



## خشک کردن لیموترش با روش هوای گرم تحت تاثیر پیش تیمار فراصوت

محمد کاوه<sup>۱</sup>، احمد جهان‌بخشی<sup>۱</sup>، عزت‌اله عسکری اصلی‌ارده<sup>۲\*</sup>، کمال ایمانیان<sup>۱</sup>

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

۲. دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۳۰، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۶/۵، تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۱)

### چکیده

هدف از این پژوهش، به دست آوردن خواص ترمودینامیکی خشک کردن لیموترش تحت تاثیر پیش تیمار فراصوت در یک خشک‌کن هوای گرم می‌باشد. فرایند خشک کردن در سه سطح دمایی ۴۰، ۵۵ و ۷۰°C، یک سطح سرعت هوای ورودی ۱ m/s و چهار سطح زمان پیش تیمار فراصوت ۰ (شاهد)، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ min صورت گرفت. از ۱۴ مدل ریاضی خشک کردن جهت پیش‌بینی نسبت رطوبت لیموترش استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش دمای هوای ورودی و زمان اعمال توان فراصوت، زمان خشک کردن کاهش پیدا کرد. بهترین مدل برای پیش‌بینی خشک کردن لیموترش مدل میدیلی و همکاران انتخاب شد. استفاده از پیش تیمار فراصوت در دماهای مختلف منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب پخش موثر رطوبت از  $5/04 \times 10^{-11}$  تا  $2/00 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s شد. انرژی فعال سازی برای لیموترش بین ۳۴/۹۳ تا ۴۲/۹۷ kJ/mol به دست آمد. هم‌چنین، مقدار انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن لیموترش ۴۷/۳۹ تا ۲۴۰/۴۶ kWh/kg ثبت شد.

واژه‌های کلیدی: لیموترش، خشک کردن، فراصوت، ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی مصرفی.

## ۱. مقدمه

لیموترش با نام علمی (*Citrus Aurantifolia L.*) میوه درخت لیمو و از مرکبات است. کشت آن فقط در مناطق گرمسیری امکان‌پذیر است [۱]. لیمو یک میوه محبوب با رنگ و طعمی جذاب و غنی از مواد مغذی مانند اسید اسکوربیک، اسید سیتریک، فلاونوئیدها و مواد معدنی می‌باشد [۲].

میزان رطوبت بالا در میوه‌ها، نقش مهمی در ذخیره‌سازی آن‌ها ایفا می‌کند. کاهش رطوبت یا خشک‌کردن از طریق انتقال هم‌زمان جرم و حرارت به‌طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل، حفظ کیفیت و کاهش افت پس از برداشت محصولات کشاورزی به منظور تولید میوه‌ها و سبزی‌های خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین در اثر کاهش مقدار رطوبت ماده غذایی امکان فساد میکروبی از بین می‌رود و سرعت دیگر واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی نیز به مقدار قابل توجهی کم می‌شود. خشک‌کردن مواد غذایی و به ویژه میوه‌ها به روش‌های مختلفی مانند خشک‌کردن در آفتاب، هوای گرم، مادون قرمز، با اشعه ماکروویو و خلاء امکان‌پذیر است [۳].

در میان انواع خشک‌کن‌های صنعتی که امروزه به صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند، خشک‌کن‌های هوای گرم بیش‌ترین کاربرد در صنایع مختلف از قبیل صنایع غذایی و کشاورزی، صنعت کاغذ، صنعت نساجی، صنایع شیمیایی و غیره را دارند. با توجه به کاربرد وسیع استفاده از هوای گرم در خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات مختلف، این روش دارای مشکلات جدی از قبیل زمان طولانی فرایند، بازدهی پایین، مصرف انرژی بسیار زیاد و افت کیفیت محصول خشک می‌باشد [۱]. بنابراین، برای رفع معایب و بهبود عملکرد این نوع خشک‌کن‌ها لازم است با استفاده از فناوری‌های جدید با خشک‌کن‌های دیگر ترکیب شوند.

یکی از روش‌های پیشرفته نگه‌داری و تبدیل مواد غذایی و کنترل فرایند استفاده از امواج فراصوت است. فرایند فراصوت مزایای اساسی نسبت به سایر روش‌ها دارد. این روش نیاز به آماده‌سازی نمونه نداشته، دقیق و نسبتاً ارزان است و سبب افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های تولید محصول می‌شود. هم‌چنین، امواج فراصوت به عنوان یک پیش‌مرحله قبل از فرایند اصلی خشک‌کردن، محصول و یا برش‌های آن در آب قرار گرفته تا امکان موج دهی به وجود آید. فراصوت روشی غیرحرارتی است

در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و حسی غذا حفظ می‌شود و می‌تواند برای ارزیابی ویژگی‌های غذاها استفاده شود و هم‌چنین زمان فراوری کاهش یافته و در صورت ادغام با سایر روش‌ها، کارایی فرایند افزایش می‌یابد [۴-۷].

توان ماورای صوت یکی از جدیدترین فناوری‌ها است که معمولاً در ترکیب با خشک‌کن‌های هوای گرم استفاده می‌شود و هدف اصلی آن افزایش سرعت فرایند و بهبود کیفیت محصول نهایی است [۸-۳۷]. امواج ماورای صوت با ایجاد اثرات مکانیکی و بدون تولید انرژی گرمایی زیاد، باعث افزایش سرعت دفع رطوبت مواد می‌شوند. بنابراین استفاده از امواج ماورای صوت در روش‌های خشک‌کردن ترکیبی به صورت ویژه برای شرایطی که حفظ کیفیت ظاهری و ارزش غذایی محصول اولویت اصلی است، پیشنهاد شده است [۴].

آزوبل و همکاران، به مطالعه سینتیک خشک‌شدن میوه موز، به کمک امواج فراصوت با فرکانس ۲۵ KHz و توان ۴۸۷۰ W در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش زمان اعمال فراصوت سبب افزایش قابلیت انتشار رطوبت شده است [۹]. داجمیچ و همکاران، در مطالعه‌ای تأثیر فراصوت با شدت بالا به عنوان پیش‌تیمار بر طول مدت خشک‌کردن و ویژگی‌های بافت گلابی با دامنه متفاوت خشک‌کردن با مادون قرمز را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش نمودند، استفاده از فراصوت با دامنه‌های مختلف در کاهش زمان خشک‌شدن نمونه‌های برش خورده گلابی تأثیر مثبتی را از خود نشان داد [۱۰]. کوالسکی و پاولوفسکی، تشدید خشک‌کردن سبب با توجه به افزایش امواج فراصوت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش نمودند، که امواج فراصوت تأثیر مثبتی بر روی خشک‌شدن همرفتی و سینتیک خشک‌شدن داشته و زمان خشک‌شدن از ۲۳۵ min برای خشک‌شدن همرفتی به ۱۶۰ min برای خشک‌کردن به کمک امواج فراصوت همرفتی کاهش یافت [۱۱]. سانتاکاتالینا و همکاران، تأثیر کاربرد توان امواج فراصوت در خشک‌کردن سبب در دمای پایین را بررسی کردند. برای این منظور، سبب به مکعب‌هایی با ابعاد ۸/۸ mm برش و در دو دمای متفاوت ۱۰ و ۱-°C با سرعت باد ۲ m/s و با پیش‌تیمار فراصوت با توان‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ w و بدون پیش-تیمار فراصوت خشک شدند. آن‌ها گزارش نمودند، هر چه سطح توان امواج فراصوت بالاتر می‌رود، زمان خشک‌شدن کاهش

