

# تأثیر تابش مادون قرمز نزدیک با پیش تیمار فراصوت بر سینتیک خشک شدن گیاه غازیاغی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

علی حسن پور<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل آخوندزاده یامچی<sup>۱</sup>، عادل حسین پور<sup>۱</sup>، عادل رضوانی وند فنائی<sup>۱</sup>، فاطمه خیاطی نژاد<sup>۱</sup>

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\* مسئول مکاتبه: a.hassanpour@urmia.ac.ir

## چکیده

گیاهان با برگ سبز به دلیل رطوبت بالا، فصلی و فاسدشدنی هستند. حفظ و نگهداری صحیح می‌تواند از هدر رفت این محصولات جلوگیری کرده و در دسترس بودن آن‌ها را در خارج از فصل تولید افزایش دهد. با خشک کردن کنترل شده و مناسب می‌توان مواد مغذی و همچنین عطر و رنگ را در برگ‌های خشک شده حفظ نمود. هدف از این تحقیق بررسی اثر موج مادون قرمز نزدیک حین خشک کردن گیاه غازیاغی به همراه پیش تیمار فراصوت بر سینتیک خشک شدن، تغییرات رنگ، جذب مجدد رطوبت و خواص ترمودینامیکی می‌باشد. برگ‌های غازیاغی در یک خشک کن مادون قرمز در سه دمای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس و سه زمان پیش تیمار فراصوت صفر، ۵ و ۱۰ دقیقه تا رسیدن به محتوی رطوبتی ۱۰٪ بر پایه تر خشک شدند. نتایج نشان داد افزایش دما و مدت زمان پیش تیمار فراصوت موجب افزایش سرعت خشک شدن و نرخ خشک شدن می‌گردد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای غازیاغی در تمامی نمونه‌ها با پیش تیمار فراصوت و دما رابطه مستقیم داشته به طوری که با افزایش دما و پیش تیمار فراصوت میزان ضریب انتشار رطوبت افزایش یافت. انرژی فعال سازی در طی خشک کردن با افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش پیدا کرد. تغییرات رنگ و شاخص قهوه‌ای برگ‌های غازیاغی با افزایش دما و کاهش مدت پیش تیمار فراصوت افزایش یافت در حالی که مقدار کروما کاهش یافت. آنتالپی و آنتروپی با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش یافتند، در حالی که انرژی آزاد گیبس افزایش پیدا کرد. واژه‌های کلیدی: امواج فراصوت، غازیاغی، خشک کن مادون قرمز، خواص ترمودینامیکی.

---

## How to cite:

Hassanpour, A., Akhondzadeh Yamchi, A., Hosainpour, A., Rezvanivand Fanaie, A. and Khayyatinejhad, F. (2024). The effect of near-infrared radiation drying with ultrasound pretreatment on the drying kinetics of *Falcaria*, Journal of Agricultural Mechanization 9 (1):53-66.

# The Effect of Near-Infrared Radiation Drying with Ultrasound Pretreatment on the Drying Kinetics of *Falcaria*

Ali Hassanpour<sup>1\*</sup>, Abolfazl Akhoundzadeh Yamchi<sup>1</sup>, Adel Hosainpour<sup>1</sup>, Adel Rezvanivand Fanaie<sup>1</sup>, Fatemeh Khayyatnejhad<sup>1</sup>

Received: November 7, 2023

Accepted: August 11, 2024

1- Department of Mechanical Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

\*Corresponding author: a.hassanpour@urmia.ac.ir

## Abstract

Plants with green leaves are seasonal and perishable due to high humidity. Proper maintenance can prevent the wastage of these products and increase their availability outside the production season. With controlled and proper drying, nutrients as well as aroma and color can be preserved in the dried leaves. The purpose of this research is to investigate the effect of drying *Falcaria* with an infrared dryer with the help of ultrasound pre-treatment on drying kinetics, color changes, reabsorption of moisture, and thermodynamic properties. *Falcaria* leaves were dried in an infrared dryer at three temperatures of 40, 45, and 50 C and three ultrasonic pre-treatment times of zero, 5, and 10 minutes until reaching a moisture content of 10% wet based. The results showed that increasing the temperature and duration of ultrasound pre-treatment increases the drying rate. The effective moisture diffusion coefficient for *Falcaria* in all samples has a direct relationship with the ultrasonic pre-treatment and temperature. Hence, the effective moisture diffusivity increased with the increase in temperature and ultrasonic pre-treatment. The activation energy during drying is reduced with the increased duration of ultrasound pre-treatment. The changes in color and brown index of *Falcaria* leaves increased with increasing temperature and decreasing duration of ultrasound pre-treatment, while the amount of chroma decreased. Enthalpy and entropy decreased with increasing drying temperature and ultrasound pre-treatment time, while Gibbs free energy enhanced.

**Keywords:** *Falcaria*, Infrared Dryer, Thermodynamic Properties, Ultrasound Waves.

آن‌ها را ترجیح می‌دادند. استفاده از گیاهان دارویی از دیرباز در ایران نیز به‌طور سنتی رواج داشته است (Shackebaei & Godini, 2009).

حفظ کیفیت مواد مغذی در فراوری و نگهداری محصولات کشاورزی به‌ویژه گیاهان دارویی، بسیار مورد توجه است. روش نگهداری و آماده‌سازی محصول ممکن است به میزان قابل توجهی غلظت و دسترس‌پذیری ترکیبات ضروری غذا را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین انتخاب شرایط مناسب فرآوری برای به حداقل رساندن آفت مواد مغذی و افزایش کیفیت نهایی در انتهای فرآیند، اولویت داشته و از اهمیت خاصی برخوردار است (Babiker et al., 2018). سبزیجات با برگ سبز به دلیل رطوبت بالا، فصلی و فاسدشدنی هستند. حفظ و نگهداری صحیح می‌تواند از هدر رفت این محصولات جلوگیری کرده و در دسترس بودن آن‌ها را در خارج از فصل تولید افزایش دهد. با خشک کردن کنترل شده و مناسب می‌توان مواد مغذی و همچنین عطر و رنگ را در برگ‌های خشک شده حفظ کرد (Gutti et al., 2012). خشک کردن محصولات کشاورزی همواره یکی از قدیمی‌ترین و بهترین روش‌های ذخیره مواد غذایی است. نیاز فراوان به تولید

## ۱- مقدمه

گیاه غازی<sup>۱</sup>، از خانواده چتریان<sup>۲</sup> در حاشیه مزارع می‌روید و در برخی مناطق ایران به‌عنوان سبزی مصرف می‌شود. این گیاه در غرب ایران به‌عنوان پاجازه معروف است و برای درمان زخم‌های پوستی، زخم معده، بیماری‌های کبدی و سنگ کلیه و کیسه صفرا به کار می‌رود. بررسی‌های علمی اندکی در مورد خواص درمانی و ترکیبات تشکیل دهنده این گیاه وجود دارد (Yadegari et al., 2007). غازی گیاهی دوساله است که می‌تواند تا ارتفاع ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر رشد کند (Shackebaei & Godini, 2009). وجود تانن، ساپونین و ترکیبات موجود در این گیاه دارای خاصیت کاهندگی گلوکز خون هستند (Rafiey et al., 2017). طب گیاهی یکی از رایج‌ترین روش‌های درمانی در پزشکی تکمیلی می‌باشد. بر طبق آمار سازمان بهداشت جهانی در سال ۱۹۷۸ حدود ۸۰ درصد از مردم دنیا برای مراقبت‌های اولیه بهداشتی خود، مصرف عصاره گیاهی و یا ماده مؤثر

<sup>1</sup> *Falcaria vulgaris*

<sup>2</sup> Umbelliferae

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خشک کردن

در این پژوهش گیاه غازی از باغات اطراف شهر ارومیه استان آذربایجان غربی به صورت دستی جمع‌آوری گردید. سپس برگ‌های آن جدا و سورت شد، به صورتی که تمام برگ‌ها عاری از هرگونه آفت بودند. برای جلوگیری از فساد برگ‌ها در طول آزمایش‌ها، نمونه‌ها در یخچال با دمای  $4^{\circ}\text{C}$  نگهداری شدند (Akhoundzadeh Yamchi et al., 2019). برای تعیین رطوبت اولیه گیاه غازی بر اساس استاندارد AOAC درون آن همرفتی در دمای  $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت خشک شد و در نهایت میانگین رطوبت اولیه غازی برحسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک محاسبه و تعیین گردید (Tagnamas et al., 2020; Latimer., 2023). لازم به ذکر است درصد رطوبت اولیه برگ‌های غازی بر پایه‌ی خشک محاسبه گردید (Khallaf & El-Sebaii, 2022)، که مقدار آن  $2/36 \pm 0/05$  بر پایه خشک به دست آمد.

