

مقاله پژوهشی

بررسی سینتیک خشک کردن گیاه گزنه با خشک کن مادون قرمز به کمک پیش تیمار فراصوت

عادل حسین پور^{۱*}، ابوالفضل آخوندزاده یامچی^۲، مازیار فیض‌اله‌زاده^۲، آریگا مرادیانس^۳ و فاطمه خیاطی‌نژاد^۳

چکیده

گزنه یکی از مهم‌ترین و فراوان‌ترین گیاهان دارویی به شمار می‌رود که به صورت فصلی در دسترس است. افزایش ماندگاری در کنار دستیابی به ویژگی‌های کیفی مورد انتظار بازارهای مصرف از مهم‌ترین اهداف فرایند خشک کردن بوده و از عوامل تأثیرگذار بر روی زمان فرایند و همچنین ویژگی‌های کیفی به شمار می‌آیند. هدف از این تحقیق یافتن مدل ریاضی مناسب برای توصیف فرایند تجربی خشک کردن، ارزیابی ضریب نفوذ و به دست آوردن انرژی فعال‌سازی جهت تعیین خواص ترمودینامیکی در طی فرایند خشک کردن گزنه است. برگ‌های گزنه با محتوی رطوبت اولیه $2/15 \pm 0/05$ کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده خشک)، در یک خشک کن مادون قرمز در سه دمای ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس و با دو زمان پیش تیمار فراصوت با توان ۲۰ کیلووات به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. بهترین مدل برای توصیف فرایند خشک کردن گزنه مدل میدلی و همکاران انتخاب شد. ضریب نفوذ مؤثر گزنه با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان پیش تیمار فراصوت افزایش یافت. انرژی فعال‌سازی در طی خشک کردن گزنه $40/54 - 11/45$ کیلوژول بر مول به دست آمد. آنتالپی و انتروپی با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش یافتند، درحالی که انرژی آزاد گیبس افزایش پیدا کرد. مقدار آنتالپی بین $37/94 - 8/76$ کیلوژول بر مول، مقدار انتروپی بین $73/18 - 178/00$ کیلوژول بر مول و مقدار انرژی آزاد گیبس بین $66/28 - 60/85$ کیلوژول بر مول تغییر کرد. این نتایج تأیید می‌کند که استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن گیاه گزنه باعث افزایش نرخ خشک شدن و کاهش مصرف انرژی در دماهای پایین خشک کردن می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: گزنه، خشک کردن مادون قرمز، مدل سازی، ضریب پخش رطوبت، آنتالپی، انتروپی.

ارجاع: حسین پور ع. آخوندزاده یامچی ا. فیض‌اله‌زاده مرادیانس آ. و خیاطی‌نژاد ف. ۱۴۰۳. بررسی سینتیک خشک کردن گیاه گزنه با خشک کن مادون قرمز به کمک پیش تیمار فراصوت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۱: ۴۲-۳۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14575.677>

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- فارغ التحصیل دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*نویسنده مسئول: a.hosainpour@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵

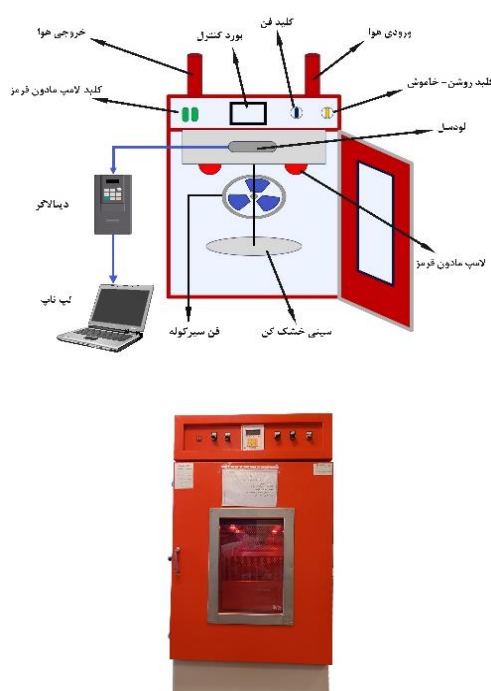
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

مقدمه

گیاهان دارویی از سالیان دور برای درمان بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفتند، امروزه نیز با توجه به اثرات سوء و عوارض جانبی داروهای شیمیایی بر بدن، هنوز هم موضوع بسیاری از تحقیقات در سراسر جهان بررسی اثرات درمانی گیاهان مختلف است (Abasi et al., 2014). گیاه گزنه با نام علمی *Urtica dioic L* متعلق به تیره *Urticaceae* است که در راسته گل سرخیان از گروه گیاهان دانه‌دار جای دارد. این تیره در دنیا دارای ۴۵ جنس و حدود ۸۰۰ گونه است که تقریباً در اکثر نواحی کره زمین پراکنده‌اند و عمدتاً در نواحی گرمسیری و نیمه گرمسیری دیده می‌شوند (Fadaie et al., 2019). برگ گزنه حاوی ترکیبات مختلف مانند استرول‌های گیاهی، بسیاری از کاروتنوئیدها مانند بتاکاروتن، گزانتوفیل‌ها، زئاگزانتین، ترپن‌ها، ترکیبات فعال بیولوژیک مانند اسید کافئیک، اسید مالیک و اسید کوئینیک، اسید فرمیک، اسید استیک، اسید بوتریک، اسید کوماریک و انواع ویتامین‌ها است (Khanloo et al., 2020). افزایش ماندگاری به همراه حفظ ویژگی‌های کیفی مورد انتظار بازارهای مصرف از مهم‌ترین اهداف فرایند خشک کردن می باشد که از عوامل تأثیرگذار بر روی زمان فرایند و همچنین ویژگی‌های کیفی به شمار می‌آیند (Akhoundzadeh Yamchi et al., 2023). فرایند خشک کردن می‌تواند به شکل‌های گوناگون و با خشک کن‌های متفاوتی انجام گیرد که هر یک برای فرایند محصول خاصی طراحی شده است. انرژی فراصوت به دلیل قابلیت اجرا در دمای محیط و حفظ خصوصیات کیفی محصولات بسیار توصیه شده است (Simal et al., 1998). خشک کردن برگ‌های گزنه نه تنها استفاده از آن‌ها را در مواقعی که گیاهان از نظر فیزیولوژیکی فعال نیستند، امکان پذیر می‌کند، بلکه دوره مصرف آن‌ها را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر این، محتویات تحریک کننده کرک‌های نیش‌دار پس از خشک شدن از بین می‌رود (Upton, 2013). روش خشک کردن انتخاب شده می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر تخریب و حفظ مواد مغذی داشته باشد (Shilton, 2003). خشک کردن با هوای محیطی (مانند خشک کردن همرفتی با تهویه مناسب و خشک کردن آفتابی) به عنوان یک روش رایج برای خشک کردن برگ‌های گزنه ذکر شده است (Maanda & Bhat, 2010).

