

مدل سازی تجربی چروکیدگی در خشک کردن انگور پیش تیمار شده با فراصوت و کربوکسی متیل سلولز

منور طهماسبی پور^۱، جلال دهقان نیا^{۲*}، سیدصادق سیدلوهریس^۳، بابک قنبرزاده^۴

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

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

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

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

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۸)

چکیده

حرارت بالا در هنگام خشک کردن، همراه با از دست دادن آب در این حین، باعث ایجاد تنش در ماده غذایی، تغییر ریزساختارها و کاهش حجم یا چروکیدگی آن می شود. در این پژوهش، اثر پیش تیمار فراصوت در زمان های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و کربوکسی متیل سلولز با غلظت های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد، بر میزان چروکیدگی دانه های انگور هنگام خشک شدن و مدل سازی آن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، دانه های انگور پیش تیمار شده، در یک خشک کن تونلی خشک شده و تغییرات حجمی آن ها اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که تمامی پیش تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، چروکیدگی بالاتری دارند ولی این اختلاف از لحاظ آماری، معنی دار نبود. هم چنین، افزایش زمان فراصوت، چروکیدگی نمونه ها را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. تیمار شاهد و تیمار با زمان ۳۰ دقیقه فراصوت، به ترتیب کمترین و بیشترین میزان چروکیدگی را در بین تیمارهای مختلف به خود اختصاص دادند. در تلفیق دو پیش تیمار فراصوت و CMC نیز، ملاحظه گردید که با افزایش غلظت CMC، چروکیدگی نمونه ها در مقایسه با غلظت های کمتر آن، کاهش می یابد.

کلید واژگان: خشک کردن، فراصوت، کربوکسی متیل سلولز، چروکیدگی، مدل سازی

* مسئول مکاتبات: J-dehghannya@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

انتقال جرم و حرارت هم‌زمان که هنگام خشک‌شدن با جریان هوای داغ در سیستم‌های غذایی اتفاق می‌افتد، می‌تواند باعث ایجاد تغییراتی در ترکیب شیمیایی، ساختار و ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی شود. به عبارت دیگر، انتقال جرم (از دست-دادن آب) از یک سو و انتقال حرارت از سوی دیگر، تنش‌هایی را در ساختار سلولی ماده غذایی ایجاد می‌کند و منجر به تغییر ساختار میکروسکوپی آن (تشکیل منافذ) و چروکیدگی می‌شود. چروکیدگی از عیوب مهم خشک‌کردن مواد غذایی محسوب می‌شود و می‌تواند آثار منفی و نامطلوب بر روی کیفیت محصول آنگیری شده بر جای گذارد که از جمله آن‌ها می‌توان به تغییر در شکل، کاهش حجم، افزایش سختی، شکاف سطحی، ترک خوردگی محصول و کاهش قابلیت آنگیری مجدد آن اشاره نمود [۱]. پدیده چروکیدگی، در اغلب سیستم‌های غذایی قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد و بایستی هنگام پیش‌بینی پروفایل‌های رطوبت در مواد غذایی آنگیری شده در نظر گرفته شود [۱، ۲]. چروکیدگی، عامل محدودکننده انتقال جرم در هنگام خشک‌شدن مواد غذایی است که باعث افزایش مدت زمان لازم برای خشک‌شدن آن‌ها نیز می‌شود. این افزایش در زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن، 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 خشک‌شدن غیریکنواخت می‌شود [۳].

امروزه به منظور کاهش زمان خشک‌شدن، بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات خشک‌شده و برطرف‌کردن عیوب خشک‌کردن با جریان هوای داغ، استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند امواج فراصوت، مایکروویو، مادون قرمز و ... به-طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. براساس پژوهش‌های مختلف بر روی خشک‌کردن انگور با استفاده از پیش‌تیمارهای متفاوت، خشک‌کردن این محصول تا رسیدن به محتوای رطوبت ۰/۴۲-۰/۱۷ کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک انجام گرفته است [۴]. امواج فراصوت که به عنوان پیش‌تیمار و قبل از فرآیند خشک‌کردن با جریان هوای داغ، به منظور کاهش زمان مورد نیاز فرآیند بکار می‌رود [۵]، شکلی از انرژی است

که توسط امواج صوتی در فرکانس‌های بالای محدوده شنوایی انسان (بالای ۱۶ کیلو هرتز) تولید می‌شود [۶]. این امواج، هنگامی که از ماده غذایی عبور کنند، تغییرات مؤثری را در آن ایجاد می‌کنند. شدت‌های بالای این امواج باعث ایجاد و سپس ترکیدن حباب‌های هوای داخل محیط مایع می‌شوند که به این پدیده کویتاسیون می‌گویند. ترکیدن غیرمتقارن این حباب‌ها در نزدیکی سطح ماده غذایی، باعث انتقال جریان 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 ایجادشده می‌شود [۷]. بنابراین، استفاده از پیش‌تیمار فراصوت به دلیل کاهش زمان خشک‌شدن، می‌تواند باعث کاهش هزینه تولید محصول خشک‌شده گردد [۸، ۹].

طی پژوهشی، اثر شدت‌های مختلف فراصوت، روی انتقال جرم در نمونه‌های سیب غوطه‌ور شده در محلول ساکارز بررسی شده است [۶]. در این پژوهش، میزان انتقال جرم با افزایش شدت فراصوت افزایش یافت. مشاهدات مشابه در مورد تأثیر تلفیق فرآیندهای فراصوت و اسمز در حین دهیدراسیون روی ساختار بافتی آناناس [۷]، پاپایا [۱۰]، ساپتاس [۱۱] و هم‌چنین، اثر فراصوت روی سیستیک خشک‌کردن ورقه‌های موز [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات نیز نشان می‌دهند که پیش‌تیمار فراصوت با افزایش قابلیت انتشار آب در طی فرآیند خشک‌کردن، باعث کاهش زمان مورد نیاز برای آن نیز می‌شوند. علاوه بر بررسی اثرات امواج صوتی بر فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی (افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و کاهش زمان خشک شدن)، بررسی این فرآیند (فراصوت) بر روی ویژگی‌های کمی و کیفی محصول غذایی از جمله چروکیدگی نیز حائز اهمیت است. در پژوهش دیگری به بررسی تأثیر فراصوت به عنوان روشی برای افزایش میزان انتقال جرم نمونه‌های سیب، قبل از فرآیند خشک‌کردن پرداخته شده است [۱۳]. در این پژوهش، نمونه‌های سیب در معرض امواج صوتی با فرکانس ۳۵ کیلوهرتز و مدت زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه قرار گرفت. نتایج حاصله، نشان از کاهش زمان خشک‌شدن با افزایش زمان فراصوت داشت. اما در عین حال،

۲-۱- عوامل مؤثر بر مقدار چروکیدگی

۲-۱-۱- **حجم آب خارج شده:** با افزایش مقدار آب خارج شده از ماده غذایی، مقدار کاهش حجم و چروکیدگی افزایش می‌یابد. این تناسب تا مراحل نهایی خشک شدن و در رطوبت‌های کمتر ماده غذایی نیز روند خود را حفظ می‌کند.

