 0/9909$  شد.

محتوی رطوبتی پاپایا را در طی خشک شدن در خشک کن کابینتی، با استفاده از مدل شبکه عصبی تخمین زدند. به طور کلی در این تحقیق مقایسه ای دریافتند که محتوی رطوبتی میوه پاپایا توسط شبکه های عصبی MLP با توپولوژی 3-9-1 نسبت به مدل های ریاضی بهتر می تواند مدل شود. نتایج یوسفی

تعدادی دیگر از پارامترهای آماری را می توان در جدول (5) مشاهده کرد، که همگی آن ها دقت و کیفیت بالای مدل پیشنهادی توسط روش شبکه عصبی GMDH هیبریدی بهینه را مشخص می کند. یوسفی و همکاران [28]، طی تحقیقی

**جدول (3)** مدل خروجی پیشنهادی توسط روش شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی جهت تخمین نسبت رطوبت (MR)

$$N_1 = 1.15 - \text{Time (min)} * 0.0054 - \text{Time (min)} * \text{Temperature (}^\circ\text{C)} * 0.00017 + \text{Time (min)} * \text{thickness (mm)} * 0.0182 + \text{Temperature (}^\circ\text{C)} * \text{thickness (mm)} * 0.0035 - (\text{Temperature (}^\circ\text{C)})^2 * 1.14e-05 - (\text{thickness (mm)})^2 * 0.35$$

$$N_2 = -1.311 + \text{Time (min)} * 0.0173 - \text{Time (min)} * N_1 * 0.020 - (\text{Time (min)})^2 * 5.45e-05 - \text{Temperature (}^\circ\text{C)} * N_1 * 0.00051 + N_1 * 4.425 - N_1^2 * 2.04$$

$$N_3 = -1.40 + \text{Time (min)} * 0.020 - \text{Time (min)} * N_1 * 0.021 - (\text{Time (min)})^2 * 6.69e-05 - \text{thickness (mm)} * 0.115 + N_1 * 4.58 - N_1^2 * 2.09$$

$$N_4 = 0.045 + \text{thickness (mm)} * N_3 * 9.61 - \text{thickness (mm)} * N_2 * 9.66 - N_3 * 6.42 + N_2 * 7.32 + N_2^2 * 0.162$$

$$N_5 = 0.226 + \text{Temperature (}^\circ\text{C)} * N_3 * 0.026 - \text{Temperature (}^\circ\text{C)} * N_2 * 0.025 + N_3 * N_2 * 131.43 - N_3^2 * 67.16 - N_2^2 * 63.54$$

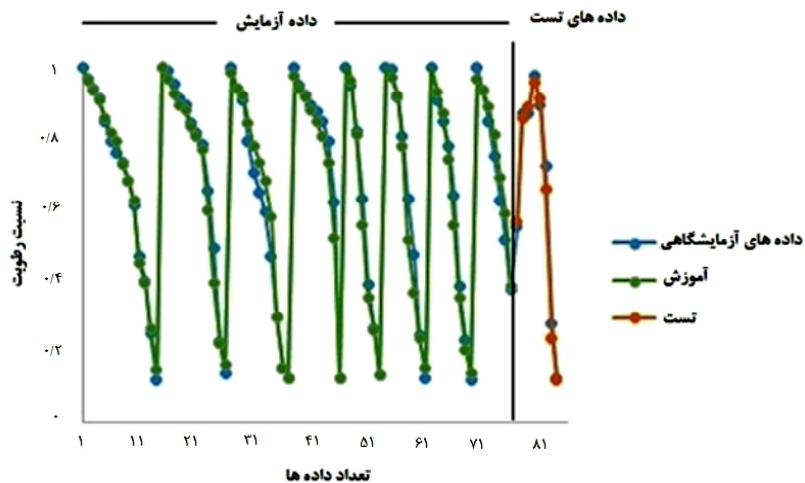
$$\text{Moisture ratio} = -0.337 - N_1 * N_3 * 5.73 - N_1 * N_4 * 5.83 + N_1^2 * 5.94 + N_5 * 2.102 + N_5 * N_4 * 3.56 + N_4^2 * 1.25$$

