

تأثیر پیش تیمار فراصوت-خلأ بر سینتیک خشک کردن و ویژگی‌های فیزیکی لفل سبز تند

ثمین ایروانی^۱، مهشید جهادی^{۱*}، مولود نورانی^۱

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
* نویسنده مسئول (m.jahadi@khuisf.ac.ir)

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶
تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱

واژه‌های کلیدی

سینتیک خشک کردن
فراصوت
لفل سبز تند
مایکروویو

لفل سبز تند (*Capsicum annuum*) به‌عنوان ادویه‌ای پرمصرف، به‌دلیل محتوای رطوبت زیاد بسیار فسادپذیر می‌باشد. لذا خشک کردن آن به جهت کاهش حجم، هزینه حمل‌ونقل و ماندگاری طولانی اهمیت دارد. بدین منظور در این تحقیق از حمام فراصوت و حمام آب گرم (۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط تحت خلأ تا رسیدن به رطوبت ۵۰ درصد به‌عنوان پیش تیمار استفاده شد. سپس نمونه‌ها با استفاده از مایکروویو (۳۶۰ وات) تا رسیدن به رطوبت نهایی ۱۰ درصد خشک شدند. ضریب انتشار رطوبت برش‌های فلفل سبز تند با حل تحلیلی قانون دوم فیک محاسبه شد. اعمال پیش تیمار فراصوت-خلأ آن باعث کوتاه‌تر شدن معنی دار زمان خشک شدن و افزایش ضریب انتشار و سرعت خشک شدن نمونه در مایکروویو نسبت به سایر نمونه‌ها شد ($P < 0.05$). پیش تیمار فراصوت به‌طور معنی داری باعث کاهش تغییرات در درصد تغییر اندازه و اندیس قهوه‌ای شدن و افزایش نسبت آب‌گیری مجدد نمونه شد ($P < 0.05$). به‌طور کلی استفاده از فراصوت به‌عنوان پیش تیمار به خشک کردن فلفل سبز در شرایط مایکروویو کمک می‌کند و باعث افزایش سرعت خشک کردن و حفظ بهتر ویژگی‌های فیزیکی محصول می‌شود. در نهایت استفاده از فراصوت می‌تواند چشم‌اندازی برای تولید محصولی با کیفیت بهتر و ویژگی‌های ظاهری و بازاریابی بیشتری باشد.



مقدمه

ادویه، خشک‌شده، به‌عنوان رنگ خوراکی، پرورش گیاه زینتی و تولید عصاره برای صنایع مختلف دارویی و آرایشی گسترش یافته است (Paran & van der Knaap, 2007). خشک کردن مواد غذایی روشی برای نگهداری از طریق حذف آب است. طی خشک کردن فرایند انتقال حرارت و جرم اتفاق می‌افتد که اساساً آب آزاد که مسئول رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌هاست، حذف می‌شود. از این رو، خشک شدن منجر به افزایش ماندگاری مواد غذایی مانند سبزی‌ها و کاهش محتوای آب تا حد قابل قبول می‌شود. زمان خشک شدن، دما و فعالیت آبی بر کیفیت محصول نهایی تأثیر می‌گذارد. اهداف مهمی که

لفل تند^۱ که معمولاً فلفل چیلی^۲ نامیده می‌شود، از زمان‌های قدیم به‌عنوان سبزی‌های غذایی، مواد طعم‌دهنده، رنگ‌های طبیعی و در طب سنتی استفاده می‌شده است. فلفل تند حاوی ترکیبات شیمیایی برجسته‌ای مانند ویتامین‌ها، مواد معدنی، فلاونوئیدها، کاروتنوئیدها و کپسایسینوئیدهاست (Hernández-Pérez *et al.*, 2020). فلفل تند در طول تاریخ عمدتاً برای چاشنی و به‌عنوان گیاه دارویی استفاده شده است، اما امروزه استفاده از آن به شکل‌های تازه و فراوری شده،

¹ *Capsicum annuum*

² Chilli

بافت نمونه، تسهیل می‌شود که انتشار آب از داخل به سطح محصول را بهبود می‌بخشد (de la Fuente-Blanco *et al.*, 2006).