۲-۱-۲- **تحرك شبکه سه بعدی و یا ماتریکس مواد جامد:** در مقدار رطوبت‌های بالا، کاهش حجم، متناسب با کاهش آب در ماده غذایی است که در این حالت تحرك زیاد شبکه، به دلیل ویژگی ویسکوالاستیک است. این در حالی است که در رطوبت‌های پایین‌تر، حالت ماده از لاستیکی به شیشه‌ای تغییر می‌یابد و در نتیجه دمای انتقال شیشه‌ای و یا دمای تبدیل به این حالت، افزایش و در نهایت چروکیدگی کاهش پیدا می‌کند. در این حالت، تحرك کم ماتریکس به علت ویژگی شیشه‌ای آن است.

۲-۱-۳- **سرعت و دمای هوا در هنگام خشک کردن:** اگر در طول فرآیند، سرعت و دماهای پایین هوا انتخاب شود، سرعت حرکت آب از لایه‌های داخلی به لایه بیرونی، برابر با سرعت تبخیر آب از سطح ماده غذایی است و این امر باعث جمع شدن یکنواخت محصول و چروکیدگی آن می‌شود؛ در حالی که اگر خشک کردن سریع، تحت شرایط سرعت و دمای بالای هوا صورت گیرد، گرادیان رطوبتی زیادی بین لایه بیرونی ماده غذایی و هوای گرم ایجاد می‌شود و در این حالت، لایه بیرونی رطوبت خود را سریع از دست می‌دهد و دمای آن افزایش یافته و به دمای انتقال شیشه‌ای می‌رسد. این رویداد، یک لایه سخت خارجی در اثر تجمع مواد محلولی که با حرکت آب به سطح ماده غذایی آمده‌اند، ایجاد می‌کند و مانع خروج آب از لایه‌های درونی که هنوز حالت لاستیکی دارند، نیز خواهد شد.

۲-۱-۴- **سایر شرایط:** تلاش‌های زیادی برای بررسی شرایط مختلف پروسه خشک کردن مانند دمای هوا، سرعت و رطوبت نسبی آن، روی تغییرات حجمی مواد غذایی صورت گرفته است؛ اما متأسفانه نتایج این بررسی‌ها برای بررسی اثر این شرایط روی چروکیدگی واضح نیست. در هر حال، می‌توان گفت که روش خشک کردن و شرایط مورد استفاده طی فرآیند، می‌تواند

چروکیدگی بیشتر نمونه‌های سیب نیز در کنار افزایش انتقال جرم آن‌ها با افزایش زمان غوطه‌وری در حمام فراصوت، دیده شد. این پژوهش‌گران، علت این موضوع را، افزایش تخریب سلولی و تغییر شکل سلول‌ها برای خروج سریع‌تر و راحت‌تر رطوبت از داخل ماده غذایی بیان کردند.

علاوه بر امواج فراصوت، فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی به منظور افزایش کیفیت مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴، ۱۵]. کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) یکی از مشتقات مهم سلولز است که به‌طور وسیعی برای افزایش عمر انبارداری مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]. CMC یک بیوپلیمر هیدروفیل است که با جذب مولکول‌های آب از ماده غذایی، از کاهش حجم و چروکیدگی آن جلوگیری کرده و در نهایت باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی ماده غذایی در طول مدت زمان نگهداری می‌شود [۱۹-۱۷]. استفاده از پوشش‌های خوراکی در دهیدراسیون مواد غذایی (به‌همراه محلول اسمزی)، روز به روز در حال افزایش است. به عنوان مثال، در پژوهشی به بررسی تأثیر پوشش چیتوزان بر روی انتقال جرم میوه پاپایا در هنگام دهیدراسیون اسمزی پرداخته شده است [۲۰]. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار خروج آب در نمونه‌های پوشش‌داده شده نسبت به نمونه‌های بدون پوشش بیشتر است. در پژوهش مشابه دیگری، تأثیر پوشش CMC بر روی دهیدراسیون اسمزی قطعات سیب مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱]. در این پژوهش، استفاده از پوشش خوراکی CMC، باعث افزایش میزان کارایی دهیدراسیون اسمزی از طریق افزایش آبیگری و کاهش ورود مواد جامد محلول به سیب شد.

۱-۱- مکانیسم چروکیدگی

سیستم‌های جامد یا نیمه جامد مواد غذایی، از مواد ناهمگنی تشکیل شده‌اند که به‌صورت یک شبکه جامد سه بعدی یا ماتریکسی از مواد جامد که فاز آبی را در بین خود نگهداری می‌کند، قرار گرفته است. زمانی که آب از ماده غذایی خارج می‌شود، فشار نامتعادلی بین درون و بیرون آن ایجاد می‌کند که این فشار نامتعادل، موجب ایجاد تنش در ساختار سلولی ماده غذایی شده و تغییر شکل و چروکیدگی را در آن ایجاد می‌کند [۱].

میزان چروکیدگی را خواهد داشت که علت آن نیز مربوط به گرمای زیادی است که ماده غذایی برای خروج سریع‌تر مولکول‌های آب در مایکروویو در معرض آن قرار می‌گیرد. علاوه بر موارد فوق، نتایج پژوهشی دیگر که به منظور تعیین تغییرات ساختاری انگور در هنگام خشک‌شدن انجام شد، نشان داد که افزایش دمای هوا از ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد، باعث افزایش میزان چروکیدگی در نمونه‌های انگور می‌شود که این موضوع نیز بیانگر وابستگی چروکیدگی به شرایط خشک‌کردن می‌باشد [۲۷]. در مطالعه دیگری، قابلیت انتشار رطوبت نمونه‌های لویبا سبز خشک‌شده را با خشک‌کن بستر سیال، با مدل‌سازی و در نظر گرفتن چروکیدگی به عنوان عامل مؤثر در سینتیک خشک‌شدن، مورد بررسی قرار داده شده است [۲۲]. مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب انتشار مؤثر رطوبت با در نظر گرفتن چروکیدگی نشان داد که کاهش در میزان قابلیت انتشار رطوبت در طی خشک‌شدن با جریان هوا دیده می‌شود. در حالی که مقادیر اندازه‌گیری‌شده برای ضریب انتشار مؤثر رطوبت بدون در نظر گرفتن چروکیدگی، نشان‌دهنده تخمین بیشتر مقدار انتقال جرم است. به عبارت دیگر، در نظر نگرفتن چروکیدگی، تخمین کمتر سرعت خشک‌شدن را در پی داشت. این یافته‌ها، مشابه با یافته‌های به‌دست‌آمده در پژوهش‌های دیگر است که قابلیت انتشار رطوبت سیب‌زمینی، انبه و انگور را با در نظر گرفتن چروکیدگی مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۱-۲۸].

