استفاده از امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی (مطالعه موردی: تولید چیپس سیب)

بهجت تاج‌الدین*
دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
behjat.tajeddin@yahoo.com

زهرا رفیعی
کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج
zrafiee23@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۲

چکیده

حفظ و نگهداری محصول‌های غذایی از جمله محصول‌های باغی، با توجه به رشد جمعیت و کمبود مواد غذایی بسیار اهمیت دارد، و روز به روز موضوع جلوگیری از اتلاف مواد غذایی و افزایش زمان نگهداری آن‌ها به دلیل رشد صادرات و به‌دست آوردن بازارهای پایدار، بیشتر نمایان می‌شود. یکی از راه‌های جلوگیری از اتلاف مازاد محصول و افزایش طول عمر آن، تبدیل محصول خام به محصول فرآوری شده از جمله محصول‌های خشک است. مزایای تولید محصول‌های خشکی چون انواع تنقلات و اسنک‌ها، علاوه‌بر دارا بودن ارزش غذایی بالا، حجم و فضای کم این مواد نسبت به مواد خام اولیه است که درنتیجه می‌توان از آن‌ها در موارد متعددی چون سفرهای هوایی، سفرهای فضایی و مواقع جنگ استفاده کرد. با توجه به این که امروزه از امواج فراصوت به عنوان کمک فرایند در کنار سایر فرایندهای مواد غذایی از جمله فرایند خشک کردن استفاده می‌شود؛ این مقاله به کاربرد امواج فراصوت در خشک کردن مواد غذایی و تأثیر آن به عنوان یک روش غیرتخریبی در بهبود کیفیت فرآورده‌های خشک، می‌پردازد و به عنوان مثال، فرایند تولید چیپس سیب را با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت بررسی می‌کند.

واژگان کلیدی: امواج فراصوت، خشک کردن، صنایع تبدیلی، کیفیت

۱. مقدمه

خشک‌کردن یکی از روش‌های قدیمی و مرسوم برای نگهداری محصول‌های کشاورزی است. مهم‌ترین هدف خشک‌کردن، جداکردن آب از ماده غذایی و در نتیجه افزایش مدت زمان ماندگاری و جلوگیری از فساد ماده غذایی است. علاوه‌بر این، هنگام خشک‌کردن، وزن و حجم ماده غذایی کاهش پیدا کرده و در نتیجه هزینه‌های بسته‌بندی، حمل و نقل، انبارداری و توزیع (پخش) مواد غذایی کاهش می‌یابد [۱].

متداول‌ترین روش خشک‌کردن مواد غذایی، استفاده از جریان هوای داغ با جابه‌جایی (کنوکسیون[۱]) 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 علاوه‌بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما، صرف نظر از اندازه و شکل محصول، و عدم نیاز به تماس مستقیم، دارای معایبی چون نیاز به زمان زیادتر و دمای بالاتر برای خشک کردن محصول طی دوره سرعت نزولی است. علاوه‌بر این، دماهای بالا باعث چروکیدگی زیاد محصول، کاهش جذب مجدد آب، کاهش ارزش تغذیه‌ای و مصرف انرژی بالا می‌شود [۲].

چروکیدگی محصول از عیوب مهم حین خشک شدن با استفاده از جریان هوای داغ و یک عامل محدودکننده در انتقال جرم است که باعث افت خصوصیات کمی و کیفی محصول و افزایش مدت زمان لازم برای خشک شدن آن 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 [۳]. از دیگر عیوب خشک شدن تحت جریان هوای داغ، ایجاد رنگ نامطلوب در محصول خشک شده است. رنگ، یکی از ویژگی‌های کیفی بسیار مهم در میوه‌های خشک شده، ممکن است طی خشک‌کردن و نگهداری طولانی مدت، به علت برخی واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی تغییر کند. رنگ نامطلوب از دید مصرف‌کننده، ناخوشایند بوده و نشانه پایان زمان ماندگاری است. علاوه‌بر رنگ، خصوصیات حسی محصول خشک شده نیز مانند طعم، بو و مزه، تأثیر به‌سزایی در بازارپسندی آن دارد. در حقیقت، رنگ و ظاهر ماده غذایی تحت تأثیر نوع آماده‌سازی اولیه قرار می‌گیرد و در تعیین قیمت نهایی محصول، نقش زیادی دارد [۴]. برای کاهش معایب مذکور، می‌توان از پیش‌تیمارهای مختلف از جمله فرایند فراصوت (اولتراسوند)، قبل از عمل خشک‌کردن با جریان هوای داغ، استفاده کرد [۵–۷].