**جدول (4)** تعدادی از نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده به همراه قدرمطلق انحراف میانگین

Actual	Predicted (GMDH)	AAD%(GMDH)
1/000	1/000	0
0/970	0/962	0/739
0/939	0/933	0/579
0/911	0/907	0/455
0/847	0/857	1/176
0/790	0/814	3/114
0/761	0/790	3/861
0/733	0/727	0/844
0/682	0/681	0/066
0/612	0/623	1/885
0/470	0/451	3/852
0/400	0/393	1/578
0/250	0/264	5/915
0/120	0/149	24/44
1/000	0/999	0/091
0/990	0/968	2/173
0/955	0/928	2/871
0/913	0/896	1/882
0/893	0/878	1/649
0/845	0/832	1/466
0/815	0/803	1/398
0/785	0/770	1/889
0/655	0/596	8/908
0/492	0/392	20/32
0/225	0/223	0/726

ادامه جدول (4) تعدادی از نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده به همراه قدرمطلق انحراف میانگین

Actual	Predicted (GMDH)	AAD%(GMDH)
0/138	0/163	17/55
1/000	0/987	1/255
0/938	0/940	0/179
0/908	0/920	1/310
0/792	0/843	6/492
0/705	0/779	10/53
0/649	0/732	12/80
0/592	0/678	14/49
0/466	0/578	23/96
0/297	0/297	0/000
0/155	0/155	0/000
0/124	0/125	0/000
1/000	0/977	2/286
0/949	0/941	0/888
0/923	0/917	0/605
Total		4/605



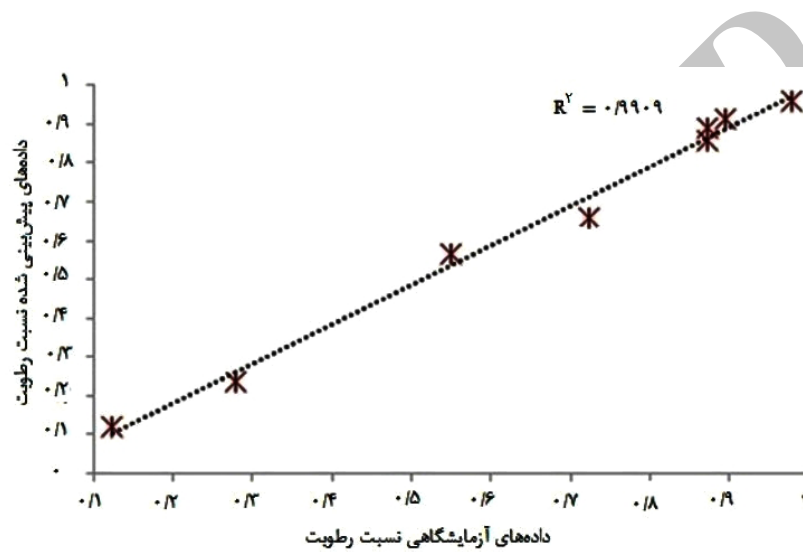
شکل (4) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل برای داده‌های آموزش و تست

و قاسمیان [3] در مورد بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های پاپایا حین خشک شدن با هوای داغ در یک خشک‌کن کابینتی نشان داد که مدل شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی دارای کارایی بالایی در پیش بینی محتوای رطوبتی می‌باشند ( $R^2 = 0/9909$ ).

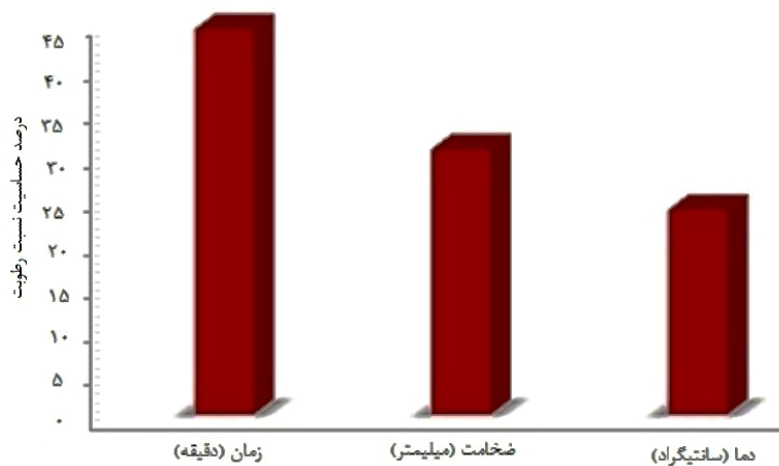
شکل (6) حساسیت نسبت رطوبت (MR) را به متغیرهای ورودی نشان می‌دهد. از شکل (4) می‌توان دریافت که نسبت رطوبت به زمان خشک شدن نسبت به دیگر متغیرهای ورودی حساس‌تر است، به طوری که درصد حساسیت به زمان برابر 45٪ تعیین شد و در نتیجه می‌توان گفت که زمان خشک شدن