فرآیند خشک کردن به وسیله خشک‌کن مادون قرمز گیاهان دارویی شرکت مهندسی و طراحی گروک ایران مدل GC400 انجام شد. این خشک‌کن دارای گرمایش تابش موضعی، راندمان حرارتی بالا، قابلیت برنامه‌دهی آسان و سیستم کنترل دما و رطوبت با قابلیت برنامه‌ریزی و کارایی بالا است. از چهار لامپ حبایی مادون قرمز نزدیک با توان‌های ۲۵۰ وات جهت خشک کردن گیاه غازی استفاده گردید. دمای هوا و رطوبت درون خشک‌کن توسط سنسورهای داخل خشک‌کن کنترل می‌شد. از یک سامانه فراصوت هوازی ساخت شرکت فراصوت زاگرس ایران با بسامد ۲۰ کیلوهرتز و توان ۲۰ کیلووات برای نفوذ به درون بافت غازی استفاده گردید. پیش‌تیمار فراصوت در سه سطح (۱): بدون اعمال پیش‌تیمار (۲): ۵ دقیقه و (۳): ۱۰ دقیقه بر روی نمونه‌ها انجام شد. سپس نمونه‌هایی به وزن حدود  $20 \pm 0/1$  گرم به صورت یکنواخت و لایه‌نازک با ضخامت  $0/5$  سانتی‌متر در یک سینی مشبک ( $25 \times 25$  سانتی‌متر) درون خشک‌کن مادون قرمز قرار داده شدند. تغییرات جرم در فرآیند خشک شدن با استفاده از ترازوی دیجیتالی با قابلیت اتصال به رایانه با دقت  $0/001$  گرم اندازه‌گیری و بافاصله زمانی ۲۰ دقیقه ثبت شد. خشک‌کن مادون قرمز قبل از شروع هر آزمایش روشن می‌گردید تا به شرایط پایدار و یکنواختی برسد. جهت بررسی اثر خشک‌کن مادون قرمز، گیاه غازی در سه سطح دمای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس، در فاصله ۲۰ cm از لامپ‌های مادون قرمز و در سه

محصولات باکیفیت بالا منجر به ترکیب روش‌های خشک کردن قدیمی با منابع انرژی غیرحرارتی شده است. در این میان انرژی فراصوت به دلیل قابلیت انجام در دمای محیط و حفظ خصوصیات اصلی و کیفیت محصولات مورد استقبال محققین مختلف قرار گرفته است (Simal et al., 1998). در استفاده از امواج فراصوت، این موج دهی به‌عنوان یک پیش مرحله قبل از فرآیند اصلی خشک کردن می‌باشد. مهم‌ترین مزیت این روش در کاربرد آن در دمای معمولی و آسیب نرساندن به بافت محصول می‌باشد (Mason et al., 1996). جیانگ و همکاران اثرات پیش تیمارهای فراصوت بر فرآیند خشک کردن گل جالیزی<sup>۱</sup> از طریق خشک کردن خلاء-مادون قرمز را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نمونه‌های تحت پیش تیمار فراصوت نسبت به نمونه‌های بدون پیش تیمار دارای آهنگ خشک شدن و ضریب نفوذ موثر رطوبت بالاتر بودند. علاوه بر این، گلیکوزید فینلاتانونید، ایریدونید، پلی ساکارید، فنل کل و فلاونوئید کل در گل جالیزی پس از پیش تیمار فراصوت به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (C. Jiang et al., 2022). زانگ و همکاران اثرات دما، توان و فرکانس فراصوت بر روی انتقال رطوبت، کیفیت فیزیکی شیمیایی و ریزساختار سنبل خطائی<sup>۲</sup> با استفاده از خشک کردن خلاء-مادون قرمز دور به کمک فراصوت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زمان خشک شدن نمونه‌ها با مادون قرمز دور به کمک فراصوت در مقایسه با نمونه‌های بدون فراصوت به میزان  $1/18/2$  تا  $50/10$ ٪ کاهش یافت. در این پژوهش برای برازش سینتیک خشک کردن، مدل میدلی بهترین مدل برای همه نمونه‌ها در مقایسه با سایر مدل‌ها بود. پس از تیمار فراصوت، رنگ، نسبت آب‌رسانی مجدد، مواد مؤثره طبیعی، فنول کل، فلاونوئید کل، پلی ساکاریدها، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و نسبت چروکیدگی محصولات خشک به‌طور قابل توجهی کاهش یافت (Zang et al., 2023).

با توجه به این‌که غازی جزو سبزیجات و گیاهان دارویی برگی پرمصرف و مهم در ایران می‌باشد و گیاهی فصلی بوده و دارای رطوبت بالا می‌باشد، به سبب آن دارای مدت ماندگاری بسیار کوتاهی می‌باشد. از طرفی تاکنون تحقیقی در مورد خشک شدن غازی با مادون قرمز و پیش تیمار فراصوت به‌منظور افزایش ماندگاری به همراه حفظ کیفیت مشاهده نشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر مادون قرمز در خشک‌کن به کمک پیش تیمار فراصوت بر روی سینتیک خشک شدن، تغییرات رنگ، جذب مجدد رطوبت و خواص ترمودینامیکی در دماهای خشک کردن و مدت‌زمان‌های پیش تیمار مختلف گیاه غازی می‌باشد.

<sup>1</sup> Cistanche

<sup>2</sup> Angelca Sinensis

در این رابطه‌ها،  $C$  خلوص رنگ (کروما)،  $\Delta E$  تغییرات کلی رنگ،  $BI$  شاخص قهوه‌ای شدن،  $L_0^*$  روشنایی،  $a_0^*$  قرمزی/سبزی و  $b_0^*$  زردی/آبی قبل از خشک شدن و،  $L^*$  روشنایی،  $a^*$  قرمزی/سبزی و  $b^*$  زردی/آبی بعد از خشک شدن را نشان می‌دهند.

### ۲-۳- جذب مجدد آب (RR)

برای بررسی جذب مجدد آب نمونه‌ها از روش ارائه‌شده توسط دویماز استفاده گردید. بدین‌صورت که ۲/۵ گرم نمونه خشک‌شده در ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر به در دماهای ۲۵ و ۶۵ درجه سلسیوس غوطه‌ور شد (Doymaz, 2017). پس از مدت ۳۰۰ دقیقه، نمونه‌ها برداشته شدند. سپس با دستمال جاذب رطوبت، آب اضافی روی سطح نمونه‌ها رفع شد و با ترازوی دیجیتال وزن شدند. جذب مجدد آب با توجه به معادله (۷) محاسبه شد (Chikpah et al., 2022).

$$RR = \frac{W_2}{W_1} \quad (7)$$

RR جذب مجدد رطوبت،  $W_2$  وزن نمونه‌ها بعد از جذب رطوبت و  $W_1$  وزن نمونه‌های خشک می‌باشد.