(Upton, 2013). با این حال، فرایند خشک شدن آهسته در روش‌های خشک کردن در هوای محیط ممکن است منجر به از دست دادن کیفیت برگ‌ها شود (مانند تغییر رنگ، از دست دادن اسید اسکوربیک و کاروتنوئیدها) (Harbourne et al., 2009). امواج فراصوت در اثر پدیده حفره زایی (کاویتاسیون) باعث ایجاد یک سری انقباض و انبساط‌های سریع در ماده می‌شوند که شبیه فشردن و رها کردن یک اسفنج است. تأثیر اسفنجی باعث خروج آب از ماتریکس جامد و از طرف دیگر سبب ایجاد ریز کانال‌هایی جهت سهولت انتقال جرم طی خشک کردن توسط هوای داغ می‌گردد (Fernandes et al., 2008). امواج فراصوت ضمن تشکیل لوله‌های موبین برای خروج آب از محصول و کاهش میزان پخش آب و خروج آن از لایه‌های سطحی تا حدودی باعث تغییر شکل مواد جامد متخلخل می‌گردد (de la Fuente-Blanco et al., 2006). کاربرد امواج فراصوت در صنایع غذایی در دهه‌های اخیر رواج پیدا نموده است، اما بیشتر مطالعات بر تأثیر این امواج در خشک کردن به روش اسمز بوده و تعداد کمی مطالعه درباره تأثیر روش فوق به‌طور مستقیم در فرایند خشک کردن انجام گرفته است (Cárcel et al., 2007). در روش استفاده از امواج فراصوت به عنوان یک پیش مرحله قبل از فرایند اصلی خشک کردن، محصول کامل و یا برش‌های آن در آب قرار گرفته تا امکان موج دهی به وجود آید. مهم‌ترین مزیت این روش کاربرد آن در دمای محیط و آسیب نرساندن به بافت محصول است (Jambrak et al., 2007). مدل‌های شبیه‌سازی، نقش مهمی در خشک کردن و بهبود آن ایفا می‌نمایند (Huang et al., 2021). باید فرایند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدل‌سازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک کردن محصول را پیش‌بینی نمود. هدف از ارائه‌ی مدل خشک کردن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه‌ی خشک کردن محصول است (Akanbi & Oludemi, 2004). در برخی از مطالعات اخیر در مورد تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی و بهینه‌سازی فرایندهای تولید بیوگاز، انرژی، آگزرژی و عملکردهای زیست محیطی مقایسه شده است (Mahmoodi-Eshkaftaki et al., 2022). با این حال، اطلاعاتی در مورد تأثیر خشک کردن در خشک کن

نیروسنج دیجیتالی (Bongshin، کره جنوبی) با محدوده اندازه‌گیری ۰-۱۰۰۰ گرم با دقت ۰/۱ ± گرم اندازه‌گیری و به کمک یک گزارش‌گر اطلاعات (Camos، ایران) ثبت شد. برای بررسی روند خشک شدن نمونه‌ها در آون، از یک آون (مدل Memmert UNE 500، آلمان) استفاده گردید. میزان کاهش وزن نمونه‌ها هر ۲۰ دقیقه یکبار قرائت شد. خشک شدن نمونه‌ها تا رسیدن به رطوبت تعادلی ادامه یافت. آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند و میانگین رطوبت در هر مقدار برای رسم منحنی‌های خشک شدن مورد استفاده قرار گرفت (Akhoundzadeh, Yamchi et al., 2022; Sharifian et al., 2023).



شکل ۱- شکل واقعی (الف) و طرح‌واره (ب) خشک‌کن مادون‌قرمز

بررسی سینتیک خشک‌کردن

به‌منظور مقایسه دقیق‌تر و رسم نمودارهای خشک شدن، مقادیر درصد رطوبت به محتوای رطوبتی تبدیل شدند. مقادیر محتوای رطوبتی و نرخ خشک شدن گیاه گزنه به ترتیب از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شدند (Doymaz, 2017).

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

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

مادون‌قرمز با پیش تیمار فراصوت و تأثیر آن بر روی سینتیک خشک شدن و خواص فیزیکی و ترمودینامیکی برگ گزنه وجود ندارد.

هدف از این تحقیق بررسی اثر پیش تیمار فراصوت بر روی انتقال جرم و حرارت در خشک شدن گیاه گزنه با خشک‌کن مادون‌قرمز و ارائه‌ی مدل خشک‌کردن است.

مواد و روش‌ها

رطوبت اولیه گیاه گزنه به روش استاندارد AOAC تعیین شد (Latimer, 2012). بر اساس این استاندارد ۵۰ گرم برگ گیاه گزنه درون آون با دمای ۱۰۴ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها از یک ترازوی AND مدل FA-2104 با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۰۱ گرم استفاده گردید. رطوبت اولیه نمونه‌های تازه در پنج تکرار اندازه‌گیری شد که ۰/۰۵ ± ۲/۱۵ کیلوگرم آب در کیلوگرم ماده خشک (d.b.) به دست آمد (Taghnamas et al., 2020). خشک‌کردن گیاه گزنه در خشک‌کن مادون‌قرمز و در سه دمای خشک‌کردن خشک‌کن مادون‌قرمز مورد استفاده، خشک‌کن تحقیقاتی گیاهان داروئی و نمونه‌های گیاهی ساخت شرکت مهندسی و طراحی گروک ایران مدل GC 400 بود. این خشک‌کن دارای سامانه پایش‌گر دما و رطوبت، با قابلیت برنامه‌ریزی و دارای ۴ لامپ مادون‌قرمز با توان ۲۵۰ وات است. دمای هوا در خشک‌کن با استفاده از یک پایش‌کننده دما به ۰/۱ ± درجه سلسیوس تنظیم شد. با افزایش و کاهش دما، دمای داخل خشک‌کن توسط حسگر داخل خشک‌کن اندازه‌گیری و منبع‌های حرارتی (لامپ‌های مادون‌قرمز) خاموش و روشن می‌شوند تا بتوان دمای داخل خشک‌کن را پایش نمود.

