

## پیش بینی سینتیک و بازده انرژی مصرفی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو (*Lippia* *citriodora Kunth*) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

### Predicting the Kinetics and energy efficiency of drying the medicinal plant Lemon verbena (*Lippia citriodora Kunth*) using artificial neural networks

حمید خفاجه<sup>۱\*</sup>، محمد زارعین<sup>۲</sup>، محمد یونسی الموتی<sup>۳</sup>

۱. استادیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، (نگارنده مسئول)
۲. دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، تهران، ایران.
۳. استاد مرکز آموزش عالی امام خمینی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶ - شناسانه برنمود رقمی: 10.22092/mpt.2025.370955.1204

#### چکیده

خفاجه، ح.، زارعین، م.، یونسی الموتی، م.، پیش بینی سینتیک و بازده انرژی مصرفی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو (*Lippia citriodora Kunth*) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

نشریه علمی فناوری و گیاهان دارویی ایران، دوره ۷- شماره ۱- پایاند ۱۲- بهار و تابستان ۱۴۰۳ صفحه: ۱۵۱-۱۳۸

گیاهان دارویی از مهمترین منابع اولیه مورد استفاده در صنعت غذا و دارو میباشند. خشک کردن یکی از قدیمی ترین روش های محافظت گیاهان دارویی می باشد. در این مطالعه تاثیر توان های مختلف مایکروویو (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ توان) و ضخامت های محصول ۳ و ۶ میلی متر بر رفتار خشک شدن، ضریب نفوذ موثر، بهترین مدل ریاضی خشک شدن، مقادیر انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در گیاه دارویی (*Lippia citriodora Kunth*) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کمترین ضریب نفوذ موثر  $1/329 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  در ضخامت ۳ میلی متر و ۲۵٪ توان و بیشترین مقدار آن  $2/486 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  در ضخامت ۶ میلی متر و ۱۰۰٪ توان، میباشد. همچنین در این پژوهش پارامترهای مختلف خشک کردن و توپولوژی های مختلف شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (MLP)، جهت تعیین بهترین شبکه برای گیاه به لیمو با خشک کن مایکروویو بررسی و ارزیابی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که بهترین مدل آموزش با شبکه ۳-۱۵-۳ MLP با ۱۵ نورون در لایه پنهان با بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۵۲) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۱۵۴) حاصل شد.

واژه های کلیدی: به لیمو، گیاهان دارویی، مدل سازی فرآیند خشک کردن، انرژی فعال سازی، پرسپترون چند لایه

(MLP)، *Lippia citriodora Kunth*

آدرس پست الکترونیکی نگارنده مسئول: khafajeh@jahromu.ac.ir

## مقدمه:

(2020). سامانه‌های خشک‌کن مایکروویو، زمان خشک کردن را به‌طور قابل توجهی کاهش داده‌اند بدون این‌که اثر منفی بر کیفیت محصول داشته باشند. در خشک‌کن مایکروویو، گرمای حاصل از تبدیل انرژی مایکروویو به انرژی حرارتی در درون مواد مرطوب بوجود می‌آید و فشار و دمای مطلوب را برای خشک کردن سریع مواد فراهم می‌کند. گرمایش حجمی ناشی از نفوذ مایکروویو و کاهش هزینه‌های فرآیند، مایکروویو را به منبع جذاب انرژی حرارتی تبدیل کرده است. زمان‌های کوتاه‌تر فرآوری، به میزان قابل توجهی هزینه‌های تولید برخی محصولات را کاهش می‌دهد (Bala *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025). یکی از مهم‌ترین مسائل در خشک‌کردن، رسیدن به یک محتوای رطوبت نهایی مطلوب است. خشک‌سازی بیش از حد محصول به‌لیمو، علاوه بر افزایش قابل توجه مصرف انرژی، کیفیت محصول نهایی را نیز کاهش می‌دهد. کنترل دقیق این فرآیند با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله محدودیت‌های تکنولوژیکی در اندازه‌گیری پیوسته و دقیق محتوای رطوبتی و نارسایی مدل‌های فیزیکی (مبتنی بر پارامترهای هوای خشک) در تخمین محتوای رطوبت در فرآیندهای غیرخطی و وابسته به زمان. به همین دلیل، از مدل‌سازی ریاضی به عنوان ابزاری کارآمد برای کنترل بهینه فرآیند خشک‌سازی استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی رفتار خشک شدن گیاه دارویی به‌لیمو، تعیین بهترین مدل ریاضی خشک شدن برای توصیف سینتیک خشک شدن، تاثیر شرایط خشک

گیاهان دارویی از مهمترین منابع اولیه مورد استفاده در صنعت غذا و دارو می‌باشند. به لیمو از واریته *Verbena* است. به لیمو با نام علمی (*Lippia citriodora kunth*) و از خانواده شاه پسندیان و راسته نعناسانان، درختچه‌ای با ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متر و بومی آمریکای جنوبی است. این گیاه دارویی دارای خواص بسیاری از جمله ضد تشنج، آرام بخش و ضد سرماخوردگی، ضد قارچ و ضد سرطان است (Ghasemi *et al.*, 2021; Naghavi & Rigi, 2017). یکی از متداولترین روش‌های نگهداری گیاهان دارویی خشک کردن است که از فساد آنها جلوگیری می‌کند. در گذشته، فرآیند خشک‌سازی مواد غذایی عمدتاً متکی بر انرژی خورشید بود. با این حال، این روش سنتی با چالش‌های متعددی همراه است که کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ از جمله نوسانات نامطلوب در کیفیت محصول، فقدان کنترل دقیق بر پارامترهای فرآیند (مانند دما و رطوبت)، طولانی بودن زمان خشک‌شدن و ملاحظات بهداشتی در محصول نهایی. این محدودیت‌ها ضرورت استفاده از فناوری‌های نوین در خشک‌سازی را آشکار می‌سازد. در مقابل، خشک‌کن‌های صنعتی مزایای چشمگیری نسبت به روش سنتی ارائه می‌دهند؛ این مزایا شامل امکان برداشت به‌موقع محصول، کاهش ضایعات در سطح مزرعه، برنامه‌ریزی دقیق برداشت در شرایط آب‌وهوایی نامساعد، و افزایش چشمگیر مدت زمان نگهداری (انبارداری) مواد غذایی است (Mbegbu *et al.*, 2021; Soodmand-Moghaddam *et al.*,

جدول ۱: مدل های مورد استفاده برای پیش بینی فرآیند خشک شدن

Model name*	Model
Newton	MR=exp(-k*t)
Page	MR=exp(-kt <sup>n</sup> )
Modified Page	MR=exp(-(k*t) <sup>n</sup> )
Logarithmic	MR=a exp(-kt) + b
Henderson and Pabis	MR=a*exp(-k*t)
Midilli et al.	MR=a* exp(-kt <sup>n</sup> )+ bt
Wang and Singh	MR =1 + bt + at <sup>2</sup>

سه معیار برای تعیین بهترین برازش استفاده شد، ضریب همبستگی R<sup>2</sup>،

مربع کای X<sup>2</sup> و مربع میانگین خطای نسبی RMSE.