### ۲-۴- ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال‌سازی و

#### خواص ترمودینامیکی

تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت یک ویژگی مهم در مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی و دیگر مواد است که تابع درجه حرارت و رطوبت مواد می‌باشد. قانون دوم فیک طبق معادله (۸) برای شرایط ناپایدار می‌تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک‌کردن را توصیف کند (Öztekın et al., 2022).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (8)$$

که در آن،  $M$  مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک،  $t$  زمان و  $x$ ،  $y$  و  $z$  مختصه‌های فضایی هستند. در قانون فیک فرض می‌گردد که فرآورده‌ی غذایی تک‌بعدی، دارای رطوبت اولیه‌ی یکنواخت و حرکت درونی رطوبت همانند مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است (Crank, 1979). ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای یک تیغه با استفاده از معادله (۹) به دست می‌آید (Tagnamas et al., 2020). جایی که  $MR$  نسبت رطوبت،  $D_{eff}$  انتشار مؤثر رطوبت ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )،  $L$  نیمه ضخامت در نمونه ( $m$ ) و  $n$  عدد صحیح مثبت است. با افزایش

تکرار تا رسیدن نمونه‌ها به رطوبت ۱۰٪ بر پایه‌تر انجام شد. نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن غازی در هر لحظه به کمک معادلات (۱) و (۲) محاسبه گردید (Akhoundzadeh Yamchi et al., 2022; Sharifian et al., 2023).

$$MR = \frac{m_e - m_t}{m_0 - m_t} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $MR$  محتوای رطوبتی،  $M_t$  مقدار رطوبت در زمان  $M_{0,t}$  مقدار رطوبت اولیه،  $M_e$  مقدار رطوبت تعادلی،  $DR$  نرخ خشک شدن،  $M_t$  مقدار رطوبت در لحظه‌ی  $M_{t+\Delta t}$  مقدار رطوبت در زمان  $t+\Delta t$  و  $\Delta t$  فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی برحسب دقیقه است.

### ۲-۲- رنگ سنجی

جهت بررسی تغییرات رنگ نمونه‌ها، از هر نمونه در هر دو حالت قبل و بعد از خشک شدن در دماهای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه به همراه نمونه بدون اعمال پیش تیمار فراصوت، ۵ عدد برگ غازی به‌طور تصادفی انتخاب و به‌وسیله سامانه رنگ‌سنج دیجیتال مدل CR 400 ساخت شرکت کونیکا مینولتا<sup>۱</sup> ژاپن مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای مدنظر اندازه‌گیری شد. پارامترهای  $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$  فضای رنگی CIELAB خوانده‌شده در دستگاه به‌صورت روشنایی (۰ = سیاه، ۱۰۰ = سفید)، محور رنگی به ترتیب از سبزی (-) به قرمز (+) و از آبی (-) به زرد (+) تعریف می‌شود (Gharkhloo Rostami et al., 2022). قبل از خواندن پارامترهای رنگ، دستگاه با صفحات استاندارد سیاه و سفید کالیبره شد. مقادیر کروما ( $C$ )، اختلاف رنگ کل ( $\Delta E$ ) و شاخص قهوه‌ای شدن ( $BI$ ) به ترتیب با استفاده از معادلات (۳) تا (۶) محاسبه گردید (Qing et al., 2023).

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (4)$$

$$X = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 0.3012b^*} \quad (5)$$

$$BI = \frac{100 \times (X - 0.31)}{0.17} \quad (6)$$

<sup>1</sup> Konica Minolta

$$\Delta H = E_a - RT \quad (15)$$

$$\Delta G = R \times T \times \ln \left( \frac{k \times h_p}{T \times K_B} \right) \quad (16)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (17)$$

که در آن‌ها،  $k_B$  و  $h_p$  به ترتیب ثابت‌های بولتزمن ( $1.3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ) و پلانک ( $0.6262 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$ ) هستند.

### ۳- نتایج و بحث

جدول ۱ تجزیه واریانس مربوط به اثر دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت را بر مدت‌زمان خشک شدن برگ گیاه غازی نشان می‌دهد. اثر مقادیر مختلف دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت در سطح احتمال ۱ درصد بر مدت‌زمان خشک شدن معنی‌دار بود.

شکل (۱) سینتیک خشک شدن برگ‌های غازی با استفاده از خشک کردن مادون قرمز در سطوح مختلف دمای خشک کردن ( $40$ ،  $45$  و  $50$  درجه سلسیوس) و مدت‌زمان اعمال پیش تیمار فراصوت (صفر،  $5$  و  $10$  دقیقه) را نشان می‌دهد. مدت‌زمان خشک شدن با افزایش دما و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت کاهش یافت. افزایش دمای خشک کردن سبب تغییر در گرمای نهان تبخیر و افزایش جنبش مولکول‌های آب موجود در محصول (ماده) در اثر گرما می‌گردد و در نهایت گرادیان حرارتی در داخل و بیرون محصول، سرعت تبخیر و آهنگ انتقال جرم می‌یابد (Beigi, 2019). افزایش زمان پیش تیمار باعث ایجاد میکرو کانال‌هایی در بافت غازی شده و رطوبت میان بافتی با آهنگ و سرعت بیشتری در زمان کمتری تبخیر شود. نتایج مشابهی در خشک کردن میوه شی<sup>۱</sup>، گیاه لیندن<sup>۲</sup> و میوه اژدها<sup>۳</sup> و خربزه تلخ<sup>۴</sup> گزارش شده است (Chikpah et al., 2022; Ríos-Moreno et al., 2022; Selvi et al., 2022; Akhoundzadeh et al., 2024)

زمان، می‌توان از عبارت اول برای تخمین میزان خشک شدن استفاده کرد ( $n = 0$ )، سپس معادله (۱۰) همگرا می‌گردد و به صورت معادله (۱۱) نوشته می‌شود.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \exp \left( -\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (9)$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left( -\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (10)$$

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (11)$$

نفوذ رطوبت مؤثر به دمای مختلف خشک کردن با استفاده از معادله آرنیوس (معادله ۱۲) پیش‌بینی می‌شود (Okunola et al., 2023). با لگاریتم گیری از طرفین معادله (۱۲)، معادله (۱۳) حاصل می‌گردد. با رسم نمودار  $\ln D_{eff}$  در مقابل  $1/T$  خطی با شیب  $K$  به دست می‌آید، که می‌توان با استفاده از معادله (۱۴) مقدار انرژی فعال سازی را محاسبه نمود (Kalantari et al., 2023).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left( -\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \quad (12)$$

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (13)$$

$$K = \left( \frac{E_a}{R} \right) \quad (14)$$

که در آن،  $D_0$  ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )،  $E_a$  انرژی فعال سازی ( $\text{kJ/mol}$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها ( $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol K})^{-1}$ ) و  $T$  دما ( $^{\circ}\text{K}$ ) می‌باشد. برای محاسبه ویژگی‌های ترمودینامیکی تغییرات آنتروپی ( $\Delta S$ )، انرژی آزاد گیبس ( $\Delta G$ ) و آنتالپی ( $\Delta H$ ) ب اساس انرژی فعال-سازی از معادلات (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) استفاده گردید (EL-Mesery et al., 2022; Tayyab Rashid et al., 2022)

<sup>1</sup> Shea Fruit

<sup>2</sup> Linden

<sup>3</sup> Red pitaya pulp

<sup>4</sup> Bitter melon

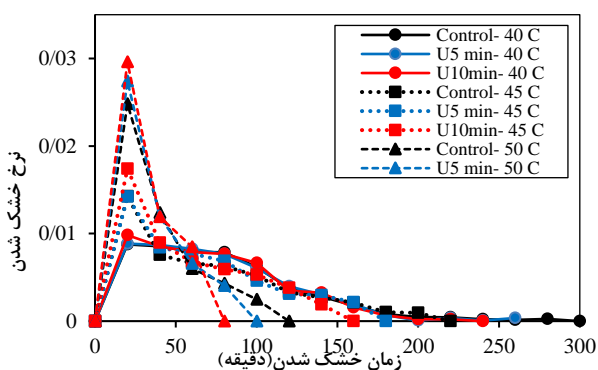
جدول (۱) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر مدت زمان خشک شدن غازیایی

Table 1. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the drying time of Falcaria

F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
555.00**	24666.67	2	49333.33	Model
				مدل
1014.00**	45066.67	1	45066.67	Temperature
				دما
96.00**	4266.67	1	4266.67	Ultrasound time
				مدت زمان فراصوت
	44.44	6	266.67	Residual
				باقی مانده
		8	49600.00	Cor Total
				همبستگی کل

\*\* معنی دار بودن در سطح احتمال یک درصد را نشان می دهند.

