



بررسی تاثیر پیش تیمار فراصوت بر چروکیدگی زغال اخته طی خشک کردن با هوای داغ

رسول قربانی^۱، محسن اسمعیلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲

کلمات کلیدی:

خشک کردن،

زغال اخته،

فراصوت،

چروکیدگی،

مدل سازی.

در پژوهش حاضر، مدل سازی چروکیدگی زغال اخته طی خشک کردن همرفتی به صورت لایه نازک و تاثیر پیش تیمار فراصوت، دما و سرعت هوای خشک کن بر میزان چروکیدگی زغال اخته بررسی شد. پیش تیمار فراصوت در دو سطح زمانی ۱۰ و ۳۰ دقیقه روی نمونه های زغال اخته اعمال شد و سپس این نمونه ها در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت های هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه خشک شدند. در ادامه، داده های چروکیدگی با سه مدل تجربی (مدل های موجود در منابع) برازش شدند. نتایج نشان داد که با کاهش محتوای رطوبت در طول خشک شدن، مقدار ضخامت نمونه ها از ۰/۱۳۸ متر در ابتدا به ۰/۰۷۸ متر در انتهای فرآیند خشک کردن کاهش می یابد. استفاده از پیش تیمار فراصوت باعث کاهش معنی دار ($P < 0.05$) میزان ضخامت شد. علاوه بر این، یکی از مدل های ارزیابی شده به عنوان مناسب ترین مدل پیش بینی کننده تغییرات ضخامت زغال اخته ($R^2 = 0.99$) تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. با انجام آنالیز رگرسیون غیرخطی، رابطه بین ضرایب مدل انتخاب شده با متغیرهای به کار رفته در این تحقیق به دست آمد.

DOI: 10.52547/fsct.19.123.15

DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.123.2.7

* مسئول مکاتبات:

M.esmaili@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

زغال اخته میوه‌ای با نام علمی *Cornus mas L.*، نام عمومی *Cornelian cherry*، از خانواده *Cornaceae* است [۱]. بیش از ۴۰ گونه متفاوت از این میوه در قاره‌های اروپا و آسیا (مانند ایران: استان‌های آذربایجان شرقی و قزوین) وجود دارد [۲]. این میوه منبع غنی از آنتوسیانین‌ها، آهن، کلسیم، اسید فولیک، اسید اگزالیک و فلاونوئیدها است. زغال اخته به دلیل دارا بودن آنتوسیانین‌ها، دارای خصوصیات دارویی گوناگون از جمله ضد سرطان، ضد باکتریایی، ضد آلرژی، کاهش دهنده کلسترول خون و ضد دیابت می‌باشد [۳ و ۴].

خشک کردن یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای نگهداری محصولات کشاورزی است. مهم‌ترین هدف خشک کردن، جد کردن آب از ماده غذایی، افزایش مدت زمان ماندگاری، جلوگیری از فساد ماده غذایی و تولید مواد غذایی خشک شده با کیفیت خوب از نظر ارگانولپتیکی و تغذیه‌ای می‌باشد [۵]. متداول‌ترین روش خشک کردن، استفاده از جریان هوای داغ است که در آن هوای داغ با عبور از سطح ماده غذایی باعث تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌شود [۶ و ۷].

هنگام خشک کردن، تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلفی در ماده غذایی اتفاق می‌افتد که موجب تغییر خصوصیات کیفی محصول نهایی خشک شده نسبت به محصول تازه اولیه می‌گردد [۸]. یکی از مهمترین تغییرات فیزیکی که در زمان خشک شدن مواد غذایی همراه با نفوذ رطوبت بخارج از ماده غذایی رخ می‌دهد، کاهش حجم پوسته خارجی یا چروکیدگی می‌باشد. انتقال همزمان جرم و حرارت در هنگام خشک شدن مواد غذایی، تنش‌هایی در ساختار سلولی مواد غذایی ایجاد می‌کند که منجر به تغییر شکل و چروکیدگی می‌شود [۹]. چروکیدگی مواد غذایی ممکن است به دو علت اتفاق بیفتد. اولاً، به دلیل تبخیر آب موجود در داخل ماده غذایی و پر شدن فضاهای خالی توسط هوا، بافت ماده غذایی توانایی حفظ ساختار شبکه مواد جامد را نداشته و باعث چروکیدگی می‌شود. ثانیاً، ساختار پوسته بیرونی فرو ریخته و منجر به

کاهش حجم پوسته خارجی یا چروکیدگی می‌گردد [۱۰]. چروکیدگی محصول از عیوب مهم حین خشک شدن مواد غذایی با استفاده از جریان هوای داغ محسوب شده و باعث افت خصوصیات کیفی محصول خشک شده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش حجم، کاهش قابلیت آبرگیری مجدد و ترک خوردگی سطحی اشاره کرد. در نتیجه، اگر بتوان محصولی متخلخل و با چروکیدگی کمتر تولید کرد بافت محصول اصلاح شده و جذب آب در طی فرآیند آبرگیری مجدد افزایش می‌یابد.

فناوری‌های نوین در صنعت غذا همواره بدنال تولید محصولی با کیفیت بالا همراه با افزایش راندمان و کاهش انرژی مصرفی هستند. استفاده از امواج فراصوت از جمله این فناوری‌های نوین و غیر حرارتی می‌باشد که امروزه بعنوان پیش تیمار قبل از فرآیند خشک کردن با جریان هوای داغ استفاده می‌شود [۱۱-۱۳]. پیش تیمار فراصوت، شامل غوطه‌ور کردن میوه در آب مقطر یا محلول آبی هیپرتونیک^۱ همزمان با اعمال امواج فراصوت می‌باشد. امواج فراصوت باعث یکسری انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب سریع شده (اثراسفنجی) و رطوبت داخل لوله‌های موئین را بوسیله ایجاد اختلاف فشار مکش لوله موئین حفظ می‌کند [۱۴]. به علاوه، فراصوت باعث ایجاد کاویتاسیون (حفره) در داخل ماده غذایی می‌شود که ممکن است برای جداسازی آب متصل مفید باشد [۱۵]. از دیگر اثرات فراصوت، تنش سطحی و تغییر شکل مواد جامد متخلخل می‌باشد که این اثرات مسئول ایجاد کانال‌های میکروسکوپی و افزایش انتقال جرم در مواد غذایی می‌باشد. مزیت دیگر استفاده از فراصوت، نیاز به افزایش کمتر دما در طول فرآیند می‌باشد. در نتیجه، فراصوت بدون داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به عنوان یک پیش تیمار در خشک کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود. همچنین، تحقیقات نشان می‌دهند که فراصوت با افزایش ضربه انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکول‌های آب در حین خشک شدن، باعث بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصول خشک شده می‌شود [۱۶].