۲. فرایند فراصوت و مزایای آن

فراصوت شامل امواج صوتی و ارتعاشات مکانیکی است که در انواع محیط‌های جامد، مایع و گاز با فرکانسی بیش از محدوده شنوایی انسان انتشار می‌یابد. این محدوده از فردی به فرد دیگر متفاوت بوده و معمولا بیش از ۲۰ کیلوهرتز است [۹–۸].

امروزه، از امواج فراصوت در مواد غذایی از جمله برای از بین بردن میکروارگانیزم‌ها، غیرفعال کردن آنزیم‌ها، استخراج انواع ترکیبات، امولسیون کردن، صنعت بسته‌بندی، فرایند انجماد و خشک کردن استفاده می‌شود [۱۰].

کاهش آب در دسترس[۲] یا خشک کردن، یکی از راه‌های حفظ مواد غذایی است. آب در مواد غذایی جامد به یک سیال (گاز یا مایع) منتقل می‌شود. طی این فرایند، مقاومت داخلی و خارجی بر انتقال آب از غذا تأثیر می‌گذارد. بنابراین، هر وسیله‌ای برای کاهش این مقاومت‌ها، موجب بهبود فرایند می‌شود و به‌نظر می‌رسد فراصوت، راه حل کاهش این مقاومت است. فراصوت، امواجی است که هنگام استفاده در یک بستر ماده غذایی، اثرات متفاوتی را ایجاد می‌کند. از میان این اثرات، آن‌هایی که در ارتباط با انتقال جرم هستند شامل تکان دادن در حد فاصل مواد یا به اصطلاح "اثر اسفنجی" و کاویتاسیون است [۱۱]. بنابراین، امواج فراصوت، باعث یک سری انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب سریع شده (اثر اسفنجی) و رطوبت داخل لوله‌های موئین را با ایجاد اختلاف فشار مکش لوله موئین حفظ می‌کند [۱۲]. علاوه‌بر این، فراصوت باعث ایجاد کاویتاسیون (حفره) در داخل ماده غذایی می‌شود که ممکن است برای جداسازی آب متصل، مفید باشد [۱۳].

از دیگر اثرات فراصوت، تنش سطحی و تغییر شکل مواد جامد متخلل است که مسئول ایجاد کانال‌های میکروسکوپی، کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش انتقال جرم کنوکسیونی در مواد غذایی هستند [۱۴].

مزیت دیگر استفاده از فراصوت، نیاز به افزایش کمتر دما در طول فرایند است. در نتیجه، فراصوت بدون داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی، ممکن است به عنوان یک پیش‌تیمار در خشک کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود. چراکه به طور کلی، باعث افزایش سرعت و کاهش دمای مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود [۱۶-۱۵].

تحقیقات نشان داده است که فراصوت با افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و افزایش سرعت انتشار مولکول‌های آب در حین خشک شدن، باعث کاهش چروکیدگی و بهبود خصوصیات رنگی و حسی محصول خشک شده می‌شود. جذب مجدد آب، یکی از مهم‌ترین خصوصیات تعیین‌کننده در مواد غذایی خشک شده است. استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، جذب مجدد آب محصول خشک شده را با ایجاد تنش‌های داخلی و ایجاد منفذهای ریز در داخل ماده غذایی، بهبود می‌دهد [۵].

