

بررسی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک آلوی پیش تیمار شده به صورت همزمان با امواج فراصوت و آبیگری اسمزی

رسول قربانی^۱، جلال دهقان‌نیا^{۲*}، سیدصادق سیدلو هریس^۳، بابک قنبرزاده^۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*نویسنده مسئول (j_dehghannya@tabrizu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

چکیده

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۸

واژه‌های کلیدی

آبیگری اسمزی

امواج فراصوت

ضریب انتشار مؤثر رطوبت

مدل‌سازی

امواج فراصوت یکی از فناوری‌های نوظهور است که کاربرد آن در خشک‌کردن مواد غذایی با هدف کاهش زمان مورد نیاز فرآیند و بهبود ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده، روز به روز در حال گسترش است. در این پژوهش، تأثیر به‌کارگیری همزمان پیش تیمارهای امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر خشک‌شدن لایه نازک آلو در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ۱/۴ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. پیش تیمارهای انجام‌شده شامل امواج فراصوت در دو زمان ۱۰ و ۳۰ دقیقه، غلظت محلول اسمزی در دو بریکس ۵۰ و ۷۰ و آب‌زدایی اسمزی در چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ دقیقه بودند. نتایج نشان داد که افزایش زمان امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز، باعث کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در مقایسه با تیمار شاهد می‌شود. علاوه بر این، به‌منظور توصیف روند صحیح خشک‌شدن، داده‌های حاصل از آزمایش توسط چند مدل تجربی به‌همراه مدل‌های پیشنهادی جدید در این پژوهش برازش شدند. سپس، یکی از مدل‌های پیشنهادی بر اساس معیارهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه متوسط خطای داده‌ها (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) به عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده فرآیند خشک‌شدن آلو تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب و پس از انجام آنالیز رگرسیونی چندمتغیره مدل انتخابی، رابطه بین ضرایب مدل با متغیرهای به‌کار رفته در این پژوهش به‌دست آمد.

مقدمه

کشورهای رومانی (۴۲۴۰۶۸ تن)، صربستان (۳۹۱۴۸۵

تن)، شیلی (۳۰۰۰۰۰ تن) و ترکیه (۲۹۷۰۲۶ تن) از جمله مناطق مهم تولید این محصول، به شمار می‌آیند (FAOSTAT, 2012). بر اساس آمارهای غیررسمی، بیش از ۵۰٪ آلوی تولیدی در کشور از بین می‌رود. این میوه به‌دلیل داشتن فصل برداشت کوتاه به‌شکل خشک‌شده نگهداری و مصرف می‌شود (Doymaz, 2004).

آلو میوه‌ای تک‌هسته‌ای با نام علمی پرونوس دومستیکا (*Prunus Domestica*) از خانواده روزاسه (*Rosaceae*) است (Nunes et al., 2008). بر اساس آمار فائو در سال ۲۰۱۲، میزان تولید جهانی آلو ۱۰۷۰۲۷۷۴ تن و میزان تولید آن در ایران ۲۹۵۰۰۰ تن بوده است. کشور چین با ۶۰۰۰۰۰۰ تن تولید، بیش از ۵۶٪ تولید جهانی را به خود اختصاص داده است.

متناوب سریع شده (اثر اسفنجی^۲) و به دلیل ایجاد کانال-های میکروسکوپی، باعث حفظ اختلاف فشار مکش لوله-های موئین و خروج راحت تر رطوبت می گردد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲ب). به علاوه، امواج فراصوت باعث ایجاد پدیده کاویتاسیون (حفره زایی) در داخل ماده غذایی می-شود که ممکن است برای جداسازی آب متصل مفید باشد. همچنین، ترکیدن حبابها سبب حرکت دورانی حبابهای مجاور شده و این امر به نوبه خود سبب ایجاد ریز جریانهایی^۳ در ماده غذایی می شود. این ریز جریانها با ایجاد تنشهای برشی و مکانیکی، سبب افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می شود (Soria & Villamiel, 2010). از دیگر اثرات امواج فراصوت، تنش سطحی و تغییر شکل مواد جامد متخلخل می باشد که این اثرات مسئول ایجاد کانالهای میکروسکوپی، کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش انتقال جرم جابه جایی در مواد غذایی می باشد (Fuente et al., 2006). امواج فراصوت با افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکولهای آب در حین خشک شدن، باعث بهبود ویژگی-های کیفی محصول خشک شده می شود (Deng & Zhao, 2008).

در پژوهشی، اثر شدت های مختلف امواج فراصوت روی میزان انتقال جرم و ویژگی آبگیری مجدد در خشک کردن نمونه های قارچ دکمه ای، کلم بروکلی و گل کلم بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان انتقال جرم در نمونه های پیش تیمار شده با امواج فراصوت بیشتر شده و زمان خشک شدن با هوای داغ در آنها کاهش یافت. نمونه های خشک شده با خشک کن انجمادی به همراه نمونه های پیش تیمار شده با امواج فرا-صوت، بیشترین قابلیت را در آبگیری مجدد از خود نشان دادند. این نتیجه بیانگر چروکیدگی و آسیب بافتی کمتر توسط امواج فراصوت و قابلیت بالای این نمونه ها در آبگیری مجدد است (Jambrak et al., 2007). همچنین بررسی تأثیر امواج فراصوت روی زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت، طی خشک کردن جابه جایی سیب و فلفل قرمز نشان داد که این امواج باعث کاهش زمان مورد نیاز برای خشک شدن در اثر افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می شود (Schosler et al., 2012).

خشک کردن یکی از روش های قدیمی و مرسوم برای نگهداری محصولات کشاورزی است. امروزه، علاوه بر مصرف تازه خوری، خشک کردن میوه های مختلف از جمله آلو، مرسوم شده است و این محصولات در بازار با قیمت بالایی به فروش می رسند. از جمله موارد مصرف آلوی خشک شده، می توان به افزودن آن به غذاهای مختلف از جمله خورش آلو مسمی، خورش آلو با مرغ و خورش فسنجان آلو برای بهبود ارزش تغذیه ای و عطر و طعم آنها اشاره نمود. نوع خشک این میوه، در جای خشک و خنک به مدت ۶ ماه قابل نگهداری می-باشد (Ibitwar et al., 2008). براساس پژوهش های مختلف روی خشک کردن آلو با استفاده از پیش تیمار-های متفاوت، خشک کردن این محصول تا رسیدن به محتوی رطوبت ۰/۲۵-۰/۸۶ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک، انجام گرفته است (Jazini & Hatamipour, 2010; Tarhan, 2007).

وجود لایه مومی موجود در آلو، باعث ایجاد مقاومت در مقابل خروج رطوبت هنگام خشک شدن آن می گردد و معمولاً برای از بین بردن این لایه از برخی ترکیبات شیمیایی استفاده می شود. استفاده از این مواد شیمیایی باعث ایجاد طعم های نامطلوب در آلوی خشک شده و برای کاهش معایب ذکر شده، استفاده از پیش تیمارهایی که سبب کاهش رطوبت ماده غذایی و سهولت انتقال جرم هنگام خشک کردن با هوا می شوند، بسیار مفید خواهد بود (قربانی و همکاران، ۱۳۹۲آ). استفاده از امواج فراصوت و آبگیری اسمزی به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن، ضمن افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می تواند باعث کاهش زمان خشک کردن با هوای داغ و بهبود ویژگی های کیفی محصول خشک شده نیز گردد (Deng & Zhao, 2008). امواج فراصوت نسبتاً ارزان، ساده و با مصرف انرژی پایین بوده و با کاهش زمان خشک شدن، باعث کاهش هزینه تولید محصول خشک شده می گردد (Fernandes & Rodrigues, 2007; Ortuno et al., 2010; Awad et al., 2012). امواج فراصوت یکی از فناوری های نوظهور است که کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، چه برای آنالیز غیر تخریبی^۱ و چه برای اهداف فرآیندی روز به روز در حال گسترش است (Chemat et al., 2011). این امواج باعث یکسری انقباضها و انبساطهای

2- Sponge effect
3- Micro-streaming currents

1- Non-destructive analysis

نازک و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده فرآیند خشک‌شدن بود.