M<sub>t</sub> میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب / کیلوگرم ماده جامد) است.

### استخراج بهترین مدل ریاضی

مدلهایی که برای برازش داده‌های حاصل از خشک کردن استفاده گردید در جدول (۱) آورده شده است.

### ضریب نفوذ موثر رطوبت

ضریب نفوذی برای طراحی و مدل سازی فرآیند انتقال جرم، مانند آب زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت لازم می‌باشد. برای بدست آوردن ضریب نفوذ از رابطه (۳) استفاده شد (Khodabakhshi et al., 2015).

رابطه ۳

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2(2n+1)^2 D_{eff} t}{a^2}\right]$$

a ضخامت نمونه به m، t زمان خشک شدن

به s، n تعداد مشاهدات و D<sub>eff</sub> ضریب نفوذ

حرارتی به m<sup>2</sup>/s می‌باشد.

### انرژی فعال سازی

برای بدست آوردن انرژی فعالسازي در مایکروویو وابستگی بین ضریب نفوذ رطوبت موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در

کردن بر ضریب نفوذ موثر، تعیین مقادیر انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن گیاه دارویی به لیمو در روش خشک کردن مایکروویو می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

به لیمو مورد آزمایش از مزرعه گیاهان دارویی مرکز امام خمینی (ره) (استان البرز، شهر کرج) تهیه شد. و برای انجام آزمایش در یخچال در دمای 4°C + نگهداری شد. رطوبت اولیه نمونه با روش خشک کردن در آون در دمای 105 ± 1 °C بدست آمد. این کار در ۳ تکرار انجام شد. رابطه (۱) برای میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک استفاده شد (Darvishi et al., 2016).

$$M(\% d. b.) = \frac{m_0 - m_f}{m_f} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

برای انجام فرآیند توزین به لیمو در حال خشک شدن از ترازوی دیجیتال مدل AND GF-600, Japan با دقت ±۰/۰۱ g استفاده شد. فرآیند خشک کردن به لیمو با استفاده از خشک کن مایکروویو (SAMSUNG, model:ME3410W,korea) انجام شد. در این پژوهش از چهار سطح توان مایکروویو (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) و دو ضخامت لایه گیاه برای خشک کردن استفاده شد. توزین نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه تر به ۱۵٪ برسد ادامه یافت. کسر به لیمو در طول خشک کردن با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Zarein et al., 2015).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)،

درصد برای اعتبارسنجی شبکه در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی توپولوژی‌های مختلف با استفاده از نرم افزار استاتستیکا (STATISTICA 12.0, USA) توسط شبکه عصبی MLP از تابع انتقال لایه‌ی مخفی Tanh و تابع انتقال لایه‌ی خروجی Identity استفاده شد. دو معیار ضریب تبیین  $R^2$  و ریشه میانگین مربعات خطا RMSE، برای تعیین بهترین توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی بکار گرفته شد.

### نتایج و بحث

تغییرات نسبت رطوبت در ازای زمان برای خشک کردن به‌لیمو در شکل (۱) ارائه گردید. رطوبت اولیه در نمونه به‌لیمو ۷۵٪ گزارش شد که در انتها رطوبت نهایی به ۱۰ درصد رسیدند. در این بررسی متغیرهای توان و ضخامت لایه را به صورت زیر نشان داده شده است.

R1-30% : ضخامت لایه ۳ میلیمتر و ۳۰ درصد توان؛ R1-50% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۵۰ درصد توان؛

R1-75% : ضخامت لایه ۳ میلیمتر و ۷۵ درصد توان؛ R1-100% : ضخامت لایه ۳ میلی‌متر و ۱۰۰ درصد توان؛ R2-30% : ضخامت لایه ۶ میلیمتر و ۳۰ درصد توان؛ R2-50% : ضخامت لایه ۶ میلیمتر و ۵۰ درصد توان؛

R2-75% : ضخامت لایه ۶ میلیمتر و ۷۵ درصد توان؛ R2-100% : ضخامت لایه ۶ میلی‌متر و ۱۰۰ درصد توان؛

تغییرات نسبت رطوبت بر پایه خشک در ازای زمان برای خشک کردن به‌لیمو در ضخامت لایه ۳ و ۶ میلیمتر و درصد توان‌های مختلف مایکروویو در شکل (۲) ارائه گردید.

برابر مقدار (وزن) نمونه براساس مدل آرنوس می‌تواند بدست آید (Mujaffar & Bynoe, 2020; Şimşek et al., 2021).

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a m}{p}\right)$$

با رسم نمودار در دو حالت بالا و با استفاده از مدل دادالی و همکاران و تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار MATLAB می‌توان انرژی فعال سازی و ضریب ( $D_0$  و  $K_0$ ) را بدست آورد (Samad et al., 2024).

میزان انرژی مخصوص به لیمو برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم به لیمو که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه میشود (Dasore et al., 2019).

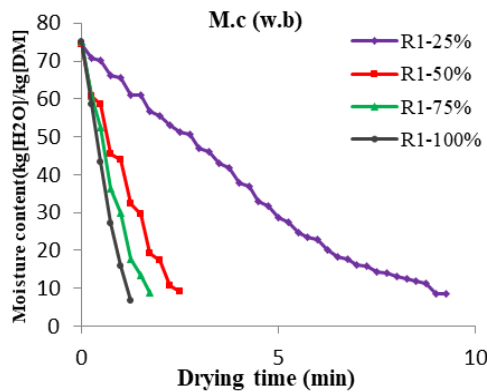
$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن  $E_t$  کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن (  $E_{kg}$ , kW.h) انرژی مخصوص مورد نیاز (kW.h/kg) و  $W_0$  وزن اولیه نمونه آزمایشی (kg) است.