سرعت هوای خشک‌کن بر میزان چروکیدگی نمونه‌های زغال اخته، مدل‌سازی تغییرات آن و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده این تغییرات جهت اعمال در شبیه‌سازی عددی انتقال جرم و حرارت همزمان بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

زغال اخته مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، از یک باغ محلی واقع در شهرستان کلبهر در استان آذربایجان شرقی تهیه شده و تا پایان آزمایشات در یخچال با دمای $1 \pm 4^{\circ}\text{C}$ نگهداری شدند. حدود شصت دقیقه قبل از شروع هر آزمایش، جهت متعادل‌سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط، نمونه‌ها از سردخانه به آزمایشگاه انتقال می‌یافت.

۲-۲- طرح کلی آزمایش‌ها

برای بررسی تاثیر بکارگیری پیش‌ تیمار فراصوت، از حمام فراصوت با بسامد ۴۰ کیلوهرتز و در ۲ سطح زمانی ۱۰ و ۳۰ دقیقه استفاده شد. قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن، نمونه‌ها بصورت کامل در معرض امواج فراصوت و تحت دمای محیط قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان‌های معین، نمونه‌ها از حمام فراصوت خارج و پس از حذف رطوبت سطحی توسط کاغذهای جاذب رطوبت، به یک خشک‌کن سینی‌دار آزمایشگاهی منتقل شدند. حدود سی دقیقه قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن نمونه‌های آماده شده زغال اخته، دستگاه خشک‌کن روشن و بر اساس مشخصات هر آزمایش، سرعت دمای هوای داخل خشک‌کن روی اعداد مورد نظر (سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد) تنظیم شد تا اینکه دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. سپس، نمونه‌ها بر روی سینی توری به صورت لایه نازک چیده شدند که به طور مستقیم به ترازو متصل شده بود و کاهش وزن آن‌ها در فواصل زمانی تعیین شده، اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک‌کردن نمونه‌ها از رطوبت اولیه ۳/۲ گرم آب بر گرم ماده خشک تا رسیدن به

جامبرک و همکاران، اثر شدت‌های مختلف فراصوت را، بر روی میزان انتقال جرم و ویژگی آبیگری مجدد، در خشک‌کردن نمونه‌های قارچ دکمه‌ای، کلم بروکلی و گل کلم بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت، میزان انتقال جرم افزایش، زمان خشک‌شدن با هوای داغ کاهش، و قابلیت آبیگری مجدد افزایش می‌یابد. [۱۲]. همچنین بررسی تاثیر فراصوت بر روی زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار موثر رطوبت در طول خشک‌کردن همرفتی سیب و فلفل قرمز توسط سچوسلر و همکاران نشان داد که فراصوت باعث کاهش زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن در اثر افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت می‌شود. علاوه بر این، فراصوت باعث کاهش غیر معنی‌دار نسبت حجمی گردید [۱۷].

در تحقیقی، تاثیر تغییرات چروکیدگی طی خشک‌کردن سیب‌زمینی تحت دمای 62°C و به مدت ۷ ساعت روی شبیه‌سازی انتقال جرم و حرارت همزمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که چروکیدگی نمونه‌های خشک‌شده رابطه خطی با محتوای رطوبت دارد. همچنین، با اعمال چروکیدگی در شبیه‌سازی عددی، پروفایل رطوبت طی خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی بهتر پیش‌بینی شد. اما، اثر چروکیدگی روی پروفایل دما در نمونه‌های خشک‌شده تقریباً ناچیز بود؛ این نتیجه به نفوذ بخش عمده حرارت طی مراحل ابتدایی خشک‌کردن نسبت داده شد [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر، شبیه‌سازی انتقال جرم و حرارت را با در نظر گرفتن مسئله مرز متحرک^۲ طی خشک‌کردن سیب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که چروکیدگی دارای تأثیر قابل توجه روی پروفایل‌های دما و رطوبت سیب بود؛ به طوری که پروفایل‌های دما و رطوبت سیب هنگام در نظر گرفتن چروکیدگی بهتر پیش‌بینی شد و تطابق بهتری با داده‌های آزمایشی داشت [۸].

بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون تاثیر به کارگیری پیش‌ تیمار فراصوت بر چروکیدگی زغال اخته به هنگام خشک‌شدن و مدل‌سازی تجربی آن مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف از این تحقیق، مطالعه تاثیر پیش‌ تیمار مذکور، دما و

ضخامت نمونه‌ها از تقسیم حجم نمونه‌های زغال اخته به مساحت آن‌ها بدست آمد [۲۱].