۳. پیش‌تیمار فراصوت برای خشک کردن

همان‌طورکه بیان شد، فراصوت به عنوان یک فناوری درحال ظهور و امیدوار کننده در صنایع غذایی محسوب می‌شود. قابلیت این فناوری بر توانایی آن در سرعت بخشیدن به فرایند انتقال جرم در سیستم‌های جامد-مایع و جامد-گاز تکیه می‌کند [۱۶]. فراصوت، برای کاهش آب در سیستم‌های جامد-گاز مانند خشک کردن پیاز و هویج اعمال شده است. در سیستم‌های جامد-مایع، فراصوت برای محصول‌های غوطه‌ور شده در محلول‌های هیپرتونیک[۳] یا در محلول‌های قندی[۴] برای میوه‌هایی مانند سیب، یا در آب نمک[۵] در مورد پنیر یا گوشت استفاده می‌شود. اگر مقدار توان آستانه[۶] برای محصول استفاده شود، افزایش مقدار انتقال جرم به‌دست می‌آید [۱۱]. بنابراین، فراصوت با فرکانس بالا می‌تواند در فرایند خشک کردن مواد غذایی به عنوان یک پیش‌تیمار یا برای بهبود فرایند اصلی و خشک‌کن‌های سنتی استفاده شود.

امواج فراصوت در فرکانس پایین نیز می‌تواند به عنوان یک روش تشخیصی برای اندازه‌گیری خواص محصول‌های خشک شده نهایی و کنترل فرایند خشک کردن به کار رود. پیش‌تیمار فراصوت دارای کاربردهای مستقیم و غیرمستقیم است. پیش‌تیمار مستقیم فراصوت، فرایند خشک کردن را با تشدید انتقال حرارت و جرم بهبود می‌بخشد، استفاده‌های غیرمستقیم این فناوری شامل امواج فراصوت، به عنوان بخشی از سیستم‌های خشک کردن مانند نازل‌های خشک‌کن‌های پاششی[۷] یا بخش‌های انجماد در سیستم‌های خشک‌کن‌های انجمادی[۸] است [۱۷].

در مورد کاربرد فراصوت به عنوان پیش‌تیمار قبل از خشک کردن با جریان هوا، تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. طی مطالعه‌ای، تأثیر فراصوت و آبگیری اسمزی با محلول ساکارز به عنوان پیش‌تیمار برای خشک کردن موز بررسی شد [۷]. نتایج نشان داد که نمونه‌هایی که در معرض فراصوت قرار گرفتند، مواد جامد محلول خود را از دست داده و باعث تولید محصول خشک شده‌ای با مقدار قند پایین شدند. درحالی‌که استفاده از پیش‌تیمار آبگیری اسمزی، مقدار قابل توجهی قند وارد میوه کرده و در نتیجه یک محصول شیرین حاصل شد. هر دو پیش‌تیمار، ضریب انتشار مؤثر رطوبت را افزایش دادند ولی پیش‌تیمار فراصوت، این ضریب را بیشتر افزایش داد. با اینکه هر دو پیش‌تیمار، کل زمان فرایند (پیش‌تیمار + خشک کردن با هوا) را در مقایسه با نمونه شاهد کاهش دادند.