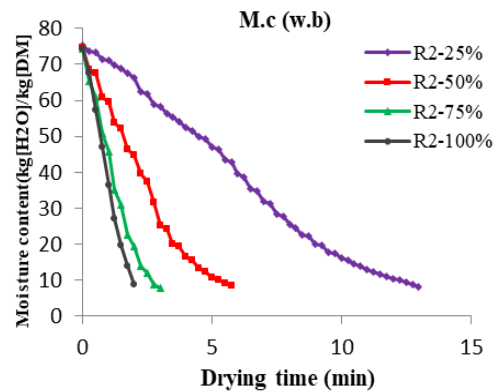
### شبکه عصبی مصنوعی

برای حل مسائل غیرخطی از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه ( $MLP^1$ ) استفاده شد. ترکیب تعداد نورون‌های لایه مخفی با سه خروجی (نسبت رطوبت، نرخ خشک شدن و بازده انرژی مصرفی مایکروویو) و سه لایه ورودی (توان مصرفی مایکروویو، ضخامت نمونه‌ها و زمان خشک شدن) مورد ارزیابی قرار گرفت؛ بطوری که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد برای ارزیابی و ۱۵

#### 1. Multi Layer Perceptron

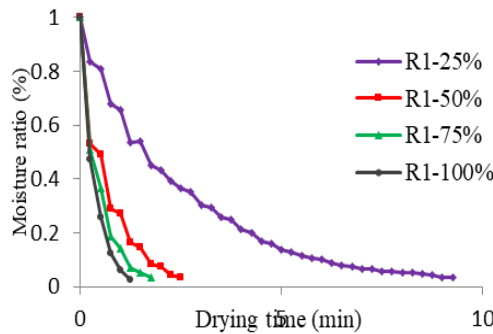


الف

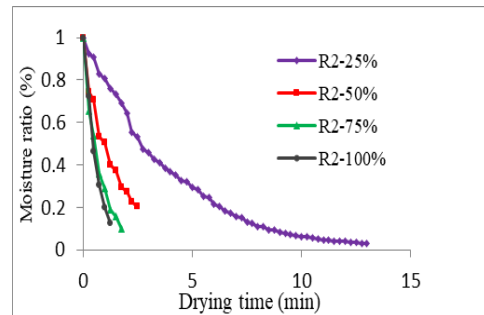


ب

شکل ۱. منحنی نسبت رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو (الف: ضخامت لایه ۳ میلی متر و ب: ضخامت لایه ۶ میلی متر)



الف



ب

شکل ۲. منحنی درصد رطوبت- زمان برای خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو (الف: ضخامت لایه ۳ میلی متر و ب: ضخامت لایه ۶ میلی متر)

### ضریب انتشار حرارتی

با توجه به جدول ۲ کمترین ضریب نفوذ موثر  $10^{-10} \times 1/329 \text{ m}^2/\text{s}$  و بیشترین مقدار آن  $10^{-10} \times 5/486 \text{ m}^2/\text{s}$  در T1-25% و T2-100%

جدول ۲. مقادیر ضریب نفوذ موثر ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) و ضریب تعیین در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلی متر

متغیرها	$D_{eff} (\text{m}^2/\text{s})$	$R^2$
T1-25%	$1/329 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۶۵
T1-50%	$4/75 \times 10^{-10}$	۰/۹۸۷۱
T1-75%	$7/097 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۳۷
T1-100%	$1/093 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۹۶
T2-25%	$4/073 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۷۷
T2-50%	$8/964 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۲۴
T2-75%	$1/748 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۵۹
T2-100%	$2/486 \times 10^{-10}$	۰/۹۹۹۹

بر اساس این شکل زمان خشک شدن به لیمو با توجه به توان های مختلف مایکروویو متفاوت می باشد. با افزایش توان خروجی مایکروویو، کاهش بیشتری در رطوبت نسبی محصول اتفاق می افتد، زیرا اینگونه به نظر می رسد که افزایش توان خروجی مایکروویو باعث افزایش شدت پرتوهای مایکروویو و دمای درون محفظه و کاهش بیشتر میزان رطوبت به لیمو می شود. به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. نتایج مشابهی را سایر پژوهشگران در خشک کردن اسطوخودوس با استفاده از مایکروویو به دست آورده اند (Khafajeh et al., 2022).

جدول ۳. مقادیر  $R^2$ ،  $\chi^2$  و RMSE حاصل از برازش مدل‌های ریاضی در ضخامت و درصد توان‌های مختلف مایکروویو

