

تأثیر پیش تیمار امواج فراصوت بر روی سینتیک خشک کردن، نفوذ رطوبت مؤثر و رنگ برگه زردآلو

ابوالفضل آخوندزاده یامچی^۱، عادل حسین پور^{۱*}، مازیار فیض‌اله‌زاده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

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

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

چکیده

ایران از نظر تولید زردآلو در جهان، مقام دوم را دارد و مطالعه روش‌های خشک کردن این میوه برای کاهش فسادپذیری ضروری می‌باشد. در این پژوهش تأثیر پیش تیمار فراصوت و ضخامت برگه‌های زردآلو روی سینتیک خشک شدن زردآلو در یک خشک کن هوای گرم بررسی شد. تأثیر پیش تیمار فراصوت در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و ضخامت در سه سطح ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر زمان خشک شدن، مدل سازی، ضریب پخش رطوبت و تغییرات کلی رنگ در طی فرآیند خشک شدن زردآلو بررسی گردید. نتایج نشان داد افزایش مدت زمان اعمال پیش تیمار و کاهش ضخامت نمونه موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت زمان آن می‌گردد. بیشترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه با ضخامت ۱۰ میلی‌متر شاهد با ۳۰۰ دقیقه و کمترین زمان خشک شدن متعلق به نمونه با ضخامت ۳ میلی‌متر تحت پیش تیمار فراصوت ۳۰ دقیقه با ۴۰ دقیقه بود. مدل میدلی بهترین برازش را با داده‌های تجربی داشت. نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی‌متر پیش تیمار فراصوت شده به مدت ۳۰ دقیقه و نمونه ۳ میلی‌متر شاهد به ترتیب با 2.62×10^{-7} و 2.99×10^{-8} مترمربع بر ثانیه دارای بیشترین و کمترین ضریب پخش رطوبت بودند. امواج فراصوت روی تغییر رنگ نمونه‌ها به دلیل ماهیت فیزیکی این امواج تأثیر نداشته و اختلاف شاخص تغییرات کلی رنگ (ΔE) با نمونه شاهد ناشی از انجام واکنش‌های شیمیایی رنگ‌زا مثل واکنش میلارد بین قندها و پروتئین‌ها و تشکیل ملانوئیدین‌ها است. واژه‌های کلیدی: خشک کردن، رنگ، زردآلو، ضریب پخش رطوبت، فراصوت

The Effect of Ultrasonic Pretreatment on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color of Apricot Slices

Abolfazl Akhondzadeh Yamchi¹, Adel Hosainpour^{1*}, and Maziar Feizollahzadeh¹

Received: 5 Dec 2022

Accepted: 18 Mar 2023

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

*Corresponding author: a.hosainpour@urmia.ac.ir

Abstract

Iran is the second largest producer of apricots in the world and study of drying methods of this fruit is necessary to reduce the corruptibility. In this study, the effects of ultrasonic pretreatment and thickness of apricot slices on drying kinetics in a hot air dryer were investigated. The effect of ultrasonic pretreatment at three levels of 10, 20 and 30 min and thickness at three levels of 3, 5 and 10 mm on drying time, modeling, effective moisture diffusivity and color changes during apricot drying process were studied. The results indicated that increasing the duration of pretreatment and decreasing the sample thickness increase the drying rate and decrease its duration. In the treated samples, the highest drying time with 300 min was for 10 mm thickness-control samples and the shortest time with 40 min was for 3 mm slices under 30 min ultrasonic pretreatment. Midilli model had the best fitting with the experimental data. 30 min ultrasonic pretreatment for 10 mm thickness samples and the control sample with 3 mm thickness, with 2.62×10^{-7} and 2.99×10^{-8} m²/s had respectively the highest and lowest effective moisture coefficient. Ultrasonic wave did not affect the color of the samples but the color change index (ΔE) for the control samples was occurred due to the chemical reactions such as Millard reaction between sugars and proteins and the formation of Melanoidins.

Keywords: Apricot, Color, Drying, Effective moisture diffusivity, Ultrasound

How to cite:

Akhondzadeh Yamchi, A., Hosainpour, A., and Feizollahzadeh, M. 2023. The Effect of Ultrasonic Pretreatment on Drying Kinetics, Effective Moisture Diffusivity and Color of Apricot Slices. *Journal of Agricultural Mechanization* 7 (4): 43-52.

۱- مقدمه

ایران پس از ترکیه مهم‌ترین تولیدکننده زردآلو در جهان است. زردآلو با نام علمی (پرموس آرمینا کا) از خانواده رزاسه یکی از خوشمزه‌ترین میوه‌ها در مناطق معتدله است. میوه آن تقریباً کروی و گوشتی و بعضی از انواع آن تقریباً بی‌ضی شکل و یا نوک دراز بوده و به واسطه شیاری به دو قسمت مساوی (قرینه) تقسیم می‌شود (Hassan-Beygi et al., 2009). میوه تازه و بر گه زردآلو ارزش تغذیه‌ای بالایی دارد و سرشار از آهن و ویتامین‌های A، B و C است. مقادیر بالای بتاکاروتن و لیکوپین موجود در زردآلو باعث می‌شود تا از اکسیداسیون کلسترول جلوگیری کند (Hassan-Beygi et al., 2015, Salehi et al., 2009). اکثر میوه‌ها مانند بسیاری دیگر از محصولات کشاورزی به علت دارا بودن رطوبت و فعالیت آبی بالا فسادپذیرند و بعد از برداشت باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن به مصرف رسیده و یا در شرایط مطلوبی نگهداری شوند. از آنجایی که بازار مصرف تازه خوری زردآلو محدود به مانی کوتاهی بوده و میزان ماندگاری محصول حتی در سامانه‌های پیشرفته انبارداری نیز محدود بوده و هزینه‌های فراوانی را در بر دارد؛ بخش زیادی از محصول می‌بایست به نحوی فرآوری گردد که از فساد آن جلوگیری و زمان ماندگاری آن افزایش یابد (Faraji haremi, 1997, Maleki & Dokhani, 2009). انتخاب روش نگهداری بستگی به نوع محصول دارد. زردآلو علاوه بر تازه‌خوری، فرآوری‌شده و به‌صورت خشک، منجمد، کمپوت، عصاره و مربا نیز عرضه می‌گردد (Fellows, 1990).