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت خلاً در دو دمای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد (رطوبت بر پایه‌ تر ۵۰ درصد) بر ویژگی‌های فیزیکی فلفل‌سبز تند خشک‌شده توسط مایکروویو (تا رسیدن به رطوبت بر پایه‌ تر ۱۰ درصد) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه

فلفل‌ها در فروردین ماه ۱۴۰۱ به‌صورت هفتگی در مقدار ۲ الی ۳ کیلوگرم خریداری و تا زمان مصرف (کمتر از ۱ روز) در یخچال با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌ها با چاقو در ابعاد ۷×۳۷ میلی‌متر برش داده شدند و کف ارلن خلاً چیده شدند (Chen *et al.*, 2016). ارلن به پمپ خلاً متصل گردید و داخل حمام فراصوت (پارسونیک اولتراسونیک، ساخت ایران) در دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. همچنین نمونه‌های بدون امواج فراصوت درون حمام آب با دماهای مشابه قرار گرفتند. پس از رسیدن رطوبت بر پایه‌ تر به ۵۰ درصد، نمونه‌ها از دستگاه خارج‌شده و به خشک‌کن مایکروویو (LG، ساخت کره جنوبی) منتقل و تا رسیدن به رطوبت بر پایه‌ تر ۱۰ درصد (بر مبنای رسیدن به کاهش رطوبت ۸۰ درصد) خشک شد (Brines *et al.*, 2015). سپس آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های فیزیکی بر نمونه‌های خشک‌شده انجام گرفت.

سینتیک خشک‌کردن و ضریب انتشار

جهت اندازه‌گیری سینتیک خشک‌کردن و ضریب انتشار نمونه‌ها در خشک‌کن مایکروویو، نمونه‌ها به‌طور مرتب (هر ۲۰ ثانیه) وزن شدند و ضریب انتشار از حل تحلیلی قانون دوم فیک در تیغه محاسبه شد (Başlar *et al.*, 2014; Dehghannya *et al.*, 2018)، رابطه (۱):

رابطه (۱)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_D - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)$$

تکنیک‌های خشک‌کردن باید انجام دهند عبارتند از: (۱) حفظ مواد غذایی تازه به‌طوری‌که در تمام سال در دسترس باشند. (۲) کاهش وزن و حجم محصول برای حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی آسان، (۳) حفظ جنبه‌های تغذیه‌ای و کیفی مواد غذایی و (۴) باید روشی پایدار از نظر مصرف انرژی کمتر باشد. از این‌رو، در دنیای امروزی از تکنیک‌های خشک‌کردن جدید استفاده می‌شود (Bisht *et al.*, 2022). استفاده از پرتوهای مایکروویو در خشک‌کردن محصولات کشاورزی رایج است، زیرا با افزایش سرعت انتقال حرارت و جرم، زمان خشک‌شدن را کاهش داده و کیفیت محصول افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش زمان خشک‌کردن و صرفه‌جویی در مصرف انرژی آفت کیفیت از طریق خشک‌کردن در مایکروویو را تقلیل می‌دهد (Diaz *et al.*, 2003; Feng, 2002). امواج مایکروویو بخشی از طیف الکترومغناطیسی بین فرکانس رادیویی و مادون قرمز، در محدوده فرکانسی بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند (Orsat *et al.*, 2017).

در فراوری سبزی‌ها و میوه‌ها، استفاده از روش‌های مختلف پیش‌ تیمار به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب فراوری معمول است. در این بین به‌کارگیری روش پیش‌ تیمار فراصوت یکی از این روش‌هاست که می‌تواند به بهبود کیفیت مواد غذایی کمک کند. فناوری فراصوت با کاربرد گسترده خود در فرایندهای مختلف، صنعت فراوری مواد غذایی را متحول کرده است و به‌عنوان یک راهکار مؤثر و پایدار و کم‌هزینه در کنار فرایند خشک‌کردن عمل می‌کند. این فناوری غیرمخرب چندین مزیت از جمله فراوری سریع، افزایش راندمان، تولید محصول با کیفیت بهتر، بهبود حفظ ویژگی‌های محصول (بافت، ارزش غذایی و خواص ارگانولپتیک) و بهبود عمر مفید را ارائه می‌دهد (Bhargava *et al.*, 2021). فراصوت نوعی امواج مکانیکی با فرکانس بین ۲۰ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز است (Huang *et al.*, 2020).