در تحقیقی دیگر، نمونه‌های قارچ دکمه‌ای، کلم بروکلی، و گل کلم در معرض امواج فراصوت با شدت ۲۰ و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳ و ۱۰ دقیقه قرار گرفته و ویژگی آبگیری مجدد آن‌ها با نمونه‌های بدون اعمال پیش‌تیمار، نمونه‌های خشک شده با استفاده از خشک‌کن انجمادی، و نمونه‌های آنزیم‌بری شده مقایسه شد [۶]. نتایج نشان داد که میزان انتقال جرم در نمونه‌های فراصوت شده افزایش یافته و زمان خشک شدن با هوای داغ در آن‌ها کاهش می‌یابد. نمونه‌های خشک

شده با خشک‌کن انجمادی همراه با نمونه‌های فراصوت شده، بیشترین قابلیت را در آبگیری مجدد از خود نشان دادند. این نتیجه، بیانگر چروکیدگی و آسیب بافتی کم‌تر به وسیله فراصوت و قابلیت بالای این نمونه‌ها در آبگیری مجدد است.
در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر پیش‌تیمار فراصوت و آبگیری اسمزی بر ساختار سلولی خربزه مطالعه شد. در پیش‌تیمار فراصوت، نمونه‌ها در آب مقطر به مدت ۲۰ و ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز قرار گرفتند. در پیش‌تیمار آبگیری اسمزی نیز، نمونه‌ها در داخل محلول اسمزی ساکارز با بریکس ۷۰ غوطه‌ور شده و با هم‌زن مکانیکی برای یکسان‌سازی غلظت در تمام نقاط محلول، هم زده شدند. بعد از برداشتن نمونه‌ها از محلول اسمزی و حمام فراصوت، نمونه‌ها در داخل آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. نتایج نشان داد که تفاوت قابل توجه‌ای بین دو پیش‌تیمار وجود دارد. در طول آبگیری اسمزی، نمونه آب از دست داده و قند جذب می‌کند درحالی‌که در طول پیش‌تیمار فراصوت، نمونه آب جذب کرده و قند از دست می‌دهد. هر دو پیش‌تیمار، ضریب انتشار مؤثر رطوبت در طول مرحله خشک کردن با هوا را افزایش می‌دهند [۱۸].
علاوه‌بر موارد فوق، تأثیر پیش‌تیمار فراصوت روی خشک کردن آناناس نیز بررسی گردید [۱۹]. در این تحقیق، نمونه‌ها یک بار در دستگاه فراصوت حاوی آب مقطر و بار دیگر در دستگاه فراصوت حاوی محلول اسمزی با غلظت مواد جامد محلول (درجه بریکس) ۳۵ و ۷۰ درصد غوطه‌ور شده و به مدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز قرار گرفتند و در ادامه، در آونی با دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. نتایج نشان داد که در پیش‌تیمار فراصوت در حضور آب مقطر، تغییرات جزئی در محتوای رطوبتی میوه رخ می‌دهد؛ درحالی‌که استفاده از فراصوت به همراه محلول اسمزی، علاوه‌بر افزایش خروج رطوبت، باعث افزایش ورود محلول اسمزی به داخل نمونه نیز می‌شود. در این تحقیق، هنگامی‌که فقط از محلول اسمزی با بریکس ۳۵ درصد استفاده شد، مقدار کاهش رطوبت بیشتر از حالت استفاده از تلفیق فراصوت و محلول اسمزی بود.
اشراقی و همکاران در سال ۱۳۹۰، اثر پیش‌تیمار ترکیبی اسمز- فراصوت را روی خشک شدن ورقه‌های کیوی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش بریکس و مدت زمان اسمز به دلیل ایجاد لایه‌ای از شکر، میزان باز جذب کاهش می‌یابد و در مورد فراصوت به این نتیجه رسیدند که اعمال فراصوت ۳۰ دقیقه به دلیل تشکیل کانال‌های میکروسکوپی بیشتر و ایجاد بافت متخلخل‌تر، توانسته است قابلیت جذب آب بهتری نسبت به زمان ۱۰ و ۲۰ دقیقه داشته باشد ولی با توجه به ترکیبی بودن این قضیه میزان مواد جامد وارد شده به داخل فضای متخلخل بیشتر شده و باز جذب کاهش می‌یابد و با اعمال فراصوت ۱۰ دقیقه، در هر یک از محلول‌های اسمزی با بریکس ۳۰ ، ۵۰ و ۷۰ به دلیل جذب مواد جامد کمتر از محلول اسمزی و نبود لایه‌های قندی، قابلیت جذب آب بیشتر است [۲۰].
الله‌پناه و شهاب لواسانی در سال ۱۳۹۳، و اینانلو و توکلی‌پور در سال ۱۳۹۳، به ترتیب روی استفاده از پیش‌تیمارهای اسمزی و فراصوت برای میوه‌های به و خرمالو، کار کرده‌اند و به نتایج مشابه بالا دست یافته‌اند [۲۲-۲۱].
کاربرد فراصوت، به عنوان روشی برای بهبود انتقال جرم در مرحله اول فرایند اسمز همراه با خشک کردن، به منظور کاهش قندهای با کالری بالا در انگور، بررسی شد. انگور تازه، تحت حمام آب مقطر در دمای اتاق با استفاده از فراصوت (۴۰ کیلوهرتز) با استفاده از نسبت وزنی میوه؛ حلال ۱: ۴، در فواصل منظم ۰-۳۰ دقیقه قرار گرفت. سپس، با خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به کشمش تبدیل شد. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش قند وقتی به‌دست آمد که از فراصوت استفاده شده بود [۲۳].