خشک‌کن حدود ۳۰ دقیقه قبل از خشک‌کردن، برای دستیابی به شرایط پایدار و قبل از هر دوره خشک شدن روشن شد. از یک سامانه خشک‌کن فراصوت هوازی ساخت شرکت فراصوت زاگرس ایران با بسامد ۲۰ کیلوهرتز و توان ۲۰ کیلووات برای نفوذ به درون بافت گزنه استفاده گردید. نمونه‌هایی به وزن حدود ۰/۱ ± ۵۰ گرم به صورت یکنواخت در یک سینی سوراخ شده (۲۵×۲۵ سانتی‌متر) بافاصله ۲۰ سانتی‌متر از لامپ‌ها گذاشته شد. از دست دادن وزن نمونه‌ها با استفاده از یک

محاسبه و با مدل های دیگر، مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات (۳)، (۴) و (۵) محاسبه شدند (Polat et al., 2022).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

که در این معادلات، $MR_{exp,i}$ رطوبت گزنه مشاهده شده در لامین اندازه گیری، $MR_{pre,i}$ رطوبت گزنه پیش بینی شده از مدل در لامین اندازه گیری، N تعداد مشاهدات (داده ها) و z تعداد ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل است. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش بینی نحوه ی خشک شدن گزنه هر سه معیار $RMSE$ ، R^2 و χ^2 مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مدل مناسب خشک کردن با حداکثر همبستگی R^2 و حداقل χ^2 و $RMSE$ به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن گزنه انتخاب شد (Doymaz, 2014).

که در آن ها، MR محتوای رطوبتی، M_t مقدار رطوبت در زمان t ، M_0 مقدار رطوبت اولیه، M_e مقدار رطوبت تعادلی، DR نرخ خشک شدن، M_t مقدار رطوبت در لحظه ی t ، $M_{t+\Delta t}$ مقدار رطوبت در زمان $t+\Delta t$ و Δt فاصله زمانی بین دو رطوبت متوالی بر حسب دقیقه است. داده های حاصل از خشک شدن گیاه گزنه با ۵ مدل خشک کردن که به طور معمول برای مدل سازی منحنی های خشک شدن استفاده می شود، برازش شد. مدل های مورد استفاده به منظور مدل سازی ریاضی در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل های توصیفی (a, b, c, n و k) با استفاده از داده های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن گیاه گزنه به کمک نرم افزار StatGraphics Plus v5 برآورد گردید. در این تحقیق برای انتخاب مناسب ترین مدل توصیف کننده ی سینتیک خشک کردن گیاه گزنه، ضریب تبیین (R^2)، ریشه ی میانگین مربعات خطا (RMSE) و کای اسکور (χ^2) مابین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط هر مدل،

جدول ۱- مدل های ریاضی اعمال شده به منحنی خشک کردن.

نام مدل	معادله مدل	منبع
لگاریتمی	$MR = a \exp(-kt) + c$	Arepally et al., (2017)
میدلی و همکاران	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Zannou et al., (2021)
بیج	$MR = \exp(-kt^n)$	Şen & Aydin, (2020)
سه می وار	$MR = a + bt + ct^2$	Coşkun et al., (2017)
هندرسون - پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	Nanvakenari et al., (2022)

a, b, c, k, n. ثابت های تجربی و ضرایب در مدل های خشک کردن

تعیین نفوذ مؤثر رطوبت

نفوذ مؤثر رطوبت یک ویژگی مهم در مدل سازی فرآیند خشک کردن مواد غذایی و دیگر مواد و تابع درجه حرارت و رطوبت مواد است. معادله ی انتشاری قانون دوم فیک^۱ بر انتشار جرم در طی دوره ی سرعت نزولی خشک کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد (Öztekin et al., 2022). قانون فیک در مختصات سه بعدی به صورت معادله (۶) بیان می شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (6)$$

1 - Fick's second law

که در آن، M مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x ، y و z مختصه های فضایی هستند. جهت حل معادله دیفرانسیل برای شکل هندسی تخت و توزیع رطوبت اولیه، فرض می شود که فرآورده ی غذایی تک بعدی، دارای رطوبت اولیه ی یکنواخت و مقاومت خارجی ناچیز، انتشار پراکنده ثابت، انقباض ناچیز و حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است (Crank, 1979). متأسفانه در نظریه انتشار، چروکیدگی، سخت شدن سطحی یا ایزوترم های جذب در نظر گرفته نمی شود (Taghnamas et al., 2020). معادله ی فیک برای یک تیغه به صورت معادله (۷) است.

که در آن، D_0 ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر ($m^2.s^{-1}$)، E_a انرژی فعال‌سازی (kJ/mol)، R ثابت جهانی گازها ($8.314 J.(mol K)^{-1}$) و T دما ($^{\circ}K$) است. معادلات (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) برای محاسبه ویژگی‌های ترمودینامیکی مانند تغییرات انتروپی (ΔS)، انرژی آزاد گیبس (ΔG) و آنتالپی (ΔH) بر اساس E_a استفاده شد (EL-Mesery et al., 2022; Sarpong et al., 2022).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (13)$$

$$\Delta G = R \times T \times \ln \left(\frac{k \times h_p}{T \times k_B} \right) \quad (14)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (15)$$

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

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایش‌های این تحقیق در طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد و نتیجه به صورت میانگین با انحراف معیار گزارش شد. تحلیل آماری تیمارها توسط جدول تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار آماری Design نسخه ۱۳ expert بررسی شد و مقایسه میانگین‌ها در سطح معنی‌دار ۵ درصد صورت گرفت. نمودارها با نرم‌افزار صفحه گسترده (Microsoft Excel 2016) رسم شد.