برای مدل‌سازی چروکیدگی ماده غذایی از دو روش در مراجع مختلف استفاده شده است. روش اول، شامل انطباق تجربی داده‌های آزمایشی چروکیدگی به صورت تابعی از محتوای رطوبت است. در حالی که روش دوم بنیادی‌تر بوده و بر پایه تفسیر فیزیکی سیستم‌های غذایی استوار است و تغییرات هندسی را در برابر محتوای رطوبت، با استفاده از قانون بقای جرم پیش‌بینی می‌کند [۱]. مدل‌های چروکیدگی ارائه‌شده در مراجع مختلف بسته به روش مورد استفاده در مدل‌سازی به دو دسته مدل‌های تجربی و بنیادی تقسیم بندی می‌شوند [۱].

الف) مدل‌های تجربی: ساده‌ترین راه برای مدل‌سازی چروکیدگی، به دست آوردن یک رابطه بین چروکیدگی و محتوای رطوبت با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش است.

اثرات بارزی روی ویژگی‌های محصول خشک‌شده با تحت تأثیر قراردادن تخلخل، چروکیدگی و چگالی ظاهری آن داشته باشد [۱].

مدل‌سازی چروکیدگی: خشک‌کردن محصولات کشاورزی، پدیده پیچیده‌ای شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان می‌باشد. مواد غذایی در طی خشک‌شدن دستخوش تغییرات حجمی، در نتیجه خروج رطوبت از آن‌ها می‌شوند که به چروکیدگی موسوم است. این پدیده می‌تواند بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت که یک فاکتور مهم در پیشرفت فرآیند خشک‌شدن است و هم‌چنین بر سرعت آن مؤثر باشد. بنابراین، مدل‌سازی رفتار خشک‌شدن این محصولات با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی مرتبط از قبیل چروکیدگی و ضریب انتشار مؤثر رطوبت بسیار حائز اهمیت است [۲۲].

در پژوهشی، مدل‌سازی چروکیدگی، تخلخل و چگالی ظاهری میوه به، در حین خشک‌شدن مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. در این پژوهش، اثر روش‌های مختلف خشک‌کردن روی ویژگی‌های فوق بررسی شد. نتایج نشان داد که چروکیدگی تحت تأثیر روش خشک‌شدن قرار می‌گیرد و خشک‌کن انجام‌داده، کمترین میزان چروکیدگی را در محصول خشک‌شده ایجاد می‌کند. در ادامه، مدل‌سازی چروکیدگی به عنوان تابعی از محتوای رطوبت صورت گرفت. در پژوهش دیگری که نتایج آن مغایر نتایج فوق بود، چروکیدگی گیلاس، تحت تأثیر روش دهیدراسیون قرار نگرفت و فقط به صورت تابعی از محتوای رطوبت تغییر کرد [۲۴]. در مطالعه‌ای دیگر، ویژگی‌های خشک‌کردن ۶ واریته از سیب‌زمینی شیرین در سه نوع خشک‌کن متفاوت (آون الکتریکی، خشک‌کن سینی‌دار با جریان اجباری هوا و خشک‌کن بستر سیال) بررسی شده است [۲۵]. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میزان چروکیدگی، وابسته به زمان آنزیم‌بری، واریته سیب‌زمینی، سیرکولاسیون هوا و نوع خشک‌کن مورد استفاده است. همچنین، در پژوهش دیگری روی خشک‌کردن کیوی، تأثیر استفاده از جریان هوا و انرژی مایکروویو روی چروکیدگی و آب‌گیری مجدد صورت گرفته است [۲۶]. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از مایکروویو هر چند زمان خشک‌شدن را در مقایسه با جریان هوای داغ کاهش می‌دهد اما محصول خشک‌شده نیز بیشترین

آن‌ها به دمای محیطی برسد. برای بررسی تأثیر فراصوت و پوشش خوراکی، از حمام فراصوت (مدل USD-4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و در ۳ زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و CMC (ساخت شرکت مرک، آلمان) در ۳ غلظت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد استفاده شد. قبل از شروع خشک کردن، نمونه‌ها در معرض امواج فراصوت با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. پس از گذشت زمان‌های بیان شده، نمونه‌ها از حمام فراصوت خارج و آب سطحی آن‌ها با کاغذهای جاذب رطوبت گرفته شد. در ادامه، نمونه‌ها با محلول CMC در دمای $40 \pm 2^\circ\text{C}$ و به مدت ۱۰ ثانیه پوشش‌دهی شده [۳۲] و به یک دستگاه خشک‌کن سینی‌دار طراحی شده 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 شدند.

۲-۲- آماده‌سازی محلول پوشش خوراکی

محلول CMC با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد به صورت زیر تهیه شد:

ابتدا بشر حاوی مقدار مشخصی آب مقطر، بر روی هیتر قرار گرفته و تا رسیدن به دمای ۷۰-۶۰ درجه سانتیگراد گرم شد. سپس مقدارهای مشخصی از CMC با توجه به هر آزمایش، در چند نوبت و در فواصل زمانی مشخص به محلول فوق اضافه شد و هم‌زمان عمل هم‌زدن توسط مگنت صورت گرفت. پس از حل شدن تمام CMC در آب، محلول شفافی به دست آمد که تا دمای $40 \pm 2^\circ\text{C}$ به وسیله حمام آب و یخ خنک گردید [۳۲].

۲-۳- تجهیزات خشک کردن

شکل ۱، شماتیک خشک‌کن همرفتی سینی‌دار آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این خشک‌کن دارای محفظه ورودی (شامل فن یا دمنده و گرم‌کن‌های الکتریکی)، محفظه میانی (شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی-سازهای جریان هوا)، محفظه خروجی و تابلو فرمان (محفظه کنترل کننده دما و سرعت) بود [۳۳].

مدل‌های تجربی به دست آمده شامل دو دسته مدل‌های خطی و غیرخطی می‌باشند. مدل‌های خطی برای توصیف کاهش خطی حجم ماده غذایی در کل محدوده رطوبتی و طی فرآیند خشک کردن به کار می‌روند؛ اما اگر طی مرحله نهایی فرآیند خشک کردن، حالت خطی از بین برود، در این صورت بهتر است این رفتار توسط مدل‌های غیرخطی توصیف گردد. مدل‌های غیرخطی به شکل مدل‌های نمایی، مدل‌های درجه دوم و ... ارائه می‌شوند. مدل‌های تجربی معمولاً تطابق بهتری با داده‌های حاصل از آزمایش دارند و علی‌رغم نیاز به آزمایش‌های گسترده، با موفقیت خوبی در مدل‌سازی داده‌های چروکیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ب) مدل‌های بنیادی: مدل‌های بنیادی بر پایه توازن جرم و تعاریف چگالی و تخلخل و محاسبه حجم فازهای مختلف در سیستم‌های غذایی استوارند [۱]. این مدل‌ها در سه گروه طبقه بندی می‌شوند: مدل‌هایی که رفتار خطی چروکیدگی را در کل فرآیند خشک کردن نشان می‌دهند؛ مدل‌هایی که انحراف از رفتار خطی را دربردارند و مدل‌هایی که تغییرات تخلخل را نیز در فرآیند خشک کردن در نظر می‌گیرند [۱].