استفاده از فراصوت در فرایند خشک‌کردن می‌تواند سرعت خشک‌شدن میوه، سبزی‌ها، گوشت و ماهی را افزایش دهد؛ زمان خشک‌شدن را کاهش داده و سرعت انتقال حرارت و جرم را برای حفظ کیفیت محصول افزایش دهد (Kowalski *et al.*, 2017). ثابت شده است که فراصوت یک راهکار مؤثر در کنار فرایند خشک‌کردن است. حذف آب با پدیده «اثر اسفنجی»^۱ این امواج بر

¹ Sponge effect

درصد تغییر اندازه

طول نمونه‌ها یک‌بار قبل از فرایند خشک شدن و یک‌بار بعد از آن توسط کولیس دیجیتالی (ساخت چین) اندازه‌گیری شد و تغییرات طول آنها از طریق رابطه (۵) محاسبه شد (Sette et al., 2016):

رابطه (۵)

$$\text{درصد تغییر اندازه} = \frac{\text{طول ثانویه} - \text{طول اولیه}}{\text{طول اولیه}} \times 100$$

نتایج و بحث

سینتیک خشک کردن و ضریب انتشار

مطابق با نتایج شکل (۱)، در میان تکنیک‌های خشک کردن مورد استفاده در این مطالعه، کوتاه‌ترین دوره خشک کردن برای روش خشک کردن با مایکروویو (نمونه شاهد) مشاهده شد؛ نمونه شاهد از ابتدا در مایکروویو قرار گرفت و سرعت خشک شدن به‌طور کلی در مایکروویو نسبت به فراصوت و حمام آب بسیار سریع‌تر می‌باشد. میزان رطوبت مواد در مرحله اولیه خشک کردن مایکروویو بسیار بالا بود که منجر به جذب بالاتر قدرت مایکروویو و سرعت خشک شدن بالاتر به دلیل انتشار رطوبت بیشتر شد (شکل ۱). با پیشرفت خشک کردن، ازدست دادن رطوبت در محصول باعث کاهش جذب قدرت مایکروویو و کاهش سرعت خشک شدن می‌شود (Ozkan et al., 2007). در سایر تیمارها در مراحل ابتدایی خشک کردن از پیش تیمار فراصوت استفاده شد و پس از رسیدن رطوبت نمونه‌ها به ۵۰ درصد، از خشک کردن توسط مایکروویو استفاده شد تا اثرات منفی مایکروویو به حداقل برسد. در میان پیش تیمارهای اعمال شده قبل از مایکروویو کوتاه‌ترین دوره خشک کردن نمونه‌ها در مایکروویو مربوط به روش پیش تیمار فراصوت-خلأ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (۲۸۰ ثانیه). این در حالی است که در پیش تیمار فراصوت-خلأ دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، بن‌ماری-خلأ دمای ۷۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب زمان خشک کردن در مایکروویو به ترتیب ۳۶۰، ۴۲۰ و ۴۴۰ ثانیه و در نمونه شاهد ۱۰۲۰ ثانیه بود. با افزایش دمای خشک کردن، تفاوت در زمان خشک کردن بین تکنیک‌های فراصوت-خلأ و بن‌ماری-خلأ کاهش یافت. استفاده از فراصوت، لایه مرزی انتشار را به دلیل تغییرات فشار، ویسکوزیته نوسانی و اثرات داخلی تغییر می‌دهد که باعث تسهیل خروج رطوبت از نمونه و افزایش سرعت خشک شدن می‌شود (Rodríguez et al., 2014).

در رابطه (۱)، MR نسبت رطوبت^۱، M رطوبت بر پایه خشک در هر زمان، M_e رطوبت بر پایه خشک تعادل، M_D رطوبت بر پایه خشک اولیه و L ضخامت نمونه فلفل، D_{eff} ضریب انتشار مؤثر (مترمربع بر ثانیه)، exp تابع نمایی و ∞ نماد بی‌نهایت می‌باشد.