نتایج و بحث

بررسی سینتیک خشک‌کردن برگ‌های گزنه (شکل ۲) با استفاده روش خشک‌کردن مادون‌قرمز در سطوح مختلف دما (۴۰، ۴۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و مدت‌زمان پیش تیمارهای فراصوت (۵ و ۱۰ دقیقه) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، فرآیند خشک شدن گزنه در دوره سرعت، نزولی اتفاق افتاد. این نتایج نشان از این است که پدیده فیزیکی انتشار، سازوکار حاکم بر خروج رطوبت از لایه‌های گزنه در شرایط مختلف است (Sadeghi et al., 2019). نتایج تحلیل واریانس نشان داد که افزایش زمان پیش تیمار فراصوت و دمای خشک‌کردن بر زمان خشک شدن در سطح ۱ درصد اثر معنی‌دار دارد. به بیان دیگر، افزایش زمان پیش تیمار فراصوت و دمای خشک‌کردن، زمان خشک شدن را کاهش می‌دهد (جدول ۲). هم‌چنین نتایج به‌دست‌آمده نشان از افزایش شیب نمودارهای

$$MR =$$

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right) \quad (7)$$

جایی که MR نسبت رطوبت، D_{eff} انتشار مؤثر رطوبت ($m^2.s^{-1}$)، L نیمه ضخامت در نمونه (m) و n عدد صحیح مثبت است. با افزایش زمان، می‌توان از عبارت اول برای تخمین میزان خشک شدن استفاده کرد ($n = 0$)، سپس معادله (۷) همگرا می‌گردد و به صورت معادله (۸) نوشته می‌شود.

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

مقادیر ضریب نفوذپذیری رطوبت (D_{eff}) معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک‌کردن برحسب $\ln MR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. ضریب نفوذ مؤثر، همان شیب زاویه‌ی بخش خطی است که در مقابل زمان خشک شدن منجر به یک خط مستقیم با شیب منفی می‌شود و K با D_{eff} به وسیله معادله (۹) رابطه دارد.

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (9)$$

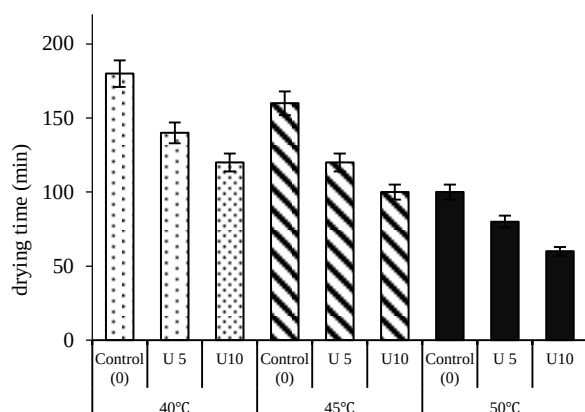
ویژگی‌های خشک‌کردن مواد مرطوب عمدتاً به قابلیت اتصال رطوبت بستگی دارد. مقدار انرژی فعال‌سازی شاخصی است که قابلیت پیوند رطوبت در مواد مرطوب را نشان می‌دهد. انرژی فعال‌سازی به‌عنوان انرژی لازم در حین حذف یک مول رطوبت از ماده با محتوای رطوبت معین و ترکیب ثابت تعریف می‌شود (Fang et al., 2009). وابستگی نفوذ رطوبت مؤثر به دمای مختلف خشک‌کردن با استفاده از معادله آرنیوس^۱ معادله (۱۰) پیش‌بینی می‌شود (Okunola et al., 2023).

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R(T + 273.15)} \right) \quad (10)$$

با لگاریتم‌گیری از طرفین، معادله (۱۰) معادله (۱۱) 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 (۱۲) مقدار انرژی فعال‌سازی را محاسبه نمود (Kalantari et al., 2023).

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (11)$$

$$K = \left(\frac{E_a}{R} \right) \quad (12)$$



شکل ۳- منحنی مدت زمان خشک شدن در دما و پیش تیمارهای مختلف فراصوت بر روی گزنه

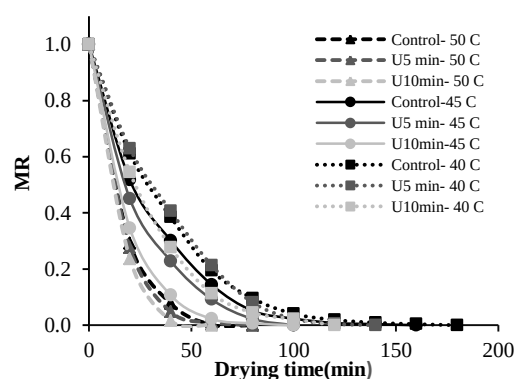
هدف از مدل سازی این است که بتوان سینتیک خشک کردن را در تمام شرایط خشک کردن با رعایت محدوده عملکرد مدل، پیش بینی کرد و همچنین در پایش برخط خشک کن و بهینه سازی فرآیند از آن استفاده کرد. داده های آزمایشی با پنج مدل خشک کردن لایه نازک بیان شده در جدول ۱ برازش گردید. ملاک انتخاب بهترین مدل توصیف رفتار خشک کردن، بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE و χ^2 است. نتایج تحلیل آماری گرفته شده از این مدل ها برای خشک کردن گزنه با خشک کن مادون قرمز در شرایط مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. از نتایج این جدول مشاهده می شود که در تمام مدل های مربوط به خشک کردن با خشک کن مادون قرمز، ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹۱ به دست آمد، به نحوی که مدل میدیلی و همکاران بیشترین ضریب همبستگی (۹۹/۷۵ - ۹۹/۹۹) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۰۲۳۸ - ۰/۰۳۰) را دارد و مقدار مربع کای این مدل نیز بین ۰/۰۰۰۲ - ۰/۰۱۱۳ است؛ بنابراین این مدل برای تشریح و پیش بینی رفتار خشک کردن گزنه با کمک مادون قرمز تحت دما و پیش تیمارهای فراصوت مختلف انتخاب گردید. تطبیق مدل میدیلی و همکاران با داده های آزمایشی به وضوح در شکل ۴ دیده می شود. در پژوهش هایی برای توصیف رفتار خشک کردن شلتوک و سیب زمینی شیرین در خشک کن مادون قرمز، مدل میدیلی به عنوان یک مدل مناسب گزارش شد (Du et al., 2023; Polat et al., 2022).