با توجه به این‌که، بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون اثر تلفیقی دو پیش تیمار فراصوت و CMC، بر چروکیدگی دانه‌های انگور هنگام خشک شدن مورد بررسی قرار نگرفته است، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر دو پیش تیمار مذکور روی چروکیدگی نمونه‌های انگور و مدل‌سازی تغییرات آن توسط مدل‌های موجود در منابع و هم‌چنین، ارائه مدل‌های پیشنهادی جدید در این پژوهش بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

انگور بی‌دانه از یک بازار محلی تهیه و تا زمان آزمایش در سردخانه با دمای $3 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شد. حدود یک ساعت قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌ها از سردخانه خارج شدند تا دمای

بدون نمونه گذاری، سرعت، دما و رطوبت نسبی آن تنظیم شد. سرعت هوای داخل خشک کن بر روی عدد ۱/۵ متر بر ثانیه و دمای آن بر روی ۶۵ درجه سانتیگراد تثبیت شد. پس از تثبیت دما و سرعت، نمونه ها بر روی سه عدد سینی توری به صورت لایه نازک چیده شدند. کاهش وزن نمونه ها هر ۵ دقیقه یکبار توسط ترازوی دیجیتال ثبت شد. عمل خشک کردن نمونه ها تا رسیدن به میزان رطوبت ۰/۳۳ گرم آب بر گرم ماده خشک در خشک کن ادامه یافت. آزمایش های خشک کردن در ۲ تکرار و ۱۳ تیمار انجام گرفت. جدول ۱ تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آن ها را نشان می دهد. محتوای رطوبت نمونه های انگور نیز، قبل و بعد از خشک شدن، از طریق خشک کردن در آون کنوکسیونی در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت به دست آمد [۳۴] و به صورت محتوای رطوبت بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش شد.

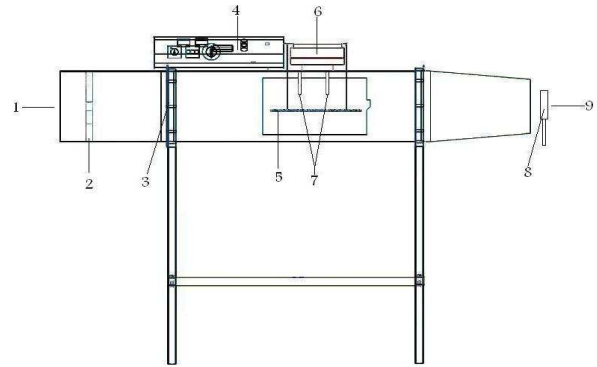


Fig 1 Schematic of convective dryer: 1) Air inlet; 2) Fan; 3) Heaters; 4) Temperature and airflow velocity controller; 5) Perforated tray; 6) Digital balance; 7) Relative humidity sensor and thermocouple; 8) Digital anemometer; 9) Air outlet

۲-۴- طرح کلی آزمایش ها

پس از روشن نمودن دستگاه خشک کن و نیم ساعت کارکرد

Table 1 Abbreviations used for different treatments

Pretreatment			
Number	Ultrasound (min)	CMC (%)	Abbreviation
1	0	0	Control
2	10	0	U10
3	20	0	U20
4	30	0	U30
5	10	0.1	U10, CMC 0.1
6	10	0.2	U10, CMC 0.2
7	10	0.3	U10, CMC 0.3
8	20	0.1	U20, CMC 0.1
9	20	0.2	U20, CMC 0.2
10	20	0.3	U20, CMC 0.3
11	30	0.1	U30, CMC 0.1
12	30	0.2	U30, CMC 0.2
13	30	0.3	U30, CMC 0.3

(تولون) و با استفاده از پیکنومتر به دست آمد [۳۵]. در این روش، ابتدا پیکنومتر حاوی تولون به صورت کاملاً پر توزین شد. سپس ۸ عدد دانه انگور پس از توزین، در داخل پیکنومتر حاوی تولون قرار گرفتند و تولون اضافی از آن خارج شد. معادله ۱، حجم تولون جابه جاشده و به تبع آن حجم نمونه انگور را نشان می دهد [۳۵].

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

۲-۵- محاسبه چروکیدگی

: برای محاسبه مقدار چروکیدگی، حجم دانه های انگور در طی خشک کردن و در رطوبت های مختلف (۲/۵، ۲، ۱/۵، ۰/۵ و ۰/۳۳ گرم آب بر گرم ماده خشک) اندازه گیری شد. بدین ترتیب که در هر آزمایش و پس از رسیدن به محتوای رطوبت مورد نظر، ۸ عدد دانه انگور به صورت تصادفی از داخل خشک کن خارج و حجم آن ها توسط روش جابه جایی حلال

می‌دهد. انواع مدل‌های تجربی و پیشنهادی برای برازش چروکیدگی (نسبت حجمی) نمونه‌های انگور در مقابل محتوای رطوبت (X) بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک و در بعضی موارد، نسبت رطوبت بدون بعد (X/X_0) آن‌ها، مورد استفاده قرار گرفت. برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های فوق و تعیین ضرایب آن‌ها در نرم افزار MATLAB R2011a انجام شد. به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات چروکیدگی با کاهش محتوای رطوبت، معیارهای ضریب تبیین (R^2)، مجموع مربعات خطا (SSE) و خطای ریشه متوسط مربعات (RMSE) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. در مقایسه بین مدل‌ها، مدلی که دارای R^2 بیشتر و SSE و RMSE کمتر باشد، بهتر می‌تواند تغییرات چروکیدگی را در طی فرآیند توصیف کند. آنالیز رگرسیونی چندمتغیره نیز در ادامه برازش داده‌های چروکیدگی با مدل‌های مختلف جدول ۲ و به منظور برآورد ضرایب مدل‌های فوق به صورت توابعی از زمان فراصوت و غلظت CMC، توسط نرم افزار Excel 2010 صورت گرفت.

در رابطه فوق، V ، حجم تولون جابه‌جاشده = حجم نمونه‌های انگور بر حسب سانتی‌متر مکعب، m' و m'' به ترتیب، جرم نمونه انگور و جرم پیکنومتر خالی بر حسب گرم، m جرم پیکنومتر حاوی تولون و نمونه انگور، M ، جرم تولون جابه‌جاشده و ρ_{to} ، چگالی تولون بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است. مقادیر نسبت حجمی و ضریب چروکیدگی این دانه‌ها نیز به ترتیب بر اساس معادله‌های ۲ و ۳ محاسبه شد [۳۳].

$$D_R = \left(\frac{V_t}{V_0} \right) \quad (2)$$

$$Sh = \left(1 - \frac{V_t}{V_0} \right) \quad (3)$$

V_t ، حجم نمونه‌های خشک‌شده در زمان مورد نظر بر حسب سانتی‌متر مکعب، V_0 ، حجم اولیه نمونه‌ها قبل از خشک شدن بر حسب سانتی‌متر مکعب، D_R ، نسبت حجمی و Sh ، ضریب چروکیدگی نمونه‌های انگور است.