به آزمایشگاه انتقال داده شدند. برای تعیین محتوای رطوبتی از روش استاندارد هوای گرم آن مدل UNE 500 شرکت Memmert ساخت کشور آلمان استفاده گردید. برای این منظور نمونه‌های لیمو را در ۳ تکرار به مدت ۲۴ h درون آن با دمای  $75^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند [۲۰]. نهایتاً رطوبت اولیه نمونه‌های لیموترش  $88/85\%$  بر پایه تر محاسبه شد.

## ۲.۲. تجهیزات مورد استفاده

به منظور پیش تیمار نمونه‌ها با امواج فراصوت از یک دستگاه حمام فراصوت مدل Parasonic 2600 s شرکت مهندسی پارس نهند، ساخت کشور ایران با ابعاد داخلی  $24 \times 13/5 \times 10 \text{ cm}^3$  و حجم  $2/6 \text{ L}$  استفاده شد. این دستگاه قادر به تولید امواج فراصوت با فرکانس  $28 \text{ KHz}$  و توان  $70 \text{ W}$  و دمای ثابت  $20^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. به منظور انجام فرایند خشک کردن نمونه‌های لیموترش از یک خشک کن هوای گرم استفاده شد (شکل ۱). اجزای اصلی خشک کن عبارتند از: المنت‌های گرم کننده هوا ( $5 \text{ المنت } 300 \text{ W}$ )، محفظه خشک کن (محل قرارگیری نمونه‌ها)، سیستم کنترل (سرعت دمنده و دمای هوای ورودی به محفظه خشک کن)، دمنده گریز از مرکز برای تامین جریان هوا و ترازو. دمنده گریز از مرکز دارای قابلیت تغییر میزان هوای ورودی به محفظه خشک کن است. تنظیم سرعت هوای ورودی با تغییر سرعت دمنده و به صورت دستی توسط یک اینورتر Vinker VSD2 ساخت کشور تایوان که به الکتروموتور متصل است، انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی از محفظه خشک کن از یک بادسنج توربینی مدل AM-4202 شرکت Lutron ساخت کشور تایوان با درجه تفکیک‌پذیری  $0/1 \text{ m/s}$  و دقت  $\pm 2\%$  استفاده شد. موتور مورد استفاده از نوع سه فاز که دارای تعداد دور  $2800 \text{ rpm}$  و قدرت  $250 \text{ W}$  می‌باشد. محفظه اصلی خشک کن دارای سه قسمت می‌باشد: توری فلزی حاوی نمونه‌ها، بدنه پلکسی گلاس و درپوش محفظه. توری حاوی نمونه‌ها، از جنس فلزی می‌باشد و توسط یک قاب تغلونی درون محفظه قرار می‌گیرد. دمای هوای خشک کن در محل قرارگیری نمونه‌ها بطور مستقیم با ترموکوپل اندازه‌گیری می‌شود که در زیر محفظه قرار گرفته است. همچنین برای جلوگیری از تلفات حرارتی، دور کانال منتهی به محفظه با پشم شیشه عایق بندی شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرار گرفتن در خشک کن هوای گرم از

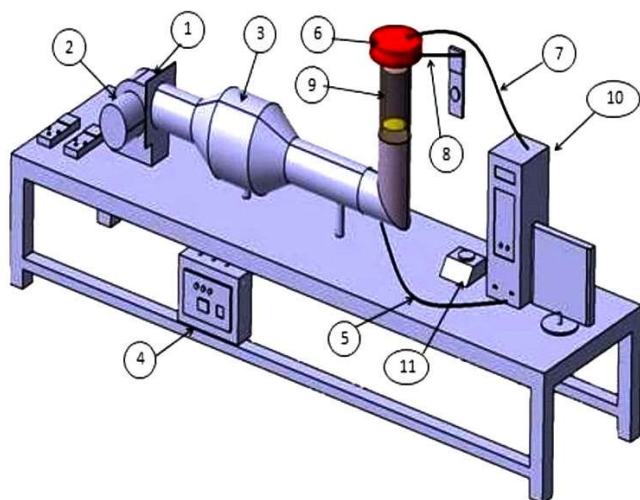
می‌یابد. تجزیه و تحلیل تأثیر سطح توان امواج فراصوت در سطح احتمال  $5\%$  بر روی پارامترهای کیفی محصول معنی‌دار بود، بنابراین پیش تیمار امواج فراصوت می‌تواند به‌عنوان یک روش غیرمخرب برای خشک کردن محصول سیب استفاده شود [۱۲]. فان و همکاران در مطالعه‌ای در تأثیر التراسوند روی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات گزارش نمودند، کاربرد فراصوت می‌تواند تغییر رنگ کل را کاهش و از دست دادن برخی عناصر مغذی بکاهد. همچنین گزارش نمودند، کاربرد التراسوند در طول فرایند خشک کردن همرفتی میوه‌ها و سبزیجات، زمان خشک شدن را کاهش و می‌تواند رطوبت موثر و ضریب انتقال جرم را افزایش دهد [۵]. محققان زیادی لیمو را با استفاده از روش‌های مختلف خشک کردن از جمله: وانگ و همکاران با استفاده از خشک کن وکیوم [۱۳]، صادقی و همکاران با استفاده از خشک کن‌های هوای گرم، مایکروویو و ترکیبی مایکروویو - هوای گرم [۱۴]، یوسفی و همکاران با استفاده از خشک کن مادون قرمز [۱۵]، ترکی هرچگان و همکاران با استفاده از خشک کن هوای گرم [۱۶]، مهیری و همکاران با استفاده از خشک کن‌های هوای گرم، مادون قرمز و مایکروویو [۱۷]، کسبی و همکاران با استفاده از خشک کن ترکیبی هوای گرم- مایکروویو [۱۸] و درویشی و همکاران با استفاده از خشک کن ترکیبی مایکروویو- هوای گرم [۱۹] خشک کردند. با توجه به آنچه گفته شد و اهمیت دانش نظری فرایند خشک کردن محصولات کشاورزی و عدم گزارش راجع به خصوصیات حرارتی لیمو ترش این تحقیق با هدف تعیین خواص حرارتی لیمو ترش تحت زمان‌های مختلف اعمال توان فراصوت  $10, 20, 40 \text{ min}$  و دماهای مختلف  $40, 55, 70^{\circ}\text{C}$ ، خشک کردن با محاسبه ضریب پخش رطوبت موثر، انرژی فعال سازی و انرژی مصرفی ویژه از طریق منحنی‌های سینیتیک خشک کردن انجام شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. آماده سازی نمونه‌ها

در این پژوهش پس از تهیه لیموها برای جلوگیری از کاهش رطوبت اولیه آن‌ها، نمونه‌های مورد آزمایش، درون یخچالی با دمای  $1^{\circ}\text{C} \pm 4$  نگهداری شده و حدود ۲ h قبل از انجام آزمایشات به منظور رسیدن به دمای اتاق نمونه‌ها از محیط انبار (یخچال)

ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ g استفاده شد.