خشک شدن با افزایش دما و مدت زمان اعمال پیش تیمار فراصوت دارد، به طوری که بالاترین زمان خشک کردن مربوط به نمودار ۴۰ °C بدون اعمال پیش تیمار فراصوت و پایین ترین زمان خشک شدن مربوط به نمودار ۵۰ °C و تحت پیش تیمار فراصوت به مدت ده دقیقه است (شکل ۳). دلیل این امر این است که افزایش دمای خشک کردن سبب تغییر در گرمای نهان تبخیر و افزایش جنبش مولکول های آب موجود در محصول (ماده) در اثر گرما می شود و در نهایت گرادیان حرارتی در داخل و بیرون محصول، سرعت تبخیر و آهنگ انتقال جرم در محصول در حال خشک شدن افزایش خواهد داشت و به دنبال آن زمان خشک شدن نیز کاهش می یابد (Beigi, 2021). روند مشابهی در خشک کردن میوه شی^۱، گیاه لیدن^۲ و میوه اژدها^۳ گزارش شده است (Chikpah et al., 2022; Ríos-Moreno et al., 2022; Selvi et al., 2022).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار فراصوت و دمای خشک کردن بر محتوای رطوبتی گیاه گزنه

رطوبت	محتوای رطوبتی	دما	پیش تیمار	تیمار
مدل	۱۰۹۳۳/۳۳	۲	۵۴۶۶/۶۷	۵۲/۷۱ ^{***}
دمای خشک کردن	۶۶۶۶/۶۷	۱	۶۶۶۶/۶۷	۶۴/۳۹ ^{***}
فراصوت	۴۲۶۶/۶۷	۱	۴۲۶۶/۶۷	۴۱/۱۴ ^{***}
باقی مانده	۶۲۲/۲۲	۶	۱۰۳/۷۰	
همبستگی کل	۱۱۵۵۵/۵۶	۸		

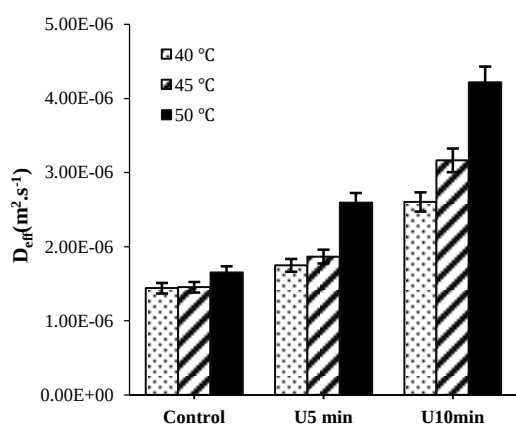
***بیانگر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد است.



شکل ۲- منحنی خشک کردن گزنه در دما و پیش تیمارهای مختلف فراصوت

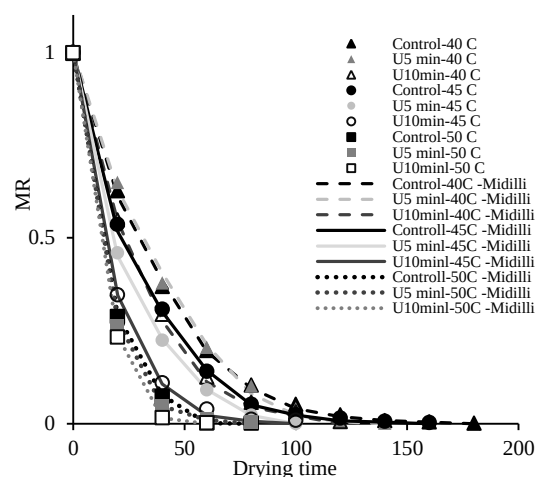
- 1- Shea Fruit
- 2- Linden
- 3- red pitaya pulp

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که افزایش زمان پیش تیمار فراصوت و دمای خشک‌کردن بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت معنی‌دار است (جدول ۴). نتایج نشان داد که با افزایش دمای خشک‌کردن و مدت‌زمان اعمال 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 تیمار شده مقدار ضریب پخش بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد که تحت پیش تیمار قرار نگرفتند، داشتند. همان‌طور که از شکل ۶ مشاهده می‌گردد، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت ۱۰ دقیقه بالاترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به دست آمد. مشاهدات مشابهی برای خشک‌کردن سیب جنگلی^۱، گوجه‌فرنگی و هویج گزارش شده است (Jiang et al., 2023; Sadin et al., 2014; Wu et al., 2014). مقدار ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت برای نمونه‌های گزنه در دماهای ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و پیش تیمار فراصوت صفر تا ۱۰ دقیقه در محدوده‌ی $10^{-6} \times 1/44$ تا $10^{-6} \times 4/22$ مترمربع بر ثانیه به دست آمد.



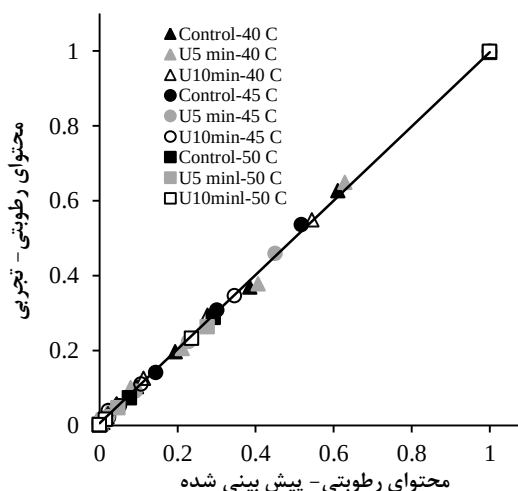
شکل ۶- نمودار اختلاف انتشار رطوبت مؤثر در دما و پیش تیمارهای مختلف فراصوت بر روی گزنه

برای محاسبه انرژی فعال‌سازی (E_a) با استفاده از معادله آرنیوس (معادله (۱۰))، نمودار $\ln D_{eff}$ در مقابل T^{-1} رسم و با استفاده از شیب نمودار به دست آمده انرژی فعال‌سازی محاسبه شد. انرژی فعال‌سازی بیان‌گر مقدار انرژی لازم برای خروج آب از محصول (خشک‌کردن) است



شکل ۴- مقایسه منحنی خشک شدن گزنه حاصل از داده‌های آزمایشی (خطی) با مدل میدیلی و همکاران (نقطه‌ای)

مقایسه بین نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی‌شده در هر خشک‌کردن با خشک‌کن مادون‌قرمز در دما و پیش تیمارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. از این نمودار، به‌وضوح مشخص است که همخوانی بسیار خوبی بین نسبت رطوبت آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده با مدل میدیلی و همکاران به‌منظور خشک‌کردن گزنه در خشک‌کن مادون‌قرمز با پیش تیمار فراصوت وجود دارد و داده‌های پیش‌بینی‌شده عموماً حول خطوط مستقیم ۴۵ درجه، قرار گرفته‌اند.