۲-۶- مدل‌سازی چروکیدگی: جدول ۲، مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی چروکیدگی نمونه‌های انگور را نشان

Table 2 Empirical modeling of shrinkage during drying of grapes

Model number	Mathematical Model	References
1	$D_R = k_1 X + k_2$	[1]
2	$D_R = k_1 + k_2 X + k_3 X^2 + k_4 X^3$	[1]
3	$D_R = k_1 + k_2 \left(\frac{X}{X_0} \right) + k_3 \left(\frac{X}{X_0} \right)^2$	[1]
4	$D_R = k_1 \exp \left(k_2 \left(\frac{X}{X_0} \right) \right)$	[1]
5	$D_R = k_1 + k_2 \left(\frac{X}{X_0} \right) + 0.26 k_3 \left(1 - \frac{X}{X_0} \right)^3$	[1]
6	$D_R = k_1 \exp(-k_2 X) + k_2 X$	Proposed model in this study
7	$D_R = \exp(k_1 X + k_2)$	Proposed model in this study
8	$D_R = k_1 (1 + X^{k_2})$	Proposed model in this study

۷-۲- طرح آماری آزمایش ها و روش آنالیز

نتایج

به منظور بررسی اثر فراصوت و CMC روی چروکیدگی انگور، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با دو فاکتور A (زمان فراصوت) و B (غلظت CMC) با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 استفاده شد. مقایسه میانگین ها نیز به روش بونفرونی^۱ صورت گرفت [۳۶].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر شرایط فرآیند سرخ کردن بر

چروکیدگی

شکل ۲ (الف، ب، ج و د)، تغییرات میزان چروکیدگی (نسبت حجمی) نمونه های انگور را با کاهش محتوای رطوبت در بین تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ نشان می دهد. با افزایش زمان خشک شدن و کاهش محتوای رطوبت نمونه های انگور، نسبت حجمی آن ها کاهش یافت. کاهش نسبت حجمی نیز، به دلیل کاهش حجم ماده غذایی در اثر خروج آب در طول خشک شدن بود. این یافته در پژوهش مشابه دیگر نیز دیده شد [۳۷].

از سوی دیگر، جدول ۳ مقایسه میانگین های اثر فراصوت و CMC را بر میزان نسبت حجمی و ضریب چروکیدگی نهایی تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱ نشان می دهد. تمامی پیش تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، ضرایب چروکیدگی بالاتری از خود نشان دادند، ولی بین ضرایب چروکیدگی

پیش تیمارهای فوق، اختلاف معنی داری از لحاظ آماری وجود نداشت.

در بررسی اثر فراصوت بر میزان چروکیدگی نمونه های انگور همان طور که در جدول ۳ و شکل ۲ (الف) دیده می شود، افزایش زمان فراصوت، باعث افزایش ضریب چروکیدگی در مقایسه با تیمار شاهد شد. علت افزایش ضریب چروکیدگی با افزایش زمان فراصوت، تغییر شکل، تخریب سلولی و خارج شدن از حالت طبیعی سلول ها، برای خروج بیشتر و راحت تر آب از داخل ماده غذایی است که با افزایش زمان غوطه وری آن ها در حمام فراصوت اتفاق می افتد. این یافته ها در پژوهش مشابهی در ارتباط با خشک کردن نمونه سیب پیش تیمار شده با فراصوت نیز دیده شد [۱۳]. بنابراین، با در نظر گرفتن مطلب فوق و با توجه به جدول ۳، مشاهده می شود که تیمار با زمان ۳۰ دقیقه فراصوت، بیشترین میزان ضریب چروکیدگی را در مقایسه با سایر تیمارها به خود اختصاص داده است. اما با این وجود، اختلاف معنی دار از لحاظ آماری بین تیمار با زمان ۳۰ دقیقه فراصوت و سایر تیمارها دیده نشد.

علاوه بر این، در نمونه های پیش تیمار شده با تلفیق فراصوت و CMC (شکل ۲- ب، ج و د)، با ثابت در نظر گرفتن زمان فراصوت و افزایش غلظت CMC، ضریب چروکیدگی کاهش یافت (جدول ۳). علت کاهش ضریب چروکیدگی با افزایش غلظت CMC، باند شدن و اتصال مولکول های آب به CMC و هم چنین، تشکیل فیلم به دلیل ویژگی ترموزلی این بیوپلیمر در هنگام خشک شدن و تماس با جریان هوای داغ، می باشد [۱۷]، [۲۳]. اما با این وجود، کاهش ضریب چروکیدگی و افزایش نسبت حجمی، بین تیمارهای مختلف از لحاظ آماری معنی دار نبود.