مواد و روش‌ها

مواد

برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، آلوده مورد نیاز (واریته آلو بخارا با رنگ زرد و رطوبت اولیه حدود ۷۷٪) از یک باغ محلی در اطراف تبریز تهیه و تا پایان آزمایش‌ها در سردخانه با دمای 1 ± 4 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از شروع هر آزمایش جهت متعادل‌سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط، نمونه‌ها از سردخانه به آزمایشگاه انتقال یافت.

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی تأثیر به‌کارگیری همزمان امواج فراصوت و آبیگری اسمزی، از حمام امواج فراصوت (مدل USD-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان امواج فراصوت) با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و در ۲ سطح زمانی ۱۰ و ۳۰ دقیقه، غلظت محلول اسمزی ساکارز در ۲ بریکس ۵۰ و ۷۰ و فرآیند اسمز نیز در ۴ زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ دقیقه استفاده شد. قبل از شروع خشک‌کردن، نمونه‌ها در معرض امواج فراصوت و تحت دمای محیط قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان مورد نظر (۱۰ و ۳۰ دقیقه)، نمونه‌ها از حمام امواج فراصوت خارج و سپس نمونه‌ها در محلول اسمزی ساکارز با غلظت مشخص غوطه‌ور شدند. نسبت نمونه به محلول اسمزی در کل آزمایش‌ها ۱ به ۴ ثابت بود. بعد از سپری شدن زمان فرآیند اسمز، نمونه‌ها از محلول اسمزی خارج و پس از حذف رطوبت سطحی، توسط کاغذهای جاذب رطوبت، به یک خشک‌کن سینی‌دار طراحی‌شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield, UK) مجهز به سیستم ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل‌کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی (هوا) منتقل شد.

آماده‌سازی محلول اسمزی

محلول اسمزی ساکارز با استفاده از ارلن‌مایر در دو غلظت با بریکس ۵۰ و ۷۰ توسط آب مقطر تهیه شد.

در پژوهشی دیگر، کاربرد امواج فراصوت روی انتقال جرم و ساختمان میکروسکوپی پوست پرتقال طی خشک‌کردن با هوای داغ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بدون اعمال پیش‌تیمار امواج فراصوت، وجود لایه مومی موجود در پوست پرتقال، باعث ایجاد مقاومت در مقابل خروج آب در هنگام خشک‌شدن با هوای داغ می‌گردد. در این پژوهش، اعمال پیش‌تیمار امواج فراصوت، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت گردید که این امر به‌دلیل پراکنده‌شدن ترکیبات مومی سطح پوست، انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب سریع، تجزیه بافت سلولی و ایجاد ریز جریان‌ها، توسط امواج صوتی بیان شد (Ortuno *et al.*, 2010).

علاوه بر امواج فراصوت، استفاده از پیش‌تیمار آبیگری اسمزی نیز برای افزایش کیفیت ماده غذایی خشک‌شده به‌کار می‌رود (Dehghannya *et al.*, 2006; Monnerat *et al.*, 2010). آبیگری اسمزی، باعث افزایش میزان ضریب انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت خشک‌شدن و در نتیجه کاهش زمان خشک‌شدن با هوای داغ می‌شود. این امر به این دلیل است که استحکام دیواره سلولی به علت حل شدن پکتین و فشار اسمزی بالا کاهش پیدا می‌کند (Prinzivalli *et al.*, 2006). تأثیر پیش‌تیمار امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر ساختار سلولی خربزه در پژوهشی دیگر مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو پیش‌تیمار، طی مرحله خشک‌کردن با هوا، ضریب انتشار مؤثر رطوبت را افزایش می‌دهند (Fernandes *et al.*, 2008).

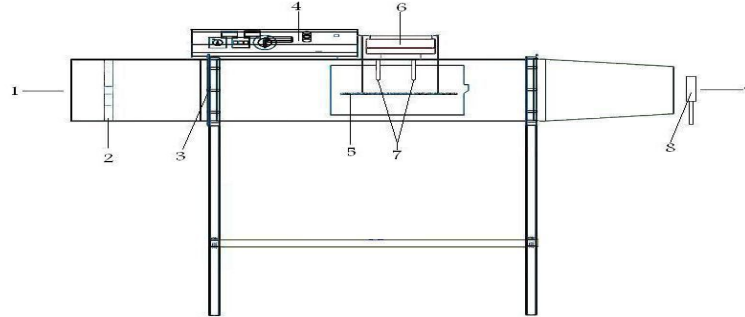
یک روش مناسب برای درک پدیده‌های درگیر در طی فرآیندهای مختلف اعمال‌شده روی مواد غذایی و پیش‌بینی رفتار ماده تحت عوامل درونی و بیرونی متعدد، مدل‌سازی می‌باشد (Chua *et al.*, 2002). مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن در طراحی‌های جدید و یا در بهبود سیستم‌های موجود خشک‌کردن و یا برای کنترل عملیات خشک‌کردن، مفید است (Togrul & Pehlivan, 2004; Sacilik *et al.*, 2006).

هدف از این پژوهش، مطالعه تأثیر همزمان پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر سینتیک خشک‌شدن آلو، مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن لایه

خشک‌کن آزمایشگاهی

برای خشک کردن نمونه‌ها از یک خشک‌کن سینی-دار آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۱). این خشک‌کن دارای محفظه ورودی (شامل فن و گرمکن‌های

الکتریکی)، محفظه میانی (شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی‌سازهای جریان هوا)، محفظه خروجی و تابلو فرمان (محفظه کنترل‌کننده دما و سرعت) بود (Seiiedlou *et al.*, 2010).



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن مورد استفاده: (۱) ورودی هوا؛ (۲) فن؛ (۳) گرمکن؛ (۴) تابلو فرمان یا محفظه کنترل‌کننده دما و سرعت؛ (۵) سینی سوراخ‌دار؛ (۶) ترازوی دیجیتال؛ (۷) سنسور رطوبت؛ (۸) سرعت‌سنج دیجیتالی هوا؛ (۹) خروجی هوا

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
۱	امواج فراصوت با زمان ۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۰ و زمان غوطه‌وری ۰ دقیقه	Control
۲	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۶۰ دقیقه	U10-B50-T60
۳	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۶۰ دقیقه	U10-B70-T60
۴	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۶۰ دقیقه	U30-B50-T60
۵	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۶۰ دقیقه	U30-B70-T60
۶	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۱۲۰ دقیقه	U10-B50-T120
۷	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۱۲۰ دقیقه	U10-B70-T120
۸	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۱۲۰ دقیقه	U30-B50-T120
۹	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۱۲۰ دقیقه	U30-B70-T120
۱۰	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۱۸۰ دقیقه	U10-B50-T180
۱۱	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۱۸۰ دقیقه	U10-B70-T180
۱۲	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۱۸۰ دقیقه	U30-B50-T180
۱۳	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۱۸۰ دقیقه	U30-B70-T180
۱۴	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۲۴۰ دقیقه	U10-B50-T240
۱۵	امواج فراصوت با زمان ۱۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۲۴۰ دقیقه	U10-B70-T240
۱۶	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۵۰ و زمان غوطه‌وری ۲۴۰ دقیقه	U30-B50-T240
۱۷	امواج فراصوت با زمان ۳۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۷۰ و زمان غوطه‌وری ۲۴۰ دقیقه	U30-B70-T240