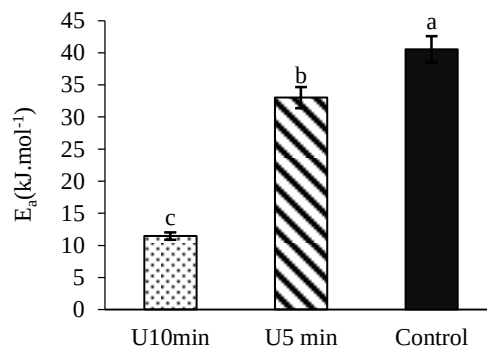
شکل ۵- مقایسه مقادیر رطوبت تجربی و پیش‌بینی‌شده گزنه با مدل میدیلی

در شکل ۶ اثرات ویژگی‌های مختلف بر میانگین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت گزنه خشک‌شده ارائه شده است.

افزایش پیدا کرد. در حوزه خشک کردن، تغییر آنتالپی (ΔH) به عنوان شاخص قدرت اتصال آب به مواد استفاده می شود. به این معنا است که در مقدار بالاتر این ویژگی، آب محکم تر به محصول چسبیده است و انرژی بیشتری برای جدا کردن آب از محصول در طی فرآیند خشک کردن لازم است (da Silva et al., 2020). این رفتار توسط نمونه های گزنه در کاهش محتوی رطوبتی مشاهده شد، به طوری که در دمای پایین تر خشک کردن به انرژی بیشتری برای جدا کردن آب متصل به محصول نیاز داشت. مقادیر تقریباً مشابهی در دانه انار خشک شده $28/53 - 28/70$ کیلوژول بر مول، واریته های مختلف نارگیل از $12/58$ تا $22/31$ کیلوژول بر مول و سیب زمینی خشک شده از $24/20 - 24/37$ کیلوژول بر مول گزارش شده است (Sarpong et al., 2022; Tayyab Rashid et al., 2020; Wanderley et al., 2023). انترپی، تحرک مولکول های آب جذب شده را ارزیابی می کند و نشان دهنده سطح فعل و انفعالات آب و ماده غذایی است. انترپی درجه بی نظمی یا حرکت تصادفی مولکول های آب را توصیف می کند (Cabral de Oliveira et al., 2013; Yogendrarajah et al., 2015). تحلیل رفتار انترپی می توان نتیجه گرفت که این خصوصیت ترمودینامیکی رفتاری مشابه آنتالپی نشان می دهد که در آن مقدار انترپی با افزایش دما و مدت زمان پیش تیمار فراصوت، کاهش می یابد (جدول ۵). از آنجا که کاهش دما منجر به کاهش سطح تحریک مولکول های آب محصول می شود، درجه نظم سامانه آب محصول افزایش می یابد (EL-Mesery et al., 2022). مقادیر منفی انترپی را به وجود تغییرات شیمیایی و ساختار محصول می توان نسبت داد (Öztekin et al., 2022). نتایج مشابهی برای پسته، نارگیل و سیر گزارش شده است (Öztekin et al., 2022; Sarpong et al., 2022; Tayyab Rashid et al., 2020).

امکان پذیری و محدوده انجام یک واکنش شیمیایی (تخیر آب در طی فرآیند خشک کردن) با اندازه گیری تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG) تعیین می شود. مقدار منفی انرژی آزاد گیبس به این معنی است که فرآیند خود به خودی است و نیازی به انرژی اضافه نیست، در حالی که مقادیر مثبت نشان دهنده فرآیند غیر خود به خودی است و نیاز به انرژی اضافه از محیط دارد (Sarpong et al.,

2022). مقدار انرژی فعال سازی در دامنه دمایی ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس با پیش تیمارهای صفر تا ۱۰ دقیقه برای خشک کردن لایه نازک گزنه به ترتیب $40/54$ کیلوژول بر مول و $11/45$ کیلوژول بر مول محاسبه گردید (شکل ۷). با افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت طی فرآیند خشک شدن با مادون قرمز، انرژی فعال سازی کاهش می یابد. اثر تسهیل کننده فراصوت بر حذف رطوبت با توجه به ایجاد ریزکانال هایی در بافت نمونه ها باعث می شود که مقدار انرژی لازم برای خروج آب از محصول کاهش یافته و به تبع آن انرژی فعال سازی کاهش یابد، که این مقدار انرژی لازم با توجه به مصرف بالای انرژی توسط سامانه فراصوت به نسبت نمونه های شاهد به دلیل کاهش مقاومت نمونه ها در برابر خروج آب محتوی کمتر است. مقدار انرژی فعال سازی تعیین شده توسط محققین برای محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که برای کیوی در محدوده $28/5 - 34/16$ کیلوژول بر مول و عناب^۱ در محدوده $25/66 - 30/29$ کیلوژول بر مول محاسبه گردید (Mengeş et al., 2019; Wang et al., 2022).



شکل ۷- نمودار انرژی فعال سازی در دما و پیش تیمارهای مختلف فراصوت بر روی گزنه

جدول ۳ مقادیر توابع ترمودینامیکی (آنتالپی و انترپی و انرژی آزاد گیبس) را برای شرایط مختلف خشک کردن گزنه نشان می دهد. آنتالپی و انترپی با افزایش دمای خشک کردن کاهش می یابند، در حالی که انرژی آزاد گیبس به طور خطی با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت. در دمای یکسان افزایش مدت زمان پیش تیمار فراصوت، مقادیر آنتالپی و انترپی به صورت چشم گیری کاهش و مقدار انرژی آزاد گیبس

2019). در این تحقیق مقدار انرژی آزاد گیبس با افزایش دما از ۴۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس و مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت از صفر تا ۱۰ دقیقه، افزایش یافت. این رفتار

همچنین در مطالعه خصوصیات ترمودینامیکی سیر، بامیه و لوبیای فابا مشاهده شد (Amadeu *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021; EL-Mesery *et al.*, 2022).