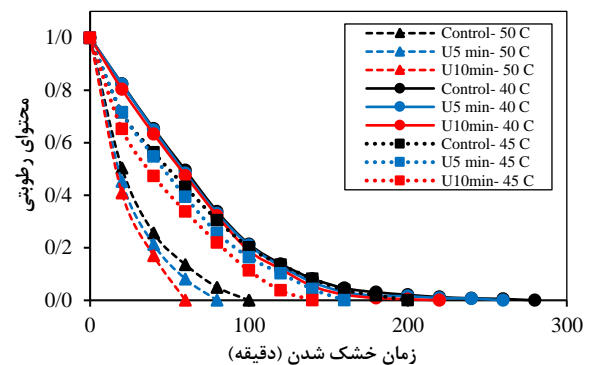
تمامی آب آزاد موجود در سطح تبخیر شده و به دلیل مقاومت در برابر حذف رطوبت، نرخ خشک شدن محصول کاهش پیدا کرد (EL-Mesery et al., 2022).



شکل ۲- منحنی های نرخ خشک شدن گیاه غازیایی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

Fig 2. Curves of the drying rate of Falcaria at different temperatures and ultrasound pretreatments.

شاخص رنگ یکی از ویژگی های ظاهری و مهم در مواد غذایی است که بر قابلیت پذیرش آن ها توسط مصرف کننده تأثیر گذار می باشد. به همین دلیل نیز تخریب رنگ طبیعی در طول فرآوری، موجب کاهش پذیرش از سوی مصرف کنندگان می گردد. جداول ۲ تا ۴ نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت را به ترتیب بر تغییرات رنگ، کروما و شاخص قهوه ای شدن برگ گیاه غازیایی نشان می دهد. اثر مقادیر مختلف دمای خشک شدن در سطح احتمال یک درصد بر تغییرات رنگ، کروما و شاخص قهوه ای شدن و تأثیر پیش تیمار فراصوت بر روی تغییرات رنگ و شاخص



شکل ۱- منحنی سینتیک خشک شدن گیاه غازیایی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

Fig 1. Drying kinetic curve of Falcaria at different temperatures and ultrasound pretreatments.

شکل (۲) تأثیر پیش تیمارهای فراصوت و تغییر دمای خشک کردن بر نرخ خشک شدن برگ های غازیایی را نشان می دهد. افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت به علت تسهیل خروج رطوبت محتوی برگ های غازیایی باعث افزایش نرخ خشک شدن غازیایی گردید. همان طوری که در شکل (۲) نشان داده شده است، در ابتدای فرآیند خشک شدن، به علت بالاتر بودن محتوای رطوبت در سطح نمونه ها، نرخ خشک شدن افزایش یافت. شدت خشک کردن در ابتدای فرآیند بیشتر از مراحل انتهایی است و بیشترین مقدار رطوبت محصول در همان لحظات اولیه از دست می رود که این امر به دلیل زیاد بودن مقدار رطوبت روی سطح برگ های غازیایی در ابتدای فرآیند خشک کردن و در نتیجه بالا بودن شدت تبخیر رطوبت از سطح برگ های غازیایی می باشد (Connor et al., 2022; Öztekin et al., 2022). در انتهای این مرحله و با ورود به مرحله سرعت نزولی،

خالص تر است (Zzaman et al., 2021). بنابراین مقادیر بالاتر آن به مفهوم حفظ رنگ طبیعی محصول است. کاهش مقدار کروما مرتبط با تخریب کاروتنوئیدها در اثر گرم شدن می‌باشد. با افزایش دما و کاهش مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت تغییرات رنگ و شاخص قهوه‌ای افزایش یافت. با توجه به شکل (۴ و ۵) کمترین مقدار تغییرات رنگ و شاخص قهوه‌ای شدن در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه حاصل شد. در طول خشک شدن، واکنش‌های آنزیمی و غیر آنزیمی (میلارد<sup>۱</sup>) رخ می‌دهد و رنگ‌دانه‌های قهوه‌ای تشکیل می‌شود که رنگ محصول را تغییر می‌دهد. این واکنش توسط دما تحریک می‌شود، و دمای بالاتر تمایل به تولید رنگ‌دانه‌های تیره بیشتری دارد (Macedo et al., 2020).

قهوه‌ای شدن در سطح احتمال یک درصد بر میزان کروما در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود.

تغییرات کلی رنگ ( $\Delta E$ ) شاخصی کاربردی است که انحراف رنگ فرآورده نسبت به ماده اولیه را بیان می‌نماید. مقادیر میانگین کروما، شاخص قهوه‌ای و تغییرات رنگ به ترتیب در محدوده‌ی  $33/13-21/13$ ،  $1689/83-2512/86$  و  $14/28-8/11$  در شرایط مختلف حاصل شد. با توجه به شکل (۳) مقادیر کروما در طول فرآیند با افزایش دما و کاهش مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کروما در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه به دست آمد، که نشان‌دهنده افزایش شدت رنگ در هنگام خشک شدن در این شرایط است. هر چه مقدار کروما بالاتر باشد، رنگ

جدول ۲) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر تغییرات رنگ طی خشک شدن غاز باغی

Table 2. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the color change of during the Falcaria drying

F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
F مقدار	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
118.10**	20.13	2	40.26	Model مدل
208.68**	35.57	1	35.57	Temperature دما
27.52**	4.69	1	4.69	Ultrasound time مدت‌زمان فراصوت
	0.1705	6	1.02	Residual باقی مانده
		8	41.28	Cor Total همبستگی کل

\*\* معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۳) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر کروما طی خشک شدن غاز باغی

Table 3. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the chroma of during the Falcaria drying

F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
F مقدار	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
78.29**	59.96	2	119.92	Model مدل
146.70**	112.36	1	112.36	Temperature دما
9.87*	7.56	1	7.56	Ultrasound time مدت‌زمان فراصوت
	0.7659	6	4.60	Residual باقی مانده
		8	124.52	Cor Total همبستگی کل

\* و \*\* به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهند.