شکل (۱) شماتیک خشک‌کن هوای گرم (۱) پنکه، (۲) الکترو موتور، (۳) بخاری الکتریکی، (۴) ترموستات و اینورتر، (۵) ثبت دما هوا ورودی، (۶) درب اتاقک خشک‌کن، (۷) سنسور سرعت هوا، (۸) سنسور ثبت دمای هوا خروجی، (۹) اتاق خشک‌کردن، (۱۰) کامپیوتر، (۱۱) ترازو دیجیتال و (۱۲) دستگاه فراصوت.

**Fig. 1** Schematic of convection dryer: 1) fan, 2) electromotor, 3) electrical heater, 4) thermostat and inverter, 5) input air temperature recorder, 6) chamber cap, 7) air velocity sensor, 8) outlet air temperature recorder, 9) drying chamber, 10) computer, 11) digital balance and 12) Ultrasound device.

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

### ۵.۲. مدل‌های ریاضی

برای تطبیق مدل‌های تجربی با داده‌های به‌دست آمده از آزمایش خشک کردن لیموترش از نرم افزار Curve Expert ۱/۴ استفاده شد. از ۱۴ مدل خشک‌کردن (جدول ۱) برای یافتن مناسب‌ترین مدل جهت تشریح رفتار خشک‌شدن لیموترش در خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت برازش داده شدند.

### ۶.۲. تعیین ضریب پخش رطوبت موثر

با فرض اینکه در فرایند خشک‌کردن لیموترش ضریب پخش رطوبت موثر ثابت و ورقه‌ای شکل است می‌توان مقدار آن را از رابطه (۲) محاسبه نمود [۱۳ و ۱۴]:

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

که در آن که در آن n تعداد جملات معادله (۱، ۲، ۳، ...)، t زمان

### ۳.۲. انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش ابتدا مخزن دستگاه حمام فراصوت با ۲L آب مقطر پر شد. سپس نمونه‌ها در پنج تکرار در داخل دستگاه در چهار زمان نمونه شاهد، ۱۰، ۲۰، و ۴۰ min تحت تاثیر امواج فراصوت قرار گرفتند. در مرحله بعد جهت خشک‌کردن نمونه‌های لیموترش دستگاه خشک‌کن به مدت نیم ساعت برای رسیدن به دمای تعادل پایدار زودتر روشن و نمونه‌های تیمار شده و شاهد در درون خشک‌کن هوای گرم با دماهای ۴۰، ۵۵، و ۷۰°C و سرعت ۱ m/s قرار گرفتند. درصد رطوبت نمونه‌ها در طول فرایند خشک‌شدن هر ۵ min از طریق وزن کردن به کمک ترازو تا رسیدن به وزن ثابت تا رطوبت ۱۰٪ بر پایه‌تر اندازه‌گیری شدند.

### ۴.۲. برازش منحنی‌های خشک کردن

نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طول خشک‌کردن لیموترش به وسیله رابطه (۱) محاسبه گردید [۲۱ و ۲۲]:

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

جدول (۱) مدل های لایه نازک مورد استفاده برای خشک کردن لیموترش.

Table 1 Thin layer models used for drying lemon.

| مدل ها<br>Models  | معادلات<br>Equations                           | رفرنس<br>Reference |
|---|--|--------------------|
| نیوتن (لوئیس)<br>Newton (Lewis)                           | $MR = \exp(-kt)$                               | [1]                |
| هندرسون و پابیس<br>Henderson and Pabis                    | $MR = a \exp(-kt)$                             | [3]                |
| اصلاح شده هندرسون و پابیس<br>Modified Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$ | [21]               |
| پیج<br>Page   | $MR = \exp(-kt^n)$                             | [13]               |
| لگاریتمی<br>Logarithmic                                   | $MR = a \exp(-kt) + c$                         | [19]               |
| دو قطبی<br>Two-term                                       | $MR = a \exp(-k_0t) - b \exp(-k_1t)$           | [20]               |
| دو قطبی نمایی<br>Two-term exponential                     | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$          | [23]               |
| تقریبی انتشار<br>Approximation of diffusion               | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$          | [24]               |
| ورما و همکاران<br>Verma et al.                            | $MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$           | [18]               |
| وانگ و سینگ<br>Wang and Singh                             | $MR = 1 + at + bt^2$                           | [25]               |
| میدلی و همکاران<br>Midilli et al.                         | $MR = a \exp(-kt^n) + bt$                      | [26]               |
| لجستیک<br>Logistic  | $MR = a / (1 + b \exp(kt))$                    | [27]               |
| دمیر و همکاران<br>Demir et al.                            | $MR = a \exp(-kt)^n + b$                       | [28]               |
| آغباشلو<br>Aghbashlo                                      | $MR = \exp\left(-\frac{at}{1+bt}\right)$       | [29]               |

با رسم  $\ln(MR)$  نسبت به زمان و مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه (۲) ضریب نفوذ را می توان به دست آورد.

$$K_1 = \left( \frac{D_{eff} \pi^2}{r_e^2} \right) \quad (5)$$

### ۷.۲. تعیین انرژی فعال سازی

با استفاده از معادله آرینوس رابطه بین دما و ضریب پخش رطوبت موثر حاصل می شود، می توان انرژی فعال سازی را به دست آورد [۲۹].