فرآیند خشک کردن زردآلو در ایران عمدتاً به‌صورت سنتی (آفتابی) انجام می‌گردد که مشکلاتی مانند زمان‌بر بودن فرآوری، آلودگی محصول در طول فرآیند و همچنین عدم توانایی در برآورده کردن انتظارات بازارهای مصرف را به دنبال دارد (Basiri, 1998, Tavakkolipour, 2002). 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 فرآیند و همچنین ویژگی‌های کیفی به‌شمار می‌روند (Basiri, 1998). تنوع زیاد محصولات کشاورزی منجر به معرفی روش‌های گوناگون خشک کردن برای کاهش رطوبت ماده غذایی شده است. فرایند خشک کردن می‌تواند به شکل‌های گوناگون و با خشک‌کن‌های متفاوتی انجام گیرد که هر یک برای فرایند محصول خاصی طراحی شده است. انرژی فراصوت به دلیل قابلیت انجام در دمای محیط و حفظ خصوصیات کیفی محصولات بسیار توصیه شده است (Simal et al., 1998). امواج فراصوت در اثر پدیده 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 میکرو کانال‌هایی جهت سهولت انتقال جرم طی خشک کردن توسط هوای داغ می‌گردد (Fernandes et al., 2008). امواج فراصوت ضمن تشکیل لوله‌های مویین 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 به‌روش اسمز بوده و تعداد کمی مطالعه موردی درباره تأثیر روش فوق به‌طور مستقیم در فرآیند خشک کردن انجام گرفته است (Cárcel et al., 2007). در روش استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک پیش مرحله قبل از فرایند اصلی خشک کردن، محصول کامل و یا برش‌های آن در آب قرار گرفته تا امکان موج دهی به‌وجود آید. مهم‌ترین مزیت این روش کاربرد آن در دمای محیط و آسیب نرساندن به بافت محصول می‌باشد (Mason, 1988).

مدل‌های شبیه‌سازی، نقش مهمی در خشک کردن و بهبود آن ایفا می‌نمایند (Bruin & Luyben, 1980). باید فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدل‌سازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی به‌دست‌آمده از مدل، روند خشک کردن محصول را پیش‌بینی نمود. هدف از ارائه مدل خشک کردن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه خشک کردن محصول است (Akanbi & Oludemi, 2004). آژوبل و همکاران به مطالعه سینتیک خشک شدن میوه موز به کمک امواج فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و توان ۴۸۷۰ وات بر مترمربع در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزایش زمان اعمال فراصوت سبب افزایش قابلیت انتشار رطوبت شده است (Azoubel et al., 2010). Kowalski & Pawłowski (2015) تشدید خشک کردن سیب با توجه به افزایش امواج فراصوت را بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که امواج فراصوت تأثیر مثبتی بر روی خشک شدن همرفتی و سینتیک خشک شدن داشته و زمان خشک شدن کاهش یافت. (2016) Corrêa et al. تأثیر استفاده از پیش تیمار فراصوت در آب مقطر و خشک کردن همرفتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از پیش تیمار فراصوت و دمای بالای خشک کردن به روند خشک شدن شتاب می‌بخشد و خشک شدن در دماهای بالاتر با استفاده از امواج فراصوت سریع‌تر می‌باشد.

هدف از این تحقیق بررسی اثر پیش تیمار فراصوت و ضخامت برش‌های میوه روی سینتیک خشک شدن و تغییرات کلی رنگ برگه‌های زردآلو در اثر خشک شدن با روش هوای گرم می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی و خشک کردن برگه‌های زردآلو

زردآلو رقم عسگرآباد در تیرماه ۱۴۰۰ از باغ‌های ارومیه تهیه گردید. میوه‌های برداشت‌شده تا زمان انجام آزمایش در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای تعیین رطوبت اولیه زردآلو، سه نمونه ۲۰ گرمی در آون در دمای 103 ± 2 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و بعد از بیرون آوردن نمونه‌ها، بلافاصله آنها را وزن کرده و رطوبت اولیه زردآلو بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید (Kashaninejad & Tabil, 2009). مقدار رطوبت اولیه زردآلو در ۸۸/۸ در صد بر مبنای تر به دست آمد.

نمونه‌ها در هنگام آزمایش از سردخانه بیرون آورده و به ورقه‌های به ضخامت ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر برش داده شدند. برای اعمال پیش تیمار فراصوت روی نمونه‌ها از یک دستگاه حمام فراصوت مدل Parsonic 2600S با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز و توان ۷۰ وات استفاده شد. مخزن دستگاه با دو لیتر آب مقطر پر شد، پس از رسیدن دمای آب مقطر به ۲۵ درجه سلسیوس، ۵۰ گرم از نمونه در داخل حمام قرار گرفت. پیش تیمار فراصوت و خیساندن در آب مقطر در پنج تکرار و سه زمان ۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه روی نمونه‌ها اعمال گردید. وزن نمونه‌ها با یک ترازوی دیجیتالی AND مدل DJ-V320A، با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد، سپس نمونه در درون آون مدل Memmert UNE500 با دمای ۶۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. در طول فرایند خشک شدن وزن نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت (رطوبت تعادلی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس) اندازه‌گیری شد و میزان کاهش متوسط وزن محاسبه گردید. نسبت رطوبت و آهنگ خشک کردن زردآلو با استفاده از معادله (۱) و (۲) محاسبه شد (Alizehi et al., 2020; Doymaz, 2017).

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

$$DR = \frac{M_t - M_{t+dt}}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

که در آن، M_t مقدار رطوبت ورقه‌های زرد آلو در لحظه t (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 رطوبت اولیه (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_e رطوبت تعادلی (گرم آب بر گرم ماده خشک) و MR نسبت رطوبت، M_{t+dt} مقدار رطوبت در لحظه $t+dt$ (گرم آب بر گرم ماده خشک)، Δt فاصله زمانی خشک شدن (دقیقه) و DR نرخ خشک شدن (گرم آب بر گرم ماده خشک در دقیقه) می‌باشند.

۲-۲- مدل سازی ریاضی منحنی‌های خشک کردن

به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن برش‌های زردآلو، از مدل‌ها و معادله‌های مختلف خشک کردن که توسط محققان جهت بررسی این‌گونه فرایندها توصیه شده است، استفاده گردید.

