

مدل سازی چروکیدگی آلو پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی در فرآیند خشک کردن

رسول قربانی¹، جلال دهقان نیا^{2*}، سید صادق سیدلو هریس³ و بابک قنبرزاده⁴

تاریخ دریافت: 91/11/14 تاریخ پذیرش: 92/4/18

¹ گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³ گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

⁴ گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: J_deghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

آلو یکی از مهمترین محصولات کشاورزی در ایران است. جهت کاهش افت پس از برداشت و افزایش زمان ماندگاری آن از روش‌های مناسب نگهداری مانند خشک کردن استفاده می‌شود. با توجه به کیفیت پایین محصولات خشک شده با استفاده از خشک کردن با جریان هوای داغ، استفاده از پیش تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی قبل از فرآیند خشک کردن با هوای داغ، جهت بهبود خصوصیات کمی و کیفی آن از جمله چروکیدگی ضروری و امید بخش بنظر می‌رسد. در این تحقیق، تاثیر بکارگیری همزمان پیش تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی بر میزان چروکیدگی آلو هنگام خشک کردن در دمای 80 درجه سانتیگراد و سرعت هوای 1/4 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. پیش تیمارهای انجام شده شامل، زمان اولتراسوند در 2 سطح 10 و 30 دقیقه، غلظت محلول اسمزی در 2 سطح با بریکس 50 و 70 و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی در 4 سطح 60، 120، 180 و 240 دقیقه بودند. در ادامه، نتایج تجربی حاصل از آزمایشات با مدل-های چروکیدگی موجود و پیشنهادی مقایسه و سپس، یکی از مدل‌ها، به عنوان مدل پیشنهادی پیش بینی کننده چروکیدگی آلو تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. نتایج نشان داد که میزان چروکیدگی با استفاده همزمان از اولتراسوند و آبگیری اسمزی نسبت به تیمار شاهد، به شکل معنی داری کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، باعث کاهش چروکیدگی در مقایسه با تیمار شاهد شدند.

واژه‌های کلیدی: آبگیری اسمزی، اولتراسوند، خشک کردن، چروکیدگی، مدل سازی

1- مقدمه

است. آلو منبع بسیار خوبی از کربوهیدرات، ویتامین A، کلسیم، منیزیم، آهن، پتاسیم، فیبر و مقدار قابل توجهی ویتامین C می‌باشد. همچنین، آلو یکی از مهمترین میوه‌ها در ایران، به خصوص استان آذربایجان شرقی بوده و تولید سالانه آن از رقم بالایی برخوردار می‌باشد. این محصول به دلیل درصد رطوبت بالا، از فعالیت متابولیکی زیادی برخوردار است. این فعالیت‌ها پس از برداشت محصول نیز ادامه یافته و موجب فاسد شدن آلو می‌شوند؛ در نتیجه، این میوه به دلیل داشتن طول کوتاه فصل برداشت،

آلو میوه‌ای تک هسته‌ای با نام علمی پرونوس دومستیکا (*Prunus Domestica*) از خانواده روزاسه (*Rosaceae*) است (نیونز و همکاران، 2008). بیش از هزاران گونه متفاوت از این میوه در دنیا وجود دارد که از نظر رنگ، شکل و اندازه تنوع زیادی دارند. برخی از آن‌ها به رنگ زرد و پر آب بوده و برخی دیگر درصد آب کمتری داشته و قرمز متمایل به ارغوانی هستند. قطر آلو از 3 تا 6 سانتی متر و طعم آن از ترش تا شیرین متغیر

به شکل خشک شده نگهداری و مصرف می شود (دویماز، 2004).

میزان رطوبت بالا در میوه‌جات، نقش مهمی در زنجیره حمل و نقل و ذخیره سازی آن‌ها ایفا می‌کند. رشد میکروبه‌ها، از بین رفتن رنگ، پیدایش بدطعمی و کاهش ارزش تغذیه‌ای، از جمله عوامل رایج کاهش کیفیت هستند که در نگهداری میوه‌جات با رطوبت بالا اتفاق می‌افتد و محصول را برای مصرف تازه‌خوری نامناسب می‌سازد. بنابراین، حذف رطوبت یا خشک کردن از طریق انتقال همزمان جرم و حرارت، به طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل، حفظ کیفیت و کاهش افت پس از برداشت محصولات کشاورزی، و به منظور تولید میوه‌ها و سبزی‌های خشک شده که بطور مستقیم مصرف می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. خشک کردن یک نوع عملیات حرارتی تحت شرایط کنترل شده برای کاهش آب موجود در مواد غذایی با استفاده از تبخیر رطوبت می‌باشد. این عملیات موجب افزایش پایداری ماده غذایی از طریق کاهش فعالیت آبی و رشد میکروارگانیسم‌ها می‌گردد. امروزه، علاوه بر مصرف تازه‌خوری، خشک کردن میوه‌های مختلف از جمله آلو مرسوم شده است و این محصولات در بازار با قیمت بالایی به فروش می‌رسند. از جمله موارد مصرف آلوی خشک شده، میتوان به افزودن آن به غذاها برای بهبود ارزش تغذیه‌ای و عطر و طعم آن‌ها اشاره نمود. نوع خشک این میوه در جای خشک و خنک به مدت 6 ماه قابل نگهداری می‌باشد (ایبیتوار و همکاران، 2008). براساس تحقیقات انجام شده بر روی خشک کردن آلو با استفاده از پیش تیمارهای مختلف، خشک کردن آلو تا رسیدن به محتوی رطوبت 0/25 تا 0/86 کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک انجام گرفته است (طهران، 2007 و جزینی و حاتمی پور، 2010).

در گذشته، محصولات کشاورزی به صورت سنتی در زیر آفتاب خشک می‌شدند که روشی بسیار آسان و کم هزینه بود (سیدلو و همکاران، 2010)؛ اما چنین سامانه‌هایی دارای معایبی از جمله کاهش کیفیت، غیرقابل کنترل بودن شرایط محیطی، نیاز به فضا و هزینه زیاد، خشک شدن غیریکنواخت و افزایش زمان خشک شدن هستند (ساسیلیک و همکاران، 2006). متداولترین روش خشک کردن مواد غذایی و از جمله آلو استفاده از جریان هوای داغ با همرفت اجباری است که در آن هوای داغ با عبور از سطح ماده غذایی باعث تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌شود. خشک کردن با جریان هوای داغ در کنار داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و عدم نیاز به تماس مستقیم، دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله این معایب، نیاز به زمان طولانی‌تر و دمای بالاتر برای خشک کردن محصول طی دوره سرعت نزولی، می‌باشد. علاوه بر این، دماهای بالا باعث کاهش ارزش تغذیه‌ای، چروکیدگی بیشتر، سخت‌شدگی سطحی و مصرف انرژی بالا می‌شود (کینگ و همکاران، 2006). هنگام خشک کردن، تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلفی در ماده غذایی رخ می‌دهد که موجب تغییر خصوصیات کیفی محصول نهایی

خشک شده نسبت به محصول تازه اولیه می‌گردد (بیالوبرزوسکی، 2006). 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 (کوک و همکاران، 2008).