1. Bonferoni

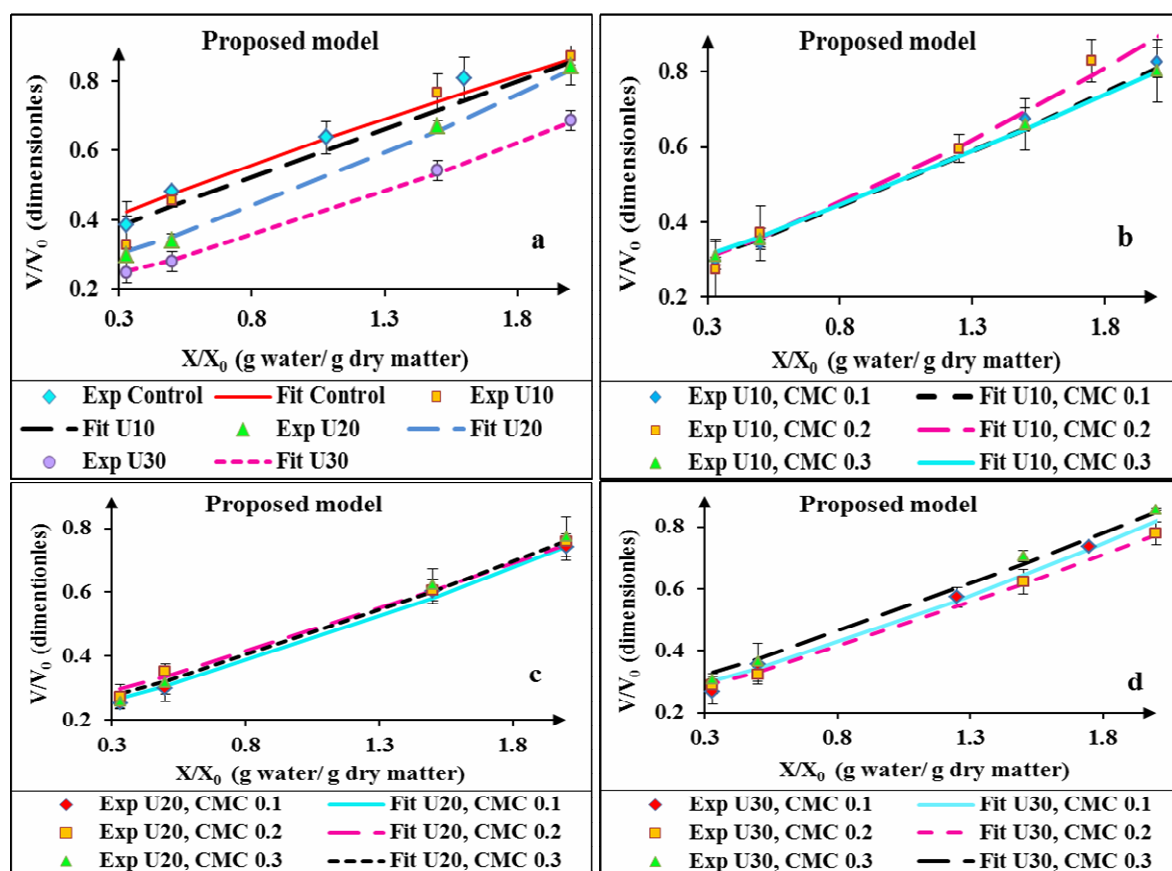


Fig 2 (a, b, c and d): Dimensionless volume ratio changes as a function of dimensionless moisture content for various treatments based on Table 1 and their fittings with the proposed model (Model 8, Table 2)

Table 3 Simultaneous effect of ultrasound and CMC on mean volume ratio and mean shrinkage coefficient

Treatment	Volume ratio (D_R)	Shrinkage Coefficient (S_b)
Control	0.386 ^a	0.613 ^a
U10	0.328 ^a	0.671 ^a
U20	0.300 ^a	0.699 ^a
U30	0.247 ^a	0.751 ^a
U10, CMC 0.1%	0.295 ^a	0.704 ^a
U10, CMC 0.2%	0.274 ^a	0.725 ^a
U10, CMC 0.3%	0.310 ^a	0.689 ^a
U20, CMC 0.1%	0.252 ^a	0.746 ^a
U20, CMC 0.2%	0.271 ^a	0.728 ^a
U20, CMC 0.3%	0.275 ^a	0.742 ^a
U30, CMC 0.1%	0.269 ^a	0.730 ^a
U30, CMC 0.2%	0.290 ^a	0.709 ^a
U30, CMC 0.3%	0.306 ^a	0.693 ^a

The same letters in the same column does not indicate a significant difference ($p > 0.05$)

۳-۲- مدل سازی چروکیدگی

در شکل ۲ (الف، ب، ج و د)، علاوه بر تأثیر فراصوت و CMC بر میزان چروکیدگی تیمارهای مختلف، می توان برازش نسبت حجمی در مقابل محتوای رطوبت آن ها را نیز با مدل پیشنهادی (مدل ۸ جدول ۲) مشاهده کرد. در جدول ۴ (الف و ب)، پارامترهای آماری مدل های مختلف برای تیمار شاهد و سایر تیمارها آمده است. همان طور که در این جداول دیده می شود، مدل های جدید پیشنهادی به همراه سایر مدل های جدول ۴، پارامترهای آماری قابل قبولی را به خود اختصاص داده اند و این مطلب نشان می دهد که تمامی مدل های فوق می توانند داده های آزمایشی را به خوبی برازش کنند؛ اما در بین مدل های

جدول ۲، تنها مدل ۸، با توجه به نتایج حاصل از آنالیز رگرسیونی چندمتغیره و داشتن پارامترهای آماری قابل قبول (میانگین میزان ضریب تبیین، خطای ریشه متوسط مربعات و مجموع مربعات خطای مدل مذکور در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب ۰/۹۹۳۵، ۰/۰۰۱۹ و ۰/۰۲۲۴ می باشد)، به عنوان مدل پیشنهادی مناسب به منظور پیش بینی تغییرات چروکیدگی انگور در نظر گرفته شد. معادله های ۴ و ۵ نیز، به ترتیب ضرایب K_1 و K_2 مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل ۸ جدول ۲) را نشان می دهند. این ضرایب وابسته به زمان فراصوت هستند و اثر غلظت CMC بر آن ها معنی دار نیست.

Table 4 (a) Statistical parameters for various models based on Table 2 for control treatment (CMC concentration: 0; Ultrasound frequency: 0)

Model no.	R ²	SSE	RMSE
1	0.97	0.005	0.042
2	0.99	0.0009	0.030
3	0.99	0.001	0.029
4	0.99	0.001	0.025
5	0.99	0.001	0.031
6	0.96	0.006	0.047
7	0.93	0.015	0.070
8	0.98	0.003	0.024

Table 4 (b) Statistical parameters for various models based on Table 2 for different treatments

Model no	Ultrasound	CMC Concentration											
		0			0.1			0.2			0.3		
		R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE	R ²	SSE	RMSE
1	10	0.97	0.008	0.052	0.99	0.0004	0.012	0.99	0.002	0.025	0.99	0.00003	0.003
	20	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.0005	0.014	0.99	0.0001	0.006
	30	0.99	0.0002	0.009	0.99	0.0006	0.014	0.99	0.0002	0.009	0.99	0.0002	0.008
2	10	0.99	0.0004	0.021	1.00	0.00001	0.004	0.99	0.001	0.043	0.99	0.00003	0.005
	20	1.00	0.00001	0.004	0.99	0.00006	0.007	0.99	0.0005	0.022	0.99	0.00002	0.004
	30	1.00	0.000006	0.002	0.99	0.0003	0.019	0.99	0.00005	0.007	0.99	0.00001	0.004
3	10	0.99	0.0014	0.026	0.99	0.00007	0.006	0.99	0.003	0.042	0.99	0.00003	0.003
	20	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.0005	0.017	0.99	0.00002	0.003
	30	0.99	0.00004	0.004	0.99	0.0005	0.017	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.00004	0.004
4	10	0.92	0.022	0.086	0.96	0.010	0.059	0.98	0.006	0.045	0.98	0.006	0.045
	20	0.98	0.007	0.049	0.98	0.006	0.045	0.97	0.006	0.045	0.97	0.009	0.055
	30	0.98	0.003	0.026	0.97	0.006	0.044	0.98	0.005	0.040	0.97	0.010	0.058
5	10	0.99	0.0008	0.021	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.003	0.041	0.99	0.0003	0.0003
	20	0.99	0.00009	0.007	0.99	0.0001	0.008	0.99	0.0005	0.017	0.99	0.0002	0.003
	30	0.99	0.00003	0.004	0.99	0.0005	0.017	0.99	0.00008	0.006	0.99	0.0002	0.003
6	10	0.97	0.008	0.052	0.98	0.006	0.046	0.98	0.006	0.047	0.98	0.004	0.027
	20	0.99	0.002	0.031	0.99	0.002	0.029	0.98	0.005	0.041	0.98	0.004	0.040
	30	0.99	0.001	0.021	0.97	0.005	0.043	0.99	0.002	0.026	0.98	0.006	0.047
7	10	0.92	0.022	0.086	0.96	0.010	0.059	0.97	0.010	0.058	0.98	0.006	0.045
	20	0.98	0.007	0.049	0.98	0.006	0.045	0.97	0.006	0.045	0.97	0.009	0.055
	30	0.98	0.003	0.026	0.97	0.005	0.044	0.98	0.005	0.040	0.97	0.010	0.058
8	10	0.97	0.007	0.051	0.99	0.001	0.024	0.98	0.002	0.035	0.99	0.0003	0.010
	20	0.99	0.0006	0.014	0.99	0.0007	0.016	0.99	0.001	0.018	0.99	0.001	0.023
	30	0.99	0.0001	0.007	0.99	0.001	0.022	0.99	0.0002	0.008	0.99	0.001	0.022