متغیرها	مدل	$R^2$	$\chi^2$	RMSE
R1-30%	نیوتون	۰/۹۹۱۰	۰/۰۰۰۲۸۹	۰/۰۲۳
	بیج	۰/۹۹۶۴	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۱۵۴
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۵۳	۰/۰۰۰۱۶۸	۰/۰۱۷۸
	لگاریتمی	۰/۹۹۵۷	۰/۰۰۰۲۸۶	۰/۰۱۷۳
	میدیلی	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۰۳
R1-50%	نیوتون	۰/۹۶۴۲	۰/۰۰۰۲۹۳	۰/۰۵۵۴
	بیج	۰/۹۸۴۷	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۳۸۲
	هندرسون و پابیس	۰/۹۷۰۲	۰/۰۰۰۱۷۳	۰/۰۵۳۲
	لگاریتمی	۰/۹۷۳۶	۰/۰۰۰۲۹۲	۰/۰۵۳۱
	میدیلی	۰/۹۸۸۷	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۳۷۱
R1-75%	نیوتون	۰/۹۹۱۱	۰/۰۰۰۲۹۵	۰/۰۳۱۱
	بیج	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۰۲۴۶	۰/۰۲۲۱
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۱۸	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۰۳۲۲
	لگاریتمی	۰/۹۹۳۳	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۳۱۹
	میدیلی	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۰۲۴۹
R1-100%	نیوتون	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۰۱۰۷
	بیج	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۹
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۱۶۵	۰/۰۱۱۸
	لگاریتمی	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۲۸۴	۰/۰۱۳۴
	میدیلی	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۱۵۱	۰/۰۰۶۴
R2-30%	نیوتون	۰/۹۹۵۸	۰/۰۰۰۲۸۹	۰/۰۱۸۰
	بیج	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۲۳۷	۰/۰۱۳۶
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۰۱۶۸	۰/۰۱۶۳
	لگاریتمی	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۰۲۸۶	۰/۰۱۴۵
	میدیلی	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۱۳۷
R2-50%	نیوتون	۰/۹۸۹۶	۰/۰۰۰۲۹۳	۰/۰۲۷۲
	بیج	۰/۹۹۳۷	۰/۰۰۰۲۴۱	۰/۰۲۱۶
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۲۷	۰/۰۰۰۱۷۳	۰/۰۲۳۳
	لگاریتمی	۰/۹۹۳۰	۰/۰۰۰۲۹۲	۰/۰۲۳۴
	میدیلی	۰/۹۹۴۲	۰/۰۰۰۱۵۹	۰/۰۲۱۸
R2-75%	نیوتون	۰/۹۹۳۸	۰/۰۰۰۲۹۵	۰/۰۲۳۲
	بیج	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۰۲۴۶	۰/۰۱۵۵۷
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۶۲	۰/۰۰۰۱۷۷	۰/۰۱۳۳
	لگاریتمی	۰/۹۹۱۰	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۱۷۲۹
	میدیلی	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۰۱۶۳	۰/۰۱۲۷۷
R2-100%	نیوتون	۰/۹۹۷۰	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۰۱۸۴
	بیج	۰/۹۹۶۱	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۰۰۷۲
	هندرسون و پابیس	۰/۹۹۷۶	۰/۰۰۰۱۶۵	۰/۰۱۷۶
	لگاریتمی	۰/۹۹۸۴	۰/۰۰۰۲۸۴	۰/۰۱۵۵
	میدیلی	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۰۱۵۱	۰/۰۰۶۶

مدلسازی ریاضی منحنی‌های خشک شدن در مدلسازی ریاضی فرآیند خشک کردن به‌لیمو بصورت تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم‌افزار Matlab انجام شد. بهترین

100% می‌باشد. همانطوری که مشاهده میشود با افزایش توان در خشک‌کن‌ها ضریب نفوذ موثر افزایش می‌یابد، دلیل وقوع این مسئله ایجاد جنبش مولکولی و مکش سطحی بیشتر می‌باشد.

جدول ۴. ضرایب و شاخص آماری مربوط به مدل میدیلی برای خشک کردن به لیمو در ضخامت و درصد توان های مختلف

R <sup>2</sup>	n	k	b	a	توان مایکروویو (وات)
۰/۹۹۸	۰/۹۵۳	۰/۴۱۹۸	$2/441 \times 10^{-2}$	۱	R1-25%
۰/۹۸۸۷	۰/۵۹۸	۱/۲۵۲	-۰/۰۳۹۰۲	۰/۹۹۷۶	R1-50%
۰/۹۹۶۷	۰/۷۷۹۲	۱/۸۷	-۰/۴۰۱۸۱۶	۰/۹۹۸۸	R1-75%
۰/۹۹۹۹	۰/۸۸۰۷	۲/۴۸	-۰/۰۲۱۳۲	۰/۹۹۹۸	R1-100%
۰/۹۹۷۷	۱/۰۷۹	۰/۲۲۲۱	$2/207 \times 10^{-2}$	۰/۹۹۴۷	R2-25%
۰/۹۹۴۲	۰/۸۸۴۲	۰/۷۱۴۶	-۰/۰۰۲۴۶۹	۰/۹۸۴۱	R2-50%
۰/۹۹۶۴	۰/۸۸۶۳	۱/۲۷۱	-۰/۰۰۴۷۱۳	۰/۹۹۴۵	R2-75%
۰/۹۹۹۸	۱/۴۱۲	۱/۶۶۷	۰/۰۰۶۶۸۴	۱/۰۰۲	R2-100%

ابتدا حاصل جبری مجموع وزنی همه ورودی‌ها و عامل بایاس تشکیل می‌شود و سپس این مقدار به عنوان ورودی به یک تابع فعال‌سازی (یا تابع انتقال) داده می‌شود تا خروجی نهایی آن نورون تولید شود (Yenikaya et al., 2018). طبق نتایج به دست آمده در جدول ۵، بهترین مدل آموزش با شبکه ۳-۱۵-۳ MLP با ۱۵ نورون در لایه پنهان با بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۵۲) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۱۵۴) حاصل شد.

در شکل‌های (۳، ۴ و ۵) ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده پارامترهای سینتیک خشک کردن (نسبت رطوبت و آهنگ خشک شدن) و بازده انرژی مصرفی مایکروویو نمونه‌های به لیمو توسط شبکه ۳-۱۵-۳ MLP نشان داده شده است. در این شکل، محور عمودی مقادیر تغییرات توان مصرفی مایکروویو، ضخامت نمونه‌ها و زمان فرآیند خشک شدن می‌باشد. نتایج به دست آمده در تائید تحقیقات انجام شده، نشان داد که با توجه به مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از شبکه

مدلی که می‌تواند سینتیک خشک شدن به لیمو را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار R<sup>2</sup> و کمترین مقادیر مربع کای  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. در جدول (۳) مقادیر R<sup>2</sup>،  $\chi^2$  و RMSE حاصل از برازش مدل‌های ریاضی در توان‌های مختلف مایکروویو آمده است. با مقایسه این مقادیر، مشخص شد که مدل میدیلی بهترین مدل برای R1-30%؛ R1-50%؛ R1-75%؛ R1-100%؛ R2-30%؛ R2-50%؛ R2-75%؛ R2-100%؛ 75% بود که می‌توانست رفتار خشک شدن به لیمو را پیش‌بینی کند.

با توجه به اینکه مدل میدیلی برای متغیرها به عنوان بهترین مدل ریاضی برازش شده انتخاب شد، ضرایب آن در جدول (۴) آمده است.