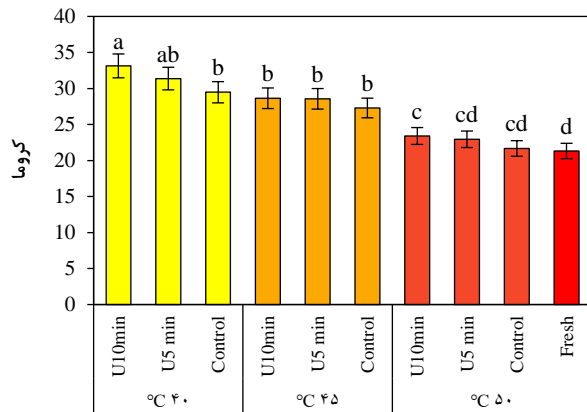
<sup>1</sup> Maillard

جدول ۴) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر شاخص قهوه‌ای شدن طی خشک شدن گازباغی

Table 4. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the brown index of during the Falcaria drying

F-value مقدار F	Mean Square میانگین مربعات	df درجه آزادی	Sum of Squares مجموع مربعات	Source منبع تغییرات
266.44**	1.987×10 <sup>5</sup>	2	3.973×10 <sup>5</sup>	Model مدل
465.03**	3.467×10 <sup>5</sup>	1	3.467×10 <sup>5</sup>	Temperature دما
67.85**	5.059×10 <sup>4</sup>	1	5.059×10 <sup>4</sup>	Ultrasound time مدت زمان فراصوت
	7.456×10 <sup>2</sup>	6	4.474×10 <sup>3</sup>	Residual باقی مانده
		8	4.018×10 <sup>5</sup>	Cor Total همبستگی کل

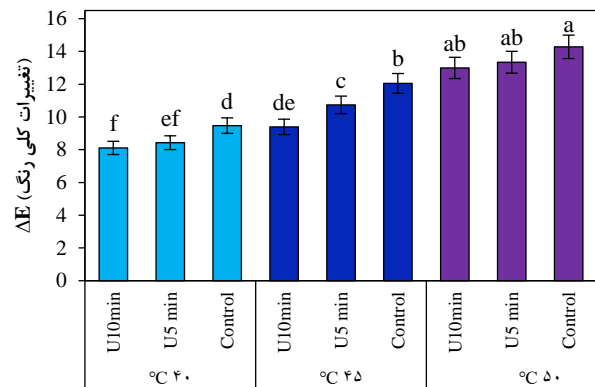
\*\* معنی دار بودن در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.



ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.

شکل ۳- نمودار تغییرات کروما (Chroma) خشک شدن گیاه گازباغی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

Fig 3. Diagram of Chroma changes of Falcaria drying at different temperatures and ultrasound pretreatments.

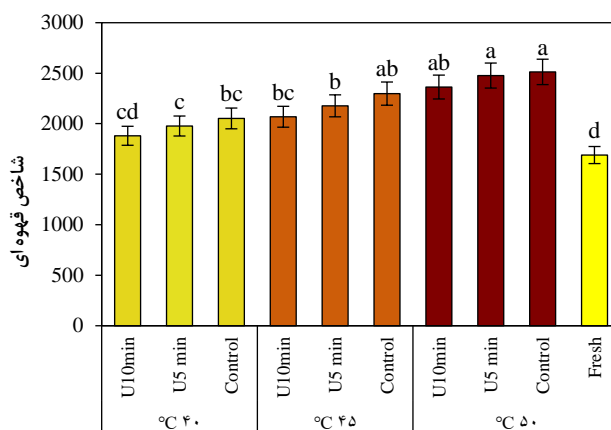


ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.

شکل ۴- نمودار تغییرات کلی رنگ (ΔE) خشک شدن گیاه گازباغی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

Fig 4. Diagram of total color changes of Falcaria drying at different temperatures and ultrasound pretreatments.



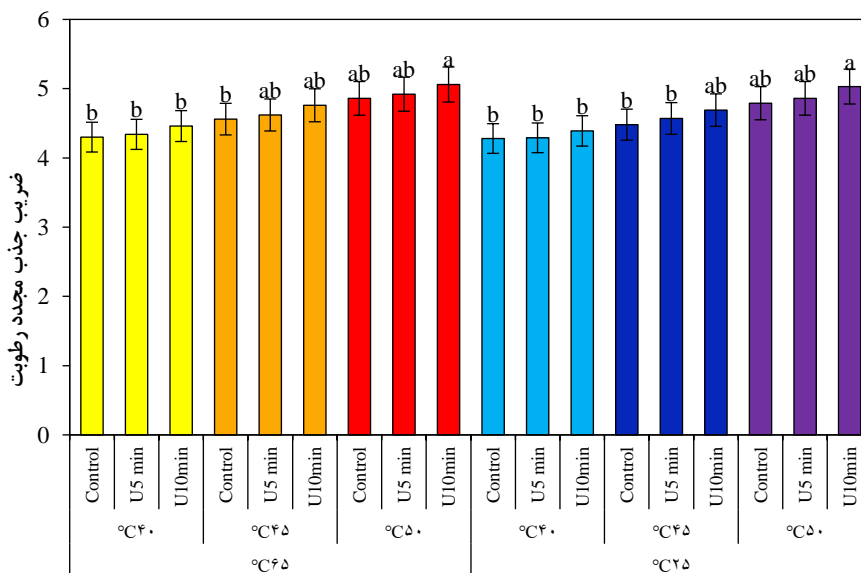


ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.  
 شکل ۵- نمودار تغییرات شاخص قهوه‌ای (BI) خشک شدن گیاه غازی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

**Fig 5. Diagram of brown index changes of Falcaria drying at different temperatures and ultrasound pretreatments.**

شد. در دماهای بالاتر ساختار ماتریکس در برگ‌های غازی بهتر حفظ شد (Lin et al., 2023). کمترین مقدار قابلیت جذب مجدد، مربوط به دمای ۴۰ °C و دمای آب مقطر از ۲۵°C و نمونه شاهد بدون اعمال فراصوت می‌باشد، دلیل این امر را می‌توان با آسیب ساختار سلولی و همچنین انتشار کمتر آب در سطح محصول در دمای پایین‌تر، توضیح داد (Izli & Polat, 2019). قابلیت جذب مجدد در دماهای بالا به دلیل تأثیر دما بر دیواره سلولی و بافت بهبود می‌یابد (Doymaz, 2017).

نسبت باز جذب یک پارامتر کیفی است که توانایی مواد غذایی بعد از خشک شدن را برای بازگشت به شکل اولیه قبل از خشک شدن و میزان تخریب سلولی را در طول خشک کردن نشان می‌دهد (Ayala-Aponte et al., 2021). مقادیر میانگین مربوط به تأثیر دمای خشک کردن، دمای آب مقطر و مدت زمان پیش تیمار فراصوت روی قابلیت جذب مجدد (RR) برگ‌های غازی در شکل (۶) نشان داده شده است. بیشترین قابلیت جذب مجدد آب مربوط به دمای ۵۰°C، دمای آب مقطر ۶۵ °C و پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه حاصل



ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.  
 شکل ۶- ضریب جذب مجدد رطوبت گیاه غازی در دماهای خشک شدن و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

**Fig 6. Rehydration ratio coefficient of Falcaria at different temperatures and ultrasound pretreatments.**

تیمار شده توسط فراصوت مقدار ضریب پخش بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پیش تیمار فراصوت داشتند. در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه بالاترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به دست آمد. مقدار ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت برای برگ‌های غازیایی در دماهای ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت به مدت صفر تا ۱۰ دقیقه در محدوده  $10^{-7}$  تا  $1/92 \times 10^{-7}$   $\times 6/59$  مترمربع بر ثانیه به دست آمد. روند مشابهی برای خشک کردن سیب جنگلی<sup>۱</sup>، گوجه‌فرنگی و هویج گزارش شده است (N. Jiang et al., 2023; Sadin et al., 2014; Wu et al., 2014)

جدول ۵ تجزیه واریانس مربوط به اثر دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت را بر نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن غازیایی برگ گیاه غازیایی نشان می‌دهد. اثر مقادیر مختلف دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان نفوذ مؤثر رطوبت معنی‌دار بود. شکل (۷) اثرات پارامترهای مختلف بر میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برگ‌های غازیایی خشک‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش دمای خشک کردن و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش می‌یابد، که این امر توسط حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه ماده غذایی توصیف می‌گردد (Beigi, 2019). نمونه‌های پیش

جدول ۵) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر نفوذ مؤثر رطوبت در طی خشک کردن غازیایی