چروکیدگی مواد غذایی ممکن است به دو علت اتفاق افتد. 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 (پانیانگ و دواهستین، 2007). چروکیدگی محصول از عیوب مهم حین خشک شدن مواد غذایی با استفاده از جریان هوای داغ محسوب شده و باعث افت خصوصیات کمی و کیفی محصول خشک شده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش حجم، افزایش سخت شدن سطحی، کاهش قابلیت آگیری 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 آگیری مجدد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در طی فرآیند خشک شدن مواد غذایی، چروکیدگی به طور مداوم اتفاق می‌افتد و خصوصیات ترموفیزیکی ماده غذایی از جمله پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین، چروکیدگی یک عامل محدودکننده در انتقال جرم است که باعث افزایش مدت زمان لازم برای خشک شدن و کاهش آهنگ خشک شدن محصول می‌شود. این افزایش در زمان مورد نیاز برای خشک شدن به این دلیل است که در جریان چروکیدگی، مساحت سطح محصول به دنبال کاهش حجم آن کاهش می‌یابد و در نتیجه مسیر مورد نیاز برای خروج مولکولهای آب حین خشک شدن غیریکنواخت می‌شود (فیجیل، 2010 و سوراکی و مولا، 2008). از اینرو، زمانی که شبیه سازی و پیش‌بینی پروفایل‌های رطوبت و حرارت در داخل ماده غذایی در فرآیند خشک کردن مدنظر باشد، بایستی چروکیدگی لحاظ شود؛ چرا که، چروکیدگی، آهنگ خشک شدن را از طریق تغییر ضریب انتشار موثر رطوبت، تا حد زیادی تغییر می‌دهد (تالا و همکاران، 2004).

1-1- مکانیسم چروکیدگی

سامانه‌های جامد و نیمه جامد مواد غذایی از مواد غیرهمگن تشکیل شده‌اند که به صورت یک شبکه سه بعدی یا ماتریکسی، مقادیر زیادی از فاز مایع را در خود نگه می‌دارند. زیست پلیمرها، عناصر ساختاری ماتریکس مواد جامد می‌باشند و در موارد پیچیده، عناصر ساختاری

یکنواخت محصول و چروکیدگی آن می‌گردد. در طرف مقابل، زمانی که بدلیل خشک کردن سریع تحت شرایط دما و سرعت بالای هوا و رطوبت نسبی پایین، اختلاف فشار بخار آب بالایی بین سطح ماده غذایی و هوا ایجاد می‌گردد، گرادیان رطوبتی زیاد بین سطح ماده غذایی و هوای گرم ایجاد می‌شود. در این حالت سرعت تبخیر آب از سطح ماده غذایی به هوای اطراف بیشتر از سرعت حرکت آب از لایه های داخلی به لایه بیرونی ماده غذایی خواهد بود؛ در نتیجه، به دلیل محتوای رطوبت پایین لایه بیرونی، دمای آن افزایش یافته و به دمای انتقال شیشه‌ای می‌رسد. این رویداد، علیرغم کاهش چروکیدگی، یک لایه سخت خارجی در اثر تجمع مواد محلولی که با حرکت آب به سطح ماده غذایی آمده‌اند، ایجاد می‌کند و به دلیل بسته شدن لوله‌های موئین، مانع خروج رطوبت از لایه‌های درونی که هنوز حالت لاستیکی دارند، نیز خواهد شد (مایور و سرنو، 2004).

2-1- عوامل موثر بر مقدار چروکیدگی

یکی از عوامل موثر بر مقدار چروکیدگی مواد غذایی، حجم آب خارج شده از آن‌ها می‌باشد. با افزایش حجم آب خارج شده، به دلیل تنش‌های انقباضی ایجاد شده در آن، چروکیدگی ماده غذایی افزایش می‌یابد؛ این روند تا مراحل پایانی خشک شدن ادامه دارد. این در حالیست که در بعضی از مواد غذایی، حجم آب خارج شده در مراحل نهایی خشک شدن بیشتر از کاهش حجم نمونه است. این رفتار بدلیل کاهش تحرک شبکه مواد جامد در محتوای رطوبت پایین می‌باشد (مایور و سرنو، 2004).

تحرک شبکه مواد جامد یا ماتریکس مواد جامد از دیگر عوامل موثر بر مقدار چروکیدگی است. تحرک شبکه مواد جامد یک فرآیند دینامیک است که نرخ آن وابسته به اختلاف دمای بین دمای ماده غذایی در حال خشک شدن و دمای انتقال شیشه‌ای آن می‌باشد. اگر این تفاوت دمایی کمتر باشد ماده از حالت لاستیکی به شیشه‌ای عبور کرده و گسترش چروکیدگی کاهش یافته یا متوقف می‌شود. در محتوای رطوبت بالا، به دلیل حالت لاستیکی ماده غذایی، کاهش حجم متناسب با کاهش رطوبت می‌باشد. در حالی که در محتوای رطوبت پایین، ماده از حالت لاستیکی به شیشه‌ای عبور کرده و دمای انتقال شیشه‌ای افزایش پیدا می‌کند؛ بطوریکه، تحرک کم شبکه مواد جامد به علت حالت شیشه‌ای آن، منجر به کاهش قابل توجه چروکیدگی می‌شود. در این مرحله امکان تشکیل خلل و فرج وجود دارد (مایور و سرنو، 2004).

سرعت، دما و رطوبت نسبی هوا، عوامل موثر دیگری بر مقدار چروکیدگی هستند. اگر در طول فرآیند خشک کردن، سرعت و دمای پایین و رطوبت نسبی بالای هوا انتخاب شود، به دلیل کاهش اختلاف فشار بخار آب بین سطح ماده غذایی و هوای اطراف ماده غذایی، سرعت حرکت آب از لایه های داخلی به لایه بیرونی برابر با سرعت تبخیر آب از سطح ماده غذایی به هوای اطراف خواهد بود و این امر موجب جمع شدن

3-1- تاثیر اولتراسوند بر چروکیدگی

وجود لایه مومی موجود در آلو، باعث ایجاد مقاومت در مقابل خروج رطوبت در هنگام خشک شدن آن می‌گردد و معمولاً برای از بین بردن این لایه، از یکسری مواد شیمیایی استفاده می‌شود (طهران، 2007). استفاده از این مواد شیمیایی باعث ایجاد طعم‌های نامطلوب در آلودگی خشک گردیده و بنابراین به منظور کاهش زمان خشک شدن، بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات خشک شده و برطرف کردن عیوب خشک کردن با جریان هوای داغ، استفاده از فناوری‌های جدید مانند اولتراسوند، بطور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، استفاده از پیش تیمار اولتراسوند به دلیل کاهش زمان خشک شدن، باعث کاهش هزینه‌های تولید محصول خشک شده نیز می‌شود (فرناندز و رودریگوز، 2007 و اورتونو و همکاران، 2010).

اولتراسوند یکی از فناوری‌های نوظهور است که کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، چه برای ارزیابی غیر مخرب و چه در فرآوری، روز به روز در حال گسترش است (چمات و همکاران، 2011). در فناوری اولتراسوند، امواج صوتی در یک بسامد بالاتر از محدوده شنوایی انسان تولید می‌شود. این امواج، در فرآوری، آنالیز و کنترل کیفیت مواد غذایی، بر اساس محدوده بسامد، به دو دسته اولتراسوند با انرژی پایین (بسامد بالا و توان پایین)، و اولتراسوند با انرژی بالا (بسامد پایین و توان بالا) طبقه بندی می‌شوند. اولتراسوند با انرژی بالا بعنوان پیش تیمار قبل از فرآیند خشک کردن با هوای داغ، جهت بهبود خصوصیات کیفی (از جمله چروکیدگی) محصول خشک شده از طریق بهبود پدیده انتقال جرم و حرارت بکار می‌رود (آواد و همکاران، 2012). این پیش تیمار با غوطه‌ور کردن میوه در آب مقطر یا محلول آبی هیپرتونیک (*Hypertonic*) و اعمال امواج اولتراسوند صورت می‌گیرد. امواج اولتراسوند باعث یکسری

همچنین در این تحقیق، چروکیدگی کمتر نمونه‌های سیب در کنار افزایش انتقال جرم آن‌ها مشاهده شد. علت آن، به خروج سریعتر و راحت‌تر رطوبت از داخل ماده غذایی و ورود ماده جامد قندی به داخل آن نسبت داده شد.