#### شبکه عصبی مصنوعی MLP

شبکه عصبی مصنوعی MLP، مدل معماری شبکه محبوب است که در بسیاری از برنامه‌های کاربردی تحقیقاتی در پزشکی، مهندسی، مدل‌سازی ریاضی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار پایه MLP، یک توپولوژی لایه‌ای Feed-forward است. در این ساختار،

جدول ۴. ضرایب و شاخص آماری مربوط به مدل میدیلی برای خشک کردن به لیمو در ضخامت و درصد توان های مختلف

R <sup>2</sup>	n	k	b	a	توان میکروویو (وات)
۰/۹۹۸	۰/۹۵۳	۰/۴۱۹۸	$2/441 \times 10^{-2}$	۱	R1-25%
۰/۹۸۸۷	۰/۵۹۸	۱/۲۵۲	-۰/۰۳۹۰۲	۰/۹۹۷۶	R1-50%
۰/۹۹۶۷	۰/۷۷۹۲	۱/۸۷	-۰/۴۰۱۸۱۶	۰/۹۹۸۸	R1-75%
۰/۹۹۹۹	۰/۸۸۰۷	۲/۴۸	-۰/۰۲۱۳۲	۰/۹۹۹۸	R1-100%
۰/۹۹۷۷	۱/۰۷۹	۰/۲۲۲۱	$2/207 \times 10^{-2}$	۰/۹۹۴۷	R2-25%
۰/۹۹۴۲	۰/۸۸۴۲	۰/۷۱۴۶	-۰/۰۰۲۴۶۹	۰/۹۸۴۱	R2-50%
۰/۹۹۶۴	۰/۸۸۶۳	۱/۲۷۱	-۰/۰۰۴۷۱۳	۰/۹۹۴۵	R2-75%
۰/۹۹۹۸	۱/۴۱۲	۱/۶۶۷	۰/۰۰۶۶۸۴	۱/۰۰۲	R2-100%

جدول ۵. نتایج مربوط به پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی

مصرفی میکروویو با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی MLP

شماره شبکه	توپولوژی شبکه	R <sup>2</sup>	RMSE
۱	۳-۱۵-۳	۰/۹۵۲	۰/۱۵۴
۲	۳-۲۰-۳	۰/۹۳۹	۰/۱۷۴
۳	۳-۵-۳	۰/۹۲۲	۰/۱۹۲
۴	۳-۷-۳	۰/۷۶۱	۰/۳۳۲
۵	۳-۱۰-۳	۰/۷۴۵	۰/۳۴۶
۶	۳-۶-۳	۰/۷۴۰	۰/۳۴۸
۷	۳-۴-۳	۰/۷۳۸	۰/۳۵۱
۸	۳-۱۸-۳	۰/۷۲۹	۰/۳۵۳
۹	۳-۱۱-۳	۰/۷۱۵	۰/۳۵۶
۱۰	۳-۱۴-۳	۰/۷۰۶	۰/۳۵۹

ضخامت نمونه‌ها و زمان فرآیند خشک شدن را با مقایسه با پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ارتباط بالایی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این شبکه برآزش شده است؛ لذا با اطمینان بالایی میتوان از این شبکه، جهت پیش‌بینی پارامترهای ذکر شده با کمترین زمان و با دقت بالا استفاده نمود.

### انرژی مصرفی مورد نیاز و آهنگ خشک

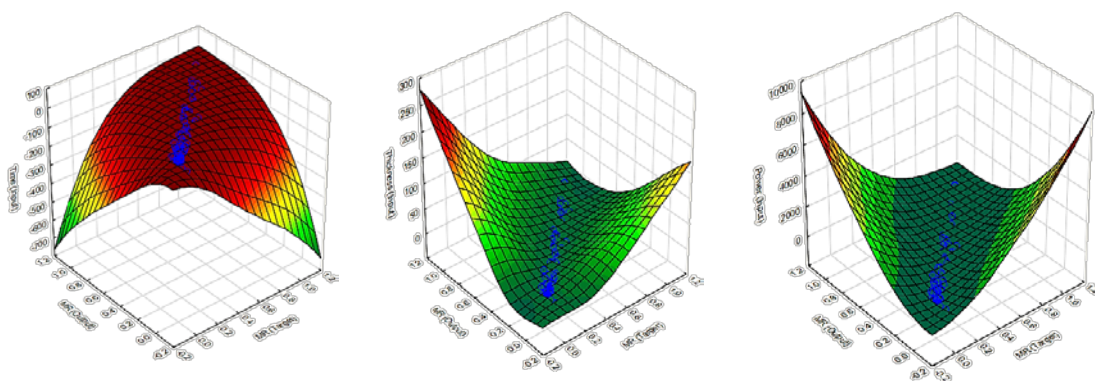
#### شدن

در خشک کردن میکروویو با افزایش محتوای رطوبت محصول در طی فرآیند خشک شدن، آهنگ رطوبت کاهش می‌یابد و آهنگ کاهش رطوبت با افزایش دما افزایش می‌یابد. علت آن افزایش گرادیان حرارتی و در نتیجه افزایش تبخیر می‌باشد. انرژی مخصوص، عبارت است از میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم محصول تازه. شکل (۷) میزان انرژی مخصوص مورد نیاز برای به‌لیمو را در توان‌های مختلف نشان می‌دهد.

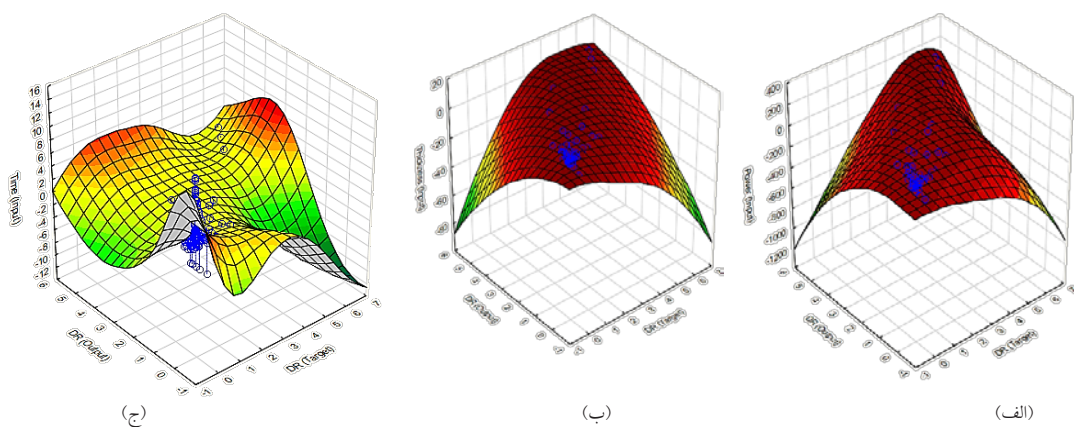
عصبی مصنوعی بهتر با مقادیر اندازه‌گیری شده، شبکه‌های عصبی مصنوعی از دقت و عملکرد بالایی برخوردارند. شبکه‌های عصبی مصنوعی میتوانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در جهت پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی میکروویو مؤثر واقع شوند (Coradi et al., 2022).