۲-۵- مدل‌سازی چروکیدگی

جدول ۱، مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی چروکیدگی نمونه‌های زغال اخته طی خشک کردن را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، سه مدل تجربی، برای برازش تغییرات ضخامت نمونه‌های زغال اخته به صورت تابعی از محتوای رطوبت، مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی‌های تغییرات ضخامت بدست آمده برای زغال اخته در شرایط مختلف خشک کردن، بوسیله سه مدل مذکور برازش شده و ضرایب آن‌ها توسط نرم افزار MATLAB تعیین گردید. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات ضخامت طی خشک کردن لایه نازک زغال اخته، معیارهای ضریب تبیین R^2 ، ریشه متوسط خطای داده‌ها^۳ (RMSE) و مجموع مربعات خطا^۴ (SSE) توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. مقادیر R^2 ، RMSE و SSE از روابط زیر محاسبه گردید:

(معادله ۲)

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

(معادله ۳)

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

(معادله ۴)

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

آنالیز رگرسیونی غیر خطی نیز در ادامه برازش داده‌ها و به منظور برآورد ضرایب مدل انتخابی به صورت توابعی از زمان فراصوت، سرعت هوا و دمای هوا توسط نرم افزار Excel 2013 انجام شد.

محتوای رطوبت ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک انجام شد. آزمایش‌های خشک کردن، در ۳ تکرار و ۲۷ تیمار انجام گرفت.

۲-۳- محاسبه حجم نمونه‌های زغال اخته طی

خشک کردن

حجم نمونه‌های زغال اخته طی خشک کردن و در محتواهای رطوبت ۳/۲، ۲/۵، ۱/۶، ۰/۶ و ۰/۱ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که در هر آزمایش و پس از رسیدن به محتوای رطوبت مورد نظر، حجم نمونه‌ها توسط روش جابه‌جایی حلال (تولون) بدست آمد [۱۹]. در این روش، ابتدا پیکنومتر حاوی تولون به صورت کاملاً پر توزین شد. سپس، نمونه‌ها پس از توزین، در داخل پیکنومتر حاوی تولون قرار گرفتند و تولون اضافی، از آن خارج شد. معادله ۱، حجم تولون جابجا شده و به تبع آن حجم نمونه‌های زغال اخته را نشان می‌دهد [۲۰].

(معادله ۱)

$$V = \frac{M}{\rho_{to}} = \frac{m - m' - m''}{\rho_{to}}$$

که در آن، V ، حجم تولون جابه‌جا شده = حجم نمونه‌های زغال اخته بر حسب سانتی متر مکعب، m' و m'' به ترتیب، جرم نمونه زغال اخته و جرم پیکنومتر خالی بر حسب گرم، m جرم پیکنومتر حاوی تولون و نمونه زغال اخته، M ، جرم تولون جابه‌جا شده و ρ_{to} ، دانسیته تولون بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب است.

۲-۴- محاسبه تغییرات ضخامت نمونه‌ها طی

خشک کردن

به منظور محاسبه ضخامت نمونه‌های زغال اخته طی خشک کردن، تغییرات مساحت سطح نمونه‌ها با استفاده از عکس‌های گرفته شده از زغال اخته در حین فرآیند خشک کردن و در رطوبت‌های مختلف و بوسیله نرم افزار MATLAB اندازه‌گیری شد. مقادیر

3. Coefficient of Determination

4. Root Mean Square Error

5. Sum Square Error

Table 1 Utilized models for modeling of boundary moving velocity

Model	Mathematical equation	Reference
1	$L=k_1x+k_2$	Vagenas and Marinos-Kouris (1991)
2	$L=k_1\exp(k_2x)$	Mayor and Sereno (2004)
3	$L=k_1\exp(-k_2x)+k_3$	Kaminski et al. (1996)

L: Thickness of the cornelian cherry (m)

x: Moisture content (kg/kg db)

 k_1, k_2 : Model parameters

۲-۶-آنالیز آماری

به منظور بررسی تاثیر زمان فراصوت، دما و سرعت هوای خشک‌کن روی ضخامت نمونه‌ها، یک آزمایش فاکتوریل $3 \times 3 \times 3$ در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای مستقل شامل زمان فراصوت در سه سطح ۰، ۱۰ و ۳۰ دقیقه، دمای هوای خشک‌کن در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای خشک‌کن در سه سطح ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه بود. آنالیز واریانس و وجود اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در سطح احتمال ۰/۵ (P<0.05) با استفاده از نرم افزار آماری SPSS انجام شد.