4-1- تاثیر آبیگری اسمزی بر چروکیدگی

علاوه بر اولتراسوند، آبیگری اسمزی نیز قبل از فرآیند خشک کردن با هوای گرم با هدف بهبود خواص تغذیه‌ای، حسی، کیفی و کاهش چروکیدگی محصول نهایی خشک‌شده به کار می‌رود (مونرات و همکاران، 2010). آبیگری اسمزی، شامل حذف بخشی از آب مواد غذایی بدون تغییر فاز، توسط غوطه‌ور کردن آن‌ها در محلول‌های هیپرتونیک می‌باشد. ساکارز یکی از پرمصرف‌ترین مواد مورد استفاده به عنوان عامل اسمز در فرآیند آبیگری اسمزی محسوب می‌شود و به‌ویژه برای میوه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک سامانه حاوی ماده غذایی و محلول اسمزی، حذف آب بر اساس پدیده اسمز از بین یک غشا نیمه تراوا مثل غشا سلولی ماده غذایی صورت می‌گیرد. در فرآیند آبیگری اسمزی، دو جریان عمده شامل جریان آب و جریان محلول اسمزی به طور همزمان اتفاق می‌افتد که در آن، انتقال جرم تابعی از تفاوت غلظت می‌باشد. با توجه به اینکه، غلظت آب در داخل ماده غذایی و غلظت ماده قندی در محلول اسمزی بالا می‌باشد، جریان آب به خارج از ماده غذایی و جریان ماده قندی به درون ماده غذایی صورت می‌گیرد. با نفوذ مواد جامد محلول به داخل ماده غذایی، فضاهای خالی ناشی از خروج رطوبت از محصول پر می‌شوند. در نتیجه، به میزان قابل توجهی بافت را محافظت کرده و حداقل چروکیدگی و آسیب سلولی را باعث می‌شود. علاوه بر این، امکان فرمولاسیون در محصول نهایی با شیرین کردن یا شور کردن ماده غذایی در آبیگری اسمزی فراهم می‌شود. آبیگری اسمزی، آسیب حرارتی به رنگ و بافت را به حداقل می‌رساند و معمولاً این فرآیند، در شرایط محیطی یا متعارفی صورت گرفته و باعث افزایش کیفیت محصولات غذایی می‌گردد (دهقان نیا و همکاران، 2006).

در تحقیقی، تاثیر پیش تیمار آبیگری اسمزی بر ویژگی‌های بافتی و ریز ساختاری گوجه فرنگی خشک‌شده با هوا مورد مطالعه قرار گرفت (امام جمعه و همکاران، 1387). نمونه‌های آبیگری اسمزی شده پس از خشک شدن با خشک‌کن هوای داغ، توسط دستگاه بافت‌سنج و میکروسکوپ الکترونی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اعمال پیش تیمار آبیگری اسمزی موجب نرم‌تر شدن بافت، و همچنین جلوگیری از تخریب گسترده ساختار سلولی باعث کاهش چروکیدگی محصول خشک‌شده می‌گردد. مشاهدات مشابه در مورد بررسی انتقال جرم در بافت توت فرنگی در طول آبیگری اسمزی (فراندو و اسپیس، 2003) نشان داد که با افزایش غلظت محلول اسمزی ساکارز، به دلیل

انقباضها و انبساط‌های متناوب سریع با اثراسفنجی (*Sponge effect*) شده و به دلیل ایجاد کانالهای میکروسکوپی، باعث حفظ اختلاف فشار مکش لوله‌های موئین و خروج راحت‌تر رطوبت می‌گردد (فرناندز و همکاران، 2008). بعلاوه، اولتراسوند باعث ایجاد حبابهای هوا در داخل محیط مایع و سپس ترکیدن این حبابها می‌شوند که به این پدیده کاویتاسیون می‌گویند. ترکیدن غیرمتقارن این حبابها در نزدیکی سطح ماده غذایی، باعث انتقال جریان‌های سریع و فورانی از امواج صوتی به سطح شده و با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی در آن، باعث تشکیل کانالهای میکروسکوپی و سهولت خروج آب از داخل محصول در طی خشک‌شدن از طریق کانالهای ایجاد شده می‌شود (سوریا و ویلامیل، 2010). از دیگر اثرات اولتراسوند، ایجاد تنش فشاری و تغییر شکل مواد جامد متخلخل می‌باشد که این اثرات مسئول ایجاد کانال‌های میکروسکوپی، کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش انتقال جرم همرفتی در مواد غذایی می‌باشد (فیونت و همکاران، 2006). مزیت دیگر استفاده از اولتراسوند، نیاز به افزایش کمتر دما در طول فرآیند خشک کردن می‌باشد. در نتیجه، اولتراسوند بدون داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند بعنوان یک پیش تیمار در خشک کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود؛ چون باعث افزایش سرعت و کاهش دمای مورد نیاز برای خشک کردن می‌شود (سان، 2005).

جامبرک و همکاران (2007) در تحقیقی، اثر شدتهای مختلف اولتراسوند راه بر روی میزان انتقال جرم و ویژگی آبیگری مجدد، در خشک کردن نمونه‌های قارچ دکمه‌ای، کلم بروکلی و گل کلم بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نمونه‌های پیش تیمار شده با اولتراسوند، میزان انتقال جرم افزایش، زمان خشک شدن با هوای داغ کاهش، و قابلیت آبیگری مجدد افزایش می‌یابد. این نتیجه بیانگر چروکیدگی و آسیب بافتی کمتر است. همچنین بررسی تاثیر اولتراسوند بر روی زمان خشک شدن و ضریب انتشار موثر رطوبت در طول خشک کردن همرفتی سیب و لفل فلر قمرز توسط شوسلر و همکاران (2012) نشان داد که اولتراسوند باعث کاهش زمان مورد نیاز برای خشک شدن در اثر افزایش ضریب انتشار موثر رطوبت می‌شود. علاوه بر این، اولتراسوند باعث کاهش ضریب چروکیدگی و افزایش نسبت حجمی در مقایسه با تیمار شاهد گردید.

علاوه بر موارد فوق، در تحقیقی دیگر، تاثیر بکارگیری همزمان پیش تیمار آبیگری اسمزی با اولتراسوند و خلاء پالسی بر روی دمای انتقال شیشه‌ای، ریز ساختار، بافت و فعالیت آبی سیب مورد بررسی قرار گرفت (دنگ و زائو، 2008). نتایج بدست آمده بیانگر این بود که بکارگیری همزمان اولتراسوند و آبیگری اسمزی منجر به دمای انتقال شیشه‌ای (*Glass transition temperature*) بالاتر، مدت زمان ماندگاری بیشتر و فعالیت آبی پایین محصول خشک شده نهایی می‌گردد.

کردن نشان می‌دهند، طبقه‌بندی می‌شوند (مایور و سرنو، 2004). مدل‌های تجربی بر اساس تطبیق داده‌های تجربی چروکیدگی به صورت تابعی از رطوبت یا زمان خشک شدن با استفاده از تجزیه رگرسیون به دست می‌آیند. مدل‌های تجربی به دو دسته خطی و غیر خطی تقسیم شده و مدل‌های غیرخطی به شکل مدل‌های نمایی، درجه دوم و غیره ارائه می‌شوند. اگر کاهش حجم نمونه در تمامی مراحل خشک شدن متناسب با مقدار آب تبخیر شده باشد، در این صورت مدل‌های خطی جهت بیان رفتار چروکیدگی کفایت می‌کند. اما اگر توسعه تخلخل در مراحل پایانی خشک شدن خیلی سریع باشد، رفتار چروکیدگی توسط مدل‌های نمایی بهتر توصیف می‌شود (مایور و سرنو، 2004).