جدول ۲- مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن

شماره	نام مدل	مدل ریاضی	مرجع
۱	هندرسون و پابیس	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis, 1969
۲	ونگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh, 1978
۳	نیوتن	$MR = \exp(-kt)$	Westerman, et al., 1973
۴	مدل پیشنهادی	$MR = \left(-\frac{at+1}{bt+1} \right)$	پژوهش حاضر
۵	مدل پیشنهادی	$MR = \exp(-at) + b$	پژوهش حاضر
۶	مدل پیشنهادی	$MR = (at+1)\exp(-bt)$	پژوهش حاضر

طرح کلی آزمایش‌ها

حدود نیم ساعت قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن، دستگاه خشک‌کن روشن و سرعت هوای داخل خشک‌کن روی عدد ۱/۴ متر بر ثانیه و دمای آن بر روی ۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد تا دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد (Menges & Ertekin, 2006; Jazini & Hatamipour, 2010; Ioannou et al., 2011). نمونه‌ها بر روی دو عدد سینی توری به صورت لایه نازک چیده شده و کاهش وزن آنها در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای، اندازه‌گیری و ثبت شد. خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت ۰/۵۴ گرم آب بر گرم ماده خشک انجام شد. جدول ۱ تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آنها را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری محتوی رطوبت نمونه‌های آلوی بر اساس استاندارد AOAC (1990) انجام شد؛ به طوری که مقداری نمونه قبل و پس از انجام هر آزمایش، در آون با دمای 105 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

علاوه بر این، آهنگ خشک‌شدن تغییرات محتوی رطوبت طی خشک‌شدن بوسیله مشتق‌گیری از تابع تغییرات محتوی رطوبت نمونه‌ها نسبت به زمان به دست آمد و بر اساس گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش شد (Togrul & Pehlivan, 2004).

برآورد ضرایب ثابت در مدل‌های ریاضی و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک خشک‌شدن

در این مطالعه، تعدادی از مدل‌های تجربی و پیشنهادی برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن (برازش نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک‌شدن) نمونه‌های آلوی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). با توجه به روند نمایی تغییرات رطوبت نمونه‌ها، از مدل‌های نمایی برای مدل‌سازی استفاده شد. برای این منظور، منحنی‌های خشک‌شدن به دست آمده برای آلوی در شرایط مختلف، به وسیله ۶ مدل مذکور برازش شده و ضرایب آنها ($k \cdot b \cdot a$) توسط نرم افزار MATLAB R2011a تعیین گردید. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده سینتیک خشک‌کردن لایه نازک آلوی، معیارهای ضریب تبیین R^2 ، ریشه متوسط خطای داده‌ها^۵ (RMSE) و مجموع مربعات خطا^۶ (SSE) توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. هر چه مدل دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقدار RMSE و SSE باشد، مدل برازش بهتری بر داده‌های آزمایشی دارد و به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (Guine & Fernandes, 2006). مقادیر R^2 ، RMSE و SSE با توجه به معادله های ۱، ۲ و ۳ محاسبه گردید:

معادله (۱)

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

معادله (۲)

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

1- Coefficient of determination
1- Root Mean Square Error
2- Sum Square Error

معادله (۳)

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

در این معادلات، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت لایه میوه در i امین اندازه‌گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت لایه میوه پیش‌بینی شده در i امین اندازه‌گیری، $\overline{MR}_{exp,i}$ میانگین نسبت رطوبت میوه در i امین اندازه‌گیری و $\overline{MR}_{pre,i}$ میانگین نسبت رطوبت لایه میوه پیش‌بینی شده در i امین اندازه‌گیری می‌باشد.

آنالیز رگرسیونی غیرخطی نیز در ادامه برازش داده‌ها و به‌منظور برآورد ضرایب مدل انتخابی به‌صورت توابعی از زمان امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز توسط نرم افزار Excel 2007 انجام شد. با فرض این که انتقال رطوبت فقط از طریق انتشار و در جهت شعاعی بوده و خشک کردن ماده غذایی در طی زمان نسبتاً طولانی انجام گردد، حل تحلیلی قانون دوم فیک در حالت انتشار ناپایا و برای موادی به شکل کره‌ای، می‌تواند حرکت رطوبت را در طی فرآیند خشک کردن توسط معادله ۴ توصیف کند (Sacilik et al., 2006).

معادله (۴)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

در این رابطه، MR نسبت رطوبت، M مقدار رطوبت در لحظه t بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک)، M_0 و M_e به ترتیب رطوبت اولیه و رطوبت تعادلی آلو بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک)، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (متر مربع بر ثانیه) و r شعاع آلو، بر حسب متر است. برای مدت زمان‌های طولانی، خشک کردن با ساده‌سازی معادله ۴ و به‌دست آوردن جمله اول سری، معادله ۵ به‌دست می‌آید (Doymaz, 2004):

معادله (۵)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

از لگاریتم معادله ۵، رابطه خطی به‌دست آمده (معادله ۶) که شیب آن با slope نشان داده شده است (معادله ۷):

معادله (۶)

$$\ln MR = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right)$$

معادله (۷)

$$\text{slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2}$$

بنابراین، با رسم نمودار $\ln MR$ به‌صورت تابعی از زمان خشک کردن (t) و داشتن شعاع میانگین آلو، ضریب انتشار مؤثر رطوبت از طریق شیب خط و با استفاده از معادله ۷ تعیین گردید. برای محاسبه شعاع آلو نیز، طول سه بعد از آلو، توسط کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری و شعاع آن بر طبق معادله ۸ محاسبه شد (Cletus & Carson, 2008).

معادله (۸)

$$r = \sqrt[3]{a.b.c}$$

آنالیز آماری

آزمایش‌های خشک کردن، در ۲ تکرار و ۱۷ تیمار انجام گرفت. به منظور بررسی تأثیر همزمان پیش‌تیمار-های امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت، آنالیز داده‌ها توسط نرم افزار SAS 9.1 و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور A (زمان امواج فرا-صوت)، B (غلظت محلول اسمزی)، C (زمان فرآیند اسمز)، و مقایسه میانگین‌ها نیز به روش بونفرونی^۱ در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) انجام شد (Steel et al., 1997).