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_a}\right) \quad (6)$$

خشک شدن (s)، L ضخامت نمونه ها (m) و  $D_{eff}$  ضریب پخش رطوبت موثر ( $m^2/s$ ) است. وقتی  $t$  افزایش می یابد، تمام جملات به غیر از جمله اول، صفر می شوند در نتیجه خواهیم داشت [۳۱].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

بعد از ساده شدن، رابطه (۳) را با لگاریتم گیری می توان به صورت رابطه خطی (۴) نوشت [۲۱]:

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

اختلاف فشار (mbar). انرژی مصرفی ویژه لیموترش در خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید:

$$SEC = \frac{EU_{(mec+ter)}}{M_w} \quad (12)$$

که در آن SEC انرژی مصرفی ویژه (kwh/kg) و  $M_w$  کاهش وزن (kg). توان فراصوت با توجه به معادله (۱۳) محاسبه شد:

$$UP = UI \cos \Phi \quad (13)$$

که در آن UP توان فراصوت (kw)، U (V) و I (A) به‌ترتیب ولتاژ و جریان اعمال شده به ژنراتور فراصوت،  $\cos \Phi$  فاکتور قدرت برابر ۰/۸ است. بنابراین انرژی مصرفی ویژه برای فراصوت از معادله (۱۴) محاسبه شد.

$$SEC_{ult} = \frac{UPt}{m_{vult}} \quad (14)$$

$SEC_{ult}$  انرژی مصرفی ویژه برای فراصوت (kwh/kg)،  $m_{vult}$  مقدار انتقال جرم (kg) برای فراصوت می‌باشد. کل انرژی مصرفی ویژه برای خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت با استفاده از معادله (۱۵) به‌دست می‌آید [۳۶].

$$SEC_{total} = SEC_{ult} + SEC_{con} \quad (15)$$

$SEC_{total}$  انرژی مصرفی ویژه کل در خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت می‌باشد. در این پژوهش جهت تجزیه و تحلیل و انجام عملیات آماری از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد. هم‌چنین مقایسه میانگین سطوح آثار اصلی و برهمکنش متغیرها، بر اساس آزمون چند عاملی دانکن انجام گرفت.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. بررسی سینتیک خشک‌کردن لیموترش

رطوبت اولیه لیموترش تازه حدود ۸۵/۸۸٪ بر پایه تر خشک به‌دست آمد. نمونه‌های لیمو تا رطوبت ۱۰٪ بر پایه تر، خشک شدند. منحنی‌های خشک‌کردن لیمو در خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت در چهار سطح زمانی ۰ (شاهد)، ۱۰، ۲۰

$E_a$  انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)،  $R_g$  ثابت جهانی گازها که برابر  $(8/3143 \text{ kJ/mol})$ ،  $T_a$  دمای هوای داخل محفظه خشک‌کن (K)،  $D_0$  عرض از مبدا که مقدار آن ثابت است. با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله (۶) معادله به صورت زیر در می‌آید [۱]:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

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

$$K_1 = \left( \frac{E_a}{R_g} \right) \quad (8)$$

#### ۸.۲. تعیین انرژی مصرفی ویژه

طی آزمایش‌ها برای محاسبه میزان انرژی مصرفی ویژه برای دفع یک کیلوگرم از محصول لیموترش از روابط استفاده می‌کنیم. میزان انرژی ویژه مصرفی در خشک‌کن هوای گرم با پیش‌تیمار فراصوت از سه منبع برای تامین انرژی استفاده می‌کند. این انرژی‌ها شامل انرژی تامین‌کننده حرارت (انرژی حرارتی)، انرژی دمنده (انرژی مکانیکی) و انرژی توان فراصوت. انرژی تامین‌کننده حرارت از رابطه (۹) به‌دست می‌آید [۳۲]:

$$EU_{ter} = (A.v.C_{pa} \cdot \rho_a \cdot \Delta T \cdot t) \quad (9)$$

که در این رابطه،  $EU_{ter}$  انرژی مصرفی حرارتی (Kwh/kg)، A سطح سینی ( $m^2$ )، U سرعت هوای ورودی (m/s)،  $C_{pa}$  حرارت مخصوص ( $kJ/kgC$ )،  $\rho_a$  تراکم هوا ( $kg/m^3$ )،  $\Delta T$  اختلاف دما ( $^{\circ}C$ )، t زمان خشک‌کردن (h). هم‌چنین مقدار  $\rho_a$  از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$\rho_a = \frac{101.325}{0.287T} \quad (10)$$

انرژی مکانیکی به‌دست آمده از دمنده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۳۴]:

$$EU_{mec} = \Delta P \cdot M_{air} \cdot t \quad (11)$$

که در آن  $EU_{mec}$  انرژی مصرفی مکانیکی (kwh/kg) و  $\Delta P$

که مدل میدلی و همکاران به علت بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقدار  $\chi^2$  و RMSE دارای بهترین برازش با داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها است. نتایج مشابهی در مطالعه‌ای صورت گرفته بر روی لیمو به دست آمد که در آن مدل میدلی و همکاران، برای بیان رفتار خروج رطوبت از لیمو پیشنهاد شد [۱۶]. هم‌چنین درویشی و همکاران برای برازش خشک کردن تکه‌های لیمو از شش مدل استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که مدل میدلی و همکاران بهترین برازش را داشت [۱۹].

### ۳.۳. تحلیل آماری

نتایج تجزیه واریانس میانگین‌های سطوح آثار اصلی و اثرات متقابل آن‌ها بر ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن لیموترش در جدول (۳) گزارش شده است. مشاهده می‌شود که اثر عامل‌های اصلی (زمان اعمال توان فراصوت و دمای هوای ورودی خشک‌کن) و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ بر خشک شدن لیموترش معنی‌دار شده‌اند، که بیانگر این است که با ۹۹٪ اطمینان می‌توان گفت بین میانگین تیمارها اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