معادله‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فرایند خشک کردن زردآلو در جدول ۱ نشان داده شده است. مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل‌های توصیفی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن برش‌های زردآلو به کمک ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار Stat Graphics برآورد گردید. در مدل‌های توصیف‌کننده سینتیک خشک کردن برش‌های زردآلو، ضریب تبیین، R^2 ریشه میانگین مربعات خطا، $RMSE$ و کای اسکوار χ^2 ما بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر، مورد مقایسه قرار گرفت. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش‌بینی نحوه خشک شدن برش‌های زردآلو، مدل دارای حداکثر همبستگی R^2 و حداقل χ^2 و $RMSE$ به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن برش‌های زردآلو انتخاب شد. این معیارها توسط معادلات (۳)، (۴) و (۵) محاسبه شدند. (Kayacan et al., 2018; Zhu, 2018). در این معادلات، $MR_{exp,i}$ رطوبت نمونه‌ها مشاهده شده در i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ رطوبت نمونه‌ها پیش‌بینی شده از مدل در i امین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل می‌باشد.

جدول ۱. مدل‌های ریاضی اعمال شده بر منحنی‌های خشک کردن
Table 1. Mathematical models applied to the drying curves

نام مدل Model name	معادله مدل Model formula*	منبع Reference
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Arepally et al., 2017)
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Zannou et al., 2021)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Şen & Aydin, 2020)
Parabolic	$MR = a + bt + ct^2$	(Coşkun et al., 2017)

* a, b, c, k و n ثابت‌های تجربی و ضرایب در مدل‌های خشک کردن می‌باشند.

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

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

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

۲-۳- ضریب پخش رطوبت

ضریب پخش رطوبت یک ویژگی مهم در مدل‌سازی فرایند خشک کردن مواد غذایی و دیگر مواد است که تابع درجه حرارت و رطوبت مواد می‌باشد. معادله انتشار قانون دوم فیک بر انتشار جرم

۳- نتایج و بحث

اثر ضخامت برش‌های زردآلو و مدت‌زمان پیش‌تیمار فراصوت بر تغییرات رطوبت در واحد زمان در شکل ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش مدت‌زمان پیش‌تیمار فراصوت و کاهش ضخامت برگه‌ها، سرعت خشک‌شدن افزایش می‌یابد. افزایش زمان پیش‌تیمار باعث ایجاد میکرو کانال‌هایی در بافت زردآلو شده و رطوبت میان بافتی با آهنگ و سرعت بیشتری در زمان کمتری تبخیر می‌شود (Fernandes et al., 2008). هنگامی که اولتراسوند به محیط وارد می‌شود، افزایش انتقال جرم توسط دو عامل مهم کنترل می‌شود (Yao, 2016). اولین عامل مربوط به تشکیل تلاطم با شدت بالا و متعاقب آن کاهش در مقاومت لایه مرزی است که اثر کاویتاسیون نامیده می‌شود (Gallego-Juárez et al., 2007). عامل دوم مربوط به اثر اسفنجی است که تشکیل کانال‌های میکرو می‌باشد. وجود این ریز کانال‌ها باعث افزایش سرعت خشک‌شدن و در نهایت کاهش زمان خشک‌شدن می‌شود. در واقع، اولتراسوند پیوند محکم با آب بافت را ضعیف می‌کند و خروج آب را تسهیل می‌کند (Bas, et al., 2015; Rodríguez et al., 2014). نتایج مشابهی توسط (Amami et al., 2017) روی توت فرنگی، (Souza da Silva et al., 2019) در مورد شلیل (Zhang et al., 2021) روی برش‌های سیب‌زمینی و (Alizehi et al., 2020) روی هویج به‌دست آمد که اثرات مشابه اولتراسوند در کاهش مدت زمان فرآیند خشک‌کردن را داشت.

شکل ۲ نشان‌دهنده تأثیر پیش‌تیمار فراصوت بر نرخ خشک‌شدن زردآلو می‌باشد. با گذشت زمان خشک‌شدن و به تبع آن کاهش رطوبت نمونه‌ها، نرخ خشک‌شدن کاهش می‌یابد. افزایش مدت زمان پیش‌تیمار فراصوت و کاهش ضخامت به‌علت کمک به خروج رطوبت باعث افزایش نرخ خشک‌شدن زردآلو گردید. در نمونه‌های تحت تیمار مورد مطالعه، کمترین نرخ خشک‌شدن متعلق به نمونه شاهد با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و بیشترین آهنگ خشک‌شدن مربوط به نمونه تحت تیمار فراصوت ۳۰ دقیقه با ضخامت ۳ میلی‌متر بود. امواج فراصوت هنگام عبور از بافت نمونه‌ها کانال‌های بسیار ریزی را در دیواره سلولی ایجاد می‌کنند، در نتیجه با کاهش مقاومت داخلی در برابر انتشار رطوبت، شرایط برای خروج سریع‌تر رطوبت در طول فرآیند خشک‌کردن فراهم می‌گردد. با گذشت زمان مشخص از فرآیند خشک‌شدن، مقدار رطوبت خارج شده از نمونه تحت تیمار فراصوت بیش‌تر از نمونه شاهد است (Jambrak et al., 2007). نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر امواج فراصوت، ضخامت برش‌های میوه و برهم‌کنش تیمار فراصوت و ضخامت بر زمان خشک‌شدن در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). با افزایش زمان فراصوت و کاهش ضخامت برش‌های میوه و اثر متقابل آن‌ها زمان خشک‌شدن را کاهش می‌دهد. معنی‌دار بودن اثر متقابل بین پیش‌تیمار فراصوتی و ضخامت نمونه‌ها را می‌توان با کاهش شدید زمان خشک‌شدن نمونه‌ها نسبت به حالت‌های جداگانه اعمال هر تیمار توجیه نمود (Akhoundzadeh Yamchi et al., 2022).

در طی دوره نزولی خشک‌کردن محصولات کشاورزی دلالت دارد. برای حل معادله فیک فرض می‌گردد که فرآورده غذایی تک‌بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و حرکت درونی رطوبت همانند مقاومت اصلی در برابر انتقال رطوبت است. قانون دوم فیک در حالت کلی به‌صورت روابط زیر می‌باشند (Delfiya et al., 2021; Mohammadi et al., 2019). فرضیات زیر باید در نظر گرفته شود:

۱. رطوبت به‌طور یکنواخت در جسم توزیع شده است.
۲. تعادل حرارتی بین سطح مواد و هوای خشک‌کننده وجود دارد.
۳. مقاومت در برابر انتقال جرم در سطح و داخل نمونه برابر است.
۴. انتقال جرم فقط از طریق انتشار انجام می‌شود.
۵. ضریب پخش رطوبت ثابت است.