در جدول ۵، مقادیر ضرایب K_1 و K_2 مدل پیشنهادی برای زمان‌های مختلف فراصوت آمده است.

$$K_2 = -0.000725 \times ULT^2 + 0.03342 \times ULT + 0.870516 \quad (۵)$$

(۴)

در معادله‌های فوق، ULT زمان فراصوت بر حسب دقیقه و a و b ضرایب مدل پیشنهادی می‌باشند.

$$K_1 = 0.000122 \times ULT^2 - 0.006161 \times ULT + 0.307247$$

Table 5 Magnitudes of K_1 and K_2 coefficients obtained from regression analysis for the proposed model (Model 8; Table 2)

Ultrasound (min)	K_1	K_2
0	0.306	0.864
10	0.260	1.151
20	0.230	1.229
30	0.233	1.226

ها صورت گرفت و نتایج حاصل از آن نشان داد که تنها، مدل پیشنهادی ۸، وابسته به متغیرهای مورد بررسی (زمان فراصوت و غلظت CMC) می‌باشد. به عبارت دیگر، هیچ‌کدام از ضرایب سایر مدل‌ها به جز مدل ۸، به شکل تابعی از زمان فراصوت نبودند. بنابراین، مدل ۸، به صورت تابعی از زمان فراصوت با در نظر گرفتن غلظت CMC، به دست آمده و به عنوان مدل پیشنهادی مناسب برای توصیف چروکیدگی انگور معرفی شد (معادله‌های ۴ و ۵ و جدول ۵). جدول ۶، مقادیر چروکیدگی پیش‌بینی شده توسط مدل توسعه یافته (مدل پیشنهادی ۸) و مقادیر آزمایشی را در زمان‌های مختلف فراصوت و محتوای رطوبت نشان می‌دهد. همانگونه که از این جدول نیز پیداست، با کاهش محتوای رطوبت، میزان چروکیدگی (نسبت حجمی) نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

در مورد وابستگی ضرایب K_1 و K_2 مدل پیشنهادی ۸ به زمان فراصوت باید افزود که چون در آنالیزهای رگرسیونی چندمتغیره انجام شده، اثر هم‌زمان دو پیش‌تیمار فراصوت و CMC، بر ضرایب مدل مذکور و سایر مدل‌های جدول ۲ معنی‌دار نبود، به همین دلیل، آنالیز رگرسیونی چندمتغیره به منظور پیدا کردن رابطه‌ای ریاضی بین ضرایب مدل‌های بیان شده به صورت تابعی از زمان فراصوت و هم‌چنین، در نظر گرفتن غلظت CMC در ضرایب K_1 و K_2 انجام شد. بدین ترتیب که به عنوان مثال، برای زمان ۱۰ دقیقه فراصوت، از ضرایب K_1 و K_2 ، به طور مجزا و در تمام تیمارهایی که در آن‌ها از زمان ۱۰ دقیقه فراصوت استفاده شده بود (تیمارهای ۲، ۵، ۶ و ۷ در جدول ۱)، میانگین‌گیری شد. در ادامه، با استفاده از این داده‌ها، آنالیز رگرسیونی چندمتغیره بین زمان فراصوت و ضرایب مدل-

Table 6 Experimental and predicted shrinkage coefficients from the proposed model (Model 8; Table 2)

Ultrasound (min)	0		10		20		30	
	Exp	Pre	Exp	Pre	Exp	Pre	Exp	Pre
Moisture content (g/g db)								
2	0.961	0.982	0.953	1.008	1.008	0.941	0.827	0.952
1.5	0.807	0.766	0.870	0.839	0.843	0.771	0.685	0.780
0.5	0.636	0.633	0.766	0.675	0.670	0.610	0.542	0.618
0.33	0.481	0.474	0.454	0.377	0.340	0.328	0.280	0.333
0.24	0.386	0.423	0.328	0.333	0.300	0.289	0.247	0.293
R^2	0.98		0.96		0.99		0.99	

M	جرم پیکنومتر حاوی نمونه و تولوئن
m'	جرم نمونه غذایی
m''	جرم پیکنومتر خالی
R ²	ضریب تبیین
RMSE	خطای ریشه متوسط مربعات
SSE	مجموع مربعات خطا

۴- نتیجه‌گیری

چروکیدگی محصول یکی از عیوب مهم حین خشک‌شدن با استفاده از جریان هوای داغ و یک عامل محدودکننده در انتقال جرم است که باعث افت ویژگی‌های کمی و کیفی محصول و افزایش مدت زمان لازم برای خشک‌شدن می‌شود. این افزایش در زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن به این دلیل است که در جریان چروکیدگی، مساحت سطح محصول به دنبال کاهش حجم آن، کاهش می‌یابد و در نتیجه مسیر موردنیاز برای خروج مولکول‌های آب، حین خشک‌شدن غیریکنواخت می‌شود. در بررسی اثر دو پیش‌تیمار فراصوت و CMC بر میزان چروکیدگی نمونه‌های انگور، مشخص شد که افزایش زمان فراصوت و کاهش غلظت CMC، باعث افزایش میزان چروکیدگی این نمونه‌ها می‌شود. با این حال، افزایش میزان چروکیدگی با افزایش زمان فراصوت، در مقایسه با تیمار شاهد، از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. مدل‌سازی پدیده چروکیدگی به منظور شناخت تغییرات حجمی محصول در طول خشک‌شدن نشان داد که مدل ۸ (جدول ۲) علاوه بر داشتن پارامترهای آماری قابل قبول، وابسته به زمان فراصوت نیز است و از این رو می‌تواند به عنوان مدلی مناسب برای برازش داده‌های آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد.