جدول ۳- مدل‌های ریاضی اعمال‌شده به منحنی‌های خشک‌کردن

مدت اعمال فراصوت (min)			دمای خشک‌کردن (°C)			نام مدل		
۵۰	۴۵	۴۰	۴۰	۳۵	۳۰	۴۰	۳۵	۳۰
RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²	RMSE	χ^2	R ²
۰/۰۱۸	۸/۴×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۹۱	۰/۰۱۴	۳/۰×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۷	۰/۰۱۸	۴/۶×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۷۸
۰/۰۰۳	۴/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۳	۲/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۱۴	۳/۳×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۸
۰/۰۰۴	۳/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۴	۲/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۱۳	۲/۱×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۷
۰/۰۱۹	۵/۸×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۶	۰/۰۱۶	۳/۴×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۰	۰/۰۲۳	۶/۷×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۵۸
۰/۱۲۳	۳/۸×۱۰ ^{-۲}	۹۵/۹۳	۰/۰۷۷	۸/۶×۱۰ ^{-۲}	۹۶/۲۴	۰/۰۵۹	۵/۰×۱۰ ^{-۲}	۹۷/۵۸
۰/۰۰۴	۳/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۸	۱/۲×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۹۸	۰/۰۲۵	۱/۰×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۶۵
۰/۰۰۳	۵/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۳	۳/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۲۴	۱/۱×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۷۵
۰/۰۰۵	۴/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۴	۲/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۲۴	۷/۸×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۶۲
۰/۰۰۷	۸/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۸	۰/۰۱۰	۱/۶×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۹۴	۰/۰۴۱	۲/۳×۱۰ ^{-۳}	۹۸/۸۹
۰/۱۰۸	۲/۹×۱۰ ^{-۲}	۹۶/۷۵	۰/۱۰۱	۲/۰×۱۰ ^{-۲}	۹۵/۹۹	۰/۰۲۶	۱/۰×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۶۵
۰/۰۳۶	۵/۲×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۸۱	۰/۰۱۵	۴/۲×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۹۱	۰/۰۱۵	۳/۸×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۹
۰/۰۰۳	۶/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۸	۰/۰۰۳	۳/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹	۰/۰۰۳	۲/۰×۱۰ ^{-۵}	۹۹/۹۹
۰/۱۶۷	۵/۶×۱۰ ^{-۲}	۹۱/۷۴	۰/۰۴۰	۲/۴×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۱۱	۰/۰۰۹	۱/۰×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۹۵
۰/۰۳۶	۲/۶×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۶۲	۰/۰۱۸	۴/۸×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۸۲	۰/۰۲۳	۷/۵×۱۰ ^{-۴}	۹۹/۶۷
۰/۰۵۰	۱/۸×۱۰ ^{-۳}	۹۹/۳۵	۰/۰۶۸	۹/۲×۱۰ ^{-۳}	۹۸/۱۰	۰/۰۶۶	۴/۴×۱۰ ^{-۳}	۹۸/۷۷

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار فراصوت و دمای خشک‌کردن بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت گیاه گزنه

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
مدل	۶/۹۵۵×۱۲-۱۰	۵	۱/۳۹۱×۱۲-۱۰	۲۴۴/۹۱ ^{xx}
دمای خشک‌کردن (A)	۱/۱۸۸×۱۲-۱۰	۱	۱/۱۸۸×۱۲-۱۰	۲۰۸/۳۵ ^{xx}
فراصوت (B)	۴/۹۳۲×۱۲-۱۰	۱	۴/۹۳۲×۱۲-۱۰	۸۶۴/۸۹ ^{xx}
AB	۴/۹۷۰×۱۲-۱۰	۱	۴/۹۷۰×۱۲-۱۰	۸۷/۱۵ ^{xx}
A ²	۹/۲۴۵×۱۴-۱۰	۱	۹/۲۴۵×۱۴-۱۰	۱۶/۲۱ ^x
B ²	۲/۴۵۰×۱۲-۱۰	۱	۲/۴۵۰×۱۲-۱۰	۴۲/۹۶ ^{xx}
باقی‌مانده	۱/۷۱۱×۱۴-۱۰	۳	۵/۷۰۳×۱۵-۱۰	
همبستگی کل	۶/۹۷۲×۱۲-۱۰	۸		

**و * به ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد است.

جدول ۵- خواص ترمودینامیکی فرآیند خشک‌کردن گزنه با پیش تیمار فراصوت

دما (K)	فراصوت ۱۰ دقیقه	فراصوت ۵ دقیقه	شاهد
۳۱۳/۱۵	۸/۸۴	۳۰/۴۱	۳۷/۹۴
۳۱۸/۱۵	۸/۸۰	۳۰/۳۷	۳۷/۹۰
۳۲۳/۱۵	۸/۷۶	۳۰/۳۳	۳۷/۸۵
۳۱۳/۱۵	۶۴/۱۵	۶۱/۳۹	۶۰/۸۵
۳۱۸/۱۵	۶۵/۲۱	۶۲/۴۱	۶۱/۸۷
۳۲۳/۱۵	۶۶/۲۸	۶۳/۴۳	۶۲/۸۸
۳۱۳/۱۵	-۱۷۶/۶۰	-۹۸/۹۳	-۷۳/۱۸
۳۱۸/۱۵	-۱۷۷/۳۱	-۱۰۰/۷۲	-۷۵/۳۵
۳۲۳/۱۵	-۱۷۸/۰۰	-۱۰۲/۴۵	-۷۷/۴۵

آنتالپی (kJ.mol⁻¹)

انرژی آزاد گیبس (kJ.mol⁻¹)

آنتروپی (kJ.mol⁻¹)

نتیجه گیری

خشک کردن به روش مادون قرمز یکی از روش های نسبتاً جدید است که در آن انتقال گرما، از طریق تابش امواج مادون قرمز صورت می گیرد. در این تحقیق فرآیند خشک کردن لایه نازک گزنه به وسیله خشک کن مادون قرمز در دماهای مختلف خشک کردن و با پیش تیمارهای فراصوت مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده، زمان خشک شدن با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان پیش تیمار گزنه، به طور قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین دمای خشک کردن و پیش تیمار فراصوت تأثیر به سزایی بر روی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت داشته و مقدار آن در دماها و پیش تیمارهای مورد مطالعه در محدوده $10^{-6} \times 1/44$ تا $10^{-6} \times 4/22$ مترمربع بر ثانیه قرار داشت و مقدار آن با تغییر دما از رابطه آرنیوس تبعیت کرد. مقدار انرژی فعال سازی در دماهای مختلف برای پیش تیمارهای فراصوت با افزایش مدت زمان پیش تیمار کاهش پیدا کرد. آنتالپی و انتروپی با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان اعمال پیش تیمار فراصوت کاهش یافتند، درحالی که انرژی آزاد گیبس به طور خطی با افزایش دمای خشک کردن و مدت زمان تیمار فراصوت، افزایش یافت.