نواسکا و همکاران در سال ۲۰۱۲ نیز روی خواص کیفی سیب خشک شده با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت در فرکانس ۳۵ کیلوهرتز به مدت ۱۰، ۲۰، و ۳۰ دقیقه مطالعه کردند. نتایج نشان داد که تیمار فراصوت در مقایسه با شاهد (بدون استفاده از فراصوت)، زمان خشک کردن را تا ۳۱ درصد کاهش داد. همچنین، در سیب‌های تیمار شده با فراصوت، ۹ تا ۱۱درصد جمع شدگی بیشتر، ۶ تا ۲۰ درصد دانسیته کمتر، و ۹ تا ۱۴ درصد تخلخل بیشتری نسبت به شاهد، مشاهده شد [۲۴].

٤. تولید چیپس سیب با استفاده از پیش‌تیمار فراصوت

سیب خشک[۹]، فرآورده‌ای است که در نتیجه فرآوری میوه‌های تمیز و سالم سیب، تحت شرایط خوب ساخت[۱۰]، شستشو، دانه‌گیری، برش (با/ بدون پوست) و خشک کردن به روش آفتابی و یا سایر روش‌ها به‌دست می‌آید. چیپس سیب[۱۱]، نوعی اسنک کم کالری با مواد طعم‌دهنده مختلف است [۲۵].

با توجه به خطر رو به رشد چاقی، بیماری‌های قلبی– عروقی و سرطان، تمرکز بسیاری از تحقیقات در حوزه صنایع تبدیلی بر تهیه فرآورده‌های سالم‌تر و کم‌چرب‌تر است. به عنوان مثال، چیپس میوه‌ها شاید بتواند جایگزین مناسبی برای چیپس سیب‌زمینی باشد. به طور کلی، چیپس میوه، از میوه‌هایی تهیه می‌شود که قسمت خوراکی آن پس از برداشت، به طور طبیعی رطوبت فراوانی دارد و بخش اعظم این رطوبت با خشک کردن به شیوه‌های گوناگون برای افزایش عمر نگهداری یا کاربردهای دیگر، از میوه‌ها گرفته می‌شود. با توجه به این‌که چیپس سیب عاری از هرگونه چربی و روغن بوده و دارای بافت نرم و لطیف، رنگ روشن و طعمی خوشمزه است، و نیز طی فرایند تولید، ماده اولیه شکل خود را از دست نمی‌دهد، بنابراین، توسعه و گسترش تولید متنوع آن با معرفی طعم‌های جدید منطقی و ضروری به نظر می‌رسد [۲۶].