۳-نتایج و بحث

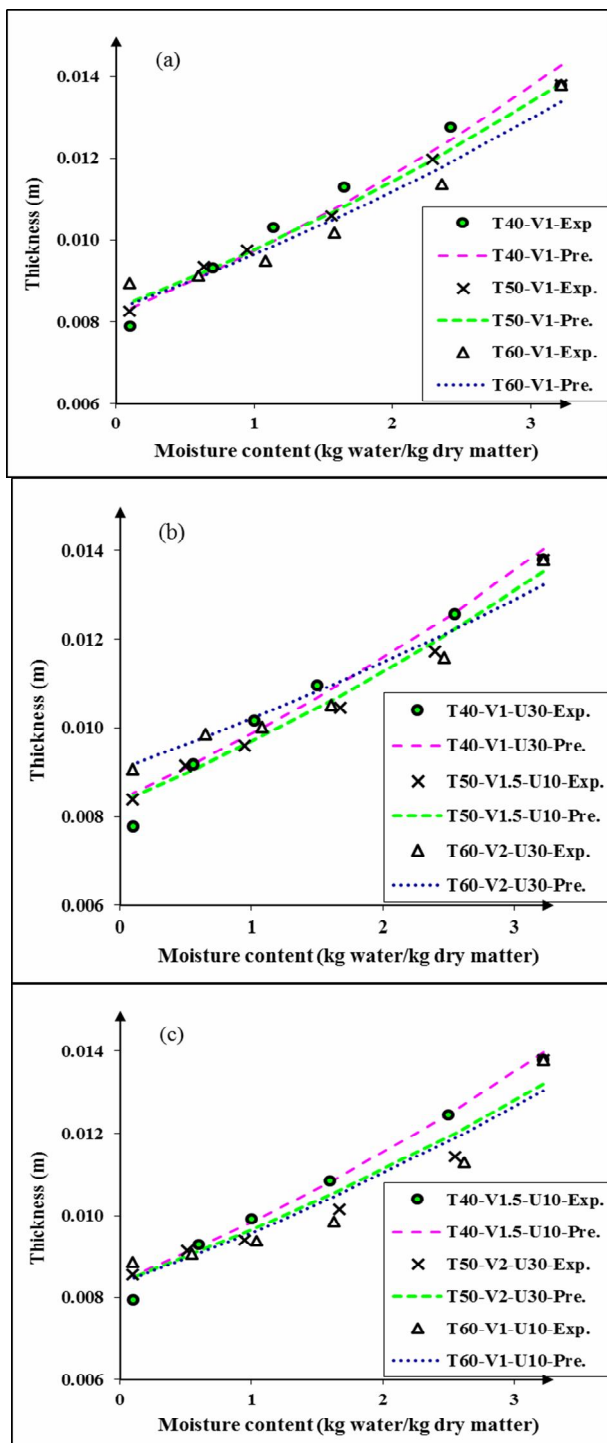
۳-۱-منحنی‌های تغییرات ضخامت نمونه‌ها

شکل ۱ (a, b, c, d)، تغییرات میزان ضخامت نمونه‌های زغال اخته را در حین خشک‌شدن بصورت تابعی از محتوی رطوبت در بین تیمارهای مختلف نشان می‌دهد.

در این منحنی‌ها تیمارها با علائم اختصاری نشان داده شده‌اند که U زمان فراصوت بر حسب دقیقه، T دمای هوای داخل خشک‌کن بر حسب درجه سانتیگراد و V سرعت هوای داخل خشک‌کن بر حسب متر بر ثانیه است.

بعنوان مثال T40-V1-U30 تیمار با دمای هوای ۴۰ درجه سانتیگراد، سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه و زمان فراصوت ۳۰ دقیقه را نشان می‌دهد.

همانگونه که از این منحنی‌ها پیداست، با کاهش محتوی رطوبت، ضخامت نمونه‌های زغال اخته بصورت مداوم کاهش می‌یابد. این یافته در پژوهش‌های انجام شده توسط هاسینی و همکاران [۲۲] نیز دیده شد. همانطور که در این منحنی‌ها مشاهده می‌شود، با بکارگیری پیش‌تیمار فراصوت، افزایش دمای هوا و سرعت هوا، کاهش ضخامت نمونه‌های زغال اخته از آهنگ بیشتری برخوردار بود.



که نمونه‌های سیب پیش تیمار شده چروکیدگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد داشتند. پیش تیمار فراصوت از طریق از بین بردن ترکیبات مومی سطح پوست و دیواره‌های سلولی باعث تغییر در ساختار بافتی و در نتیجه ایجاد تنش سطحی و ترک خوردگی بافت می‌شود. بنابراین، افزایش سهولت خروج رطوبت از طریق باز شدن مسیر لوله‌های موئین و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در اثر تغییر شکل سلول‌ها، ضخامت نهایی را کاهش داده است. این نتیجه با نتایج مودیبه و همکاران [۲۴] و اورتو و همکاران [۲۵] که به بررسی کاربرد فراصوت روی انتقال جرم و ساختمان میکروسکوپی پوست پرتقال پرداختند، مطابقت دارد. در جدول ۳، علاوه بر اثر فراصوت بر ضخامت نهایی، می‌توان تاثیر دما و سرعت هوای خشک‌کن را نیز بر متغیر مذکور مشاهده کرد. بدین ترتیب که، استفاده از دمای ۴۰ درجه سانتیگراد باعث کاهش ضخامت نهایی در مقایسه با استفاده از دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه باعث افزایش ضخامت نهایی در مقایسه با سرعت ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه گردید که این امر به این دلیل می‌باشد که، در دما و سرعت پایین هوای خشک‌کردن، سرعت حرکت آب از لایه‌های داخلی به لایه بیرونی، برابر با سرعت تبخیر آب از سطح ماده غذایی می‌باشد و این امر موجب جمع شدن یکنواخت محصول و چروکیدگی بیشتر آن می‌گردد. اما، تحت شرایط دما و سرعت بالای هوا، گرادیان‌های رطوبتی بوجود می‌آید که این مکانیسم موجب ایجاد یک لایه صلب خارجی شده و از چروکیدگی محصول و کاهش ضخامت بیشتر جلوگیری می‌کند. نتایج سنادرا و همکاران [۲۶]، یداللهی نیا و جهانگیری [۲۷]، اسچولتز و همکاران [۲۸] و مایور و سرنو [۲۹] تایید کننده نتایج این تحقیق است.

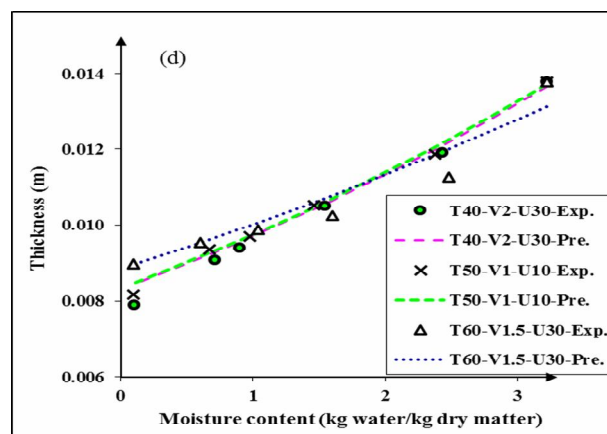


Fig 1 (a-d) Thickness changes during different drying treatments and fitted them with model 2. In this figure, Exp., shows the data obtained from experimental and Pre. show the data obtained from fitted.