در تحقیقی، مدل‌سازی چروکیدگی، تخلخل و دانسیته ظاهری میوه به و تاثیر روشهای مختلف خشک کردن بر روی این خصوصیات مورد بررسی قرار گرفت (کوک و همکاران، 2008). نتایج این تحقیق نشان داد که چروکیدگی، تحت تاثیر روش خشک کردن قرار دارد و خشک کردن انجمادی، کمترین میزان چروکیدگی را در محصول نهایی ایجاد می‌کند. در ادامه، مدل‌سازی چروکیدگی توسط 6 مدل صورت گرفت و مدل راتی (*Ratti*) بعنوان بهترین مدل برازش کننده داده‌های آزمایشی انتخاب شد.

بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون تاثیر به کارگیری همزمان پیش-تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر چروکیدگی آلو به هنگام خشک شدن مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف از این تحقیق، مطالعه تاثیر دو پیش تیمار مذکور بر میزان چروکیدگی نمونه‌های آلو، مدل‌سازی تغییرات آن و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی کننده این تغییرات بود.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

آلو بخارای مورد نیاز برای انجام آزمایشهای خشک کردن، از یک باغ محلی تهیه و تا پایان آزمایشات در سردخانه با دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. حدود شصت دقیقه قبل از شروع هر آزمایش، جهت متعادل سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط، نمونه‌ها از سردخانه به آزمایشگاه انتقال می‌یافت. برای بررسی تاثیر بکارگیری همزمان اولتراسوند و آبیگری اسمزی، از حمام اولتراسوند (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سامانه تنظیم بسامد و زمان اولتراسوند) با بسامد 40 کیلوهرتز و در 2 سطح زمانی 10 و 30 دقیقه، غلظت محلول اسمزی ساکارز در 2 سطح با بریکس 50 و 70 و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی نیز در 4 سطح 60، 120، 180 و 240 دقیقه استفاده شد. قبل از شروع به خشک کردن، نمونه‌ها در معرض امواج اولتراسوند و تحت دمای محیط قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان‌های معین، نمونه‌ها از حمام اولتراسوند خارج، و در محلول اسمزی ساکارز با غلظت معین غوطه‌ور شدند. نسبت نمونه به محلول

جانشین شدن آب خارج شده از بافت توت فرنگی با ساکارز جذب شده، چروکیدگی سلولها کاهش می‌یابد.

همچنین در تحقیق دیگری، به بررسی تغییرات ساختاری در بافت سیب در طی آبیگری اسمزی پرداخته شده است (نیتو و همکاران، 2004). نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان داد که آبیگری اسمزی در زمان‌های کوتاه‌تر، به دلیل خروج رطوبت بیشتر، چروکیدگی بیشتری مشاهده می‌شود؛ در حالیکه، وقتی آبیگری اسمزی در مدت زمان طولانی (200 دقیقه) انجام می‌گیرد، به علت ورود ماده جامد بیشتر و افزایش مقاومت مکانیکی بافت سلولی نمونه، از چروکیدگی بیشتر جلوگیری شده و محصول نهایی از لحاظ شکل ظاهری به نمونه تازه اولیه نزدیک می‌شود. علاوه بر این، تاثیر پیش تیمار آبیگری اسمزی بر روی خشک کردن خربزه مورد بررسی قرار گرفته است (رودریگوز و فرناندز، 2006). در این پژوهش، آبیگری اسمزی مازاد بر 2 ساعت، باعث کاهش ضریب انتشار موثر رطوبت از طریق پر شدن فضاهای خالی ناشی از خروج آب توسط ماده جامد و پیوستگی ماده قندی توسط میوه شد.

1-5- مدل‌سازی چروکیدگی

خشک کردن محصولات کشاورزی، پدیده پیچیده‌ای است که شامل انتقال همزمان جرم و حرارت می‌باشد. بنابراین، مدل‌سازی یک روش مناسب برای درک پدیده‌های درگیر در طی فرآیندهای مختلف اعمال شده روی مواد غذایی و پیش‌بینی رفتار ماده تحت عوامل درونی و بیرونی متعدد می‌باشد (چوا و همکاران، 2002). از سوی دیگر، همان گونه که اشاره شد، یکی از مهمترین تغییرات فیزیکی که هنگام خشک شدن مواد غذایی همراه با خروج رطوبت از ماده غذایی رخ می‌دهد، چروکیدگی می‌باشد. این پدیده، خصوصیات ترموفیزیکی ماده غذایی، از جمله پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را تحت تاثیر قرار داده و در نتیجه بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت که یک عامل مهم در فرآیند خشک شدن است، و همچنین بر آهنگ خشک شدن، مؤثر می‌باشد. از اینرو، برای توصیف رفتار چروکیدگی محصولات کشاورزی با هدف افزایش کیفیت محصول خشک-شده، طراحی‌های با قابلیت اطمینان بالا، بهینه‌سازی طراحی‌ها و شرایط عملیات و همچنین ارزیابی عملکرد فرآیند، مدل‌سازی چروکیدگی ضروری است (دواهستین و نیامونی، 2010).

مدل‌های ریاضی مورد استفاده در مدل‌سازی تغییرات چروکیدگی بسته به روش مورد استفاده در مدل‌سازی، به دو گروه مدل‌های ساختاری یا بنیادی و مدل‌های تجربی طبقه بندی می‌شوند. مدل‌های بنیادی از فرضیه‌ها و نظریه‌ها استنباط می‌شوند و بر اساس توازن جرم و تعاریف چگالی و تخلخل و محاسبه حجم فازهای مختلف در سامانه‌های غذایی پایه‌ریزی می‌شوند. این مدل‌ها سه گروه از مدل‌هایی که رفتار خطی چروکیدگی، رفتار غیر خطی و تغییرات تخلخل را در کل فرآیند خشک-

و تابلو فرمان (محفظه کنترل کننده دما و سرعت) می‌باشد (سیدلو و همکاران، 2010).

2-4- طرح کلی آزمایش‌ها

حدود سی دقیقه قبل از شروع فرآیند، دستگاه خشک‌کن روشن و سرعت هوای داخل خشک‌کن بر روی عدد 1/4 متر بر ثانیه و دمای آن بر روی 80 درجه سانتیگراد تنظیم شد تا دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. نمونه‌ها به صورت لایه نازک بر روی سینی توری چیده شدند. سینی توری به طور مستقیم به ترازو متصل شده بود و کاهش وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی تعیین شده، اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت 0/54 گرم آب بر گرم ماده خشک انجام شد. آزمایشهای خشک‌کردن، در 2 تکرار و 17 تیمار انجام گرفت. علاوه بر این، قبل از شروع خشک‌کردن و حین فرآیند خشک‌کردن، اندازه‌گیری حجم نمونه‌های آلو در محتوای رطوبت 2/9، 3/4، 2/1، 1/4، 0/9 و 0/54 گرم آب بر گرم ماده خشک صورت گرفت. اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌های آلو بر اساس استاندارد AOAC (1990) انجام شد؛ به طوری که مقداری نمونه قبل و پس از انجام هر آزمایش، در آون با دمای 105°C قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت آن‌ها بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش شد.