بدین منظور، از نمونه‌های سیب بومی ایران، چیپس تهیه شد. برای این کار، ابتدا میوه‌ها با آب شسته و در دمای محیط خشک شدند. سپس، با استفاده از یک دستگاه برش‌دهنده معمولی (اسلایسر)، به قطعه‌های با ضخامت ۳ میلی‌متر برش داده شدند. برای کاهش زمان خشک کردن و بهبود کیفیت میوه‌ی خشک شده، از پیش‌تیمار فراصوت با استفاده از دستگاه فراصوت (شرکت Hielscher، مدل UP 200H، ساخت آلمان) با سرعت ۳۵ کیلوهرتز به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شد. نمونه‌های سیب پس از فراصوت، در خشک‌کن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۸۰ الی ۲۴۰ دقیقه قرار گرفتند تا رطوبت نمونه‌ها به ۲۰ درصد برسد. شکل ۱، نمونه‌هایی از چیپس تهیه شده از سیب را نشان می‌دهد. سپس، خصوصیات چیپس حاصل مشتمل بر میزان رطوبت، محاسبه جذب مجدد آب (به‌صورت نسبت وزن نمونه آب جذب کرده به وزن نمونه خشک؛ [۵])، محاسبه چروکیدگی محصول (به صورت نسبت حجم نهایی (محصول خشک شده) و حجم اولیه آن (محصول تازه) [۲۷])، بافت به روش برشی[۱۲] (با دستگاه بافت‌سنج Hounsfield، مدل H5KS، ساخت انگلستان)، رنگ (با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج مینولتا، مدل CR-۴۰۰، ساخت ژاپن)، و ارزیابی حسی (با روش امتیازبندی هدونیک پنج نقطه‌ای[۱۳] برای هر یک از توصیف‌گرهای حسی طعم و مزه، تردی، رنگ، شکل، عطر و رایحه) اندازه‌گیری گردید.

شکل ۱. چیپس سیب تهیه شده با پیش‌تیمار فراصوت

نتایج نشان داد که چیپس حاصل از تیمار فراصوت نسبت به شاهد (بدون استفاده از تیمار فراصوت)، میزان باز جذب آب بیشتر؛ میزان سفتی بافت کم‌تر؛ تغییرات رنگ کم‌تر؛ و میزان چروکیدگی بافت کم‌تری دارد. علاوه‌بر این، میزان امتیاز پذیرش کلی در نمونه پیش‌تیمار شده با فراصوت نسبت به شاهد بیشتر بود.

۵. نتیجه‌گیری

به طور کلی، فناوری فراصوت به طور مستقیم یا غیرمستقیم به عنوان یک پیش‌تیمار در بسیاری از کاربردهای خشک کردن و/یا حذف آب محصول استفاده می‌شود. پیش‌تیمار مستقیم، فرایند خشک کردن را با تشدید انتقال جرم و حرارت در ساختار مواد بهبود می‌بخشد. پیش‌تیمار فراصوت می‌تواند قبل از خشک شدن با جریان هوا و حذف آب اسمزی میوه‌ها و سبزی‌ها استفاده شود. مطالعات نشان می‌دهد که قابلیت انتشار آب مؤثر محصول، پس از اعمال فراصوت افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که حدود ۱۶٪ زمان خشک شدن کاهش یابد. نتایج حاصل از مطالعه پژوهش‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که در تهیه مواد غذایی خشک، حداقل تأثیر استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، کاهش زمان خشک شدن است.