جدول (5) پارامترهای آماری به‌دست آمده برای شبکه عصبی GMDH هیبریدی بهینه

Statistics		Training	Testing
Absolute Fraction of variance ( $R^2$ )	$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{model} - Y_i^{actual})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^{actual})^2} \right]$	0/9900	0/9909
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{model} - Y_i^{actual})^2}{N} \right]^{1/2}$	0/1916	0/5776
Mean Square Error (MSE)	$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{model} - Y_i^{actual})^2}{N}$	0/242	0/877
Mean Absolute Deviation (MAD)	$MAD = \frac{\sum_{i=1}^N  Y_i^{model} - Y_i^{actual} }{N}$	0/098	0/2463



شکل (5) عملکرد شبکه عصبی GMDH برای پیش‌بینی داده‌های استفاده نشده در آموزش شبکه



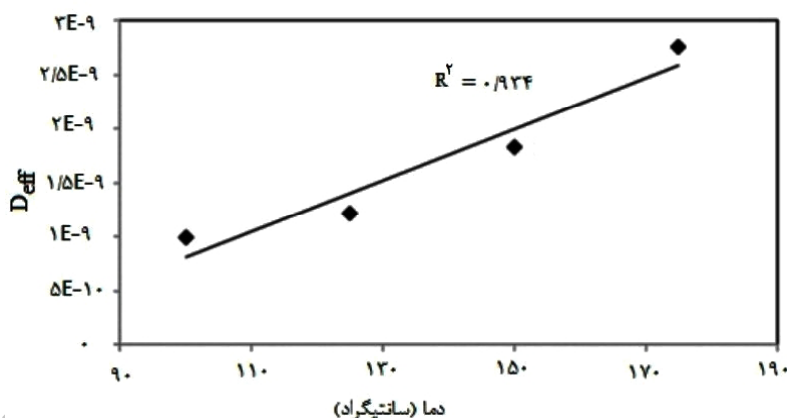
شکل (6) آنالیز حساسیت میزان نسبت رطوبت (MR) به متغیرهای ورودی

مهم‌ترین اثر را در کاهش میزان نسبت رطوبت در طی فرایند خشک‌شدن برش‌های لیموترش در خشک‌کن مادون قرمز دارد. برای برش‌های لیموترش نیز در این دامنه تغییرات قرار دارد. نتایج مشابهی در مورد اثر دما توسط کلیم الله و کایلاپان [30] و دویماز [31] گزارش شده است.

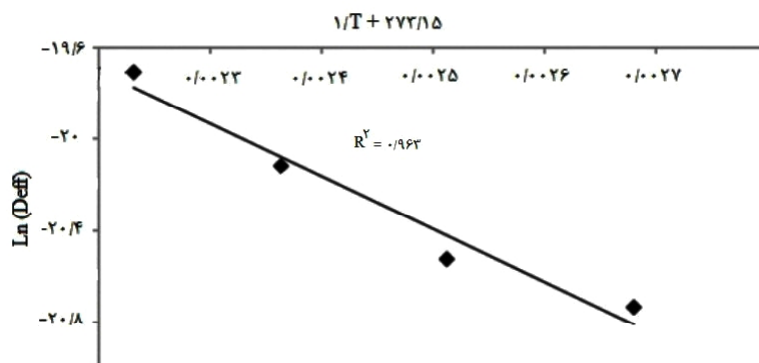
### 3-4- محاسبه ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

تاثیر دما روی ضریب نفوذ رطوبت توسط معادله آرنیوس بیان شد. در این‌جا نیز از رسم رگرسیون خطی  $\ln(D_{eff})$  برحسب معکوس دمای مطلق ( $1/T$ ) می‌توان به سادگی ثابت آرنیوس ( $D_0$ ) و نیز انرژی فعال سازی ( $E_a$ ) را تعیین کرد (شکل 8). بر اساس این معادله انرژی فعال‌سازی برای برش‌های لیموترش  $87/61 \text{ kJ/mol}$  به‌دست آمد. این مقدار به‌دست آمده بیش‌تر از مقدار انرژی فعال‌سازی برای فلفل سبز ( $51/4 \text{ kJ/mol}$ ) تعیین شده توسط کایماک-ارتکین [32] و حدود انرژی فعال‌سازی نعنای خشک شده ( $82/93 \text{ kJ/mol}$ ) تعیین شده توسط پارک و همکاران [33] بود.