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

که در آن، M مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x مختصه مکانی می‌باشد. حل یک بعدی معادله فیک برای یک شکل تیغه‌ای همچون قطاع زردآلو به‌صورت زیر می‌باشد:

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

برای پروسه‌های طولانی خشک‌شدن، معادله (۷) را می‌توان به‌صورت معادله (۸) نوشت.

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

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

که در آن، L نصف ضخامت برش قطعه زردآلو (m)، D_{eff} ضریب پخش رطوبت (m^2/s)، t زمان (s)، MR نسبت رطوبت (بدون بعد) و k شیب خط می‌باشد. ضریب پخش رطوبت معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک‌کردن برحسب $\ln MR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد.

۲-۴- رنگ‌سنجی

در اکثر پژوهش‌های صنایع غذایی برای تحلیل تغییر رنگ در فرآیند خشک‌کردن از فضای رنگی $L^*a^*b^*$ استفاده می‌شود (Tkalčič & Tasič, 2003). برای اندازه‌گیری رنگ از دستگاه Chroma Meter CR-400 استفاده گردید. پس از اندازه‌گیری رنگ، برای محاسبه تغییرات کلی رنگ (ΔE) در طی فرآیند خشک‌کردن از رابطه (۱۰) استفاده شد (Suo et al., 2022).

$$\Delta E = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

در این رابطه، ΔE تغییرات کلی رنگ، ΔL^* اختلاف روشنایی، Δa^* اختلاف قرمزی/سبزی و Δb^* اختلاف زردی/آبی نسبت به نمونه شاهد قبل از خشک‌شدن را نشان می‌دهند.

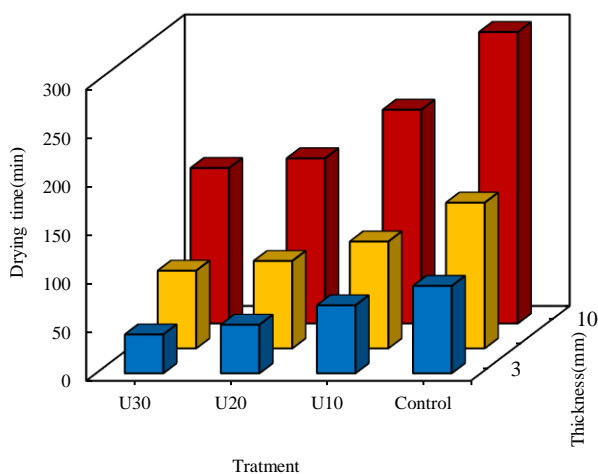
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار و ضخامت بر زمان خشک شدن برگه های زردآلو

Table 2. The results of analysis of variance for the effect of pretreatment and thickness on the drying time of apricot slices

F	میانگین مربعات MS	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.V
168.70**	13121.29	39363.89	3	پیش تیمار فراصوت Ultrasound Pretreatment
886.75**	68969.44	137938.89	2	ضخامت Thickness
				پیش تیمار فراصوت × ضخامت Thickness ×
20.70**	1610.18	9661.11	6	Ultrasound Pretreatment
	77.77	1866.67	24	خطا Error
			35	مجموع Sum

**وجود اختلاف معنی دار در سطح 1%

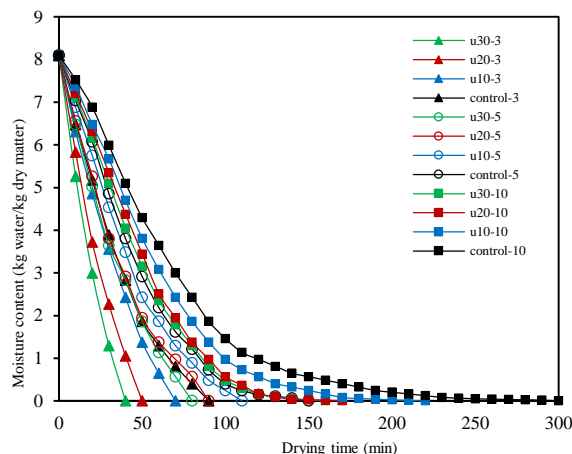
**Significant difference at 1% probability level



شکل ۳- نمودار زمان لازم برای خشک کردن برگه زردآلو

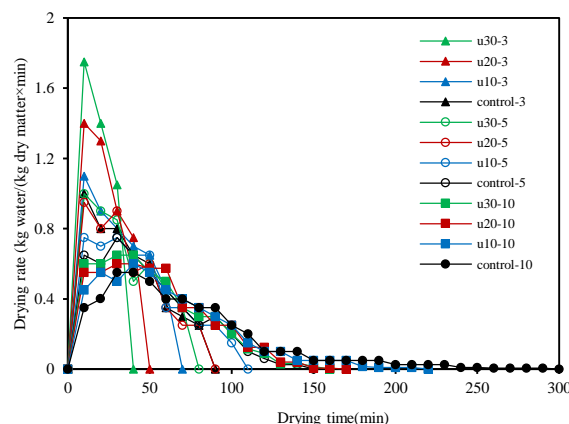
Fig 3. The curves of the time needed to dry apricot slices

مدل های دینامیکی خشک کردن لایه نازک نرم افزار Stat Graphics Plus v5 برای برگه های زردآلو در دمای ۶۵ درجه سانتی گراد برازش شدند. نتایج مدل سازی فرآیند خشک کردن برش های زردآلو و شاخص های ارزیابی مدل در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی های خشک کردن برگه زردآلو در پیش تیمارهای مختلف اولتراسوند

Fig 1. Drying curves of apricot leaves in different ultrasound pretreatments



شکل ۲- منحنی های نرخ خشک کردن برگه زردآلو در پیش تیمارهای مختلف اولتراسوند

Fig 2. Drying rate curves of apricot leaves in different ultrasound pretreatments