در مورد چیپس سیب، مقایسه بین نمونه‌های با فراصوت و بدون فراصوت نشان داد که تیمار فراصوت با ایجاد کانال میکروسکوپی خروج آب را راحت‌تر کرده و در نتیجه سبب افزایش شاخص بازجذب آب شد. از نظر سفتی بافت، چیپس تهیه شده از پیش‌تیمار فراصوت به سبب ایجاد منافذ و سپس ضعیف بودن دیواره منافذ در اثر فشار متلاشی شده و به سرعت شکسته می‌شد. با توجه به افزایش سرعت خشک کردن در هنگام استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، میزان چروکیدگی نیز کاهش یافت. پیش‌تیمار فراصوت با افزایش سرعت خشک کردن، سبب بهبود رنگ گردید. با توجه به این که استفاده از پیش‌تیمار فراصوت، مدت زمان فرایند خشک شدن را کوتاه کرده و کیفیت چیپس حاصل را بهبود می‌بخشد؛ در صورت استفاده هم‌زمان از تیمارهای دیگری چون مواد پودری طعم‌دهنده (به عنوان مثال دارچین) یا اسیدهای خوراکی، از بازارپسندی بیشتری برخوردار خواهد بود.

٦. مآخذ

[1] Ibitwar, B. B., Bhupinder Kaur, Sadhna Arora, and Pankaj B. Pathare. "Osmo-Convective Dehydration of Plum (Prunus salicina L)." *International journal of food engineering,* Vol.4, No.8, 2008.

[2] Gowen, A., N. Abu-Ghannam, J. Frias, and J. Oliveira. "Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (Cicer arietinum L.) undergoing microwave–hot air combination drying." *Trends in Food Science & Technology,* Vol.17, No.4, 2006, pp.177-183.

[3] Figiel, Adam. "Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods." *Journal of Food Engineering,* Vol.98, No.4, 2010, pp.461-470.

[4] Chemat, Farid, and Muhammed Kamran Khan. "Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction." *Ultrasonics sonochemistry,* Vol.18, No.4, 2011, pp.813-835.

[5] Deng, Yun, and Yanyun Zhao. "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,* Vol.41, No.9, 2008, pp.1575-1585.