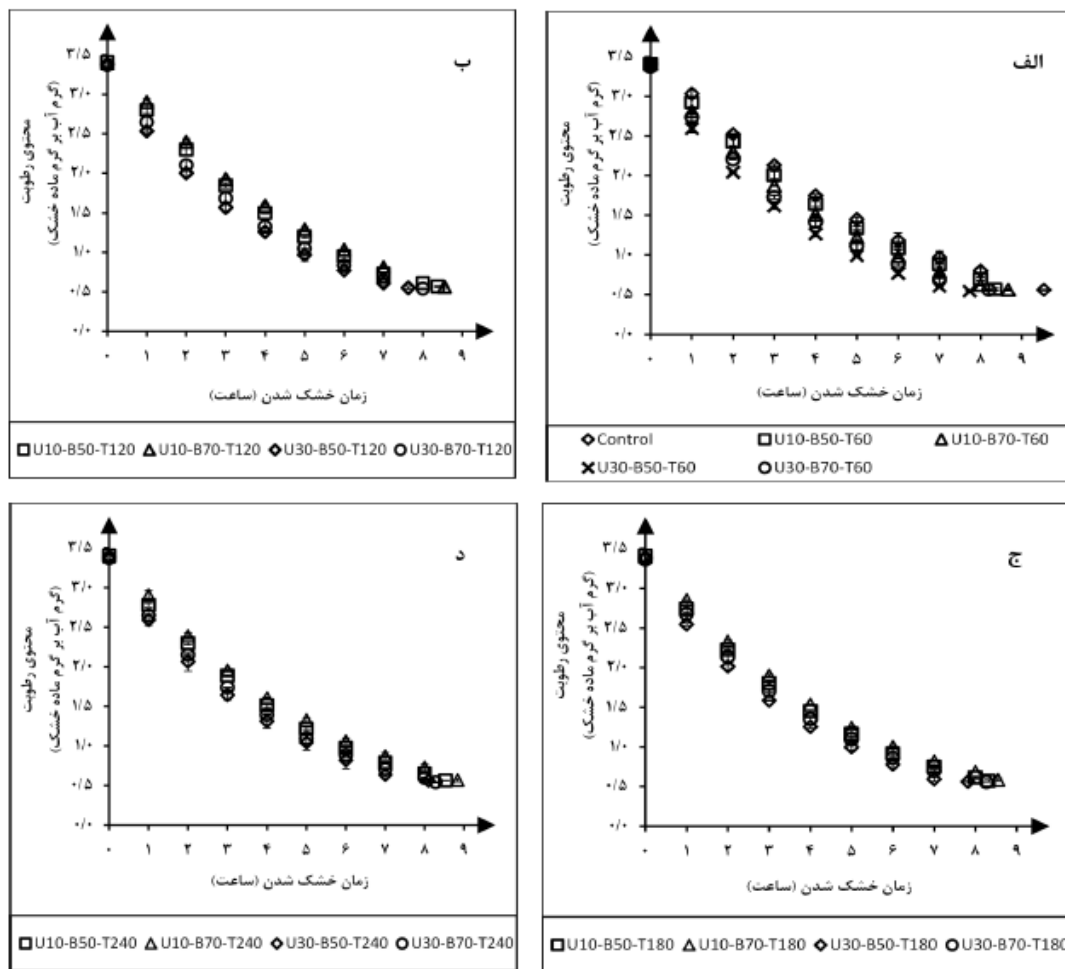
نتایج و بحث

بررسی تغییرات محتوی رطوبت

شکل ۲ (الف-د) منحنی‌های سینتیک کاهش رطوبت نمونه‌ها را به صورت محتوی رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) طی خشک شدن و در سطوح مختلف زمان امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز بر اساس جدول ۱ نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوی رطوبت نمونه‌های آلو طی خشک شدن به صورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد. استفاده همزمان از امواج فراصوت

آبگیری اسمزی می باشد که این امر، باعث تسهیل خروج رطوبت شده و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش پیدا می کند (Jambrak et al., 2007; Fernandes et al., 2008; Ortuno et al., 2010).

و آبگیری اسمزی، زمان خشک شدن را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد که علت آن به دلیل پراکنده شدن ترکیبات مومی سطح پوست آلو، پدیده کاویتاسیون، تشکیل کانال های میکروسکوپی در اثر امواج فراصوت و همچنین انحلال پکتین و تجزیه بافت سلولی به دلیل



شکل ۲- (الف-د) - محتوی رطوبت طی خشک شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

استفاده همزمان از امواج فراصوت و آبگیری اسمزی از لحاظ آماری تأثیر معنی داری بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت داشت. با ملاحظه جدول ۳ می توان دریافت که با ثابت در نظر گرفتن غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز، با اعمال امواج فراصوت و افزایش زمان آن از ۱۰ به ۳۰

جدول ۳ مقایسه میانگین های اثر متقابل امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز بر زمان خشک شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت را در بین تیمارهای مختلف نشان می دهد. مقادیر به دست آمده برای طول سه بعد (a, b و c) و شعاع آلو، به ترتیب ۰/۰۳۷، ۰/۰۳۱، ۰/۰۳۱ و ۰/۰۳۳ متر بود. اثر

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت تیمار- های مختلف بر اساس جدول ۱

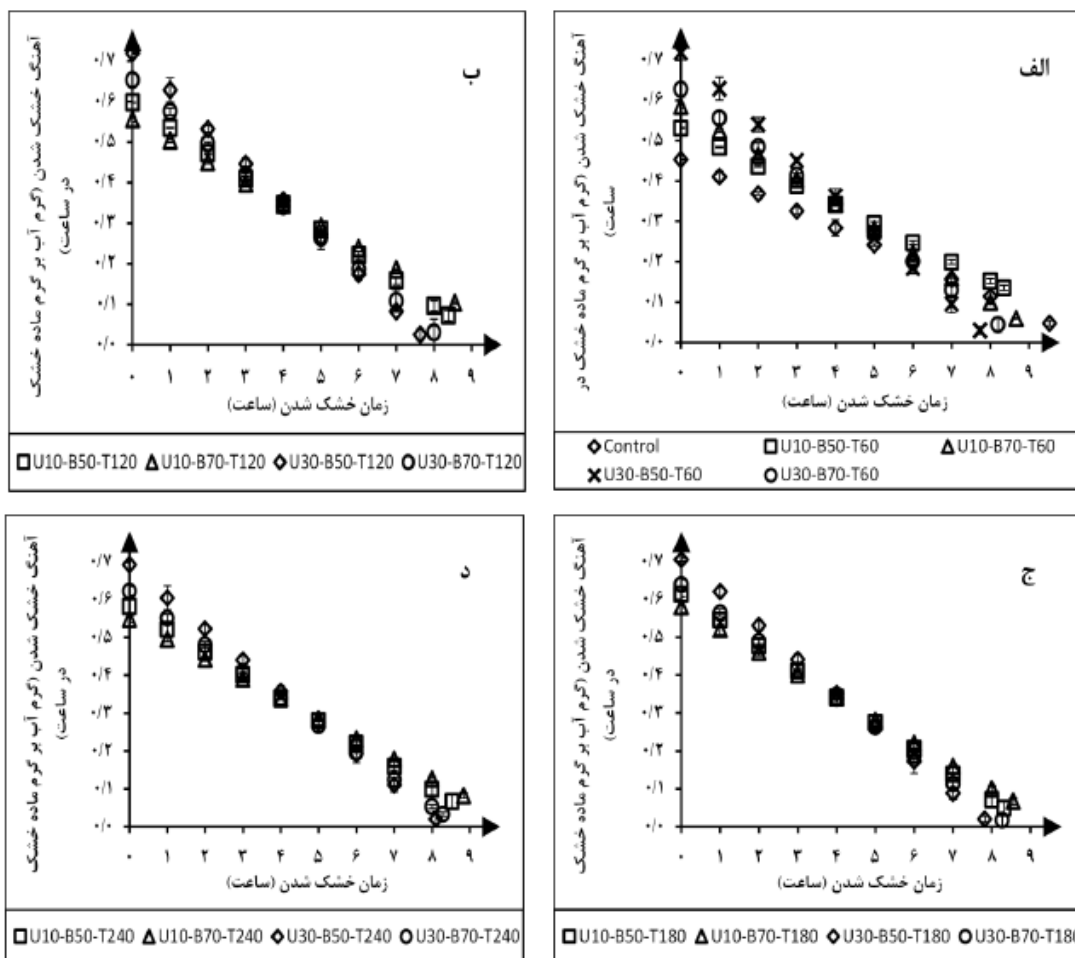
تیمار	زمان خشک‌شدن (ساعت)	ضریب انتشار مؤثر رطوبت ($\times 10^{-9}$) (متر مربع بر ثانیه)
Control	۹/۵۳ ^a ± ۰/۰۷	۵/۸۴ ⁱ ± ۰/۰۵
U۱۰-B۵۰-T۶۰	۸/۳۸ ^{bcd} ± ۰/۰۳	۶/۴۷ ^{efgh} ± ۰/۰۳
U۱۰-B۷۰-T۶۰	۸/۶۷ ^{bc} ± ۰/۱۴	۶/۳۲ ^{hg} ± ۰/۰۱
U۳۰-B۵۰-T۶۰	۷/۷۳ ^{gh} ± ۰/۰۶	۷/۳۲ ^a ± ۰/۰۸
U۳۰-B۷۰-T۶۰	۸/۲۰ ^{cdefg} ± ۰/۰۴	۶/۸۶ ^{bcd} ± ۰/۰۷
U۱۰-B۵۰-T۱۲۰	۸/۳۵ ^{bcd} ± ۰/۱۳	۶/۶۱ ^{defg} ± ۰/۱۵
U۱۰-B۷۰-T۱۲۰	۸/۵۹ ^{bcd} ± ۰/۰۶	۶/۴۶ ^{efgh} ± ۰/۰۷
U۳۰-B۵۰-T۱۲۰	۷/۶۳ ^h ± ۰/۰۴	۷/۳۶ ^a ± ۰/۰۵
U۳۰-B۷۰-T۱۲۰	۸/۰۰ ^{efgh} ± ۰/۰۳	۷/۱۱ ^{abc} ± ۰/۰۵
U۱۰-B۵۰-T۱۸۰	۸/۳۱ ^{bcd} ± ۰/۰۶	۶/۶۹ ^{cdefg} ± ۰/۱۶
U۱۰-B۷۰-T۱۸۰	۸/۵۵ ^{bcd} ± ۰/۰۷	۶/۴۸ ^{efgh} ± ۰/۰۴
U۳۰-B۵۰-T۱۸۰	۷/۸۲ ^{fgh} ± ۰/۰۴	۷/۲۲ ^{ab} ± ۰/۱۰
U۳۰-B۷۰-T۱۸۰	۸/۲۶ ^{cdefg} ± ۰/۲۰	۶/۷۷ ^{cdef} ± ۰/۰۳
U۱۰-B۵۰-T۲۴۰	۸/۵۳ ^{bcd} ± ۰/۰۴	۶/۳۸ ^{fgh} ± ۰/۰۵
U۱۰-B۷۰-T۲۴۰	۸/۸۳ ^b ± ۰/۲۸	۶/۱۷ ^{hi} ± ۰/۱۴
U۳۰-B۵۰-T۲۴۰	۸/۱۰ ^{defgh} ± ۰/۱۰	۶/۹۷ ^{abcd} ± ۰/۱۹
U۳۰-B۷۰-T۲۴۰	۸/۲۸ ^{cdef} ± ۰/۰۵	۶/۷۴ ^{cdefg} ± ۰/۰۶