اسمزی در کل آزمایش‌ها 1 به 4 بود. بعد از سپری شدن زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، نمونه‌ها از محلول اسمزی خارج و پس از حذف رطوبت سطحی توسط کاغذهای جاذب رطوبت، به یک خشک‌کن سینی دار طراحی شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray Dryer, Armfield، مجهز به سامانه ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) منتقل شدند.

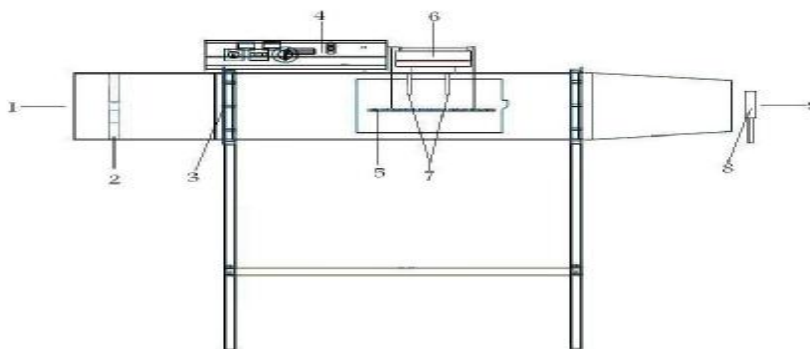
2-2- آماده‌سازی محلول اسمزی

محلول اسمزی ساکارز در دو غلظت با بریکس 50 و 70 به صورت زیر تهیه شد:

با توجه به هر آزمایش، ابتدا مقدار معینی از ساکارز، به داخل بشر ریخته شد. سپس مقدار معینی آب مقطر به آن اضافه شد تا حجم محلول به مقدار تعیین شده برسد. محلول همزده شد و ساکارز در آب مقطر حل و محلول اسمزی با بریکس مشخص بدست آمد.

2-3- خشک‌کن آزمایشگاهی

برای مقایسه خصوصیات کمی و کیفی نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فرآیند اولتراسوند و آبیگری اسمزی با نمونه شاهد، از یک دستگاه خشک‌کن سینی دار آزمایشگاهی استفاده شد (شکل 1). این خشک‌کن دارای محفظه ورودی (شامل فن و گرم‌کن‌های الکتریکی)، محفظه میانی (شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی‌سازهای جریان هوا)، محفظه خروجی



شکل 1- طرحواره خشک‌کن مورد استفاده: (1) ورودی هوا، (2) فن؛ (3) گرم‌کن، (4) تابلو فرمان یا محفظه کنترل کننده دما و سرعت، (5) سینی سوراخ دار، (6) ترازوی دیجیتال، (7) حسگر رطوبت، (8) سرعت سنج دیجیتالی هوا، (9) خروجی هوا (سیدلو و همکاران، 2010).

جدول 1- مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی چروکیدگی

شماره	نام مدل	مدل ریاضی	مرجع
1	Simal, et. al. (1996)	$D_R = k_1 X + k_2$	Mayor & Sereno, 2004
2	Mulet et. al. (1997)	$D_R = k_1 + k_2 \left(\frac{X}{1+X} \right) + \exp \left(k_3 \frac{X}{1+X} \right)$	Mayor & Sereno, 2004
3	Mayor & Sereno, 2004	$D_R = k_1 \exp \left(k_2 \frac{X}{X_0} \right)$	Mayor & Sereno, 2004
4	مدل پیشنهادی	$Sh = \left(\frac{t}{k_1 t + k_2} \right)$	تحقیق حاضر
5	مدل پیشنهادی	$Sh = 1 - \exp(-k_1 t)$	تحقیق حاضر
6	مدل پیشنهادی	$Sh = k_1 t k_2^t$	تحقیق حاضر

در این معادلات V_t ، حجم نمونه‌های خشک‌شده در محتوای رطوبت مورد نظر بر حسب سانتی‌متر مکعب، V_0 ، حجم اولیه نمونه‌ها قبل از خشک شدن بر حسب سانتی‌متر مکعب، DR، نسبت حجمی و Sh، ضریب چروکیدگی نمونه‌های آلوده است.

2-6- مدل‌سازی چروکیدگی

جدول 1، مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی تغییرات چروکیدگی نمونه‌های آلوده را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، تعدادی از مدل‌های تجربی و پیشنهادی، برای برازش ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی نمونه‌های آلوده به صورت تابعی از محتوای رطوبت، نسبت رطوبت و زمان فرآیند خشک کردن مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی‌های تغییرات چروکیدگی بدست آمده برای آلوده شرایط مختلف خشک کردن، بوسیله 6 مدل مذکور برازش شده و ضرایب آن‌ها توسط نرم افزار MATLAB R2011a تعیین گردید. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات چروکیدگی در طی خشک کردن لایه نازک آلوده، معیارهای ضریب تبیین (R^2) (Coefficient of determination)، ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) (Root Mean Square Error)، و مجموع مربعات خطا (SSE) (Sum Square Error)، توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. R^2 بالا و RMSE و SSE پایین نشان دهنده برازش بهتر مدل بر داده‌های آزمایشگاهی بوده و به عنوان بهترین مدل توصیف‌کننده تغییرات چروکیدگی در طی فرآیند خشک کردن انتخاب می‌شود (مبنای تعیین سه مدل پیشنهادی). آنالیز رگرسیونی غیر خطی نیز در ادامه برازش داده‌ها و به منظور برآورد ضرایب مدل انتخابی به صورت توابعی از زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه-

2-5- محاسبه چروکیدگی

برای محاسبه مقدار چروکیدگی، حجم نمونه‌های آلوده در طی خشک کردن و در محتوای رطوبت 0/9، 1/4، 2/1، 2/9، 3/4 و 0/54 گرم آب بر گرم ماده خشک اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که در هر آزمایش و پس از رسیدن به محتوای رطوبت مورد نظر، حجم نمونه‌ها از طریق روش جابه‌جایی حلال (تولون) و با استفاده از پیکنومتری که به این منظور ساخته شده بود، بدست آمد (بان و همکاران، 2008). 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 (1)، حجم تولون جابجا شده و به تبع آن حجم نمونه‌های آلوده را نشان می‌دهد.

$$V = \frac{M}{\rho_{to}} = \frac{m - m' - m''}{\rho_{to}} \quad (1)$$

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

مقادیر ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی نمونه‌های آلوده نیز، به ترتیب بر اساس معادلات (2) و (3) محاسبه شد (دیسا و همکاران، 2008 و سیدلو و همکاران، 2010).

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0} \right) \quad (2)$$

$$D_R = \left(\frac{V_t}{V_0} \right) \quad (3)$$

وری در محلول اسمزی توسط نرم افزار Excel 2007 انجام شد.

2-7- آنالیز آماری

برای بررسی اثر پیش تیمار اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر روی چروکیدگی آلو، آنالیز داده‌ها توسط نرم افزار SAS 9.1 و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب بلوکهای کامل تصادفی با سه فاکتور A (زمان اولتراسوند)، B (غلظت محلول اسمزی) و C (زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی) صورت گرفت و مقایسه میانگین‌ها نیز به روش بونفرونی (*Bonferoni*) در سطح احتمال 5 درصد ($P < 0.05$) انجام شد (استیل و همکاران، 1997).