[6] Jambrak, Anet Režek, Timothy J. Mason, Larysa Paniwnyk, and Vesna Lelas. "Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties." *Journal of Food Engineering,* Vol.81, No.1, 2007, pp.88-97.
[7] Fernandes, Fabiano AN, and Sueli Rodrigues. "Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana." *Journal of Food Engineering,* Vol.82, No.2, 2007, pp.261-267.
[8] Azizi, Rezvan, and Asgar Farahnaky. "Ultrasound assisted cold gelation of kappa carrageenan dispersions." *Carbohydrate polymers,* Vol.95, No.1, 2013, pp.522-529.
[9] Camino, Nerina A., Oscar E. Pérez, and Ana MR Pilosof. "Molecular and functional modification of hydroxypropylmethylcellulose by high-intensity ultrasound." *Food Hydrocolloids,* Vol.23, No.4, 2009, pp.1089-1095.
[۱۰] یوسف‌زاده ثانی، س.، مرتضوی، س.ع.، شیخ‌الاسلامی، ز.، کریمی، م.، و الهامی‌راد، ا.ح.، "کاربردهای امواج فراصوت در صنایع غذایی و تأثیرآن در بهبود کیفیت فرآورده های سوخاری"، *صوت و ارتعاش*، س.۶، ش.۱۲، ۱۳۹۶، ص. ۱۱۹-۱۰۵.
[11] Mulet, A., J. A. Cárcel, N. Sanjuan, and J. Bon. "New food drying technologies-Use of ultrasound." *Food Science and Technology International,* Vol.9, No.3, 2003, pp.215-221.
[12] Fernandes, Fabiano AN, and Sueli Rodrigues. "Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits." *Drying Technology,* Vol.26, No.12, 2008, pp.1509-1516.
[13] Soria, Ana Cristina, and Mar Villamiel. "Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review." *Trends in food science & technology,* Vol.21, No.7, 2010, pp.323-331.
[14] De la Fuente-Blanco, S., E. Riera-Franco De Sarabia, V. M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, and J. A. Gallego-Juárez. "Food drying process by power ultrasound." *Ultrasonics,* Vol.44, 2006, pp.523-e527.
[15] Sun, W.D., *Emerging technology for food processing* (Chapter 13), 2005, pp.338-339.
[16] Rodríguez, Óscar, Valeria Eim, Carmen Rosselló, Antoni Femenia, Juan A. Cárcel, and Susana Simal. "Application of power ultrasound on the convective drying of fruits and vegetables: effects on quality." *Journal of the Science of Food and Agriculture,* Vol.98, No.5, 2018, pp.1660-1673.
[17] Pakbin, Babak, Karamatollah Rezaei, and Maryam Haghighi. "An introductory review of applications of ultrasound in food drying processes." *J Food Process Technol,* Vol.6, No.410, 2014, pp.2.
[18] Fernandes, F.A.N., Gallao, M.I., and Rodrigues, S., "Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration", *LWT - Food Science and Technology*, Vol.41, Issue.4, May 2008, pp.604-610.
[19] Fernandes, Fabiano AN, Francisco E. Linhares Jr, and Sueli Rodrigues. "Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple." *Ultrasonics Sonochemistry,* Vol.15, No.6, 2008, pp.1049-1054.
[۲۰] اشراقی، ا.، مقصودلو، ی.، کاشانی‌نژاد، م.، بیرقی‌طوسی، ش.، اعلمی، م.، "بررسی اثر پیش‌تیمار فراصوت روی خشک شدن ورقه‌های کیوی"، *نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران*، جلد ۷، شماره ۴، ۱۳۹۰، ص. ۲۷۹-۲۷۳.
[۲۱] الله‌پناه، پ.، و شهاب‌لواسانی، ع.ر.، "بررسی پیش فرآیند ترکیبی فراصوت- آبگیری اسمزی و خشک کردن تکمیلی با هوای داغ بر شاخص خشک کردن و جذب مجدد آب به"، *بیست و سومین همایش ملی صنایع غذایی و تکنولوژی*، دانشگاه آزاد قوچان، ۱۳۹۳.
[۲۲] اینانلو سلطان احمدی، م.، و توکلی پور، ح.، "بررسی پیش فرآیند ترکیبی فراصوت- آبگیری اسمزی و خشک‌کردن تکمیلی با هوای داغ بر شاخص خشک کردن و جذب مجدد آب خرمالو"، *بیست و سومین همایش ملی صنایع غذایی و تکنولوژی*، دانشگاه آزاد قوچان، ۱۳۹۳.

[23] Laborde, M. B., G. P. Barreto, and A. M. Pagano. "Ultrasound-assisted Dehydration Process Applied to Red Globe Grapes for Producing Low Calorie Raisins." *American Journal of Food Science and Technology,* Vol.6, No.5, 2018, pp.209-214.

[24] Nowacka, Małgorzata, Artur Wiktor, Magdalena Śledź, Natalia Jurek, and Dorota Witrowa-Rajchert. "Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties." *Journal of Food Engineering,* Vol.113, No.3, 2012, pp.427-433.

[۲۵] سازمان ملی استاندارد ایران، سیب درختی برای مصارف صنعتی- ویژگی‌ها و روش‌های آزمون، *استاندارد ملی ایران*، شماره ۳۴۷۶، ۱۳۷۳.

[۲۶] تاج‌الدین، بهجت، "ارزیابی خواص فیزیکوشیمیایی ارقام سیب پس از برداشت برای تعیین نوع کاربرد در صنایع تبدیلی"، گزارش نهایی به شماره ثبت ۴۹۷۲۵ مورخ ۹۵/۴/۸ مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی، *موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی*، ۱۳۹۵.

[27] Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., and Oliveira, F.A.R., "Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying", *Journal of Food Engineering*, 84, 2008, pp. 430-440.

پی‌نوشت:

1. Convection
2. Water availability
3. Hypertonic solutions
4. Sugar solutions
5. Salt brine
6. The threshold power value
7. Spray-driers
8. Freeze-drying
9. Dried Apple
10. GMP-Good Manufacture Practices
11. Apple Chips
12. Shear
13. Point method