حروف یکسان در هر ستون، بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشد.

ناشی از افزایش فشار اسمزی و ورود ماده جامد محلول (ساکارز) بیشتر به داخل نمونه‌ها باشد که باعث اتصال ماده جامد محلول به یکدیگر و افزایش مقاومت در مقابل انتشار رطوبت طی خشک‌کردن می‌شود؛ ولی این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

شکل ۳ (الف-د)، آهنگ خشک‌شدن تیمارهای مختلف را طی خشک‌شدن نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، دوره سرعت ثابت خشک‌شدن در آلو دیده نشد و خشک‌شدن در مرحله سرعت نزولی اتفاق افتاد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم وجود داشت (Doymaz, 2004). شکل ۳ نشان می‌دهد که آهنگ خشک‌شدن در ابتدای فرآیند به دلیل زیاد بودن محتوی رطوبت، بیشتر از مراحل پایانی بود. همچنین، آهنگ خشک‌شدن در مراحل پایانی به دلیل ایجاد مقاومت در مقابل

دقیقه، به دلیل افزایش سهولت خروج رطوبت از طریق باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده‌شدن ترکیبات مومی پوست آلو و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی طولی‌تر در اثر تغییر شکل سلول‌ها، ضریب انتشار مؤثر رطوبت افزایش و به تناسب آن، زمان کاهش یافته است (Ortuno *et al.*, 2010). در جدول ۳، علاوه بر اثر امواج فراصوت بر زمان خشک‌شدن و ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌توان تأثیر آبیگری اسمزی و افزایش غلظت و زمان فرآیند اسمز را نیز بر دو متغیر مذکور مشاهده کرد. بدین ترتیب که در شرایط ثابت زمان امواج فراصوت و زمان فرآیند اسمز، استفاده از غلظت محلول اسمزی با بریکس ۷۰ باعث افزایش زمان خشک‌شدن و کاهش ضریب انتشار مؤثر رطوبت در مقایسه با استفاده از غلظت محلول اسمزی با بریکس ۵۰ گردید. این امر ممکن است



شکل ۳- (الف-د) - آهنگ خشک شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ طی خشک شدن

دوره سرعت ثابت در خشک کردن، هنگامی وجود دارد که خشک کردن به صورت کنترل خارجی باشد؛ یعنی خشک شدن ماده غذایی فقط وابسته به شرایط هوا و هندسه محصول بوده و تحت تأثیر ویژگی‌های محصول قرار نگیرد. کنترل خارجی حاکی از عدم وجود گرادایان رطوبت در داخل ماده غذایی است؛ به عبارت دیگر، در کنترل خارجی، مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم وجود ندارد و آهنگ خشک شدن و تغییرات نسبت رطوبت طی خشک شدن نسبت به زمان، خطی است. با توجه به شکل ۳ و ۴، ملاحظه می‌شود که آهنگ خشک شدن و تغییرات نسبت رطوبت آلو نسبت به زمان، خطی نیست. بنابراین، این امر نشان می‌دهد که خشک شدن آلو در مرحله سرعت نزولی اتفاق افتاده و مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم وجود داشته است. بنابراین، می‌توان فرآیند خشک شدن آلو را به عنوان یک فرآیند