3- نتایج و بحث

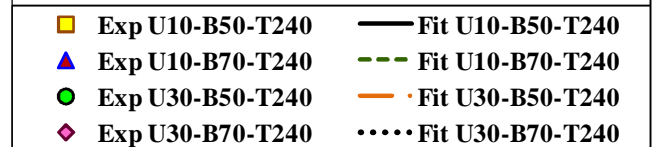
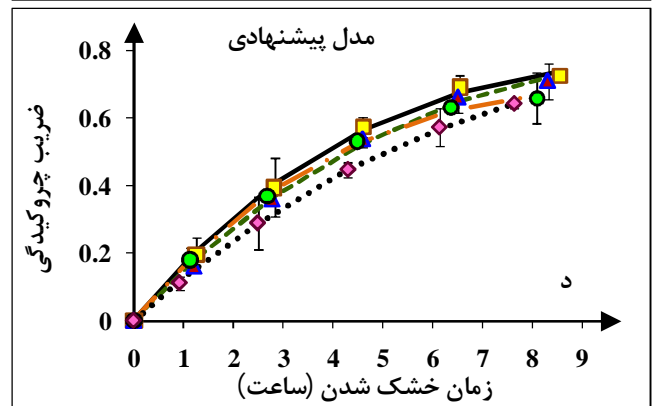
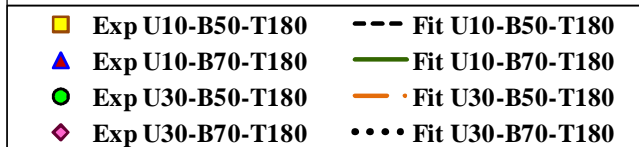
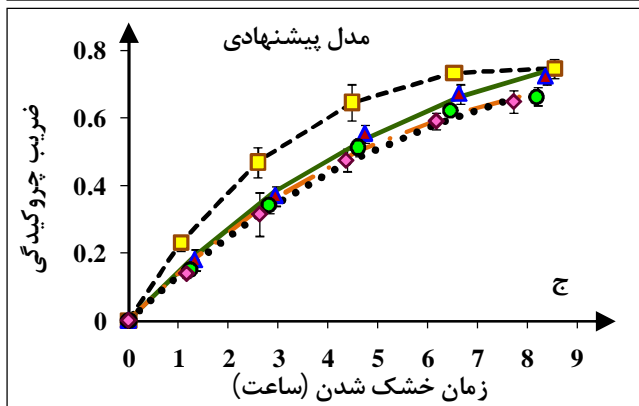
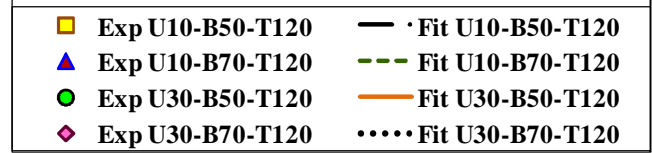
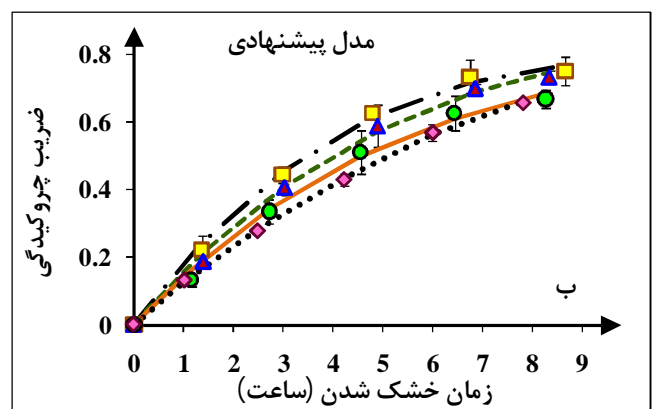
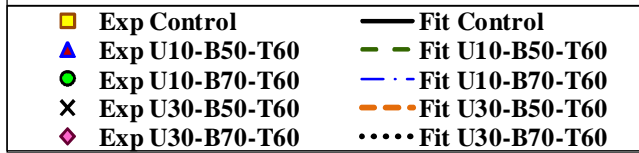
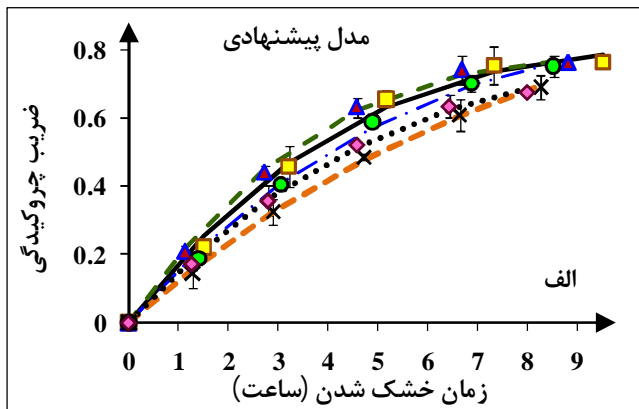
شکل 2- الف تا 2- د تغییرات میزان چروکیدگی (ضریب چروکیدگی) نمونه‌های آلو را در حین خشک شدن به صورت تابعی از زمان خشک شدن در بین تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. در این منحنی‌ها تیمارها با علائم اختصاری نشان داده شده‌اند که U زمان اولتراسوند بر حسب دقیقه، B غلظت محلول اسمزی بر حسب بریکس و T زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی بر حسب دقیقه است؛ به عنوان مثال U10-B50-T60 تیمار با اولتراسوند 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان

غوطه‌وری 60 دقیقه را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش زمان خشک شدن، به دلیل کاهش حجم آلو در اثر خروج آب در طول فرآیند، ضریب چروکیدگی آن‌ها افزایش یافته است. این یافته در پژوهش‌های انجام شده توسط کوک و همکاران (2007) نیز دیده شد. همانطور که از این اشکال بر می‌آید، استفاده همزمان از اولتراسوند و آبیگری اسمزی، ضریب چروکیدگی را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش می‌دهد که علت آن به دلیل پراکنده شدن ترکیبات مومی سطح پوست آلو و ایجاد کانالهای میکروسکوپی توسط اولتراسوند و سپس خروج سریعتر و راحت‌تر رطوبت از داخل کانالهای میکروسکوپی ایجاد شده و ورود ماده جامد قندی (ساکارز) به داخل آلو در اثر آبیگری اسمزی می‌باشد. نتایج جامبرک و همکاران (2007)، فرناندز و همکاران (2008) و اورتونو و همکاران (2010) تاییدکننده نتایج این تحقیق است.

جدول 2، مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی را بر میزان نسبت حجمی و ضریب چروکیدگی نهایی تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، اثر متقابل استفاده همزمان از اولتراسوند و آبیگری اسمزی، از لحاظ آماری تاثیر معنی‌دار بر روی ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی دارد و تمامی پیش تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، ضرایب چروکیدگی کمتری از خود نشان داده‌اند.

جدول 2- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی نهایی تیمارها

نسبت حجمی	ضریب چروکیدگی	تیمار
0/236 ^g	0/764 ^a	Control
0/239 ^g	0/761 ^a	U10-B50-T60
0/248 ^{fg}	0/752 ^{ab}	U10-B70-T60
0/310 ^{abcdef}	0/689 ^{bcdefg}	U30-B50-T60
0/324 ^{abcde}	0/675 ^{cdefg}	U30-B70-T60
0/250 ^{fg}	0/749 ^{ab}	U10-B50-T120
0/267 ^{defg}	0/732 ^{abcd}	U10-B70-T120
0/333 ^{abcd}	0/667 ^{defg}	U30-B50-T120
0/345 ^{ab}	0/655 ^{fg}	U30-B70-T120
0/256 ^{efg}	0/744 ^{abc}	U10-B50-T180
0/278 ^{bcdefg}	0/722 ^{abcdef}	U10-B70-T180
0/338 ^{abc}	0/661 ^{efg}	U30-B50-T180
0/353 ^a	0/647 ^g	U30-B70-T180
0/276 ^{cdefg}	0/724 ^{abcde}	U10-B50-T240
0/292 ^{bcdefg}	0/708 ^{bcdefg}	U10-B70-T240
0/342 ^{abc}	0/658 ^{efg}	U30-B50-T240
0/359 ^a	0/641 ^g	U30-B70-T240



شکل 2 الف، ب، ج و د: تغییر نسبت حجمی با کاهش محتوای رطوبت تیمارهای مختلف و برازش آن‌ها با مدل پیشنهادی (مدل 6)

جدول 3- میانگین پارامترهای آماری مدل‌های 1، 2، 3، 4، 5 و 6 بر اساس جدول 1 برای تیمارهای مختلف

مدل	R ²	SSE	RMSE
1	0/987	0/0053	0/0322
2	0/987	0/0051	0/0405
3	0/991	0/0030	0/0262
4	0/995	0/0021	0/0213
5	0/993	0/0030	0/0217
6	0/998	0/0008	0/0126

پیشنهادی (مدل 6 جدول 1) مشاهده کرد.