تغییرات ضریب نفوذ موثر رطوبت در دماهای مختلف در شکل (7) نشان داده شده است. با افزایش دما در فرایند خشک شدن مادون قرمز، ضریب نفوذ موثر رطوبت یک روند افزایشی دارد، که آن را از طریق حرکت یا انتقال جرم از منافذ متخلخل می‌توان توصیف کرد. در محدوده دمایی 100 تا 175 درجه سانتی‌گراد ضریب نفوذ رطوبت از  $9/90 \times 10^{-10}$  تا  $2/76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  جنبش ملکولی و مکش سطحی بیش‌تر و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ می‌باشد. مادامبا و همکاران [29] بیان کردند که میزان  $D_{eff}$  برای نمونه‌های مواد غذایی بین  $10^{-11}$  تا  $10^{-9}$  می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار به‌دست آمده



شکل (7) تاثیر دما بر ضریب نفوذ رطوبت لیموترش خشک شده با مادون قرمز در دماهای مختلف



شکل (8) الگوی آرنیوس؛ رابطه بین ضریب نفوذ موثر و دماهای مختلف خشک کردن مادون قرمز

## 4- نتیجه‌گیری

با سه ورودی زمان، دما و ضخامت خشک‌شدن دارای برآزش بالایی با داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده برای برش‌های لیموترش حین خشک‌شدن بود ( $R^2 = 0/9909$ ). از آنجایی که میزان رطوبت بیش‌ترین حساسیت (45 درصد) را به زمان خشک‌کردن داشت می‌توان نتیجه گرفت که کنترل زمان نقش تعیین‌کننده‌تری در تعیین رطوبت مناسب برای خشک کردن برش‌های لیموترش دارد.

در این پژوهش برش‌های لیموترش با ضخامت 5 و 10 میلی‌متر به روش تابش مادون قرمز در چهار دمای 100، 125، 150 و 175 درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سینتیک خشک کردن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی سینتیک خشک کردن نشان داد که مدل چند جمله‌ای به‌دست آمده از روش شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی

## منابع

- [1] مظاهری، م.، سالاری، ا.، ریاضی، ع.، حیدری، ا. و قاسمی م. 1385. تلخی زدایی و تولید مارمالاد و نوشیدنی از ضایعات حاصل از فرآیند تولید آبلیمو. *مجله پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، 2، 53-60.
- [2] Adam, K.L. (2004). *Food Dehydration Options*. US: National Sustainable Agriculture Information Service. Available online: [www.attra.ncat.org](http://www.attra.ncat.org).
- [3] Ziafroughi, A., Yousefi, A.R., Razavi, S.M.A. (2016). A Comparative Modeling Study of Quince Infrared Drying and Evaluation of Quality Parameters. *Int. J. Food Eng.*, 12, 901-910.
- [4] Nowak, D., Lewicki, P.P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 5, 353-360.
- [5] Doymaz, I. (2012). Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Sci. Biotechnol.*, 21, 1269-1275.
- [6] Pokham, K., Meeso, N., Soponronarit, S., Siriamornpun, S. (2012). Modeling of combined far-infrared radiation and drying of a ring shap-pineapple with/without shrinkage. *Food Bioprod. process*, 90, 155-164.
- [7] Niamnuy, M., Poomsa-ad N, Devahastin S. (2012). Kinetic modeling infrared drying conversion/degradation of isoflavones during infrared drying of soybean. *Food Chem.*, 133, 946-952.
- [8] Bi, J., Chen, Q., Zhou, Y., Liu, X., Wu, X., Chen, R. (2014). Optimization of short-and medium-wave infrared drying and quality evaluation of jujube powder. *Food Bioprocess Tech.*, 7, 2375-2387.
- [9] Kamiński, W., Tomczak, E., Strumill, P. (1998). Neurocomputing approaches to modelling of drying process dynamics. *Drying Technol.*, 16, 967-992.
- [10] Movagharnjad, K., Nikzad, M. (2007). Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Comput Electron Agric.*, 59, 78-85.
- [11] Momenzadeh, L., Zomorodian, A., Mowla, D. (2011). Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network. *Food Bioprod. process*, 89, 15-21.
- [12] Nikbakht, A.M., Motevali, A., Minaei, S. (2014). Energy and exergy investigation of microwave assisted thin-layer drying of pomegranate arils using artificial neural networks and response surface methodology. *Saudi Society Agric Sci.*, 13, 81-91.
- [13] Nariman-Zadeh, N., Jamali, A. (2007). Pareto genetic design of GMDH-type neural networks for non-linear systems. In: Proc. of the International Workshop on InductiVe Modelling, Drchal J, Koutnik J, (eds.).