شکل (۶) نتیجه کلی حاصل از شبکه MLP برای ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توان مصرفی میکروویو،

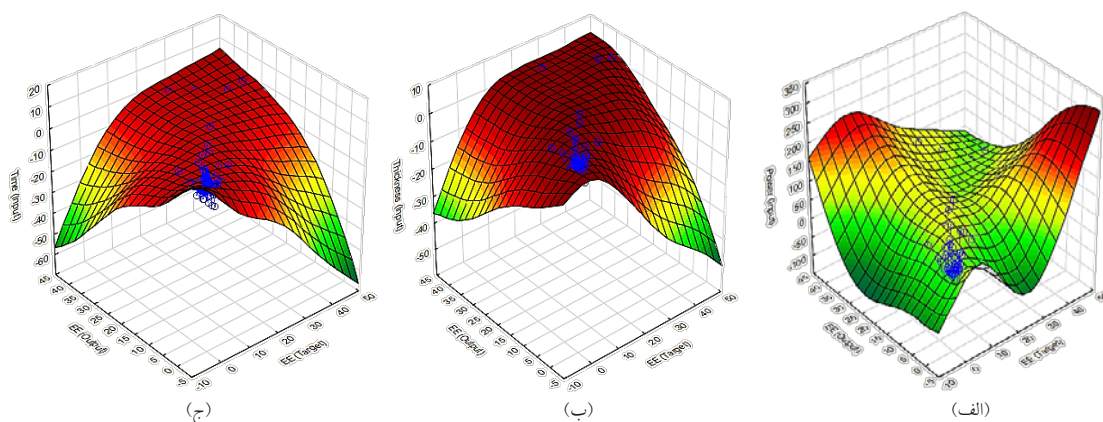




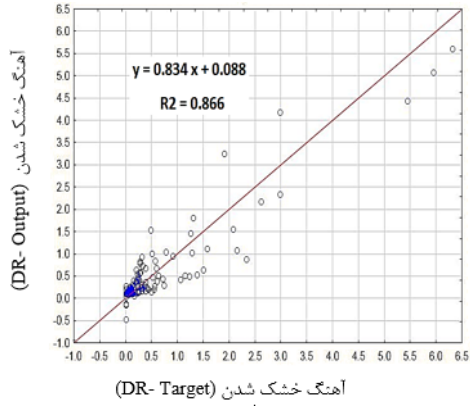
شکل ۳. نمودار سه بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده نسبت رطوبت با شبکه عصبی ۳-۱۵-۳ MLP. (الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن



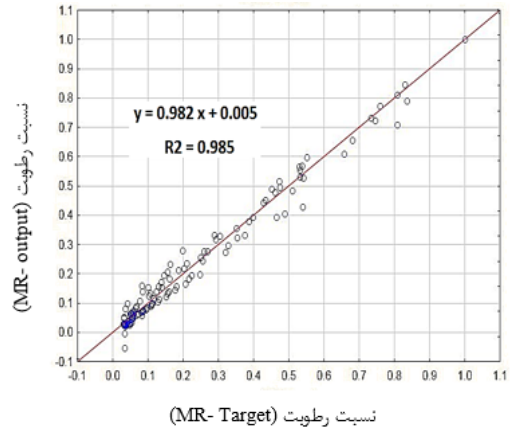
شکل ۴. نمودار سه بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده آهنگ خشک شدن با شبکه عصبی ۳-۱۵-۳ MLP. (الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن



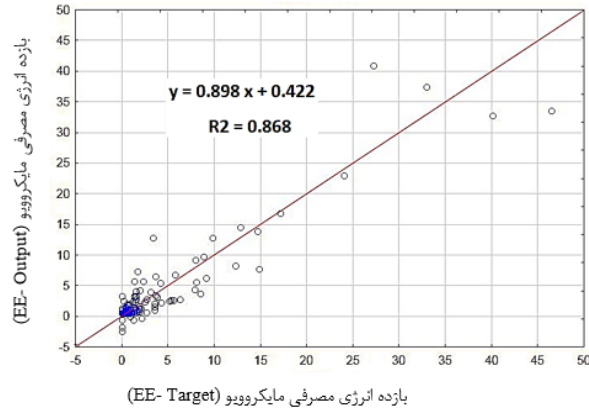
شکل ۵. نمودار سه بعدی ارتباط بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده بازده انرژی مصرفی مایکروویو با شبکه عصبی ۳-۱۵-۳ MLP. (الف) توان مصرفی مایکروویو، (ب) ضخامت نمونه ها و (ج) زمان فرآیند خشک شدن



(ب) آهنگ خشک شدن

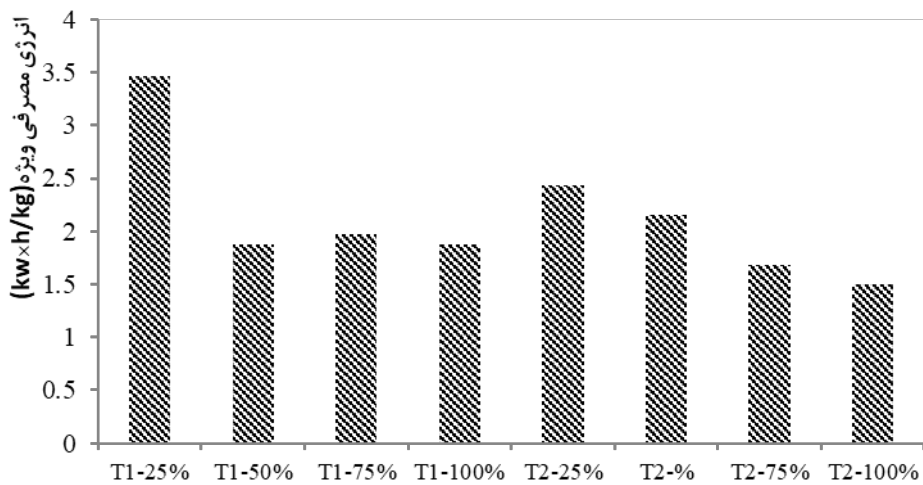


(الف)