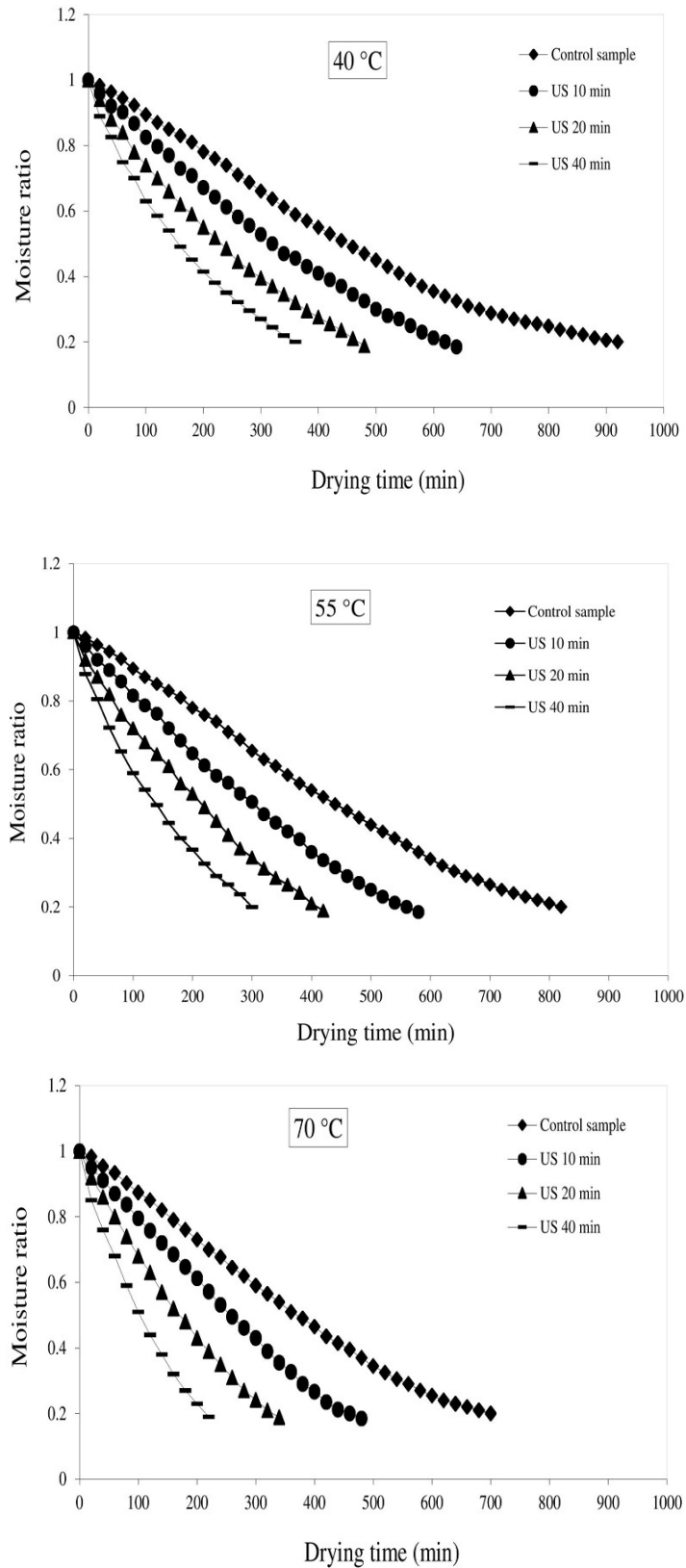
### ۴.۳. ضریب پخش موثر رطوبت

ضریب پخش موثر رطوبت برای محصولات کشاورزی بین  $10^{-12}$  و  $10^{-8}$   $m^2/s$  می‌باشد [۲۸]. مقادیر به دست آمده برای ضریب پخش موثر رطوبت در شکل (۳) گزارش شده است. بیشترین مقدار ضریب پخش موثر رطوبت ( $2/00 \times 10^{-10}$   $m^2/s$ ) در دمای  $70^\circ C$  و پیش تیمار فراصوت با مدت زمان ۴۰ min و کمترین مقدار ضریب پخش موثر ( $5/04 \times 10^{-11}$   $m^2/s$ ) در دمای  $40^\circ C$  و نمونه شاهد، به دست آمد. مشاهده شد با افزایش دمای محفظه خشک‌کن و مدت زمان اعمال پیش تیمار فراصوت مقدار ضریب پخش موثر رطوبت به دلیل از دست رفتن سریعتر آب افزایش یافت [۴۱]. در تحقیقاتی که بر روی برگ توت در خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار فراصوت صورت گرفت، مشاهده شد که با افزایش دما و مدت زمان اعمال توان فراصوت مقدار ضریب پخش موثر رطوبت افزایش یافت [۳۹]. تائو و همکاران، برای خشک کردن سیر در یک خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار فراصوت مقدار ضریب پخش موثر رطوبت بین  $1/54 \times 10^{-10}$  تا  $13/30 \times 10^{-10}$   $m^2/s$  به دست آوردند [۴۲]. گامبا سانتاس و

و  $40$  min، دمای هوای ورودی در سه سطح  $55$ ،  $40$ ،  $70^\circ C$  و با سرعت هوای ثابت  $1$  m/s در شکل (۲) آورده شده است. با افزایش توان فراصوت و دمای هوا به خشک‌کن، نرخ خشک کردن افزایش و زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. با افزایش دمای هوای ورودی رطوبت محصول کاهش یافت، این موضوع می‌تواند به دلیل تبخیر سریع رطوبت سطحی به علت ضرایب بالای انتقال گرما و جرم در فرایند خشک کردن باشد. می‌توان بیان کرد که نرخ خشک کردن در مرحله اول فرایند خشک کردن بسیار بالا است اما هنگامی که رطوبت سطحی تبخیر شد، نرخ خشک کردن به صورت تابع نمایی کاهش یافت (شکل ۲). هم‌چنین افزایش زمان اعمال توان فراصوت سبب تغییرات (تخریب) بیش‌تر در بافت محصول شده و لایه سخت در طول فرایند خشک شدن در این محصول تشکیل نمی‌گردد و محصول سریع‌تر خشک می‌شود. پیش تیمار فراصوت با اعمال پدیده کاویتاسیون درون محصول سبب انبساط و انقباض‌های شدید در محصول شده و این انبساط‌ها و انقباض‌ها ساختار محصول را شبیه به بافت اسفنجی می‌کند. تشکیل این بافت اسفنجی خروج سریع‌تر رطوبت را نسبت به حالت شاهد خواهد داشت. نواکا و همکاران، از یک خشک‌کن هوای گرم با دمای  $70^\circ C$  و سرعت هوای ورودی  $1/5$  m/s با پیش تیمار فراصوت در چهار سطح ۰ (شاهد)، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ min جهت خشک کردن سیب استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش نفوذپذیری رطوبت با افزایش زمان اعمال توان فراصوت است. هم‌چنین گزارش نمودند که زمان اعمال توان فراصوت اثر معنی‌داری بر زمان خشک شدن لیموترش دارد و با افزایش زمان اعمال توان فراصوت، زمان خشک شدن کاهش می‌یابد [۲۷]. این نتایج مشابه نتایج به دست آمده برای محصولات دیگری مانند سیب [۳۸]، برگ توت [۳۹]، دانه‌های انگور [۴۰] با استفاده از خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار فراصوت می‌باشد.

### ۲.۳. برازش مدل‌های نیمه تجربی سینتیک خشک کردن

۱۴ مدل ریاضی خشک کردن با داده‌های به دست آمده از آزمایش برای یافتن بهترین مدل جهت پیش‌بینی روند خشک شدن لیموترش مطابقت داده شد و بر اساس بیشترین مقدار برای  $R^2$  و کمترین مقدار برای  $\chi^2$  و RMSE مرتب شدند. مقادیر میانگین  $\chi^2$ ،  $R^2$  و RMSE برای تمامی مدل‌ها محاسبه و در جدول (۲) گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد



شکل (۲) تغییرات زمان خشک کردن با دماها و زمان‌های مختلف اعمال توان فراصوت  
Fig. 2 Changes in drying time with different temperatures and times of ultrasound power



جدول (۲) مقایسه مدل های ریاضی برای پیش بینی نسبت رطوبت لیموترش.

Table 2 Comparing mathematical models to predict the proportion of lemon moisture content.