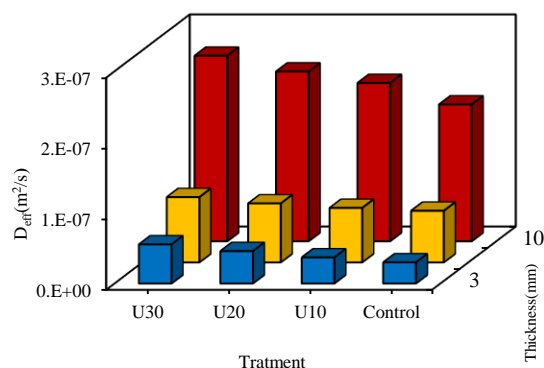
نتایج نشان داد که افزایش زمان موجهی و کاهش ضخامت برگه های زردآلو باعث کاهش زمان خشک شدن می شود (شکل ۳). با افزایش زمان موجهی از ۱۰ به ۳۰ دقیقه در ضخامت ۱۰ میلی متر، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت تعادلی حدود ۴۷ درصد کاهش یافت. با افزایش ضخامت برگه ها از ۳ به ۱۰ میلی متر در تمامی تیمارها افزایش مدت زمان خشک شدن نمونه ها رخ داده است. طولانی ترین زمان خشک شدن مربوط به نمونه شاهد با ضخامت ۱۰ میلی متر به مدت ۳۰۰ دقیقه و کمترین زمان خشک شدن متعلق به نمونه تحت پیش تیمار فراصوت به مدت ۳۰ دقیقه با ضخامت ۳ میلی متر با مدت زمان خشک شدن ۴۰ دقیقه بود.

جدول ۳- مقادیر آماری تحلیل مدل خشک کردن

Table 3. Statistical values of drying model analysis

مدل Model	ضخامت Thickness (cm)	تیمار Treatments (min)	ثابت ها و ضرایب مدل Model constants and coefficients	RMSE	χ^2	R ²
Page	0.3	U30	k=0.0143, n=1.4411	0.0387	0.0025	99.29
		U20	k=0.0118, n=1.4031	0.0350	0.0018	99.31
		U10	k=0.0079, n=1.3853	0.0352	0.0016	99.15
		Control(0)	k=0.0089, n=1.3064	0.0214	0.0006	99.65
	0.5	U30	k=0.0092, n=1.3121	0.0294	0.0011	99.35
		U20	k=0.0094, n=1.2832	0.0207	0.0005	99.67
		U10	k=0.0074, n=1.2791	0.0272	0.0009	99.42
		Control	k=0.0044, n=1.3973	0.0114	0.0002	99.89
	1	U30	k=0.0035, n=1.4400	0.0120	0.0002	99.88
		U20	k=0.0029, n=1.4681	0.0134	0.0002	99.85
		U10	k=0.0028, n=1.4274	0.0063	4.4×10 ⁻⁵	99.96
		Control	k=0.0067, n=1.1815	0.0221	0.0005	99.49
Logaritmik	0.3	U30	k=0.0260, a=1.5510, c=-0.5497	0.0036	3.2×10 ⁻⁵	99.99
		U20	k=0.0216, a=1.5172, c=-0.5138	0.0098	0.0002	99.96
		U10	k=0.0155, a=1.5199, c=-0.5192	0.0064	6.5×10 ⁻⁵	99.98
		Control(0)	k=0.0187, a=1.2468, c=-0.2371	0.0130	0.0002	99.89
	0.5	U30	k=0.0169, a=1.3513, c=-0.3478	0.0089	0.0001	99.95
		U20	k=0.0188, a=1.2323, c=-0.2205	0.0163	0.0004	99.82
		U10	k=0.0163, a=1.2513, c=-0.2254	0.0208	0.0006	99.70
		Control(0)	k=0.0177, a=1.1642, c=-0.1180	0.0296	0.0011	99.33
	1	U30	k=0.0169, a=1.1719, c=-0.1200	0.0326	0.0013	99.18
		U20	k=0.0161, a=1.1855, c=-0.1250	0.0378	0.0017	98.91
		U10	k=-0.6110, a=1.2269, c=-1.2071	0.0260	0.0008	99.41
		Control	k=0.0149, a=1.1176, c=-0.0329	0.0309	0.0010	99.05
Midilli	0.3	U30	k=0.0298, a=1.0000, b=-0.0052, n=1.0759	0.0005	1.0×10⁻⁶	100.00
		U20	k=0.0234, a=1.0009, b=-0.0038, n=1.0863	0.0099	0.0003	99.97
		U10	k=0.0177, a=0.9985, b=-0.0030, n=1.0552	0.0075	0.0001	99.97
		Control	k=0.0138, a=0.9969, b=-0.0010, n=1.1478	0.0095	0.0001	99.95
	0.5	U30	k=0.0160, a=1.0030, b=-0.0030, n=1.0276	0.0094	0.0001	99.95
		U20	k=0.0139, a=0.9998, b=-0.0009, n=1.1418	0.0139	0.0003	99.89
		U10	k=0.0075, a=0.9962, b=-0.0005, n=1.2695	0.0087	0.0001	99.95
		Control(0)	k=0.0048, a=0.9921, b=-0.0001, n=1.3639	0.0091	0.0001	99.94
	1	U30	k=0.0037, a=0.9885, b=-0.0001, n=1.4110	0.0091	0.0001	99.94
		U20	k=0.0025, a=0.9839, b=-0.0001, n=1.4893	0.0105	0.0001	99.92
		U10	k=0.0027, a=0.9904, b=-0.00001, n=1.4377	0.0059	4.2×10⁻⁵	99.97
		Control(0)	k=0.0028, a=1.0032, b=0.00003, n=1.3835	0.0081	7.6×10⁻⁵	99.94
Parabolic	0.3	U30	a=0.9983, b=-0.0378, c=0.0003	0.0048	5.7×10 ⁻⁵	99.99
		U20	a=0.9989, b=-0.0305, c=0.0002	0.0114	0.0003	99.95
		U10	a=0.9954, b=-0.0219, c=0.0001	0.0054	4.6×10 ⁻⁵	99.98
		Control	a=0.9964, b=-0.0202, c=0.0001	0.0103	0.0002	99.93
	0.5	U30	a=0.9935, b=-0.0205, c=0.0001	0.0123	0.0002	99.90
		U20	a=0.9972, b=-0.0199, c=0.0001	0.0176	0.0004	99.79
		U10	a=1.0118, b=-0.0176, c=0.00008	0.0132	0.0002	99.88
		Control	a=1.0123, b=-0.0157, c=0.00006	0.0155	0.0003	99.82
	1	U30	a=1.0171, b=-0.0151, c=0.00006	0.0155	0.0003	99.82
		U20	a=1.0265, b=-0.0146, c=0.00005	0.0183	0.0004	99.74
		U10	a=1.0002, b=-0.0119, c=0.00003	0.0309	0.0011	99.17
		Control(0)	a=0.9573, b=-0.0091, c=0.00002	0.0516	0.0029	97.35