(ج)

شکل ۶. ارتباط بین مقادیر اندازه گیری و پیش‌بینی شده (الف) نسبت رطوبت، (ب) آهنگ خشک شدن و (ج) بازده انرژی مصرفی مایکروویو، توسط شبکه عصبی ۳-۱۵-۳ MLP

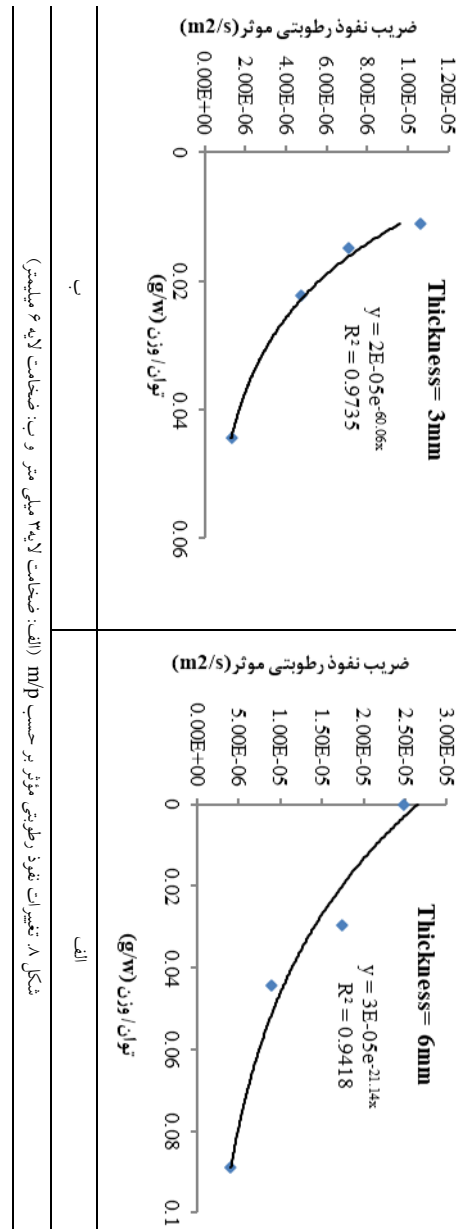


سطوح توان (W)

شکل ۷. انرژی مخصوص طی خشک کردن به لیمو در درصد توان های مختلف مایکروویو با ضخامت لایه های ۳ و ۶ میلیمتر

### نتیجه گیری کلی

در این مطالعه به بررسی پارامترهای مختلف خشک کردن، ارزیابی توپولوژی‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی MLP جهت تعیین بهترین شبکه برای گیاه به‌لیمو با خشک کن میکروویو با محدوده توان ۹۰۰-۱۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز در چهار سطح ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ توان خروجی پرداخته شده است. از شبکه عصبی مصنوعی MLP برای پیش‌بینی ارتباط بین پارامترهای سینتیک خشک کردن (نسبت رطوبت و آهنگ خشک شدن) و بازده انرژی مصرفی با تغییرات توان مصرفی میکروویو با به‌کارگیری نرم‌افزار استاتستیکا استفاده شد. به منظور پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی، شبکه MLP دارای یک ورودی و سه خروجی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، یک مدل ریاضی برای مدل کردن آهنگ تبخیر به‌لیمو ارائه شده است. نتایج بررسی و تحقیق نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی MLP یک ابزار بسیار قدرتمند در پیش‌بینی پارامترهای سینتیک خشک کردن و بازده انرژی مصرفی گیاه دارویی به‌لیمو براساس مقادیر توان مصرفی میکروویو است. بین شبکه‌های مختلف مورد ارزیابی، شبکه عصبی بهترین مدل آموزش با شبکه ۳-۱۵-۳ MLP با ۱۵ نرون در لایه پنهان با بیشترین ضریب تبیین (۰/۹۵۲) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۱۵۴) حاصل شد. کمترین ضریب نفوذ موثر  $10^{-6} \times 329/1 \text{ m}^2/\text{s}$  و بیشترین مقدار آن  $10^{-5} \times 486/2 \text{ m}^2/\text{s}$  به ترتیب در T1-25%



انرژی مخصوص مورد نیاز نیز با افزایش توان کاهش می‌یابد.

### محاسبه انرژی فعال سازی

تغییرات نفوذ رطوبتی در مقابل مقدار (m/p) در شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق با نمودار به دست آمده مقدار انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ رطوبتی برای به-لیمو  $60/06 \times 10^{-5}$  و  $2 \times 10^{-5}$  برای ضخامت ۳ میلی‌متر و  $21/14$  و  $3 \times 10^{-5}$  برای ضخامت ۶ میلی‌متر به دست آمد.

و 100%-T2، می‌باشد. بیشترین میزان انرژی مصرفی ویژه در خشک‌کن مایکروویو در ۲۵٪ توان و ضخامت ۳ میلی‌متر و مقدار ۳/۴۶ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم و کمترین میزان انرژی مصرفی در ۱۰۰ توان و ضخامت ۶ میلی‌متر به میزان ۱/۵ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم محاسبه شد. با افزایش توان، زمان خشک‌کردن به علت افزایش گرادیان حرارتی در داخل جسم و در نتیجه افزایش سرعت تبخیر رطوبت محصول، کاهش می‌یابد. انرژی فعال‌سازی و ثابت نفوذ رطوبتی برای به‌لیمو ۶۰/۰۶ و  $2 \times 10^{-5}$  برای ضخامت ۳ میلی‌متر و ۲۱/۱۴ و  $3 \times 10^{-5}$  برای ضخامت ۶ میلی‌متر به‌دست آمد.