در جدول 3، میانگین پارامترهای آماری مدل‌های مختلف برای همه تیمارها آمده است. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی 6 دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل‌های جدول 1 می‌باشد. با توجه به جدول 3، میانگین مقادیر ضریب تبیین، ریشه متوسط خطای داده‌ها و مجموع مربع خطای مدل مذکور (مدل 6) در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب 0/998، 0/0126 و 0/0008 می‌باشد. بنابراین از بین 6 مدل مورد مطالعه، مدل 6 به عنوان مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی تغییرات چروکیدگی آلو انتخاب شد. همانطور که در شکل 2 (الف تا د) مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مقادیر ضریب چروکیدگی پیش‌بینی شده (توسط مدل پیشنهادی 6) و آزمایشی در همه تیمارهای مورد مطالعه وجود دارد.

معادلات (4) و (5)، به ترتیب ضرایب K_1 و K_2 مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل 6) را نشان می‌دهند که از آنالیز رگرسیونی غیر خطی به دست آمده‌اند.

(4)

$$K_1 = 0.00304B - 0.00149U + 0.0008T \quad R^2 = 0.91$$

(5)

$$K_2 = 0.01171B + 0.00499U + 0.0007T \quad R^2 = 0.92$$

در جدول 4، مقادیر ضرایب K_1 و K_2 این مدل پیشنهادی در سطوح مختلف زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی آمده است.

با ملاحظه جدول 2 و شکل 2 می‌توان دریافت که با ثابت در نظر گرفتن غلظت و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، با افزایش زمان اولتراسوند از 10 به 30 دقیقه، بدلیل باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده شدن ترکیبات مومی سطح پوست آلو و تشکیل کانالهای میکروسکوپی طولتر در اثر تغییر شکل سلولها، مواد جامد موجود در محلول اسمزی وارد فضاهای بین سلولی آلو شده و ضریب چروکیدگی را کاهش و به تناسب آن، نسبت حجمی را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داده است. این نتیجه با نتایج اورتونو و همکاران (2010) که به بررسی کاربرد اولتراسوند بر روی انتقال جرم و ساختمان میکروسکوپی پوست پرتقال پرداختند، مطابقت دارد. همچنین، با توجه به جدول 2، در ارتباط با تاثیر آبیگری اسمزی بر ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی نیز مشاهده می‌شود که در شرایط ثابت، زمان اولتراسوند و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، استفاده از غلظت محلول اسمزی با بریکس 70، باعث کاهش بیشتر ضریب چروکیدگی و افزایش نسبت حجمی در مقایسه با استفاده از غلظت محلول اسمزی با بریکس 50 گردیده است. این امر ناشی از افزایش فشار اسمزی و ورود ماده جامد محلول (ساکارز) بیشتر به فضای بین سلولی نمونه‌ها است که باعث اتصال (پیوستگی) ماده جامد محلول به یکدیگر و افزایش مقاومت مکانیکی بافت سلولی آلو می‌شود. اما با این وجود، کاهش ضریب چروکیدگی و افزایش نسبت حجمی، بین تیمارهای مختلف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

3-1- مدل‌سازی چروکیدگی

در شکل 2 (الف، ب، ج و د)، علاوه بر تاثیر اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر میزان چروکیدگی تیمارهای مختلف، می‌توان برآزش تغییرات ضریب چروکیدگی نمونه‌های آلو در طول خشک‌شدن آن‌ها را نیز با مدل

جدول 4- مقادیر ضرایب K_1 و K_2 مدل پیشنهادی حاصل از آنالیز رگرسیونی تیمارهای مختلف

K_2	K_1	تیمار
0/67544	0/14273	U10-B50-T60
0/90957	0/20372	U10-B70-T60
0/77520	0/11297	U30-B50-T60
1/0093	0/17395	U30-B70-T60
0/71565	0/14786	U10-B50-T120
0/94978	0/20885	U10-B70-T120
0/81542	0/11810	U30-B50-T120
1/0495	0/17909	U30-B70-T120
0/75587	0/15300	U10-B50-T180
0/99000	0/23199	U10-B70-T180
0/85564	0/12324	U30-B50-T180
1/0897	0/18423	U30-B70-T180
0/79609	0/15814	U10-B50-T240
1/0302	0/21913	U10-B70-T240
0/89585	0/12837	U30-B50-T240
1/1299	0/18936	U30-B70-T240

بهترین مدل پیش‌بینی کننده چروکیدگی آلو تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. $(R^2=0/998)$ با مقادیر ضریب چروکیدگی آزمایشی داشته و به‌عنوان

راهنمای استفاده از جداول و نمودارها

عنوان	علائم اختصاری
نسبت حجمی و ضریب چروکیدگی	D_R, Sh
دانشیه تولون	ρ_{to}
ضرایب مدلها	k_1, k_2, k_3
محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)	X
نسبت رطوبت (بدون بعد)	X/X_0
حجم نهایی	V
حجم اولیه	V_0
حجم در لحظه t	V_t
جرم تولون جابه جا شده	M
جرم پیکنومتر حاوی نمونه و تولون	M
جرم نمونه غذایی	m'
جرم پیکنومتر خالی	m''
ضریب تبیین	R^2
ریشه متوسط مربعات خطا	$RMSE$
مجموع مربعات خطا	SSE
زمان اولتراسوند (دقیقه)	U
غلظت محلول اسمزی (بریکس)	B
زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی (دقیقه)	T

مزیت مدل‌سازی حاضر این است که با استفاده از معادلات (4) و (5)، ضرایب K_1 و K_2 را می‌توان بر حسب سه متغیر مستقل (زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی) محاسبه کرده و با جایگذاری این ضرایب در مدل 6، میتوان ضریب چروکیدگی را بدون انجام آزمایش در سطوح مختلف زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی به‌دست آورد.