جدول ۲ آنالیز واریانس اثر زمان فراصوت، دما و سرعت هوای خشک‌کن روی ضخامت نهایی زغال اخته را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، زمان فراصوت، دما و سرعت هوا از لحاظ آماری تاثیر معنی‌دار ($P < 0.05$) روی ضخامت نهایی دارد. اما، اثر متقابل زمان فراصوت، دما و سرعت هوای خشک‌کن بر روی ضخامت نهایی تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) نشان نداد. جدول ۳ مقایسه میانگین‌های اثر متقابل زمان فراصوت، دما و سرعت هوا روی ضخامت نهایی زغال اخته در بین تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که از این جدول مشاهده می‌شود، اثر متقابل استفاده از فراصوت، دما و سرعت هوا، از لحاظ آماری تاثیر معنی‌دار روی ضخامت نهایی تیمارهای مختلف دارد. با ملاحظه این جدول می‌توان دریافت که با ثابت در نظر گرفتن دما و سرعت هوا، با اعمال فراصوت و افزایش زمان فراصوت، میزان ضخامت نمونه‌ها در مقایسه با تیمار شاهد (بدون فراصوت) کاهش یافت. در تطابق با نتایج حاصل از این پژوهش، نوآکا و همکاران [۲۳] مشاهده کردند

Table 2 Analysis of variance for the effect of ultrasound time, temperature and air velocity on final thickness

F value	Mean squares	Sum of squares	Degree of freedom	Source of variation
0.437	0.009	0.019	2	Replication
18.689**	0.185	0.371	2	Ultrasound
375.07**	8.005	16.011	2	Air temperature
32.671**	0.697	1.395	2	Air velocity
0.132	0.003	0.011	4	Temperature × Ultrasound
0.11	0.002	0.009	4	Velocity × Ultrasound
2.492	0.053	0.213	4	Velocity × Temperature
0.152	0.003	0.026	8	Velocity × Temperature × Ultrasound
	0.021	1.11	52	Error

** significant difference ($p < 0.05$)

Table 3 Average comparison of ultrasound, temperature and air velocity interaction for final thickness of different treatment

Treatment	Final thickness (m)
T40-V1	$7.89^{op} \times 10^{-3} \pm 5.51 \times 10^{-5}$
T50-V1	$8.27^{iklm} \times 10^{-3} \pm 1.37 \times 10^{-4}$
T60-V1	$8.95^{bcd} \times 10^{-3} \pm 2.41 \times 10^{-4}$
T40-V1.5	$7.99^{nop} \times 10^{-3} \pm 1.14 \times 10^{-4}$
T50-V1.5	$8.49^{ghij} \times 10^{-3} \pm 7.09 \times 10^{-5}$
T60-V1.5	$9.12^{abc} \times 10^{-3} \pm 3.04 \times 10^{-4}$
T40-V2	$8.11^{lmno} \times 10^{-3} \pm 1.01 \times 10^{-4}$
T50-V2	$8.68^{efg} \times 10^{-3} \pm 6.06 \times 10^{-5}$
T60-V2	$9.25^a \times 10^{-3} \pm 1.68 \times 10^{-4}$
T40-V1-U10	$7.85^{op} \times 10^{-3} \pm 1.07 \times 10^{-4}$
T50-V1-U10	$8.18^{klmn} \times 10^{-3} \pm 1.89 \times 10^{-4}$
T60-V1-U10	$8.86^{cde} \times 10^{-3} \pm 2.12 \times 10^{-4}$
T40-V1.5-U10	$7.96^{nop} \times 10^{-3} \pm 5.86 \times 10^{-5}$
T50-V1.5-U10	$8.39^{hijk} \times 10^{-3} \pm 1.99 \times 10^{-4}$
T60-V1.5-U10	$9.05^{abc} \times 10^{-3} \pm 3.51 \times 10^{-5}$
T40-V2-U10	$8.05^{mnop} \times 10^{-3} \pm 1.86 \times 10^{-4}$
T50-V2-U10	$8.63^{efgh} \times 10^{-3} \pm 8.74 \times 10^{-5}$
T60-V2-U10	$9.14^{ab} \times 10^{-3} \pm 4.16 \times 10^{-5}$
T40-V1-U30	$7.79^p \times 10^{-3} \pm 2.11 \times 10^{-4}$
T50-V1-U30	$7.98^{mnop} \times 10^{-3} \pm 1.63 \times 10^{-4}$
T60-V1-U30	$8.75^{def} \times 10^{-3} \pm 1.80 \times 10^{-4}$
T40-V1.5-U30	$7.88^{op} \times 10^{-3} \pm 2.36 \times 10^{-4}$
T50-V1.5-U30	$8.32^{ijkl} \times 10^{-3} \pm 6.66 \times 10^{-5}$
T60-V1.5-U30	$8.98^{bcd} \times 10^{-3} \pm 8.52 \times 10^{-5}$
T40-V2-U30	$7.92^{nop} \times 10^{-3} \pm 1.46 \times 10^{-4}$
T50-V2-U30	$8.56^{fghi} \times 10^{-3} \pm 1.29 \times 10^{-4}$
T60-V2-U30	$9.08^{abc} \times 10^{-3} \pm 1.76 \times 10^{-4}$

Different letters in the same column indicate a significant difference ($p < 0.05$)

U: Ultrasound time at 40 kHz (min)

T: Air temperature (°C)

V: Air velocity (m/s)

Table 4 Statistical parameters of models 1, 2, 3 according to Table 2 for different treatments