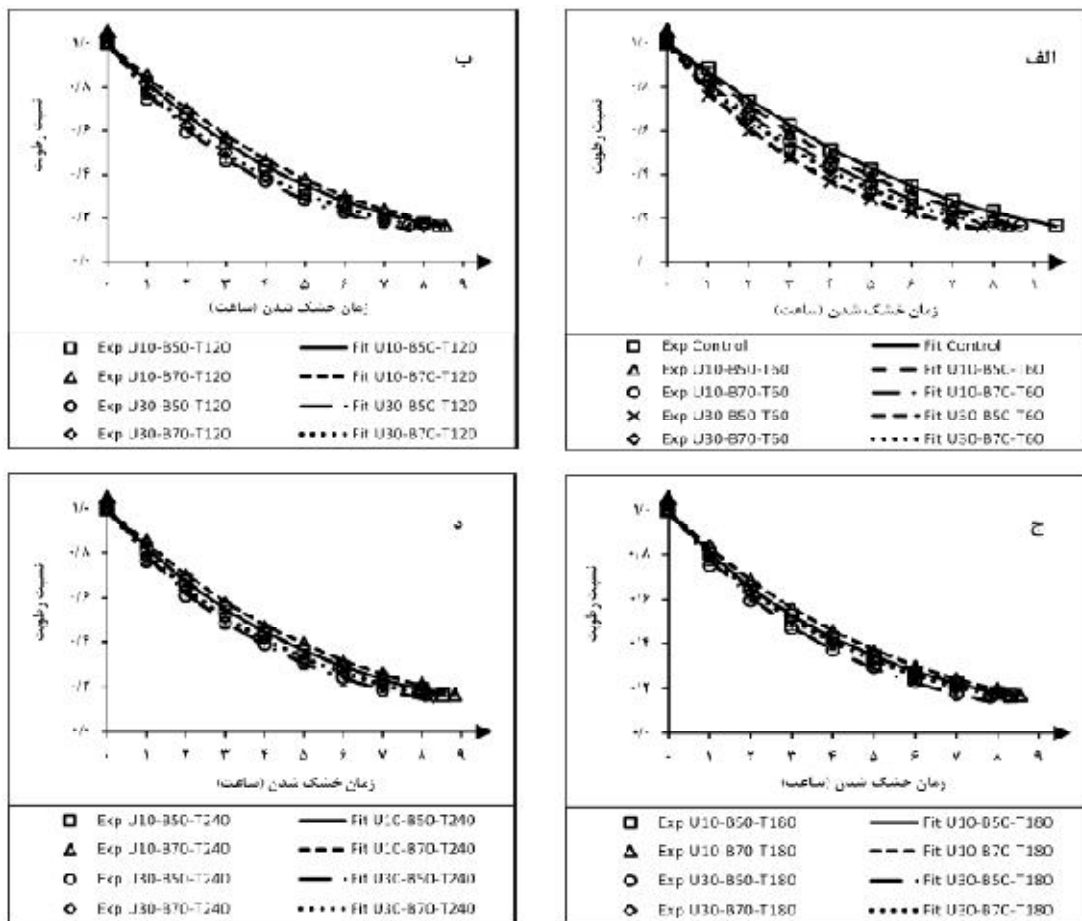
انتقال رطوبت در نتیجه چروکیدگی آلو و افزایش مقاومت داخلی در مقابل انتقال جرم به دلیل کاهش محتوی رطوبت، کاهش پیدا کرد. در بررسی تأثیر استفاده همزمان امواج فراصوت و آبگیری اسمزی بر آهنگ خشک شدن نمونه‌های آلو، همان‌طور که در شکل ۳ (الف-د) نیز دیده می‌شود، به کارگیری امواج فراصوت و آبگیری اسمزی به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و در نتیجه تسهیل خروج رطوبت، آهنگ خشک شدن را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. همچنین، این اشکال نشان می‌دهند که در یک محلول اسمزی با غلظت و زمان فرآیند ثابت، پیش تیمار امواج فراصوت و افزایش زمان آن از ۱۰ به ۳۰ دقیقه، شیب نمودار و آهنگ خشک شدن نسبت به تیمار شاهد را افزایش داد.

جدول ۴ (الف و ب)، پارامترهای آماری مدل‌های مختلف برای همه تیمارها را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی ۶ دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل‌های جدول ۲ می‌باشد. میانگین مقادیر ضریب تبیین، ریشه متوسط خطای داده‌ها و مجموع مربع خطای مدل مذکور در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب ۰/۹۹۹، ۰/۰۰۶۷ و ۰/۰۰۰۴ بود. بنابراین، از بین ۶ مدل مورد مطالعه، مدل پیشنهادی (مدل ۶) به‌عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌شدن لایه نازک نمونه‌های آلو انتخاب شد.

کنترلی از طریق انتشار در نظر گرفت که در آن میزان خروج رطوبت توسط انتشار رطوبت از داخل به سطح محصول محدود شده است (Barbosa-Canovas & Vega-Mercado, 1996; Doymaz, 2004; Giner, 2009).

مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن

شکل ۴ (الف-د) تغییرات نسبت رطوبت نمونه‌های آلو را طی خشک‌شدن و در شرایط مختلف امواج فرا-صوت و آبیگری اسمزی بر اساس جدول ۱ نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال، تأثیر تلفیقی امواج فراصوت و آبیگری اسمزی بر نسبت رطوبت، مشابه محتوی رطوبت طی خشک‌شدن (شکل ۲) است.



شکل ۴ (الف-د) - نسبت رطوبت طی خشک‌شدن تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ و برازش آن‌ها با مدل پیشنهادی (مدل ۶). در این شکل، Exp، داده‌های حاصل از آزمایش و Fit، داده‌های حاصل از برازش را نشان می‌دهد.

ضرایب a و b مربوط به مدل پیشنهادی برای زمان‌های مختلف امواج فراصوت، غلظت‌های مختلف محلول اسمزی و زمان‌های مختلف فرآیند اسمز در جدول ۵ آمده است. مزیت این مدل‌سازی این است که با استفاده از معادله‌های ۹ و ۱۰، ضرایب a و b را می‌توان بر حسب سه متغیر مستقل (زمان امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز) محاسبه کرد؛ به طوری که با جایگذاری ضرایب a و b در مدل ۶، می‌توان نسبت رطوبت یا زمان خشک شدن را بدون انجام آزمایش در سطوح مختلف زمان امواج فراصوت، غلظت محلول اسمزی و زمان فرآیند اسمز به دست آورد.

در شکل ۴ (الف-د) برازش تغییرات نسبت رطوبت تیمارهای مختلف با مدل ۶ طی خشک شدن آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی و داده‌های آزمایشی در همه تیمارهای مورد مطالعه وجود داشت. معادله‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب ضرایب a و b را برای مدل ۶ نشان می‌دهند که از آنالیز رگرسیونی چند-متغیره به دست آمده‌اند. در این معادله‌ها، a و b ، ضرایب مدل توسعه یافته پیشنهادی ۶، U زمان امواج فراصوت بر حسب دقیقه، B غلظت محلول اسمزی بر حسب بریکس و T زمان فرآیند اسمز بر حسب دقیقه، است.

$$R^2=۸۹ \quad \text{معادله (۹)}$$

$$a = 7.65 \times 10^{-13} \times (U \times B \times T)^2 - 6.2 \times 10^{-4} \times (U)^2 - 4.9 \times 10^{-5} \times (B)^2 + 4.38 \times 10^{-7} \times (T)^2 - 3.2 \times 10^{-6} \times (U \times B \times T) + 3.64 \times 10^{-4} \times (U \times B) + 1.59 \times 10^{-4} \times (U \times T) + 5.28 \times 10^{-5} \times (B \times T) - 3.26 \times 10^{-3} \times T + 0.168519$$

$$R^2=۹۲ \quad \text{معادله (۱۰)}$$

$$b = 2.83 \times 10^{-12} \times (U \times B \times T)^2 - 1.4 \times 10^{-4} \times (U)^2 + 1.66 \times 10^{-5} \times (B)^2 - 6.8 \times 10^{-6} \times (T)^2 - 4.3 \times 10^{-6} \times (U \times B \times T) + 2.12 \times 10^{-4} \times (U \times B) + 1.23 \times 10^{-4} \times (U \times T) + 1.72 \times 10^{-5} \times (B \times T) + 2.031 \times 10^{-3} \times T$$

معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل بر می‌آید، انطباق خوبی ($R^2=۰/۹۹۹$) بین نسبت رطوبت این مدل و تیمار آزمایشی وجود داشت. بنابراین، مدل توسعه یافته پیشنهادی برای پیش‌بینی سینتیک خشک شدن نمونه‌های آلوده مناسب می‌باشد.