4- نتیجه گیری نهایی

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 به‌کارگیری همزمان اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر روی میزان چروکیدگی آلو و مدل‌سازی آن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی از لحاظ آماری تاثیر معنی‌دار بر روی ضریب چروکیدگی و نسبت حجمی دارند. افزایش زمان اولتراسوند از 10 تا 30 دقیقه بعلت پراکنده کردن ترکیبات مومی سطح پوست آلو و ایجاد کانالهای میکروسکوپی، سبب سهولت انتقال جرم و کاهش ضریب چروکیدگی نسبت به تیمار شاهد گردید. همچنین، آبیگری اسمزی نیز منجر به کاهش ضریب چروکیدگی نسبت به تیمار شاهد شد. مدل‌سازی تغییرات ضریب چروکیدگی تیمارها با مدل‌های مختلف، نشان داد که مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل 6) انطباق خوبی

منابع مورد استفاده

- امام جمعه، ز. م. طهماسبی، م. پیروزی فرد و غ. عسگری - 1387. بررسی تاثیر پیش‌فرآیند اسمزی بر ویژگی‌های بافتی و ریز ساختاری گوجه‌فرنگی خشک شده با هوا، مجله مهندسی بیوسیستم ایران، جلد 39، صفحات 139-133.
- Awad, T. S., H. A. Moharram, O. E. Shaltout, D. Asker, and M. M. Youssef. 2012. *Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review*. Food Research International. (48): 410-427.
- Bialobrzewski, I. 2006. *Simultaneous heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying*. Drying Technology. (24): 551-559.
- Chemat, F., M. K. Zill-e-Humaand Khan. 2011. *Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction*. Ultrasonics Sonochemistry. (18): 813-835.
- Chua, K. J., S. K. Chou, M. N. S. Hawlader, A. S. Mujumdar, and J. C. Ho. 2002. *Modeling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes*. Biosystems Engineering. (81): 99-111.
- Dehghannya, J., Z. Emam-Djomeh, R. Sotudeh-Gharebagh, and M. Ngadi. 2006. *Osmotic dehydration of apple slices with carboxy-methyl cellulose coating* Drying Technology. (24): 45-50.
- Deng, Y. and Y. Zhao. 2008. *Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji)*. LWT. Food Science and Technology. (41): 1575-1585.
- Devahastin, S. and C. Niamnuy. 2010. *Modelling quality changes of fruits and vegetables during drying: a review*. International Journal of Food Science and Technology. (45): 1755-1767.

- Dissa, A., O., H. Desmorieux, J. Bathiebo, and J. Kouliadiati. 2008. *Convective drying characteristics of Amelie mango (Mangifera Indica L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage*. Journal of Food Engineering. (88): 429-437.
- Doymaz, I. 2004. *Effect of dipping treatment on air drying of plums*. Journal of Food Engineering. (64): 465-470.
- Fernandes, F. A. N. and S. Rodrigues. 2007. *Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana*", Journal of Food Engineering. (82): 261-267.
- Fernandes, F. A. N., M. I. Gallao, and S. Rodrigues. 2008. *Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration*. LWT. Food Science and Technology. (41): 604-610.
- Ferrando, M. and W. E. L. Spiess. 2003. *Mass transfer in strawberry tissue during osmotic treatment*. Journal of Food Science. (68):1347-1364.
- 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.
- Fuente-Blanco, S. D. L., E. R. F. D. Sarabia, V. M. Acosta-Aparicio, A., Blanco-Blanco, and J. A. Gallego-Juarez. 2006. *Food drying process by power ultrasound*. Ultrasonics. (44): 523-527.
- Ibitwar, B. B., B. Kaur, S. Arora, and P. B. Pathare. 2008. *Osmo-convective dehydration of plum*. International Journal of Food Engineering. (4): 8.
- Jambrak, A. R., T. J. Mason, L. Paniwnyk, and V. Lelas. 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.
- Jazini, M. H. and M. S. Hatamipour. 2010. *A new physical pretreatment of plum for drying*. Food and bioproducts processing. (88): 133-137.
- Koc, B., I. Eren, and F. K. Ertekin. 2008. *Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method*. Journal of Food Engineering. (85): 340-349.
- Mayor, L. and A. M. Sereno. 2004. *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. Journal of Food Engineering. (61): 373-386.
- Monnerat, S. M., T. R. M. Pizzi, M. A. Mauro, and F. C. Menegalli. 2010. *Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients*. Journal of Food Engineering. (100): 604-612.
- Nieto, A. B., D. M. Salvatori, M. A. Castro, and S. M. Alzamora. 2004. *Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: Shrinkage, porosity, density and microscopic features*. Journal of Food Engineering. (61): 269-278.
- Nunes, C., J. A. Saraiva, and M. A. Coimbr. 2008. *Effect of candying on cell wall polysaccharides of plums (Prunus domestica L.) and influence of cell wall enzymes*. Food Chemistry. (111): 538-548.
- Ortuno, C., I. Perez-Munuera, A., Puig, and E. Riera. 2010. *Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying*. Physics Procedia. (3): 153-159.
- Panyawong, S. and S. Devahastin. 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.
- Qing-guo, H., Z. Min, A. S. Mujumdar, D. Wei-hua and A. S. Jin-cai. 2006. *Effects of different drying methods on the quality changes of granular Edamame*. Drying Technology. (24): 1025-1032.
- Rodrigues, S. and F. A. N. Fernandes. 2006. *Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying*. Journal of Food Engineering. (80): 678-687.
- Sacilik, K., A. K. Elicin, and G. Unal. 2006. *Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer*. Journal of Food Engineering. (76): 362-368.
- Schossler, K., H. Jager, and D. Knorr. 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.
- Seiiedlou, S., H. R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati, and M. Moghaddam. 2010. *Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters*. International Journal of Agriculture and Biology. (12): 171-178.

- Soria, A. C. and M. Villamiel. 2010. *Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review*. Food Science and Technology. (21): 323-331.
- Souraki, B. A. and D. Mowla. 2008. *Axial and radial moisture diffusivity in cylindrical fresh green beans in a fluidized bed dryer with energy carrier: Modeling with and without shrinkage*. Journal of Food Engineering. (88): 9-19.
- Steel, R. G. D., J. H. Torrie, and D. A. Dickey. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. McGraw-Hill. New York.
- Sun, W. D. 2005. *Emerging technology for food processing*. Chapter (13): 338-339.
- Talla, A., J. R. Puiggali, W. Jomaa, and Y. Jannot. 2004. *Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana*. Journal of Food Engineering. (64): 103-109.
- Tarhan, S. 2007. *Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures*. Journal of Food Engineering. (79): 255-260.
- Yan, Z., M. J. Sousa-Gallagher, and F. A. R. Oliveira. 2008. *Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying*", Journal of Food Engineering. (84): 430-440.

Modeling Shrinkage During Drying of Plums Pretreated with Ultrasound and Osmotic Dehydration

Rasoul Ghorbani¹, Jalal Dehghannya^{2*}, Seied-Sadegh Seiedlou-Heris³ Babak Ghanbarzadeh⁴

¹Dept. of Food Sciences and Industries, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

²Dept. of Food Sciences and Industries, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

³Dept. of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

⁴Dept. of Food Sciences and Industries, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

*Corresponding author: E-mail address: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

Plum is one of the most important crops in Iran. To reduce postharvest losses and increase shelf life of the produce, suitable preservation methods such as drying are used. Application of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments in order to improve quantitative and qualitative characteristics such as shrinkage seems to be necessary and promising compared to hot air dried low quality products. In this study, the effect of simultaneous application of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on plums shrinkage during drying at 80°C temperature and 1.4 m/s air velocity was examined. Pretreatments including ultrasound time at two levels (10 and 30 minutes), osmotic solution concentrations at two levels (50 and 70 Brix), and immersion time in osmotic solution at four levels (60, 120, 180 and 240 min) were performed. Afterwards, experimental results obtained from experiments were compared to that of available and proposed shrinkage models and then, one of the models was selected as a proposed model to predict shrinkage of plums under the selected experimental conditions. The results showed that shrinkage is significantly reduced by the simultaneous use of ultrasound and osmotic dehydration compared to control samples. Moreover, increasing the ultrasound time, osmotic solution concentration, and immersion time in osmotic solution, decreased shrinkage compared to control samples.

Keywords: Drying, Osmotic dehydration, Modeling, Shrinkage, Ultrasound