Treatment	Model								
	1			2			3		
	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE
T40-V1	0.9175	5.91×10^{-7}	3.85×10^{-4}	0.9485	1.36×10^{-6}	5.82×10^{-4}	0.9272	6.02×10^{-7}	9.62×10^{-1}
T40-V1-U10	0.9381	7.98×10^{-7}	4.47×10^{-4}	0.9432	1.42×10^{-6}	5.96×10^{-4}	0.9054	3.66×10^{-7}	3.49×10^{-4}
T40-V1-U30	0.9849	3.52×10^{-7}	2.97×10^{-4}	0.9676	7.57×10^{-7}	4.35×10^{-4}	0.9960	9.32×10^{-8}	1.76×10^{-4}
T40-V1.5	0.9932	1.56×10^{-7}	1.97×10^{-4}	0.9791	4.79×10^{-7}	3.46×10^{-4}	0.9980	4.57×10^{-8}	1.23×10^{-4}
T40-V1.5-U10	0.9755	9.93×10^{-8}	1.58×10^{-4}	0.9852	3.25×10^{-7}	2.85×10^{-4}	0.9778	4.87×10^{-7}	4.03×10^{-4}
T40-V1.5-U30	0.9551	9.89×10^{-8}	1.57×10^{-4}	0.9944	1.15×10^{-7}	1.69×10^{-4}	0.9298	1.43×10^{-6}	6.91×10^{-4}
T40-V2	0.9682	3.82×10^{-8}	9.77×10^{-5}	0.9926	1.59×10^{-7}	1.99×10^{-4}	0.9598	8.64×10^{-7}	5.37×10^{-4}
T40-V2-U10	0.9879	4.37×10^{-8}	1.05×10^{-4}	0.9971	6.10×10^{-8}	1.24×10^{-4}	0.9576	5.02×10^{-8}	1.29×10^{-4}
T40-V2-U30	0.9868	2.52×10^{-7}	2.51×10^{-4}	0.9966	6.48×10^{-8}	1.27×10^{-4}	0.9745	4.85×10^{-7}	4.02×10^{-4}
T50-V1	0.9956	8.56×10^{-8}	1.46×10^{-4}	0.9991	1.80×10^{-8}	6.72×10^{-5}	0.9642	6.99×10^{-7}	4.83×10^{-4}
T50-V1-U10	0.9915	1.61×10^{-7}	2.01×10^{-4}	0.9970	5.79×10^{-8}	1.20×10^{-4}	0.9342	1.25×10^{-6}	6.46×10^{-4}
T50-V1-U30	0.9699	5.70×10^{-7}	3.77×10^{-4}	0.9871	2.45×10^{-7}	2.47×10^{-4}	0.9208	1.50×10^{-6}	7.07×10^{-4}
T50-V1.5	0.9760	4.53×10^{-7}	3.37×10^{-4}	0.9891	2.06×10^{-7}	2.27×10^{-4}	0.9665	6.32×10^{-7}	4.59×10^{-4}
T50-V1.5-U10	0.9640	6.65×10^{-7}	4.08×10^{-4}	0.9829	3.15×10^{-7}	2.81×10^{-4}	0.9570	7.92×10^{-7}	5.14×10^{-4}
T50-V1.5-U30	0.9524	8.59×10^{-7}	4.63×10^{-4}	0.9735	4.77×10^{-7}	3.46×10^{-4}	0.9417	1.05×10^{-6}	5.92×10^{-4}
T50-V2	0.9599	7.24×10^{-7}	4.26×10^{-4}	0.9795	3.71×10^{-7}	3.04×10^{-4}	0.9593	7.35×10^{-7}	4.95×10^{-4}
T50-V2-U10	0.9329	1.23×10^{-6}	5.54×10^{-4}	0.9601	7.30×10^{-7}	4.27×10^{-4}	0.9287	1.31×10^{-6}	6.60×10^{-4}
T50-V2-U30	0.9008	1.71×10^{-6}	6.53×10^{-4}	0.9309	1.19×10^{-6}	5.45×10^{-4}	0.8855	1.97×10^{-6}	8.10×10^{-4}
T60-V1	0.9214	1.34×10^{-6}	5.78×10^{-4}	0.9533	7.94×10^{-7}	4.45×10^{-4}	0.9188	1.38×10^{-6}	6.78×10^{-4}
T60-V1-U10	0.8554	2.46×10^{-6}	7.84×10^{-4}	0.8909	1.85×10^{-6}	6.81×10^{-4}	0.8243	2.99×10^{-6}	9.98×10^{-4}
T60-V1-U30	0.7967	3.41×10^{-6}	9.24×10^{-4}	0.8906	5.68×10^{-6}	8.18×10^{-4}	0.7452	4.28×10^{-6}	1.19×10^{-3}
T60-V1.5	0.7733	3.73×10^{-6}	9.66×10^{-4}	0.8582	2.99×10^{-6}	8.65×10^{-4}	0.7428	4.23×10^{-6}	1.19×10^{-3}
T60-V1.5-U10	0.7805	3.13×10^{-6}	8.84×10^{-4}	0.8683	2.59×10^{-6}	8.05×10^{-4}	0.7744	3.22×10^{-6}	1.04×10^{-3}
T60-V1.5-U30	0.8543	1.92×10^{-6}	6.93×10^{-4}	0.8870	1.49×10^{-6}	6.11×10^{-4}	0.8539	1.93×10^{-6}	8.02×10^{-4}
T60-V2	0.6926	4.15×10^{-6}	1.02×10^{-3}	0.7912	3.63×10^{-6}	9.53×10^{-4}	0.6921	4.16×10^{-6}	1.18×10^{-3}
T60-V2-U10	0.6794	3.99×10^{-6}	9.98×10^{-4}	0.7846	3.55×10^{-6}	9.42×10^{-4}	0.6784	4.01×10^{-6}	1.15×10^{-3}
T60-V2-U30	0.8408	1.68×10^{-6}	6.48×10^{-4}	0.8936	1.28×10^{-6}	5.67×10^{-4}	0.8493	1.70×10^{-6}	7.53×10^{-4}

۳-۲-مدل سازی چروکیدگی

در شکل ۱ (a-d)، علاوه بر تأثیر فراصوت، دما و سرعت هوا بر تغییرات میزان ضخامت تیمارهای مختلف، می توان مدل-سازی تغییرات ضخامت (چروکیدگی) نمونه های زغال اخته در طول خشک شدن آن ها را نیز با مدل پیشنهادی (مدل ۲ جدول ۱) مشاهده کرد.