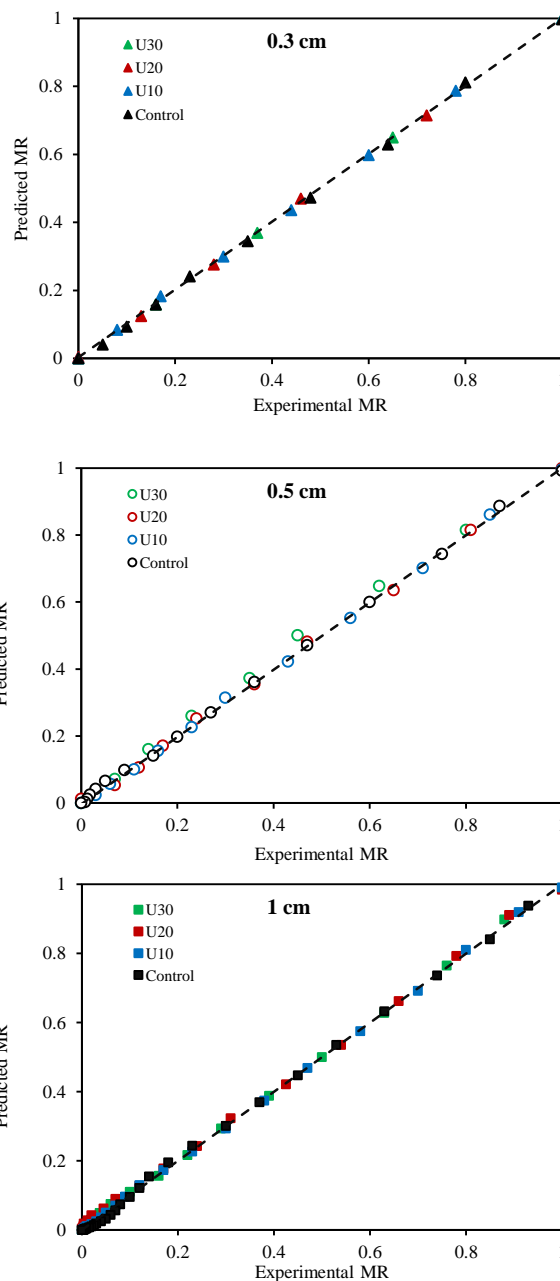
مطابق شکل ۴، داده‌های پیش‌بینی شده با نمونه‌های شاهد و نمونه‌های پیش تیمار شده با فراصوت در مدت زمان‌ها و ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر مطابقت دارد. میزان رطوبت پیش‌بینی شده با استفاده از مدل میدلی و مقادیر رطوبت آزمایشی در امتداد یک خط مستقیم قرار دارند و دارای ضریب همبستگی بالایی هستند که نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل در توصیف ویژگی‌های خشک کردن با پیش تیمار فرا صوت برگه‌های زردآلو است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تغییر ضخامت نمونه‌ها هیچ تاثیری بر همبستگی بین داده‌های تجربی و مدل نداشته و تنها تاثیر ضخامت بر افزایش مدت زمان خشک شدن برش‌های زردآلو می‌باشد. بررسی سینتیک انتقال جرم و ضرایب نفوذ رطوبت می‌تواند یک ابزار سودمند برای کنترل شرایط فرآیند خشک کردن و افزایش کیفیت محصول می‌باشد. مقادیر تعیین شده ضریب پخش رطوبت در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود انتشار رطوبت با افزایش ضخامت نمونه‌ها و مدت زمان پیش تیمار فرا صوت، افزایش می‌یابد. با کاهش مقاومت داخلی در برابر انتشار رطوبت، شرایط برای خروج سریع‌تر رطوبت در طول فرآیند خشک کردن فراهم گردیده است. با گذشت زمان خشک شدن، مقدار رطوبت خارج شده از نمونه تحت تیمار فراصوت بیش‌تر از نمونه‌های شاهد می‌باشد. جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار و ضخامت بر انتشار رطوبت مؤثر برگه‌های زردآلو را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۴ تأثیر مدت زمان پیش تیمار امواج فراصوت، ضخامت نمونه‌ها و اثر متقابل آن‌ها بر انتشار رطوبت مؤثر برگه‌های زردآلو در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. میزان انتشار رطوبت در تمامی تیمارها با ضخامت برگه‌ها رابطه مستقیم داشته به طوری که با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان ضریب پخش رطوبت افزایش می‌یابد. نمونه دارای ضخامت ۱۰ میلی‌متر پیش تیمار فراصوت شده به مدت ۳۰ دقیقه و نمونه ۳ میلی‌متر شاهد به ترتیب با $2/62 \times 10^{-7}$ و $2/99 \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه دارای بیشترین و کمترین ضریب پخش رطوبت بودند.



شکل ۵- نمودار اختلاف انتشار رطوبت مؤثر در ضخامت‌ها و پیش تیمارهای مختلف اولتراسوند روی برگه زردآلو

Fig 5. The curves of the difference of effective moisture diffusion in different thickness and ultrasound pretreatments on apricot leaves

نتایج آماری برآزش داده‌های تجربی به دست آمده با مدل‌های خشک کردن دینامیکی نشان داد که مدل میدلی و همکاران بیشترین مقدار ضریب تعیین (R^2) و حداقل مقادیر χ^2 و RMSE را دارد. بنابراین، مدل میدلی بهترین تناسب را با داده‌های مختلف خشک کردن با پیش تیمار فراصوت دارد و می‌توان برای مطالعه سینتیک خشک شدن برگه‌های زردآلو پیشنهاد کرد. مقایسه داده‌های تجربی با مدل میدلی در ضخامت‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه مقادیر نسبت رطوبت با استفاده از مدهای میدلی در زمان‌های پیش تیمار و ضخامت‌های مختلف

Fig 4. Comparison of moisture ratio values using Midilli models in different pretreatment time and thicknesses

بیشتر به صورت فیزیکی و تخریب دیواره‌های سلولی در بافت داخلی زردآلو می‌باشد (Akhouzadeh yamchi *et al.*, 2019). این تغییرات ناشی از واکنش‌های اکسیداسیون در کاروتنوئیدها می‌باشد که در اثر برهمکنش با رادیکال‌های آزاد تشکیل شده در طی فراصوت ایجاد می‌شود (Zhao *et al.*, 2021). این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط (Erdem *et al.*, 2018) و (Bromberger Soquetta *et al.*, 2018) مطابقت دارد.