- (1996). Drying models for green peas. *Food Chem.*, 55, 121-128.
- [23] Abe, T., Afzal, T.M. (1997). Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *J. Ac. Eng. Res.*, 67, 289-297.
- [24] Hebbar, H.U., Rastogi, N.K. (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Food Eng.*, 47, 1-5.
- [25] Thorat, I.D., Mohapatra, D., Sutar, R., Kapdi, S., Jagtap, D.D. (2012). Mathematical modeling and experimental study on thin-layer vacuum drying of ginger (*Zingiber Officinale* R.) slices. *Food Bioprocess Technol.*, 5, 1379-1383.
- [26] Kingsly, A., Singh, D. (2007). Drying kinetics of pomegranate arils. *Food Eng.*, 79, 741-744.
- [27] Sharma, G., Verma, R., Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *Food Eng.*, 71, 282-286.
- [28] Yousefi, A.R., Asadi, V., Nassiri, S.M., Niakousari, M., Khodabakhsh Aghdam, S. (2012). Comparison of mathematical and neural network models in the estimation of papaya fruit moisture content. *Philippine J. Agric. Sci.*, 95, 192-198.
- [29] Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Food Eng.*, 29, 75-97.
- [30] Kaleemullah, S., Kailappan, R. (2005). Drying kinetics of red chillies in a rotary dryer. *Biosyst. Eng.*, 92, 15-23.
- [31] Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Food Eng.*, 79, 243-248.
- [32] Kaymak-Ertekin, F. (2002). Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *J. Food Sci.*, 67, 168-175.
- [33] Park, K.J., Vohnikova, Z., Brod, F.P.R. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Food Eng.*, 51, 193-199.
- Czech Technical University: Prague, Czech Republic, pp. 96-103, Citeseer.
- [14] Ghanadzadeh, H., Ganji, M., Fallahi, S. (2012). Mathematical model of liquid-liquid equilibrium for a ternary system using the GMDH-type neural network and genetic algorithm. *Appl. Math. Model.*, 36, 4096-4105.
- [15] Abdolrahimi, S., Nasernejad, B., Pazuki, G. (2014). Prediction of partition coefficients of alkaloids in ionic liquids based aqueous biphasic systems using hybrid group method of data handling (GMDH) neural network. *J. Mol. Liq.*, 191, 79-84.
- [16] Atashrouz, S., Pazuki, G., Kakhki, S.S. (2015). A GMDH-type neural network for prediction of water activity in glycol and Poly (ethylene glycol) solutions. *J. Mol. Liq.*, 202, 95-100.
- [17] Yousefi, A.R., Ghasemian, N. (2016). Prediction of papaya fruit moisture content using hybrid GMDH - neural network modeling during thin layer drying process. *Iranian Food Sci. Technol. Res. J.*, 11, 747-757.
- [18] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H., Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. *Int. Agrophys.*, 28, 1-6.
- [19] Toriki-Harchegani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M., Tohidi, M. (2016). Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. *Heat Mass Transfer*, DOI 10.1007/s00231-015-1546-y.
- [20] Ghasemian, N., Nourmoradi, H. (2016). Experimental Study and Mathematical Modeling of Propane-SCR-NOx Using Group Method of Data Handling and Artificial Neural Network. *Int. J. Chem. React. Eng.*, 14, 559-569.
- [21] Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion (2nd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.
- [22] Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., Rosello, C.