در جدول ۴، میانگین پارامترهای آماری مدل های مختلف برای همه تیمارها آمده است. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها، می توان نتیجه گرفت که مدل ۲ دارای بالاترین مقدار R² و پایین ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل های

جدول ۱ می باشد. با توجه به جدول ۴، میانگین مقادیر ضریب تبیین، ریشه متوسط خطای داده ها و مجموع مربع خطای مدل مذکور (مدل ۲) در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب ۰/۹۴۲، ۴/۴۹×۱۰^{-۶} و ۱/۰۸×۱۰^{-۶} می باشد. بنابراین از بین ۳ مدل مورد مطالعه، مدل ۲ به عنوان مدل پیشنهادی برای پیش بینی تغییرات ضخامت زغال اخته انتخاب شد. همانطور که در شکل ۱ (a-d) مشاهده می شود، انطباق خوبی بین مقادیر ضخامت پیش بینی شده (توسط مدل پیشنهادی ۲) و آزمایشی در تیمارهای مورد مطالعه وجود دارد.

معادلات ۵ و ۶، به ترتیب ضرایب K₁ و K₂ مدل توسعه یافته

تغییرات ضخامت (چروکیدگی) نمونه‌های زغال اخته مناسب می‌باشد.

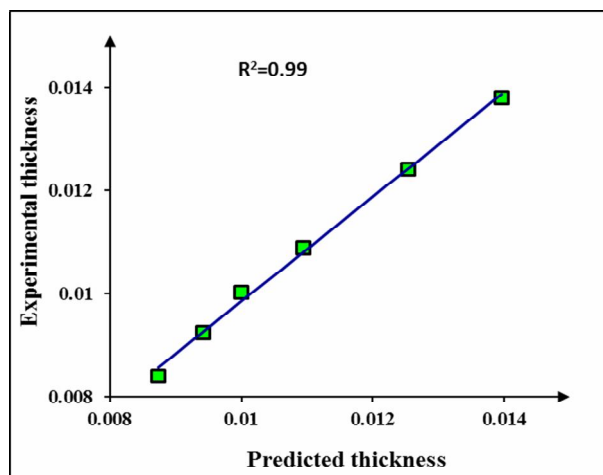


Fig. 2 Fitted of thickness data obtained from experimental with data obtained from proposed model (model 2)

۴- نتیجه گیری

چروکیدگی محصول یکی از عیوب مهم حین خشک‌شدن مواد غذایی با استفاده از جریان هوای داغ است که خصوصیات ترموفیزیکی ماده غذایی از جمله پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق، تاثیر به-کارگیری فراصوت، دما و سرعت هوای خشک‌کن روی میزان ضخامت زغال اخته و مدل‌سازی آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت، دما و سرعت هوا از لحاظ آماری تاثیر معنی‌دار بر روی ضخامت نهایی دارند. افزایش زمان فراصوت از ۰ تا ۳۰ دقیقه بعلاوه پراکنده کردن ترکیبات مومی سطح پوست زغال اخته و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی، سبب سهولت انتقال جرم و کاهش ضخامت گردید. همچنین، افزایش دما و سرعت هوای خشک‌کن منجر به افزایش ضخامت شد. مدل‌سازی تغییرات ضخامت (چروکیدگی) تیمارها با مدل‌های مختلف، نشان داد که مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل ۲) انطباق خوبی ($R^2=0.942$) با مقادیر ضخامت آزمایشی داشته و به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی کننده چروکیدگی زغال اخته تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

۵- منابع

[1] Bijelic, S.M., Golosin, B.R., Ninic Todorovic, J.I., Cerovic, S.B., Popovic, B.M.

پیشنهادی (مدل ۲) را نشان می‌دهند که از آنالیز رگرسیونی غیر خطی به‌دست آمده‌اند. همچنین، فرم نهایی معادله مربوط به تغییرات ضخامت زغال اخته طی خشک‌کردن در زیر آورده شده است (معادله ۷).

(معادله ۵)

$$K_1 = (2.49 \times 10^{-5} \times T) + (2.27 \times 10^{-4} \times V) + (3.48 \times 10^{-6} \times U) \quad R^2 = 0.99$$

(معادله ۶)

$$K_2 = (5.07 \times 10^{-4} \times T) - (1.09 \times 10^{-2} \times V) + (1.58 \times 10^{-4} \times U) \quad R^2 = 0.98$$

(معادله ۷)

$$L = [2.49 \times 10^{-5} \times T + 2.27 \times 10^{-4} \times V + 3.48 \times 10^{-6} \times U] \times \exp[(5.07 \times 10^{-4} \times T - 1.09 \times 10^{-2} \times V + 1.58 \times 10^{-4} \times U) \times x]$$

در این روابط، k_1 و k_2 ضرایب ثابت مدل پیشنهادی (مدل ۲ جدول ۱)، L ، ضخامت نمونه‌ها بر حسب متر، x ، محتوی رطوبت بر حسب کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک، T ، دمای هوای خشک‌کن بر حسب درجه کلوین، V ، سرعت هوای خشک‌کن بر حسب متر بر ثانیه و U ، زمان فراصوت بر حسب دقیقه می‌باشند.

با استفاده از بهترین مدل برازش شده تجربی (مدل ۲ جدول ۱) و وارد کردن معادله ۸ در نرم افزار شبیه‌سازی COMSOL Multiphysics، سرعت چروکیدگی نمونه‌های زغال اخته از رابطه زیر (معادله ۸) برای استفاده در شبیه‌سازی انتقال جرم و حرارت بدست می‌آید [۱۸].

$$LV = \left(\frac{L}{t} \right) \quad \text{(معادله ۸)}$$

، ضخامت نمونه -

های زغال اخته بر حسب متر (پیش‌بینی شده توسط مدل معادله ۷)، t ، زمان خشک‌شدن بر حسب ثانیه و V ، سرعت چروکیدگی نمونه‌های زغال اخته بر حسب متر بر ثانیه است.