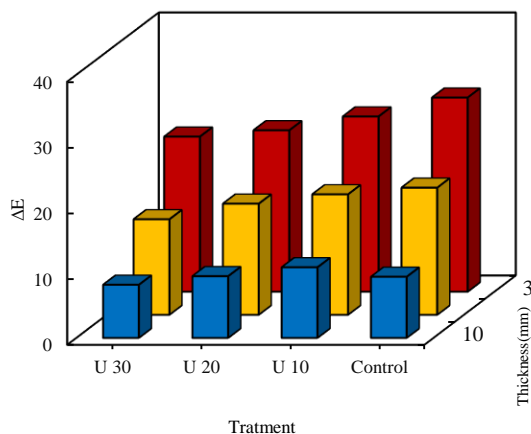
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار فراصوت و ضخامت بر تغییرات کلی رنگ برش‌های زردآلو

Table 5. The results of analysis of variance for the effect of ultrasound pretreatment and thickness on the total color changes of apricot slices

F	میانگین مربعات MS	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.V
267.22 ^{ns}	30.71	92.12	3	پیش تیمار فراصوت Ultrasound Pretreatment
7312.21 ^{**}	840.21	1680.43	2	ضخامت Thickness
46.35 ^{**}	5.33	31.96	6	پیش تیمار فراصوت × ضخامت × Thickness Ultrasound Pretreatment
	0.11	2.76	24	خطا Error
		1807.26	35	مجموع Sum

***: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 1% و ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

***: show significant difference at 1% probability of error level, ns: no significant difference,



شکل ۶- تغییرات کلی رنگ در اثر خشک شدن برش‌های زردآلو با ضخامت‌ها و پیش تیمارهای مختلف اولتراسوند

Fig 6. Color changes due to the drying of apricot slices with different thickness and ultrasound pretreatments

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار فراصوت و ضخامت بر انتشار رطوبت موثر برش‌های زردآلو

Table 4. The results of analysis of variance for the effect of ultrasound pretreatment and thickness on the effective moisture diffusion of apricot slices

F	میانگین مربعات MS	مجموع مربعات SS	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.V
433.47 ^{**}	2.23×10^{-15}	6.69×10^{-15}	3	پیش تیمار فراصوت Ultrasound
25148.80 ^{**}	1.29×10^{-13}	2.59×10^{-13}	2	ضخامت Thickness
109.55 ^{**}	5.64×10^{-16}	3.38×10^{-15}	6	پیش تیمار فراصوت × ضخامت
	5.15×10^{-18}	1.24×10^{-16}	24	خطا Error
		2.69×10^{-13}	35	مجموع Sum

***: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 1%

بر این اساس، با افزایش زمان پیش تیمار اولتراسوند، میزان ضریب پخش رطوبت به دلیل از دست دادن سریعتر آب افزایش می‌یابد (Zielinska & Markowski, 2018). دلیل این امر حرکت رطوبت با انتقال جرم از منافذ مویرگی است. شایان ذکر است با افزایش مدت زمان پیش تیمار اولتراسوند، تعداد این منافذ نیز افزایش یافته و به تبع آن میزان رهاسازی موثر رطوبت نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاصل با نتایج ضرایب توزیع برای خشک کردن سیب‌زمینی شیرین (Tayyab Rashid *et al.*, 2022) و انبه (Fernandes *et al.*, 2019) مطابقت دارد.

رنگ سطحی زردآلو به علت توزیع پیچیده و غیریکنواخت آب و مواد قندی یکسان نیست. هر قدر میزان مواد قندی موجود در برش‌های زردآلو کمتر باشد، میزان تغییرات رنگی آن نیز اندک خواهد بود (Yazdanpanah Gangachin & Ziiaifar, 2014). نتایج تجزیه واریانس تأثیر پیش تیمار و ضخامت بر تغییرات کلی رنگ برش‌های زردآلو در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد تأثیر تیمار فراصوت به عنوان تیمار اصلی بر تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها معنی‌دار نمی‌باشد ولی تأثیر ضخامت روی تغییر کلی رنگ نمونه‌ها در سطح یک در صد معنی‌دار بوده و دلیل آن افزایش مدت زمان خشک شدن به دلیل افزایش ضخامت برش‌های زردآلو می‌باشد. اختلاف شاخص تغییرات کلی رنگ (ΔE) با نمونه شاهد ناشی از انجام واکنش‌های شیمیایی رنگ‌زا مثل واکنش میلارد بین قندها و پروتئین‌ها و تشکیل ملانوئیدین‌ها می‌باشد (Krokida *et al.*, 2000). عدم تأثیرگذاری امواج فراصوت در تغییرات کلی رنگ زردآلو ناشی از عدم تأثیرگذاری امواج فراصوت بر واکنش‌های شیمیایی می‌باشد و