به منظور معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی، نتایج حاصل از برازش، مقادیر نسبت رطوبت آزمایشی با زمان امواج فراصوت ۲۰ دقیقه، محلول اسمزی با بریکس ۶۰ و زمان فرآیند اسمز ۱۵۰ دقیقه با مقادیر نسبت رطوبت پیش‌بینی شده (مدل ۶ جدول ۲) در

جدول ۴-الف- پارامترهای آماری مدل‌های ۱، ۲ و ۳ بر اساس جدول ۲ برای تیمارهای مختلف

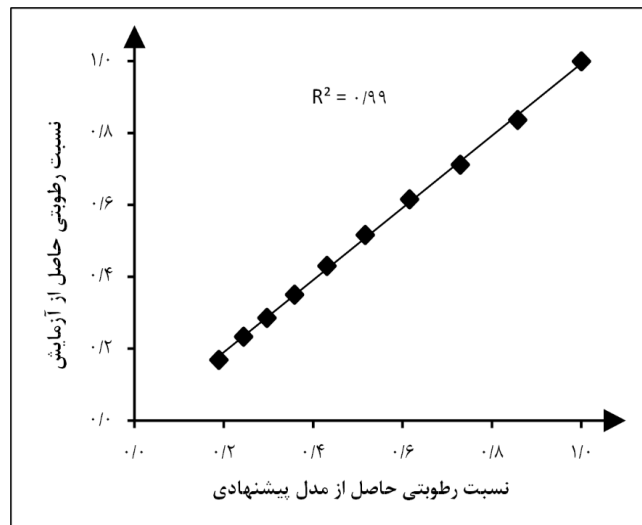
تیمار	مدل								
	۳			۲			۱		
	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²
Control	۰/۰۲۵	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹۲۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۸۸	۰/۰۲۱	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۵۴
U1۰-B۵۰-T1۰	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹۴۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۷۲	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۶۰
U1۰-BV۰-T1۰	۰/۰۴۶	۰/۰۰۶۶	۰/۹۷۴۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۲۵	۰/۹۷۸۴	۰/۰۴۷	۰/۰۰۵۴	۰/۹۸۹۵
U3۰-B۵۰-T1۰	۰/۰۶۹	۰/۰۰۴۸	۰/۹۸۹۱	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹۶۰	۰/۰۵۸	۰/۰۰۷۱	۰/۹۷۹۴
U3۰-BV۰-T1۰	۰/۰۳۷	۰/۰۰۹۶	۰/۹۸۵۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۹۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۷۶
U1۰-B۵۰-T1۲۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۵۱
U1۰-BV۰-T1۲۰	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۵۵	۰/۰۵۷	۰/۰۰۶۴	۰/۹۷۹۵	۰/۰۱۷	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۷۰
U3۰-B۵۰-T1۲۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۷۸	۰/۰۲۴	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹۳۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۸۵
U3۰-BV۰-T1۲۰	۰/۰۲۸	۰/۰۰۴۱	۰/۹۸۶۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۷۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۵۸
U1۰-B۵۰-T1۸۰	۰/۰۸۳	۰/۰۰۷۷	۰/۹۸۱۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۵	۰/۰۴۳	۰/۰۰۲۷	۰/۹۸۵۶
U1۰-BV۰-T1۸۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۸۷	۰/۰۳۶	۰/۰۰۲۳	۰/۹۸۹۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۲۲
U3۰-B۵۰-T1۸۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۷۶	۰/۰۲۴	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹۳۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۳
U3۰-BV۰-T1۸۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۲۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۶۷
U1۰-B۵۰-T۲۴۰	۰/۰۸۲	۰/۰۰۹۵	۰/۹۷۲۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۹۱	۰/۰۳۵	۰/۰۰۶۳	۰/۹۸۴۴
U1۰-BV۰-T۲۴۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹۷۴	۰/۰۴۴	۰/۰۰۲۶	۰/۹۸۴۶	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹۸۳
U3۰-B۵۰-T۲۴۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۲	۰/۰۲۱	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹۴۸	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۸۷
U3۰-BV۰-T۲۴۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۲۵	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۷۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۳۶

جدول ۴-ب- پارامترهای آماری مدل‌های ۴، ۵ و ۶ بر اساس جدول ۲ برای تیمارهای مختلف

مدل									تیمار
۶			۵			۴			
RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	
۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹۳۶	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۶۹	Control
۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۴	۰/۰۲۲	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹۴۸	۰/۰۴۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۸۶۵	U۱۰-B۵۰-T۱۰
۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۷۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۸۲	U۱۰-B۷۰-T۱۰
۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۲	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲۳	۰/۹۸۹۶	U۳۰-B۵۰-T۱۰
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۸۸	U۳۰-B۷۰-T۱۰
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۷۱	U۱۰-B۵۰-T۱۲۰
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹۶۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۳	U۱۰-B۷۰-T۱۲۰
۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹۷۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹۸۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۸۷	U۳۰-B۵۰-T۱۲۰
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۵	U۳۰-B۷۰-T۱۲۰
۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۷	۰/۹۹۷۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۸۵	U۱۰-B۵۰-T۱۸۰
۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۸۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۸۶	U۱۰-B۷۰-T۱۸۰
۰/۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۷۶	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۹۴	U۳۰-B۵۰-T۱۸۰
۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۸۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۳	U۳۰-B۷۰-T۱۸۰
۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۷۴	U۱۰-B۵۰-T۲۴۰
۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹۷۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۵	U۱۰-B۷۰-T۲۴۰
۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۹۹۹۳	U۳۰-B۵۰-T۲۴۰
۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۹۵	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳۳	۰/۹۸۹۶	۰/۰۲۲	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۲۶	U۳۰-B۷۰-T۲۴۰

جدول ۵- مقادیر ضرایب a و b مدل پیشنهادی حاصل از آنالیز رگرسیونی تیمارهای مختلف

تیمار	a	b
Control	۰/۱۶۸۵۱۹	۰
U۱۰-B۵۰-T۶۰	۰/۱۳۰۴۸۴	۰/۲۲۹۸۲۷
U۱۰-B۷۰-T۶۰	۰/۱۱۱۳۰۵	۰/۲۸۳۵۵۲
U۳۰-B۵۰-T۶۰	۰/۰۰۲۷۹۲	۰/۲۳۹۸۰۳
U۳۰-B۷۰-T۶۰	۰/۰۵۷۷۰۱	۰/۲۹۴۶۸۹
U۱۰-B۵۰-T۱۲۰	۰/۰۹۹۴۸	۰/۲۸۲۲۸۸
U۱۰-B۷۰-T۱۲۰	۰/۱۰۷۲۴۴	۰/۳۱۲۳۸۸
U۳۰-B۵۰-T۱۲۰	-۰/۰۱۲۸۹	۰/۲۴۴۹۹۲
U۳۰-B۷۰-T۱۲۰	۰/۰۰۸۰۲۷	۰/۲۲۹۷۳۶
U۱۰-B۵۰-T۱۸۰	۰/۰۷۳۰۰۷	۰/۲۹۰۸۸۳
U۱۰-B۷۰-T۱۸۰	۰/۱۰۹۰۳۵	۰/۳۰۲۲۴۹
U۳۰-B۵۰-T۱۸۰	-۰/۰۱۳۰۲	۰/۲۴۴۰۶۷
U۳۰-B۷۰-T۱۸۰	-۰/۰۱۴۲	۰/۲۰۵۶۸۲
U۱۰-B۵۰-T۲۴۰	۰/۰۵۱۰۶۴	۰/۲۵۵۶۱۲
U۱۰-B۷۰-T۲۴۰	۰/۱۱۶۶۷۹	۰/۲۵۳۱۳۴
U۳۰-B۵۰-T۲۴۰	۰/۰۰۲۳۹۲	۰/۲۴۰۰۲۸
U۳۰-B۷۰-T۲۴۰	-۰/۰۰۸۹۹	۰/۲۲۲۵۲۵



شکل ۵- برازش داده‌های نسبت رطوبت حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (مدل ۶)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر به کارگیری همزمان امواج فرا-صوت و آبیگری اسمزی بر سینتیک خشک‌شدن لایه نازک آلوی و مدل‌سازی آن، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیش تیمارهای امواج فراصوت و آبیگری اسمزی از لحاظ آماری تأثیر معنی‌دار بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت و زمان خشک‌شدن دارند. افزایش زمان امواج فراصوت از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه به علت ایجاد کانال‌های میکروسکوپی و پراکنده کردن ترکیبات مومی سطح پوست آلوی سبب سهولت انتقال جرم و کاهش زمان خشک‌شدن نسبت به تیمار شاهد گردید. علاوه بر این،

آبیگری اسمزی به دلیل تجزیه بافت سلولی، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و آهنگ خشک‌شدن در مقایسه با تیمار شاهد شد. مدل‌سازی تغییرات نسبت رطوبت تیمارها با مدل‌های مختلف نشان داد که مدل توسعه‌یافته پیشنهادی (مدل ۶ جدول ۲) انطباق خوبی ($R^2=0.999$) را با مقادیر نسبت رطوبت آزمایشی دارد و به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده سینتیک خشک‌شدن لایه نازک آلوی تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد.