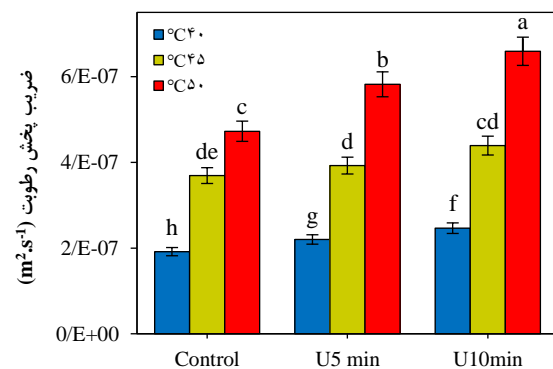
Table 5. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the effective moisture diffusivity of during the Falcaria drying

F-value مقدار F	Mean Square میانگین مربعات	df درجه آزادی	Sum of Squares مجموع مربعات	Source منبع تغییرات
293.32**	$6.877 \times 10^{-14}$	3	$2.063 \times 10^{-13}$	Model مدل
792.49**	$1.858 \times 10^{-13}$	1	$1.858 \times 10^{-13}$	Temperature دما
68.92**	$1.616 \times 10^{-14}$	1	$2.051 \times 10^{-14}$	Ultrasound time مدت‌زمان فراصوت
	$2.344 \times 10^{-16}$	5	$1.172 \times 10^{-15}$	Residual باقی‌مانده
		8	$2.075 \times 10^{-13}$	Cor Total همبستگی کل

\*\* معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

انرژی فعال‌سازی بیانگر مقدار انرژی لازم برای خروج آب از محصول می‌باشد. محدوده مقدار انرژی فعال‌سازی برای مواد غذایی بین ۱۲/۷ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول متغیر می‌باشد (Chikpah et al., 2022).

جدول ۶ تجزیه واریانس مربوط به اثر دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت را بر انرژی فعال‌سازی در طی خشک کردن غازیایی برگ گیاه غازیایی نشان می‌دهد. اثر مقادیر مختلف دمای خشک شدن و پیش تیمار فراصوت در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان انرژی فعال‌سازی معنی‌دار بود. مقدار انرژی فعال‌سازی در دامنه دمایی ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس با پیش تیمارهای فراصوت به مدت صفر تا ۱۰ دقیقه برای خشک کردن برگ‌های غازیایی از ۵۱/۱۶ کیلوژول بر مول تا ۵۸/۷۴ کیلوژول بر مول محاسبه گردید (شکل ۸). با توجه به نتایج حاصل، با افزایش مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت طی فرآیند خشک شدن برگ‌های غازیایی با روش مادون قرمز، انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد. مقدار انرژی فعال‌سازی تعیین‌شده توسط محققین برای کیوی در

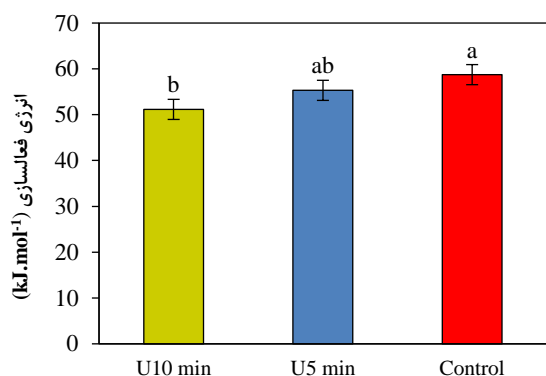


ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.

شکل ۷- نمودار تغییرات ضریب پخش رطوبت مؤثر در خشک شدن گیاه غازیایی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

Fig 7. The graph of changes in the effective moisture diffusivity coefficient of Falcaria at different temperatures and ultrasound pretreatments.

<sup>1</sup> Crabapple



ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت آماری معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد می‌باشند.

شکل ۸- نمودار تغییرات انرژی فعال‌سازی خشک شدن گیاه غازیغی در دماها و پیش تیمارهای مختلف فراصوت.

**Fig 8. Diagram of changes in the activation energy of the drying of Falcaria at different temperatures and ultrasonic pretreatments.**

جدول ۶) تجزیه واریانس اثر دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت بر انرژی فعال‌سازی در طی خشک کردن غازیغی

**Table 6. Analysis of variance to the effect of drying temperature and ultrasonic pretreatment on the activation energy of during the Falcaria drying**

F-value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
329.52**	28.73	1	28.73	Model
				مدل
329.52**	28.73	1	28.73	Ultrasound time
				مدت‌زمان فراصوت
	0.0872	1	0.0872	Residual
				باقی‌مانده
		2	28.82	Cor Total
				همبستگی کل

\*\* معنی‌دار بودن در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

و سیب‌زمینی خشک‌شده گزارش شده است (Sarpong et al., 2022; Tayyab Rashid et al., 2020; Wanderley et al., 2023). آنتروپی تحرک مولکول‌های آب جذب‌شده را ارزیابی می‌کند و نشان‌دهنده سطح فعل‌وانفعالات آب و ماده غذایی است. آنتروپی درجه بی‌نظمی یا حرکت تصادفی مولکول‌های آب را توصیف می‌کند (Cabral de Oliveira et al., 2013; Yogendrarajah et al., 2015). از تحلیل رفتار آنتروپی می‌توان نتیجه گرفت که رفتاری مشابه آنتالپی نشان می‌دهد که در آن مقدار آنتروپی با افزایش دما و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش می‌یابد (جدول ۱). نتایج مشابهی برای پسته، نارگیل و سیر گزارش شده است (Öztekin et al., 2022b; Sarpong et al., 2022; Tayyab Rashid et al., 2020). یک ماده در شرایط فعال‌سازی کمپلکس به جهت از دست دادن آزادی حرکت انتقالی یا چرخش، آنتروپی آن منفی

محدوده ۲۸/۵-۳۴/۱۶ کیلوژول بر مول، غناب در محدوده‌ی ۲۵/۶۶-۳۰/۲۹ کیلوژول بر مول محاسبه گردید (Mengeş et al., 2019; Wang et al., 2022).

مقادیر توابع ترمودینامیکی (آنتالپی و آنتروپی و انرژی آزاد گیبس) برای شرایط مختلف خشک‌کردن برگ‌های غازیغی در جدول (۱) نشان داده شده است. آنتالپی و آنتروپی با افزایش دمای خشک‌کردن و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش پیدا کردند، در صورتی که انرژی آزاد گیبس به‌طور خطی افزایش یافت. تغییر آنتالپی ( $\Delta H$ ) به‌عنوان شاخص قدرت اتصال آب به مواد استفاده می‌شود. هرچه مقدار آنتالپی بالاتر باشد، آب محکم‌تر به محصول متصل است و انرژی بیشتری برای جدا کردن آب از محصول در طی فرآیند خشک‌کردن لازم است (da Silva et al., 2020). این رفتار توسط برگ‌های غازیغی در طی کاهش محتوی رطوبتی مشاهده شد، به‌طوری که در دمای پایین‌تر خشک‌کردن به انرژی بیشتری برای جدا کردن آب متصل به محصول نیاز بود. نتایج مشابهی در مطالعه‌های انجام‌گرفته بر روی دانه‌های انار خشک‌شده، واریته‌های مختلف نارگیل

در این تحقیق مقدار انرژی آزاد گیبس با افزایش دما از ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس برای پیش تیمارهای فراصوت از صفر تا ۱۰ دقیقه از ۵۹/۸۹ تا ۶۲/۲۷ ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) تغییر یافت. این رفتار همچنین در مطالعه خصوصیات ترمودینامیکی سیر، بامیه و لوبیای فابا مشاهده شد- (Amadeu et al., 2022; dos Santos et al., 2021; EL-Mesery et al., 2022).