راهنمای استفاده از جداول و نمودارها

- ## ۵- منابع
- [1] Mayor, L. and Sereno, A.M. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
 - [2] 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.
 - [3] Bhaskaracharya, R., Kentish, S. and Ashokkumar, M. 2009. Selected applications of ultrasonics in food processing. *Food Engineering Reviews*, 1, 31-49.
 - [4] Doymaz, I. 2006. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering*, 76, 212-217.
 - [5] Yildirim, A., Öner, M.D. and Bayram, M. 2011. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. *Journal of Food Engineering*, 104, 134-142.
 - [6] Cárcel, J.A., Benedito, J., Rosselló, C. and Mulet, A. 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 472-479.
 - [7] Fernandes, F.A.N., Linhares J.F.E. and Rodrigues, S. 2008. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15, 1049-1054.
 - [8] Fernandes, F.A.N. and Rodrigues, S. 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
 - [9] Ortuno, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A. and Riera, E. 2010. Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3, 153-159.
 - [10] Rodrigues, S., Oliveira, F.I.P., Gallão, M.I. and Fernandes, F.A.N. 2009a. Effect of

عنوان	علائم اختصاری
نسبت حجمی و ضریب چروکیدگی	D_R, Sh
چگالی ظاهری	ρ_b
چگالی تولوئن	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 تولوئن جابه‌جاشده	M

- dehydration of papaya. *Food Research International*, 43, 1656-1660.
- [21] Emam-Djomeh, Z., Dehghannya, J. and Sotudeh Gharabagh, R. 2006. Assessment of osmotic process in combination with coating on effective diffusivities during drying of apple slices. *Drying Technology*, 24, 1159-1164.
- [22] Souraki, B.A. and Mowla, D. 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.
- [23] Koç, B., Eren, İ. and Kaymak Ertekin, F. 2008. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.
- [24] Ochoa, M.R., Kessler, A.G., Pirone, B.N., Márquez, C.A. and De Michelis, A. 2007. Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (*Prunus avium*) during convective dehydration with very simple models. *Journal of Food Engineering*, 79, 657-661.
- [25] Hatamipour, M.S., Hadji Kazemi, H., Nooralivand, A. and Nozarpoor, A. 2007. Drying characteristics of six varieties of sweet potatoes in different dryers. *Food and Bioproducts Processing*, 85, 171-177.
- [26] Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.
- [27] Ramos, I.N., Silva, C.L.M., Sereno, A.M. and Aguilera, J.M. 2004. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. *Journal of Food Engineering*, 62, 159-164.
- [28] Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R. and Belghith, A. 2007. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 79, 47-56.
- [29] Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J. and Kouliadiati, J. 2008. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 88, 429-437.
- [30] Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W. and Belghith, A. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying immersion time in osmosis and ultrasound on papaya cell structure during dehydration. *Drying Technology*, 27, 220-225.
- [11] Rodrigues, S., Gomes, M.C.F., Gallão, M.I. and Fernandes, F.A.N. 2009b. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89, 665-670.
- [12] Azsoubel, P.M., Baima, M.d.A.M., Amorim, M.D.R. and Oliveira, S.S.B. 2010. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 97, 194-198.
- [13] Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N. and Witrowa-Rajchert, D. 2012. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113, 427-433.
- [14] Vázquez, M.B., Flores, S.K., Campos, C.A., Alvarado, J. and Gerschenson, L.N. 2009. Antimicrobial activity and physical properties of chitosan-tapioca starch based edible films and coatings. *Food Research International*, 42, 762-769.
- [15] Carneiro-da-Cunha, M.G., Cerqueira, M.A., Souza, B.W.S., Souza, M.P., Teixeira, J.A. and Vicente, A.A. 2009. Physical properties of edible coatings and films made with a polysaccharide from *Anacardium occidentale* L. *Journal of Food Engineering*, 95, 379-385.
- [16] Dehghannya, J., Emam-Djomeh, Z., Sotudeh-Gharebagh, R. and Ngadi, M. 2006. Osmotic dehydration of apple slices with carboxy-methyl cellulose coating. *Drying Technology*, 24, 45-50.
- [17] Mellema, M. 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 364-373.
- [18] Baldwin, E.A., Nisperos, M.O., Chen, X. and Hagenmaier, R.D. 1996. Improving storage life of cut apple and potato with edible coating. *Postharvest Biology and Technology*, 9, 151-163.
- [19] Toğrul, H. and Arslan, N. 2004. Extending shelf-life of peach and pear by using CMC from sugar beet pulp cellulose as a hydrophilic polymer in emulsions. *Food Hydrocolloids*, 18, 215-226.
- [20] García, M., Díaz, R., Martínez, Y. and Casariego, A. 2010. Effects of chitosan coating on mass transfer during osmotic

- [34] AOAC. 1990. Official Methods of Analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- [35] Yan, Z., Sousa –Gallagher, M.J. and Oliveira, F.A.R. 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84, 430-440.
- [36] Steel, R.G.D., Torrie, J.H. and Dickey, D.A. 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill.
- [37] Batista, L.M., da Rosa, C.A. and Pinto, L.A.A. 2007. Diffusive model with variable effective diffusivity considering shrinkage in thin layer drying of chitosan. *Journal of Food Engineering*, 81, 127-132.
- of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55, 323-330.
- [31] Ramos, I.N., Miranda, J.M.R., Brandão, T.R.S. and Silva, C.L.M. 2010. Estimation of water diffusivity parameters on grape dynamic drying. *Journal of Food Engineering*, 97, 519-525.
- [32] Ghanbarzadeh, B., Almasi, H. and Entezami, A.A. 2010. Physical properties of edible modified starch/carboxymethyl cellulose films: *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 697-702.
- [33] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H.R, Hamdami, N., alati, F.T. and Moghaddam, M. 2010. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters: *International Journal of Agriculture and Biology*, 12, 171-178.

Shrinkage empirical modeling during drying of grapes pretreated with ultrasound and carboxymethyl cellulose

Tahmasebi-Pour, M. ¹, Dehghannya, J. ^{2*}, Seiedlou-Heris, S. S. ³,
Ghanbarzadeh, B. ⁴

1. M. Sc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3. Associate Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

4. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 2014/05/25 Accepted: 2014/12/09)

High temperatures during drying, with loss of water in the meantime, cause tension in the food, change the microstructure and reduce the volume (shrinkage). In this study, the effect of ultrasonic pretreatment at 10, 20 and 30 minutes and carboxymethyl cellulose with concentrations of 0.1, 0.2 and 0.3 percent on grapes shrinkage during drying and its modeling was examined. In this study, pretreated grapes were dried in a tunnel dryer and their volumetric changes were measured. Results showed that all the pretreatments have higher shrinkage compared with control samples, but this difference was not statistically significant. Also, by increasing ultrasound time, the shrinkage of the samples increased compared with control treatment. Control and pretreated samples with ultrasound for 30 minutes had the lowest and highest rate of shrinkage, respectively, in the various studied treatments. In the samples pretreated with both ultrasound and CMC, it was observed that by increasing the concentration of CMC, shrinkage of the samples decreases compared to its lower concentrations.

Keywords: Drying, Ultrasound, Carboxymethyl cellulose, Shrinkage, Modeling

* Corresponding Author E-Mail Address: J-dehghannya@tabrizu.ac.ir