راهنمای استفاده از جداول و اشکال

پارامترها	علامت اختصاری
محتوی رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)	X
نسبت رطوبت (بدون بعد)	X/X0 یا MR
ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2/s)	D_{eff}
شعاع آلوی (متر)	R
طول سه بعد آلوی	a, b, c
ضرایب مدل‌ها	a, b, k
زمان خشک‌شدن	t
ضریب تبیین	R^2
مجموع مربع خطا	SSE
ریشه متوسط خطای داده	RMSE

منابع

- ۱- قربانی، ر.، دهقان‌نیا، ج.، سیدلو هریس، س. ص.، قنبرزاده، ب. ۱۳۹۲. مدل‌سازی چروکیدگی آلوی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبیگری اسمزی در فرآیند خشک‌کردن. نشریه علمی- پژوهشی مکانیزاسیون کشاورزی، جلد ۱، شماره ۱، صفحات ۲۴ - ۱۱.
- ۲- قربانی، ر.، دهقان‌نیا، ج.، سیدلو هریس، س. ص.، قنبرزاده، ب. ۱۳۹۲. مدل‌سازی دانسیته ظاهری در طی خشک‌کردن آلوی پیش تیمار شده با اولتراسوند و آبیگری اسمزی. مجله علمی- پژوهشی علوم و فناوری‌های نوین غذایی، جلد ۱، شماره ۲، صفحات ۳۸ - ۲۳.
- 3- Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: review. Food Research International, 48 (2): 410-427.
- 4- Barbosa-Canovas, G. V. & Vega-Mercado, H. 1996. Dehydration of Foods. New York: Chapman and Hall.

- 5- Chemat, F., Zill-e-Huma & Khan, M. K. 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18: 813-835.
- 6- Chua, K. J., Chou, S. K., Hawlader, M. N. S., Mujumdar, A. S. & Ho, J. C. 2002. Modeling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Biosystems Engineering*, 81: 99-111.
- 7- Cletus, A. B. & Carson, J. K. 2008. Drying curves and apparent diffusivity of New Zealand chestnut variety '1015'. *Journal of Food Engineering*, 85: 381-386.
- 8- Dehghannya, J., Emam-Djomeh, Z., Sotudeh-Gharebagh, R. & Ngadi, M. 2006. Osmotic dehydration of apple slices with carboxy-methyl cellulose coating. *Drying Technology*, 24: 45-50.
- 9- Deng, Y. & Zhao, Y. 2008. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmo pretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *LWT - Food Science and Technology*, 41: 1575-1585.
- 10- Doymaz, I. 2004. Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Journal of Food Engineering*, 64: 465-470.
- 11- Fernandes, F. A. N., Gallao M. I. & Rodrigues, S. 2008. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology*, 41: 604-610.
- 12- 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.
- 13- 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.
- 14- Giner, S. A. 2009. Influence of Internal and External Resistances to Mass Transfer on the constant drying rate period in high-moisture foods. *Biosystems Engineering*, 102 (1): 90-94.
- 15- Guine, R. P. F. & Fernandes, R. M. C. 2006. Analysis of the drying kinetics of chestnut. *Journal of Food Engineering*, 76: 460-467.
- 16- Ibitwar, B. B., Kaur, B., Arora, S. & Pathare, P. B. 2008. Osmo-convective dehydration of plum. *International Journal of Food Engineering*, 4 (8): Article 5.
- 17- Ioannou, I., Guiga, W., Charbonnel, C. & Ghouil M. 2011. Frozen mirabelle plum drying: Kinetics, modelling and impact on biochemical properties. *Food and Bioproducts Processing*, 89: 438-448.
- 18- 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.
- 19- Jazini, M. H. & Hatamipour, M. S. 2010. A new physical pretreatment of plum for drying. *Food and Bioproducts processing*, 88: 133-137.

- 20- Menges, H. O. & Ertekin, C. 2006. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*, 47: 2337-2348.
- 21- Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A. & Menegalli, F. C. 2010. Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients. *Journal of Food Engineering*, 100: 604-612.
- 22- Nunes, C., Saraiva, J. A. & Coimbra, M. A. 2008. Effect of candying on cell wall polysaccharides of plums (*Prunus domestica* L.) and influence of cell wall enzymes. *Food Chemistry*, 111: 538-548.
- 23- Ortuno, C., Perez-Munuera, I., Puig, A. & Riera, E. 2010. Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3: 153-159.
- 24- Prinziavalli, C., Brambilla, A., Maffi, D., Scalzo, R. L. & Torreggiani, D. 2006. Effect of osmosis time on structure, texture and pectic composition of strawberry tissue. *European Food Research and Technology*, 224: 119-127.
- 25- Sacilik, K., Elicin, A. K. & Unal, G. 2006. Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76: 362-368.
- 26- 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.
- 27- Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Alati, F. T. & Moghaddam, M. 2010. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12: 171-178.
- 28- 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.
- 29- Steel, R. G. D., Torrie, J. H. & Dickey, D. A. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York: McGraw-Hill
- 30- Tarhan, S. 2007. Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying temperatures. *Journal of Food Engineering*, 79: 255-260.
- 31- Togrul, I. T. & Pehlivan, D. 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65: 413-425.

Kinetics investigation of thin layer plums drying simultaneously pretreated with ultrasound and osmotic dehydration

Rasoul Ghorbani¹, Jalal Dehghannya^{2*}, Seiiid-Sadegh Seiiidlou-Heris³, Babak Ghanbarzadeh²

- 1- MSc. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
- 2- Associated Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
- * Corresponding author (j_dehghannya@tabrizu.ac.ir)
- 3- Associated Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
- 4- Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Ultrasound is one of the emerging technologies that its application in drying foodstuffs aimed at reducing the time needed to process and improve the quality characteristics of dried product is growing day by day. In this study, the simultaneous effect of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on thin-layer drying kinetics of plums during drying at 80°C temperature and 1.4 m/s air velocity was examined. The pretreatments applied included ultrasound waves at two levels (10 and 30 minutes), osmotic solution concentrations at two levels (50 and 70 Brix) and osmotic dehydration time at four levels (60, 120, 180 and 240 min). The results showed that increasing ultrasound time, osmotic solution concentration and osmotic process time led to a decrease in drying time and an increase in effective moisture diffusion coefficient compared to control sample. Furthermore, in order to correctly predict the drying process, the data from the experiments were fitted with some empirical models as well as some new proposed models in this study. Then, one of the proposed models was selected as the best model (based on Coefficient of Determination, Root Mean Square Error and Sum of Square Error) to describe the drying process of plums under the selected experimental conditions. Through multiple regression analysis, the relations between the coefficients of the models with the variables used were obtained.

Keywords: Effective moisture diffusion coefficient, Modeling, Osmotic dehydration, Ultrasound