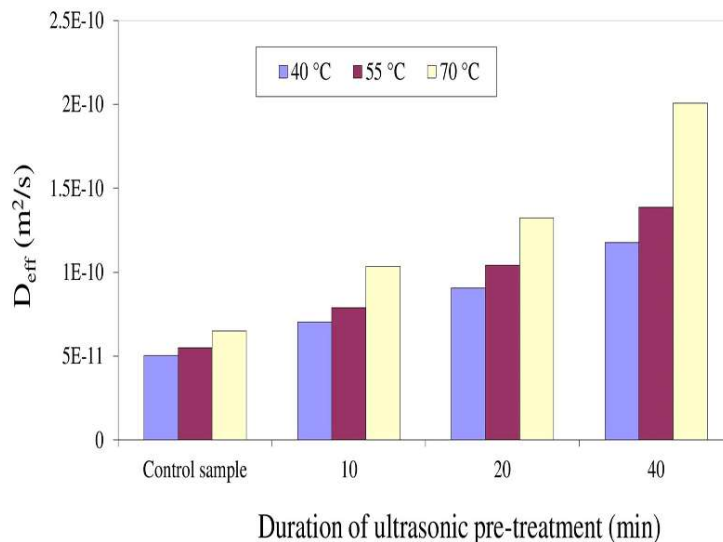
| مدل ها<br>Models  | ضریب تعیین<br>R <sup>2</sup> | ریشه میانگین مربعات خطا<br>RMSE | مربع کای<br>$\chi^2$ |
|---|------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| نیوتن (لوئیس)<br>Newton (Lewis)                           | 0.9979                       | 0.091                           | 0.0069               |
| هندرسون و پابیس<br>Henderson and Pabis                    | 0.9958                       | 0.131                           | 0.0102               |
| اصلاح شده هندرسون و پابیس<br>Modified Henderson and Pabis | 0.9953                       | 0.144                           | 0.0118               |
| پیج<br>Page   | 0.9990                       | 0.061                           | 0.0034               |
| لگاریتمی<br>Logarithmic                                   | 0.9992                       | 0.053                           | 0.0028               |
| دو قطبی<br>Two-term                                       | 0.9989                       | 0.065                           | 0.0037               |
| دو قطبی نمایی<br>Two-term exponential                     | 0.9940                       | 0.172                           | 0.0141               |
| تقریبی انتشار<br>Approximation of diffusion               | 0.9936                       | 0.181                           | 0.0156               |
| ورما و همکاران<br>Verma et al.                            | 0.9962                       | 0.119                           | 0.0092               |
| وانگ و سینگ<br>Wang and Singh                             | 0.9928                       | 0.197                           | 0.0171               |
| میدلی و همکاران<br>Midilli et al.                         | 0.9996                       | 0.032                           | 0.0009               |
| لجستیک<br>Logistic  | 0.9971                       | 0.108                           | 0.0081               |
| دمیر و همکاران<br>Demir et al.                            | 0.9983                       | 0.081                           | 0.0056               |
| آغباشلو<br>Aghbashlo                                      | 0.9987                       | 0.068                           | 0.0040               |

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس میانگین سطوح عامل های اصلی و اثرات متقابل آن ها بر ضریب پخش رطوبت موثر و انرژی مصرفی ویژه برای خشک کردن لیموترش.

Table 3 Variance analysis for mean of main factors and their interaction effects on effective moisture diffusion coefficient and specific energy consumption for drying Sour lemon.

| میانگین مربعات<br>MS    |                                    | درجه آزادی<br>DF        |                                    | منابع تغییرات<br>Sources of changes               |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---|
| انرژی مصرفی ویژه<br>SEC | ضریب پخش رطوبت<br>D <sub>eff</sub> | انرژی مصرفی ویژه<br>SEC | ضریب پخش رطوبت<br>D <sub>eff</sub> |   |
| 24092.22**              | 1.46×10 <sup>-20**</sup>           | 3                       | 3                                  | پیش تیمار فراصوت<br>Ultrasound pre-treatment (US) |
| 15091.69**              | 5.97×10 <sup>-21**</sup>           | 2                       | 2                                  | دمای هوای<br>Air temperature (AT)                 |
| 1170.83**               | 7.03×10 <sup>-22**</sup>           | 6                       | 6                                  | زمان اعمال فراصوت، دمای هوا<br>US×AT              |
| 0.0004                  | 3.01×10 <sup>-24</sup>             | 24                      | 24                                 | خطا<br>Error                                      |
| -                       | -                                  | 35                      | 35                                 | کل<br>Total                                       |

\*\* معنی داری در سطح احتمال ۱٪ را نشان می دهد.



شکل (۳) مقدار ضریب پخش موثر رطوبت در دماهای هوای ورودی و زمان‌های اعمال توان فراصوت  
**Fig. 3** The amount of effective moisture diffusivity at the inlet air temperatures and ultrasound power

### ۶.۳. انرژی مصرفی ویژه

شکل (۴) اثر پیش تیمار فراصوت بر انرژی مصرفی ویژه در دماهای مختلف خشک کردن نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل فوق پیدا است مقدار پارامتر انرژی مصرفی ویژه با افزایش دما روند نزولی را از خود نشان می‌دهد به طوری که بیشترین مقدار انرژی مصرفی به میزان ۲۴۰/۴۶ kwh/kg در دمای ۴۰°C و در تیمار شاهد و کمترین مقدار آن به میزان ۴۷/۳۹ kwh/kg در دمای ۷۰°C و در حالت بکارگیری پیش تیمار فراصوت به مدت ۴۰ min به دست آمد. هم‌چنین تیمار شاهد در تمامی دماها بالاترین میزان انرژی مصرفی مورد نیاز را به خود اختصاص داده است که دلیل این امر می‌تواند خروج کم رطوبت از محصول در حال خشک شدن و افزایش زمان خشک شدن باشد. محصولات مواد غذایی مانند لیموترش که هنگام خروج رطوبت از آن‌ها لایه سخت سطحی تشکیل داده و به دنبال آن خروج رطوبت از محصول با کندی اتفاق می‌افتد. اعمال پیش تیمارهای مختلف سبب عدم تشکیل این لایه سخت سطحی شده و به دنبال آن خروج رطوبت از سطح محصول بیشتر شده و زمان خشک شدن و در نهایت میزان انرژی مخصوص مصرفی کاهش می‌یابد [۴۴]. نتایج مشابهی در خشک کردن بنه [۲۸] و بابونه [۴۴] گزارش شده است که با افزایش دما میزان انرژی مصرفی ویژه روند کاهشی داشت. هم‌چنین نتایج مشابه دیگری در خشک کردن برگ جعفری [۴۵] و ذرت [۳۶] نشان داد که استفاده از

همکاران، بالاترین و پایین‌ترین مقدار ضریب پخش رطوبت موثر را به ترتیب  $2/29 \times 10^{-10}$  و  $0/76 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s در خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار فراصوت به دست آورند [۴۳].