منابع

- Arepally, D., Ravula, S., Malik, G., & Kamidi, V. (2017). Mathematical Modelling, Energy and Exergy Analysis of Tomato Slices in a Mixed Mode Natural Convection Solar Dryer. *Chemical Science International Journal*, 20(4): 1-11.
- 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.
- Beigi, M. (2021). Infrared dehydration of blanched quince slices: Study on process and mass transfer characteristics. *Latin American Applied Research*, 51(4): 241-247.
- 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.
- Cárcel, J. A., Benedito, J., Rosselló, C., & Mulet, A. (2007). Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 472-479.
- 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>
- 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 and Mass Transfer/Waerme-Und Stoffuebertragung*, 53(6): 1863-1871.
- 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.
- de la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44(SUPPL.). <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.181>
- 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.
- Doymaz, I. (2014). Suitability of Thin-Layer Drying Models for Infrared Drying of Peach
- Akanbi, C. T., & Oludemi, F. O. (2004). Effect of processing and packaging on the lycopene content of tomato products. *International Journal of Food Properties*, 7(1): 139-152.
- 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.
- Akhoundzadeh Yamchi, A., Hosainpour, A., & Feizollahzadeh, M. (2023). The Effect of Ultrasonic Pretreatment on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color of Apricot Slices. *Agricultural Mechanization*, 7(4): 43-52.
- 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>

- 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.
- Khanloo, M. H., Choobkar, N., & Aghajani, A. (2020). Determination of the effect of ethanolic extract of *Ocimum basilicum* seed and *Urtica dioica* leaves on the physicochemical and sensory characteristics of sausage during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*, 17(99): 79-90.
- Latimer, G. W. (2012). AOAC international. Official methods of analysis of AOAC International. 19th Ed. Gaithersburg, MD, USA: AOAC International.
- Maanda, M. Q., & Bhat, R. B. (2010). Wild vegetable use by Vhavenda in the Venda region of Limpopo Province, South Africa. *Phyton-Revista Internacional de Botanica Experimental*, 79: 189.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Rahmadian-Koushkaki, H., & Rafiee, M. R. (2022). Comparative exergy and energy assessment of a biogas plant with biological purification process: A multigeneration system. *Energy and Environment*, 33(7): 1326–1345.
- 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>
- Nanvakenari, S., Movagharnejad, K., & Latifi, A. (2022). Modelling and experimental analysis of rice drying in new fluidized bed assisted hybrid infrared-microwave dryer Highlights: *Food Research International*, 111617. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111617>
- Okunola, A. A., Adekanye, T. A., Okonkwo, C. E., Kaveh, M., Szymanek, M., Idahosa, E. O., Olayanju, A. T., & 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. (2022). 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>
- Polat, A., Taskin, O., & Izli, N. (2022). Intermittent and continuous infrared drying of sweet potatoes. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 58(10): 1709–1721.
- Ríos-Moreno, G., Cruz-Reyes, I., Vargas-Rodríguez, P., Félix-Flores, M. G., Quiñones-Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(6): 2232–2239.
- 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.
- Du, Y., Yan, J., Wei, H., Xie, H., Wu, Y., & Zhou, J. (2023). Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities. *Case Studies in Thermal Engineering*, 43(November 2022), 102780. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102780>
- 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 Studies in Thermal Engineering*, 33(March), 101929. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101929>
- Fang, S., Wang, Z., & Hu, X. (2009). Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): Thin-layer mathematical modelling. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(9): 1818–1824.
- Fatemeh Fadaie, Khalili, M., & Gholipour, A. (2019). Intra and inter-specific morphological variations in the genus *Urtica* L. (Urticaceae), new key and new descriptions for species in Iran. *Journal of Plant Research*, 31(4): 892–904.
- Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pretreatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41(4): 604–610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007>
- Harbourne, N., Marete, E., Jacquier, J. C., & O’Riordan, D. (2009). Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*). *LWT-Food Science and Technology*, 42(9): 1468–1473.
- Huang, D., Yang, P., Tang, X., Luo, L., & Sundén, B. (2021). Application of infrared radiation in the drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 110: 765–777.
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81(1): 88–97.
- 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.

- Tayyab Rashid, M., Ahmed Jatoy, 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>
- Upton, R. (2013). Stinging nettles leaf (*Urtica dioica* L.): Extraordinary vegetable medicine. *Journal of Herbal Medicine*, 3(1): 9–38.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zannou, O., Pashazadeh, H., Ghellam, M., Hassan, A. M. A., & Koca, I. (2021). Optimization of drying temperature for the assessment of functional and physical characteristics of autumn olive berries. In *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15658>
- Reyes, G., & Lozada-Rodríguez, L. (2022). Mathematical modeling of infrared drying of red pitaya pulp (*Stenocereus queretaroensis*) for potential use of its betalains. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), 1–14.
- S. Abasi, Minaiee, S., & Taghaza, M. H. K. (2014). Investigation of kinetics and energy consumption of thin layer drying of corn. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(1): 98–107.
- Sadeghi, E., Haghighi Asl, A., & Movagharnejad, K. (2019). Mathematical modelling of infrared-dried kiwifruit slices under natural and forced convection. *Food Science and Nutrition*, 7(11): 3589–3606.
- 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.
- 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.
- Sarpong, F., Zhou, C., Bai, J., Amenorfe, L. P., Golly, M. K., & Ma, H. (2019). Modeling of drying and ameliorative effects of relative humidity (RH) against β -carotene degradation and color of carrot (*Daucus carota* var.) slices. *Food Science and Biotechnology*, 28(1): 75–85.
- Selvi, K. Ç., Alkhaled, A. Y., & Yıldız, T. (2022). Application of Artificial Neural Network for Predicting the Drying Kinetics and Chemical Attributes of Linden (*Tilia platyphyllos* Scop.) during the Infrared Drying Process. *Processes*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/pr10102069>
- Şen, S., & Aydin, F. (2020). Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01326-0>
- 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>
- Shilton, N. (2003). *DRYING| Chemical Changes*.
- 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.
- 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.