می‌شود (Alves et al., 2021; Öztekin et al., 2022b). مقادیر منفی آنتروپی را به وجود تغییرات شیمیایی و ساختار محصول می‌توان نسبت داد. امکان‌پذیری و محدوده انجام یک واکنش شیمیایی با اندازه‌گیری تغییرات انرژی آزاد گیبس ( $\Delta G$ ) تعیین می‌شود. مقدار منفی انرژی آزاد گیبس به معنی خود به خودی بودن فرآیند است و نیازی به انرژی اضافه نیست، درحالی‌که مقادیر مثبت نشان‌دهنده فرآیند غیر خودی است که نیاز به انرژی اضافه از محیط دارد (Sarpong et al., 2022).

جدول ۷) خواص ترمودینامیکی فرآیند خشک شدن گیاه‌های باغی به وسیله خشک‌کن مادون قرمز با پیش تیمار فراصوت.

Table 7. Thermodynamic properties of the drying process of Falcaria using infrared dryer with ultrasonic pretreatment.

شاهد	فراصوت ۵ دقیقه	فراصوت ۱۰ دقیقه	دما ( $^{\circ}\text{K}$ )	
Control	U5 min	U10 min	Temperature	
56.13	52.71	48.55	313.15	آنتالپی ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
56.09	52.66	48.51	318.15	Enthalpy
56.05	52.62	48.47	323.15	
59.89	60.05	60.25	313.15	انرژی آزاد گیبس ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
60.89	61.05	61.25	318.15	Gibbs free energy
61.89	62.05	62.26	323.15	
-11.99	-23.44	-37.35	313.15	آنتروپی ( $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
-15.07	-26.35	-40.05	318.15	Entropy
-18.06	-29.17	-42.66	323.15	

دمای خشک شدن، مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت و دمای آب مقطر افزایش پیدا کرد. آنتالپی و آنتروپی با افزایش دمای خشک‌کردن و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش یافتند. انرژی آزاد گیبس به‌طور خطی با افزایش دمای خشک‌کردن و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، افزایش یافت.

## منابع

- Akhoundzadeh Yamchi, A., Yeganeh, R., & Kouchakzadeh, A. (2019). The Effect Of Ultrasound Pretreatment On Qualitative Characteristics Of Peach Thin Slices (Alberta Variety). *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 8(14), 37–47. (In Persian).
- Akhoundzadeh Yamchi, A., Yeganeh, R., & Kouchakzadeh, A. (2022). Effect of ultrasonic pretreatment on drying kinetics and physio-mechanical characteristics of peach slices. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14053>
- Akhoundzadeh Yamchi, A., Hosainpour, A., Hassanpour, A., & Fanaei, A. R. (2024). Drying Kinetics and Thermodynamic Properties of Ultrasound Pretreatment Bitter Melon Dried by Infrared. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1), 1987547.
- Alves, N. M. C., Arruda-Silva, T. A., Dos Santos, S. B., Galle, N. B. C., Silva, I. D. F., & da Silva, M. I. P. (2021). Drying kinetics and thermodynamic properties of 'baru' almond flours. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, 25(1), 30–36. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p30-36>

## ۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این تحقیق تأثیر پیش تیمار امواج فراصوت بر روی خشک شدن برگ‌های باغی در دماهای مختلف در یک خشک‌کن مادون قرمز و اثرات آن‌ها بر روی تغییرات رنگ، جذب مجدد رطوبت و خواص ترمودینامیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش مدت‌زمان اعمال پیش تیمار و دمای خشک‌کردن موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان آن گردید. بالاترین آهنگ خشک شدن مربوط به دمای ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه بود. همچنین دمای خشک‌کردن و پیش تیمار فراصوت اثر معنی‌داری بر روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت داشت به صورتی که مقدار آن در دماها و پیش تیمار فراصوت مورد مطالعه در محدوده  $10^{-7}$  تا  $1/92 \times 10^{-7}$  مترمربع بر ثانیه به دست آمد و مقدار آن با تغییر دما از رابطه آرنیوس تبعیت کرد. مقدار انرژی فعال‌سازی در دماهای مختلف برای پیش تیمار فراصوت از ۵۱/۱۶ تا ۵۸/۷۴ به دست آمد. مقادیر کروما در طول فرآیند با افزایش دما و کاهش مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش یافت. با افزایش دما و کاهش مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت تغییرات رنگ و شاخص قهوه‌ای افزایش پیدا کردند. قابلیت باز جذب برگ‌های باغی با افزایش

- Studies in Thermal Engineering*, 33(March), 101929. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101929>
- Gharkhloo Rostami, Z., Sharifian, F., Rahimi, A., & Akhoundzadeh Yamchi, A. (2022). Influence of high wave sound pretreatment on drying quality parameters of echinacea root with infrared drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(5), 2153–2164.
- Gutti, B., Kiman, S., & Murtala, A. M. (2012). Solar dryer-an effective tool for agricultural products preservation. *Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation*, 2(1), 31–38.
- Izli, N., & Polat, A. (2019). Freeze and convective drying of quince (*Cydonia oblonga* Miller.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 55(5), 1317–1326. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2516-y>
- Jiang, C., Wan, F., Zang, Z., Zhang, Q., Ma, G., & Huang, X. (2022). Effect of an Ultrasound Pre-Treatment on the Characteristics and Quality of Far-Infrared Vacuum Drying with Cistanche Slices. *Foods*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/foods11060866>
- Jiang, N., Ma, J., Ma, R., Zhang, Y., Chen, P., Ren, M., & Wang, C. (2023). Effect of slice thickness and hot-air temperature on the kinetics of hot-air drying of Crabapple slices. *Food Science and Technology (Brazil)*, 43, 1–8. <https://doi.org/10.1590/fst.100422>
- Kalantari, D., Naji-Tabasi, S., Kaveh, M., Azadbakht, M., Majnooni, M., Khorshidi, Y., Asghari, A., & Khalife, E. (2023). Drying kinetics and shrinkage rate of thin-sliced pears in different drying stages. *Journal of Food Process Engineering*, 46(3), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14264>
- Khallaf, A. E. M., & El-Sebaei, A. (2022). Review on drying of the medicinal plants (herbs) using solar energy applications. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 58(8), 1411–1428. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03191-5>
- Latimer, G. W. (ed.), *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*, 22nd Edition (New York, 2023; online edn, AOAC Publications, 4 Jan. 2023), <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>.
- Lin, Q., Zong, X., Lin, H., Huang, X., Wang, J., & Nie, S. (2023). Based on quality, energy consumption selecting optimal drying methods of mango slices and kinetics modelling. *Food Chemistry: X*, 17(October 2022), 100600. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100600>
- Macedo, L. L., Vimercati, W. C., da Silva Araújo, C., Saraiva, S. H., & Teixeira, L. J. Q. (2020). Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. *Journal of Food Process Engineering*, 43(9), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13451>
- Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lorimer, J. P. (1996). The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 3(3). [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(96\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(96)00034-X)
- Mengeş, H. O., Ünver, A., Musa, M., & Can, Ö. (2019). *The Effects of Drying Parameters on Drying Characteristics, Colorimetric Differences, Antioxidant Capacity and Total Phenols of Sliced Kiwifruit*. <https://doi.org/10.1007/s10341-019-00417-5>
- Okunola, A. A., Adekanye, T. A., Okonkwo, C. E., Kaveh, M., Szymanek, M., Idahosa, E. O., Olayanju, A. T., & Amadeu, L. T. S., Queiroz, A. J. de M., Figueirêdo, R. M. F. de, Ferreira, J. P. de L., Silva, W. P. da, Gomes, J. P., Paiva, Y. F., Costa, C. C., Moura, H. V., Santos, D. da C., Lima, A. R. C. de, & Silva, H. A. (2022). Controlled Germination of Faba Beans: Drying, Thermodynamic Properties and Physical-Chemical Composition. *Processes*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/pr10081460>
- Ayala-Aponte, A. A., Cárdenas-Nieto, J. D., & Tirado, D. F. (2021). Aloe vera gel drying by refractance window®: Drying kinetics and high-quality retention. *Foods*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/foods10071445>
- Babiker, E. E., Juhaimi, F. A. L., Ghafoor, K., & Abdoun, K. A. (2018). Effect of drying methods on nutritional quality of young shoots and leaves of two Moringa species as non-conventional fodders. *Agroforestry Systems*, 92(3), 717–729. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0043-8>
- Beigi, M. (2019). Drying of mint leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 77–88.
- Cabral de Oliveira, D. E., Resende, O., Vieira Bessa, J. F., & Kester, A. N. (2013). Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(2s), 331–337. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.s2.e66>
- Chikpah, S. K., Korese, J. K., Sturm, B., & Hensel, O. (2022). Colour change kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*) slices during convective air drying and bioactive compounds of the dried products. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10(June), 100409. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100409>
- Connor, Z. N. O., Yagoobi, J. S., Tilley, B. S., Noori, Z., Yagoobi, J. S., & Experimental, B. S. T. (2022). Experimental study of paper drying with direct- contact ultrasound mechanism. *Drying Technology*, 0(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2150635>
- Crank, J. (1979). *The Mathematics of Diffusion*. In *Oxford university press*. Oxford university press.
- da Silva, D. P., Dos Santos, S. G. F., Silva, I. L., da Silva, H. W., & Rodovalho, R. S. (2020). Drying kinetics and thermodynamic properties of bitter melon (*Momordica charantia* L.) leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(10), 707–712. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n10p707-712>
- dos Santos, F. S., de Figueiredo, R. M. F., de Melo Queiroz, A. J., de Lima, A. R. C., & de Lima, T. L. B. (2021). The temperature effect in okra drying process: a kinetic study on powders physical properties. *Australian Journal of Crop Science*, 15(5), 649–660. <https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.05.p2919>
- Doymaz, I. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- Doymaz, İ. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- EL-Mesery, H. S., Sarpong, F., Xu, W., & Elabd, M. A. (2022). Design of low-energy consumption hybrid dryer: A case study of garlic (*Allium sativum*) drying process. *Case*