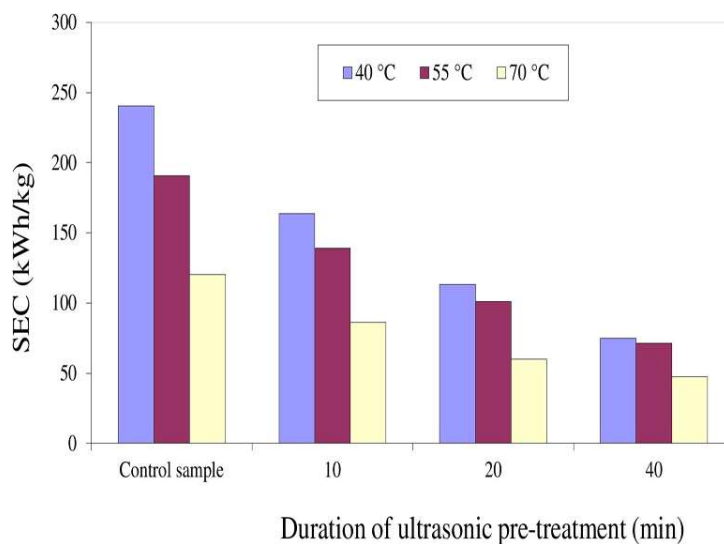
### ۵.۳. انرژی فعال‌سازی

میزان انرژی فعال‌سازی برای محصولات مختلف کشاورزی و مواد غذایی عمدتاً بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ kJ/mol گزارش شده است [۲۶]. انرژی فعال‌سازی و ضرایب تعیین برای شرایط مختلف خشک کردن در جدول (۴) آورده شده است. با رسم نمودار  $\ln(D_{eff})$  در مقابل  $1/T_{abs}$  خطی با شیب  $K_2$  به دست آمد. مقدار انرژی فعال‌سازی برای لیموترش بین ۳۶/۰۱ تا ۴۲/۹۷ kJ/mol محاسبه شد. مقادیر به دست آمده برای انرژی فعال‌سازی در مطالعات دیگر مورد بررسی قرار گرفت. برای مثال برای دانه‌های انگور در خشک‌کن هوای گرم با پیش تیمار فراصوت انرژی فعال‌سازی ۲۴/۴ تا ۳۲/۲ [۴۰] و برای توت فرنگی با خشک‌کن هوای گرم با اعمال توان فراصوت مقدار انرژی فعال‌سازی بین ۲۰/۶ تا ۲۱/۹ kJ/mol به دست آمد [۴۳]. آب در میوه‌ها و محصولات کشاورزی به دو صورت پیوندی و آزاد می‌باشد. دلیل پایین بودن انرژی فعال‌سازی لیموترش این است که در آب که بافت‌های لیموترش بیشتر به صورت سطحی و آزاد است و پیوند بین آب و مولکول‌ها لیموترش چندان قوی نیست، بنابراین انرژی کمی برای تبخیر آب در طی دوره خشک کردن نیاز دارد.

جدول (۴) مقدار انرژی فعال سازی و ضریب تعیین برای خشک کردن لیموترش.

Table 4 Activation energy and determination coefficient for drying lemon.

| ۴۰ دقیقه<br>40 min | ۲۰ دقیقه<br>20 min | ۱۰ دقیقه<br>10 min | نمونه شاهد<br>Control sample | پارامترها<br>Parameters                                |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|--|
| 38.20              | 34.93              | 36.01              | 42.97                        | انرژی فعال سازی (kJ/mol)<br>Activation energy (kJ/mol) |
| 0.9939             | 0.9776             | 0.9495             | 0.9943                       | ضریب تعیین<br>R <sup>2</sup>                           |



شکل (۴) تاثیر دما هوای ورودی و زمان های اعمال توان فراصوت بر مقدار انرژی مصرفی ویژه

Fig. 4 Effect of the temperature of the Incoming air and the times of applying ultrasound on the amount of energy consumed

بیشترین مقدار ضریب پخش موثر رطوبت  $2/0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  و کمترین مقدار آن  $5/04 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده اعمال پیش تیمار ۴۰ min توان فراصوت در تمامی دماها کمترین میزان انرژی مصرفی مورد نیاز را در خشک کردن لیموترش به خود اختصاص داد.

پیش تیمارهای مختلف می تواند سبب کاهش انرژی مصرفی در طول فرایند خشک کردن شود.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر زمان های مختلف توان فراصوت و دمای خشک کردن روی خصوصیات حرارتی و سینتیکی لیموترش بررسی شد. در مدل سازی ریاضی، مدل میدیلی و همکاران منحنی داده های تجربی خشک کردن را دقیق تر از سایر مدل ها برازش کرد. این مدل قادر بود رفتار خشک شدن نمونه های لیموترش را با توجه به مقادیر  $(R^2=0/9996)$ ،  $(\chi^2=0/0009)$  و  $(RMSE=0/032)$  برآورد کند. با افزایش دمای هوا و زمان اعمال پیش تیمار فراصوت زمان خشک کردن کاهش پیدا کرد. همچنین ضریب پخش رطوبت موثر لیمو ترش با افزایش دمای محفظه خشک کن و مدت زمان اعمال پیش تیمار فراصوت افزایش یافت؛

## منابع

vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slice. *J. Food Eng.*, 224, 129-138.

[14] Sadeghi, M., Kesbi O.M., Mireei S.A. (2012). Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices. *J. Sci. Food Agric.*, 93, 471-478.

[۱۵] یوسفی، ع؛ قاسمیان، ن؛ سالاری، ا. (۱۳۹۶) مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن برش‌های لیموترش به روش تابش مادون قرمز با استفاده از شبکه‌های عصبی GMDH هیبریدی. فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، جلد ۵، شماره ۱، ص ۳۵-۶۰.

[16] Torki Harchegan, M., Sadeghi, M., Ghanbarian, D., Moheb, A. (2016). Characteristics of whole lemons in a convective hot air dryer. *Iran J. Chem. Eng.*, 35, 65-73.

[17] M'hiri, N. Ghali, R. Ben Nasr, I. & Boudhrioua, N. (2018). Effect of different drying processes on functional properties of industrial lemon byproduct. *Process Saf Environ Protec.*, 116, 450- 460.

[18] Kesbi, O.M., Sadeghi, M., Mireei, S.A. (2016). Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices. *Eng. Agri, Environ Food.*, 9, 216- 223.

[19] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S. (2014). Drying kinetics and colour change of lemon slices. *Int. Agrophys.*, 28, 1-6.

[20] AOAC, (1965). Official methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists (Vol. 9). The Association.

[21] Jahanbakhshi, A. (2018). Determine some engineering properties of snake melon (cucumis melo var. flexuosus). *Agri Eng Intl: CIGR J.*, 20, 171-176.