۳-۳- معبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

به‌منظور معبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی، مقادیر تغییرات ضخامت پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی (مدل ۲ جدول ۱) و مقادیر ضخامت تجربی بدست آمده با زمان فراصوت ۱۵ دقیقه، دمای هوای ۵۵ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۱/۷ متر بر ثانیه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوری که از این شکل بر می‌آید، انطباق خوبی ($R^2=0.99$) بین ضخامت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل وجود دارد. بنابراین، مدل توسعه یافته پیشنهادی برای پیش‌بینی

- [12] 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, 88-97.
- [13] Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
- [14] Fernandes, F.A.N., Rodrigues, S. (2008). Application of Ultrasound and Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration in Drying of Fruits. *Drying Technology*, 26, 1509-1516.
- [15] Soria, A.C., Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Food Science and Technology*, 21, 323-331.
- [16] Fuente-Blanco, S.d.l., Sarabia, E.R.F.d., Acosta-Aparicio, V.M., Blanco-Blanco, A., Gallego-Juarez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- [17] Schossler, K., Jager, H., Knorr, D. (2012). Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 108, 103-110.
- [18] Aprajeta, J., Gopirajah, R., Anandharamakrishnan, C. (2015). Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, 144, 119-128.
- [19] Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., Oliveira, F.A.R. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84, 430-440.
- [20] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R., Hamdami, N., Talati, F., Moghaddam, M. (2010). Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12, 171-178.
- [21] Hii, C.L., Law, C.L., Law, M.C. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54, 264-271.
- [22] Hassini, L., Azzouz, S., Peczkalski, R., Belghith, A. (2007). Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. (2011). *Physicochemical Fruit Characteristics of Cornelian Cherry (Cornus mas L.) Genotypes from Serbia. HORTSCIENCE*, 46, 849-853.
- [2] Hassanpour, H., Hamidoghli, Y., Hajilo, J., Adlipour, M. (2011). Antioxidant capacity and phytochemical properties of cornelian cherry (*Cornus mas L.*) genotypes in Iran. *Scientia Horticulturae*, 129, 459-463.
- [3] Tural, S., Koca, I. (2008). Physico-chemical and antioxidant properties of cornelian cherry fruits (*Cornus mas L.*) grown in Turkey. *Scientia Horticulturae*, 116, 362-366.
- [4] Seeram, N.P., Schutzki, R., Chandra, A., Nair, M.G. (2002). Characterization, Quantification, and Bioactivities of Anthocyanins in *Cornus* Species, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2519-2523.
- [5] Deghannya, J., Gorbani, R., Ghanbarzadeh, B. (2015). Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on drying kinetics and effective moisture diffusivity of Mirabelle plum. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 2710-2717.
- [6] Guine, R.P.F., Fernandes, R.M.C. (2006). Analysis of the drying kinetics of chestnut. *Journal of Food Engineering*, 76, 460-467.
- [7] Figiel, A. (2010). Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*, 98, 461-470.
- [8] Bialobrzewski, I. (2006). Simultaneous heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying. *Drying Technology*, 24, 551-559.
- [9] Koc, B., Eren, I., Ertekin, F.K. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.
- [10] Panyawong, S., Devahastin, S. (2007). Determination of deformation of a food product undergoing different drying methods and conditions via evolution of a shape factor. *Journal of Food Engineering*, 78, 151-161.
- [11] Deng, Y., Zhao, Y. (2008). Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). *Journal of Food Engineering*, 85, 84-93.

- [26] Senadeera, W., Bhesh, R.B., Young, G., Wijesinghe, B., (2005). Modeling dimensional shrinkage of shaped foods in fluidized bed drying. *Journal of Food Processing and Preservation*. 29, 109–119.
- [27] Yadollahinia, A., Jahangiri.M., (2009). Shrinkage of potato slice during drying *Journal of Food Engineering*. 94, 52–58.
- [28] Schultz, E.L.M.M., Mazzuco, R.A.F., Machado, A., Bolzan, M.B., Quadri, M.G.N. (2007). Effect of pre-treatment on drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering*, 78, 1103-1110.
- [29] Mayor, L., Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
- Journal of Food Engineering*, 79, 47–56.
- [23] Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*. 113, 427-433.
- [24] Mothibe, K.J., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Wang, Y.C., Cheng, X. (2014). Effects of ultrasound and microwave pretreatments of apple before spouted bed drying on rate of dehydration and physical properties. *Drying Technology*. 32, 1848-1856.
- [25] Ortuño, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A., Riera, E., Garcia-Perez, J.V. (2010). Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3, 153-159.



Investigation of the effect of ultrasound pretreatment on shrinkage of cornelian cherry during hot air drying

Ghorbani, R.¹, Esmaili, M.^{2*}

1. Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Iran.
2. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Iran.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article History: Received 2019/ 12/ 11 Accepted 2020/ 01/ 31 Keywords: Drying, Cornelian cherry, Ultrasound, Shrinkage, Modeling. DOI: 10.52547/fsct.19.123.15 DOR: 20.1001.1.20088787.1401.19.123.2.7 *Corresponding Author E-Mail: M.esmaili@urmia.ac.ir	In this study, the effect of ultrasound pretreatment, air velocity and temperature on cornelian cherry shrinkage during hot air drying process were investigated. Ultrasound pretreatment at two time levels (10 and 30 minutes) was applied and then the samples were dried at 40, 50 and 60°C and 1, 1.5 and 2 m/s air velocity. Afterwards, shrinkage data were fitted to three experimental models. The results showed that with decreasing moisture content during drying, the thickness of the samples reduced from 0.0138 to 0.0078 m. The application of ultrasound pretreatment led to a significant ($P < 0.05$) decrease in thickness. Moreover, one of the models was selected as the best suitable model in predicting thickness changes of cornelian cherry ($R^2 = 0.99$) under the experimental conditions. Through multiple regression analysis, the relations between the coefficients of the models with the variables used were obtained.