- <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.107>
- Tayyab Rashid, M., Ahmed Jatoui, M., Safdar, B., Wali, A., Muhammad Aadil, R., Sarpong, F., & Ma, H. (2020). Modeling the drying of ultrasound and glucose pretreated sweet potatoes: The impact on phytochemical and functional groups. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68(March), 105226. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105226>
- Tayyab Rashid, M., Liu, K., Ahmed Jatoui, M., Safdar, B., Lv, D., & Wei, D. (2022). Developing ultrasound-assisted hot-air and infrared drying technology for sweet potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86(March), 106047. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106047>
- Wanderley, R. de O. S., de Figueirêdo, R. M. F., Queiroz, A. J. de M., dos Santos, F. S., Paiva, Y. F., Ferreira, J. P. de L., de Lima, A. G. B., Gomes, J. P., Costa, C. C., da Silva, W. P., Santos, D. da C., & Maracajá, P. B. (2023). The Temperature Influence on Drying Kinetics and Physico-Chemical Properties of Pomegranate Peels and Seeds. *Foods*, 12(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/foods12020286>
- Wang, C., Tian, S., & An, X. (2022). The effects of drying parameters on drying characteristics, colorimetric differences, antioxidant components of sliced chinese jujube. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 58(9), 1561–1571. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03202-5>
- Wu, B., Ma, H., Qu, W., Wang, B., Zhang, X., Wang, P., Wang, J., Atungulu, G. G., & Pan, Z. (2014). Catalytic infrared and hot air dehydration of carrot slices. *Journal of Food Process Engineering*, 37(2), 111–121. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12066>
- Yadegari, M., Khazae, M., Ghorbani, R., Rezae, M., Izadi, B., & Sheikholeslam, A. (2007). Wound Healing Effect of Falcaria Vulgaris' Leaves on Aspirin Induced Gastric Ulcer in Rats. *Journal of Kermanshah University of Medical Sciences*, 10(3), 195–203.
- Yogendrarajah, P., Samapundo, S., Devlieghere, F., De Saeger, S., & De Meulenaer, B. (2015). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum* L.). *Lwt*, 64(1), 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.045>
- Zang, Z., Zhang, Q., Huang, X., Jiang, C., He, C., & Wan, F. (2023). Effect of Ultrasonic Combined with Vacuum Far-infrared on the Drying Characteristics and Physicochemical Quality of Angelica sinensis. *Food and Bioprocess Technology*. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03076-3>
- Zzaman, W., Biswas, R., & Hossain, M. A. (2021). Application of immersion pre-treatments and drying temperatures to improve the comprehensive quality of pineapple (*Ananas comosus*) slices. *Heliyon*, 7(1), e05882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05882>
- Wojciechowska, K. (2023). Drying Characteristics, Kinetic Modeling, Energy and Exergy Analyses of Water Yam (*Dioscorea alata*) in a Hot Air Dryer. *Energies*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/en16041569>
- Öztekin, Y. B., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Bilim, H. I. C., & Sacilik, K. (2022a). Drying kinetics and thermodynamic properties of Uzun pistachios dried by convective drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), 1–13. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17035>
- Öztekin, Y. B., Aktaş, M., Dolgun, E. C., Bilim, H. I. C., & Sacilik, K. (2022b). Drying kinetics and thermodynamic properties of Uzun pistachios dried by convective drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17035>
- Qing, S., Long, Y., Wu, Y., Shu, S., Zhang, F., Zhang, Y., & Yue, J. (2023). Hot-air-assisted radio frequency blanching of broccoli: heating uniformity, physicochemical parameters, bioactive compounds, and microstructure. In *Journal of the Science of Food and Agriculture* (Vol. 103, Issue 5). <https://doi.org/10.1002/jsfa.12458>
- Rafiey, Z., Jalili, F., Sohrabi, M., Salahshoor, M., & Jalili, C. (2017). Effects of Hydro- alcoholic Extract of Falcaria Vulgaris on Pancreas Tissue in Streptozotocin-induced Diabetic Rats. *Ranian Journal of Endocrinology and Metabolism Vol*, 19(2), 91–99. (In Persian).
- Sadin, R., Chegini, G. R., & Sadin, H. (2014). The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 50(4), 501–507. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1255-3>
- Sarpong, F., Dwumfour, F., Rashid, M. T., & Aly, T. (2022). Modelling the Kinetics, Thermodynamic and Physical Properties of Coconut (*Cocos nucifera* L.) during Convective Drying. *Ghana Journal of Science*, 63(1), 63–73. <https://doi.org/10.4314/gjs.v63i1.4>
- Shackebaei, D., & Godini, A. (2009). Assessment of the role of nitric oxide component of Falcaria vulgaris extract in coronary vasodilatation in the isolated rat heart. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*, 14(1), 75–83. (In Persian).
- Sharifian, F., Gharkhloo, Z. R., Yamchi, A. A., & Kaveh, M. (2023). Infrared and hot drying of saffron petal (*Crocus sativus* L.): Effect on drying, energy, color, and rehydration. *Journal of Food Process Engineering, April*. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14342>
- Simal, S., Benedito, J., Sánchez, E. S., & Rosselló, C. (1998). Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, 36(3), 323–336. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00053-3)
- Tagnamas, Z., Bahammou, Y., Kouhila, M., Hilali, S., Idlimam, A., & Lamharrar, A. (2020). Conservation of Moroccan truffle (*Terfezia boudieri*) using solar drying method. *Renewable Energy*, 146, 16–24.