## References

- Bala, E., Dey, S., Patra, S., and Singha, S. 2024. Assessment of microwave drying for rapid and convenient analysis of medicinal plants for quality assurance. *Phytochemical Analysis*, 35(4), 903-922. <https://DOI.org/10.1002/pca.3336>
- Coradi, P. C., Lemes, Â. F. C., Müller, A., Jaques, L. B. A., Dubal, Í. T. P., Bilhalva, N. d. S.,...Maier, D. E. 2022. Silo–dryer–aerator in fixed and thick layer conceptualized for high quality of grains applied in different social scales post-harvest: modeling and validation. *Drying Technology*, 40(7), 1369-1394. <https://DOI.org/10.1080/07373937.2020.1870040>
- Darvishi, H., Zarein, M., and Farhudi, Z. 2016. Energetic and exergetic performance analysis and modeling of drying kinetics of kiwi slices. *Journal of food science and technology*, 53(5), 2317-2333. <https://DOI.org/10.1007/s13197-016-2199-7>
- Dasore, A., Konijeti, R., and Puppala, N. 2019. Experimental investigation and mathematical modeling of convective drying kinetics of white radish. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 13. <https://DOI.org/10.5098/hmt.13.21>
- Ghasemi, J., Moradi, M., Karparvarfard, S. H., Golmakani, M. T., and Khaneghah, A. M. 2021. Thin layer drying kinetics of lemon verbena leaves: a quality assessment and mathematical modeling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(1), 59-72. <https://DOI.org/10.15586/qas.v13i1.835>
- Khodabakhshi, A., Mahfeli, M., and Zarein, M. 2015. Investigation of microwave power effects on drying kinetics and energy efficiency of banana samples. *Global J. Sci. Front. Res*, 15(4), 41-45.
- Mbegbu, N., Nwajinka, C., and Amaefule, D. 2021. Thin layer drying models and characteristics of scent leaves (*Ocimum gratissimum*) and lemon basil leaves (*Ocimum africanum*). *Heliyon*, 7(1).
- Mujaffar, S., and Bynoe, S. 2020. Microwave Drying of West Indian Bay Leaf (*Pimenta racemosa*). *West Indian Journal of Engineering*, 87-95.
- Naghavi, E., and Rigi, S. 2017. Thin-layer convective air drying of lemon verbena (*lippia citriodora*) leaves. *Iranian Food Science and Technology Research*

- Journal, 12(6), 716-729. [https://DOI.org/ 10.22067/ifstrj.v12i6.61049](https://DOI.org/10.22067/ifstrj.v12i6.61049)
- Samad, N. A., Zaidel, D. N. A., Yunus, N. A., Muhamad, I. I., Jusoh, Y. M. M., Dailin, D. J., and Sulisty, J. 2024. Kinetics Modelling of Moringa Oleifera Leaves using Microwave Drying. <https://DOI.org/10.1002/htj.70137>
- Şimşek, M., Küçük, H., and Midilli, A. 2021. Experimental investigation and mathematical modeling of microwave thin layer drying behaviour of apricot, kiwi and mint leaves. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 13-35. <https://DOI.org/10.53501/rteufemud.969314>
- Soodmand-Moghaddam, S., Sharifi, M., Zareiforoush, H., and Mobli, H. 2020. Mathematical modelling of lemon verbena leaves drying in a continuous flow dryer equipped with a solar pre-heating system. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 12(1), 57-66. <https://DOI.org/10.15586/QAS2019.658>
- Yenikaya, S., Salihoglu, G., Salihoglu, N. K., and Yenikaya, G. 2018. Microwave drying of automotive industry paint sludge. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 22(4), 04018015. [https://DOI.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000407](https://DOI.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000407)
- Zarein, M., Samadi, S. H., and Ghobadian, B. 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 14(1), 41-47. <https://DOI.org/10.1016/j.jssas.2013.06.002>
- Zhao, Y., Zhang, W., Yang, H., Xu, Z., Wang, X., Zhang, Z., and Deng, J. 2025. Effects of drying methods on phytochemicals and antioxidant activity of broccoli by-products. Food Research International, 208, 116284. <https://DOI.org/10.1016/j.foodres.2025.116284>

## Predicting the Kinetics and energy efficiency of drying the medicinal plant Lemon verbena (*Lippia citriodora Kunth*) using artificial neural networks

Hamid Khafajeh<sup>1\*</sup>, Mohammad Zarien<sup>2</sup>, Mohammad Younesi Alamouti<sup>3</sup>

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Jahrom University, Jahrom, Iran. (Corresponding author)
2. Biosystems 2Engineering Department, TarbiatModares University, Tehran, Iran .
3. Imam Khomeini Higher Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Received: October 2025 Accepted: December 2025 - DOI: 10.22092/mpt.2025.370955.1204

### Abstract

**Khafajeh, H., Zarien, M., Younesi Alamouti, M.,** .Predicting the Kinetics and energy efficiency of drying the medicinal plant Lemon verbena (*Lippia citriodora Kunth*) using artificial neural networks  
**Iranian Medicinal Plants and Technology, Vol 7, No. 1, 2024 20-21:** 138-151(in Persian)

### Abstract:

Drying is one of the oldest methods of preserving medicinal plants. In this report, mathematical modeling, kinetic prediction and energy efficiency of drying the medicinal plant Lemon verbena (*Lippia citriodora Kunth*) using an artificial neural network in a microwave dryer are discussed. In the microwave drying method, four power levels (25%, 50%, 75% and 100% power) and two thicknesses of 3 and 6 mm were used to dry Lemon verbena. The results showed that the lowest effective diffusion coefficient was  $1.329 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s at a thickness of 3 mm and 25% power and the highest value was  $2.486 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s at a thickness of 6 mm and 100 power. Also, in this report, different drying parameters and different topologies of the MLP artificial neural network were investigated and evaluated to determine the best network for Lemon verbena with a microwave dryer. The results showed that the MLP artificial neural network is a very powerful tool in predicting drying kinetic parameters and energy efficiency of the medicinal plant Lemon verbena based on microwave power consumption values.

**Email address of the corresponding author:** khafajeh@jahromu.ac.ir

**Keywords:** Lemon verbena, Medicinal Plants, Modeling the Drying Process, Activation Energy, Multilayer Perceptron (MLP), *Lippia citriodora* Kunth