داشتن حداکثر R^2 ، حداقل χ^2 و RMSE، با منحنی داده‌های تجربی خشک کردن با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های دیگر برآزش داشت. بر این اساس، مدل میدلی و همکاران به‌عنوان بهترین مدل برای خشک کردن برش‌های زردآلو پیش‌تیمار شده با استفاده از امواج فراصوت انتخاب شد. ضریب پخش رطوبت برای زردآلو در محدوده ۶۵×10^{-7} تا $۲/۹۹ \times 10^{-8}$ مترمربع بر ثانیه در دمای خشک شدن ۶۵ درجه سلسیوس به‌دست آمد که با افزایش مدت‌زمان اعمال پیش‌تیمار و ضخامت نمونه افزایش یافت. همچنین بررسی‌ها نشان داد که امواج فراصوت روی تغییر رنگ نمونه‌ها به‌دلیل ماهیت فیزیکی این امواج تأثیر سوئی نداشته و تیره شدن رنگ نمونه‌ها بعد از خشک شدن ناشی از اثرگذاری بالای دما در انجام تغییرات شیمیایی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش، سینتیک خشک کردن برش‌های زردآلو پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت با ضخامت‌های مختلف در یک خشک‌کن هوای گرم مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش مدت‌زمان اعمال پیش‌تیمار و کاهش ضخامت نمونه موجب افزایش سرعت خشک شدن و کاهش مدت‌زمان نمونه‌ها تا ۵۵ درصد برای نمونه‌های دارای ضخامت ۳ میلی‌متر تحت تیمار فراصوت به مدت ۳۰ دقیقه نسبت به نمونه شاهد گردید. نرخ خشک شدن با مدت‌زمان پیش تیمار فراصوت رابطه مستقیم و با ضخامت نمونه‌ها رابطه معکوس داشته و با افزایش زمان پیش‌تیمار و کاهش ضخامت نرخ خشک شدن نمونه‌ها افزایش یافت. پس از تجزیه و تحلیل آماری مدل، نتایج نشان داد که مدل میدلی و همکاران به‌دلیل

منابع

- 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. <https://doi.org/10.1081/JFP-120024173>
- 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.
- 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>
- Alizehi, M. H., Niakousari, M., Fazaehi, M., & Iraj, M. (2020). Modeling of vacuum- and ultrasound-assisted osmodehydration of carrot cubes followed by combined infrared and spouted bed drying using artificial neural network and regression models. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), 1–16. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13563>
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T., & Kechaou, N. (2017). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.007>
- 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. <https://doi.org/10.9734/csji/2017/34878>
- Azoubel, P. M., Baima, M. do A. M., Amorim, M. da R., & Oliveira, S. S. B. (2010). Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.009>
- Bromberger Soquetta, M., Schmaltz, S., Wesz Righes, F., Salvalaggio, R., & de Marsillac Terra, L. (2018). Effects of pretreatment ultrasound bath and ultrasonic probe, in osmotic dehydration, in the kinetics of oven drying and the physicochemical properties of beet snacks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13393>
- Bruin, S., & Luyben, K. (1980). Drying of food materials. In *Advances in Drying* (pp. 155–215). McGraw-Hill Co, US.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.018>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1946-7>
- 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.), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.181>
- Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfia, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam, R. (2021). Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. *Journal of Food Process Engineering*, May, 1–19. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>
- 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>
- Erdem, T., Ozluoyamak, O. B., & Kizildag, N. (2018). Color Change Analysis of Dried Orange Slices During Hot Air Color Change Analysis of Dried Orange Slices. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(9), 6064–6072.
- Fernandes, F. A. N., Braga, T. R., Silva, E. O., & Rodrigues, S. (2019). Use of ultrasound for dehydration of mangoes (*Mangifera indica* L.): kinetic modeling of ultrasound-assisted osmotic dehydration and convective air-drying. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1793–1800. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03622-y>
- Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment

- on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41(4), 604–610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.05.007>
- Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., de la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., & Blanco, A. (2007). Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: Processes and devices. *Drying Technology*, 25(11), 1893–1901. <https://doi.org/10.1080/07373930701677371>
- Hassan-Beygi, S. R., Ghaebi, S. M., & Arabhosseini, A. (2009). Some physico-mechanical properties of apricot fruit, pit and kernel of ordubad variety. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*, XI(1459), 1–16. <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.009>
- Kashaninejad, M., & Tabil, L. G. (2009). Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.007>
- Kayacan, S., Sagdic, O., & Doymaz, I. (2018). Effects of hot-air and vacuum drying on drying kinetics, bioactive compounds and color of bee pollen. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(2), 1274–1283. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9741-4>
- Kowalski, S. J., & Pawłowski, A. (2015). Intensification of apple drying due to ultrasound enhancement. *Journal of Food Engineering*, 156, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.023>
- Krokida, M. K., Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2000). Effect of pretreatment on color of dehydrated products. *Drying Technology*, 18(6), 1239–1250. <https://doi.org/10.1080/07373930008917774>
- Mohammadi, I., Tabatabaekolour, R., & Motevali, A. (2019). Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. *Energy*, 170, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.099>
- Şen, S., & Aydın, 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>
- 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)
- Souza da Silva, E., Rupert Brandão, S. C., Lopes da Silva, A., Fernandes da Silva, J. H., Duarte Coêlho, A. C., & Azoubel, P. M. (2019). Ultrasound-assisted vacuum drying of nectarine. *Journal of Food Engineering*, 246(September 2018), 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.11.013>
- Tayyab Rashid, M., Liu, K., Ahmed Jatoti, M., Safdar, B., Lv, D., & Wei, D. (2022). Developing ultrasound-assisted hot-air and infrared drying technology for sweet potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86(May), 106047. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106047>
- Tkalčić, M., & Tasič, J. F. (2003). Colour spaces - Perceptual, historical and applicational background. *IEEE Region 8 EUROCON 2003: Computer as a Tool - Proceedings*, A, 304–308. <https://doi.org/10.1109/EURCON.2003.1248032>
- Yao, Y. (2016). Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 512–531. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.039>
- Yazdanpanah Gangachin, M., & Ziaifar, A. (2014). Evaluation of potato chips color using image processing. *Journal of Food Industry Research*, 24(2), 239–247.
- 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* (Vol. 45, Issue 9). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15658>
- Zhang, J., Li, M., Ding, Z., Wang, C., & Cheng, J. (2021). Evaluation of ultrasound-assisted microwave hot air convective drying Chinese hickory—Drying kinetics and product's quality properties. *Journal of Food Process Engineering*, 44(11), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13842>
- Zhao, Y., Zhu, H., Xu, J., Zhuang, W., Zheng, B., Lo, Y. M., Huang, Z., & Tian, Y. (2021). Microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: Effects of ultrasonic pretreatment on color, antioxidant activity, and rehydration capacity. *Lwt*, 149, 111603. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111603>
- Zhu, A. (2018). The convective hot air drying of *Lactuca sativa* slices. *International Journal of Green Energy*, 15(3), 201–207. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1434523>
- Zielinska, M., & Markowski, M. (2018). Effect of microwave-vacuum, ultrasonication, and freezing on mass transfer kinetics and diffusivity during osmotic dehydration of cranberries. *Drying Technology*, 36(10), 1158–1169. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1390476>



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)