[22] Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Gundoshmian, T. M. (2018). Determination of physical and mechanical properties of carrot in order to reduce waste during harvesting and post-harvesting. *Food Sci. Nut.*, 6, 1898-1903.

[23] Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi Pirbalouti, A., Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renew Sustain Energy Rev.*, 58, 407-418.

[24] Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Compr Rev. Food Sci. Food Saf.*, 15, 599-618.

[25] Lakshmi, D.V.N., Muthukumar, P., Layek, A., Nayak, P.K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renew Energy.*, 120, 23-33.

[26] Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., Moghimi, M. B. F. (2018). The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and

[1] Torki-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.*, 52, 281-289.

[2] Lorente, J., Vegara, S., Martí, N., Ibarz, A., Coll, L., Hernández, J., Saura, D. (2014). Chemical guide parameters for Spanish lemon (*Citrus limon* (L.) Burm.) juices. *Food Chem.*, 162, 186-191

[3] Coşkun, S., Doymaz, İ., Tunçkal, C., Erdoğan, S. (2017). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. *Heat Mass Transfer.*, 53, 1863-1871.

[4] Siucińska, K., Konopacka, D. (2014). Application of ultrasound to modify and improve dried fruit and vegetable tissue – a review. *Drying Technol.*, 32, 1360-1368.

[5] Fan, K., Zhang, M., Mujumdar, A. S. (2017). Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrason Sonochem.*, 39, 47-57.

[6] Arvanitoyannis, I. S., Kotsanopoulos, K. V., Savva, A. G. (2017). Use of ultrasounds in the food industry- Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: A review. *Crit Rev. Food Sci. Nut.*, 57, 109-128.

[7] Rodríguez, Ó., Gomes, W., Rodrigues, S., Fernandes, F. A. (2017b). Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant activity, organic acids and drying kinetics of pineapple. *Ultrason Sonochem.*, 35, 92-102.

[8] Kowalski, S. J., Pawłowski, A., Szadzińska, J., Łechtańska, J., Stasiak, M. (2016). High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. *Innov Food Sci. Emerg. Technol.*, 34, 225-233.

[9] Azoubel, P. M., Baima, M. D. A. M., da Rocha Amorim, M., Oliveira, S. S. B. (2010). Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *J. Food Eng.*, 97, 194-198.

[10] Dujmić, F., Brnčić, M., Karlović, S., Bosiljkov, T., Ježek, D., Tripalo, B., Mofardin, I. (2013). Ultrasound-assisted infrared drying pear slice: textural issues. *J. Food Process Eng.*, 36, 397-406.

[11] Kowalski, S. J., Pawłowski, A. (2015). Intensification of apple drying due to ultrasound enhancement. *J. Food Eng.*, 156, 1-9

[12] Santacatalina, J. V., Contreras, M., Simal, S., Cárcel, J. A., Garcia-Perez, J. V. (2016). Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple. *Ultrason Sonochem.*, 28, 100-109.

[13] Wang, J., Law, C.L., Nema, P. K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z., Gao, Z.J., Xiao, H.W. (2018). Pulsed

- sensory properties of dried apple. *J. Food Process Eng.*, 39, 256-265.
- [39] Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kadam S.U., Han Y., Wang J., Zhou, J. (2016). Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrason Sonochem.*, 31, 310-318.
- [40] Clemente, G., Sanjuan, N., Carcel, J.A., Mulet, A. (2014). Influence of temperature, air velocity, and ultrasound application on drying kinetics of grape seeds. *Drying Technol.*, 32, 68-76.
- [41] Zielinska, M., Markowski, M. (2018). The effect of microwave-vacuum, ultrasonication and freezing on mass transfer kinetics and diffusivity during osmotic dehydration of cranberries. *Drying Technol.*, 36, 1158-1169.
- [42] Tao, Y., Zhang, J., Jiang, S., Xu, Y., Show, P., Han, Y., Ye, X., Ye, M. (2018). Contacting ultrasound enhanced hot-air convective drying of garlic slices: Mass transfer modeling and quality evaluation. *J. Food Eng.*, 235, 79- 88.
- [43] Gamboa-Santos, J., Montilla, A., Cárcel, J. A., Villamiel, M., Garcia-Perez J.V. (2014). Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry. *J. Food Eng.*, 128, 132-139.
- [44] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Convers Manage.*, 87, 711-725.
- [45] Sledz, M., Wiktor, A., Rybak, K., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D. (2016). The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics.*, 103, 148-156.
- thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *J. Food Process Eng.*, 41, e12868.
- [27] Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *J. Food Eng.*, 113, 427-433.
- [28] Kaveh, M., Abbaspour-Gilandeh, Y., Amir Chayjan, R., Taghinezhad, E., Mohammadigol, R. (2018) Mass transfer, physical, and mechanical characteristics of terebinth fruit (*Pistacia atlantica* L.) under convective infrared microwave drying. *Heat Mass Transfer.*, 54, 1879-1899.
- [29] Rad, S.J., Kaveh, M., Sharabiani, V.R., Taghinezhad, E. (2018). Fuzzy logic, artificial neural network and mathematical model for prediction of white mulberry drying kinetics. *Heat Mass Transfer.*, 54, 3361-3374.
- [30] Kayran, S., Doymaz, I. (2017). Determination of drying kinetics and physicochemical characterization of apricot pomace in hot-air dryer. *J. Therm Anal Calorim.*, 130, 1163-1170.
- [31] Deepika S. Sutar P. P. (2018). Combining osmotic-steam blanching with infrared-microwave-hot air drying: Production of dried lemon (*Citrus limon* L.) slices and enzyme inactivation. *Drying Technol.*, 36, 1719-1737.
- [32] Motevali, A., Jafari, H., Hashemi, J. (2018). Effect of IR intensity and air temperature on exergy and energy at hybrid infrared-hot air dryer. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, 24, 31-42.
- [33] Beigi, M., Torki-Harchegani, M., Tohidi, M. (2017). Experimental and ANN modeling investigations of energy traits for rough rice drying. *Energy.*, 141, 2196-2205.
- [34] Tohidi, M., Sadeghi, M., Torki-Harchegani, M. (2017). Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. *Renew Sustain Energy Rev.*, 70, 519-528.
- [35] Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., Chen, G. (2018). Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure. *J. Food Process Eng.*, 41, e12686.
- [36] Abdoli, B., Zare, D., Jafari, A., Chen, G. (2018). Evaluation of the air-borne ultrasound on fluidized bed drying of shelled corn: Effectiveness, grain quality, and energy consumption. *Drying Technol.*, 36, 1749-1766.
- [37] Liu, Y., Sun, Y., Miao, S., Li F., Luo, D. (2015). Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of Flos Lonicerae. *J. Food Sci. Technol.*, 52, 4955-4964.
- [38] Fijalkowska, A., Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Witrowa- Rajchert, D. (2016). Ultrasound as a pretreatment method to improve drying kinetics and