درصد جذب آب و حفظ ماده خشک

آزمایش‌ها از طریق غوطه‌ورسازی مقدار مشخصی از نمونه‌های خشک شده درون آب مقطر در دمای اتاق انجام گرفت. پس از گذشت ۱ ساعت نمونه‌ها برداشته شده و با کاغذ خشک شده و آب سطح آنها گرفته شد و توسط ترازو (ABJ 220-4NM) وزن شدند. میزان درصد جذب آب (رابطه ۲) و حفظ ماده خشک (رابطه ۳) محاسبه شد (Prosapio & Norton, 2018):

رابطه (۲)

$$\text{وزن قبل از آب‌گیری} - \text{وزن بعد از آب‌گیری} = D_s$$

$$\text{وزن قبل از آب‌گیری} - \text{وزن قبل از آب‌گیری} = \frac{D_s + \text{وزن قبل از آب‌گیری}}{\text{وزن قبل از آب‌گیری}} = \text{جذب آب (درصد)}$$

در رابطه (۲)، D_s ماده خشک از دست رفته طی فرایند آب‌گیری می‌باشد.

رابطه (۳)

$$\text{درصد حفظ ماده خشک} = \frac{\text{وزن ماده خشک بعد از آب‌گیری}}{\text{وزن ماده خشک قبل از آب‌گیری}}$$

اندیس قهوه‌ای شدن

برای بررسی اندیس قهوه‌ای شدن از نمونه‌های فلفل خشک شده توسط دوربین سامسونگ (مدل Galaxy s7، ساخت ویتنام) با تنظیمات اتوماتیک که در یک جعبه چوبی به ابعاد ۲۵×۵۰×۵۰ سانتی‌متر و مجهز به دو منبع نور طبیعی روز قرار داده شده است، تصویربرداری شد (Nourani et al., 2016). سپس تصاویر با استفاده از نرم‌افزار Photoshop نسخه CS6 Portable پردازش شدند. سپس سه پارامتر L* که نشان‌دهنده روشنایی، a* نشان‌دهنده قرمزی-سبزی و b* مقیاس زردی-آبی به کمک نرم‌افزار تعیین شد و ضریب قهوه‌ای شدن^۲ (BI) از طریق رابطه (۴) محاسبه شد (Guclu et al., 2021):

رابطه (۴)

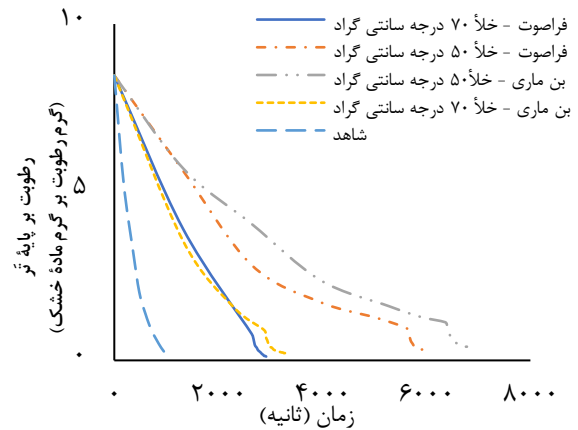
$$BI = \frac{100}{0.172} \times \left[\frac{a + 1.75L}{(5.645L) + a - (3.012b)} \right] - 0.31$$

¹ Moisture ratio

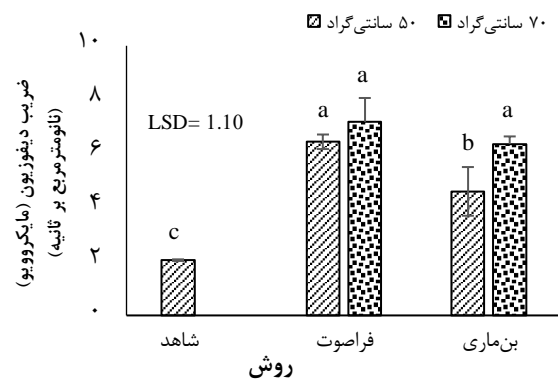
² Browning index

درصد جذب آب و حفظ ماده خشک

میزان جذب آب و حفظ ماده خشک به عنوان معیاری برای آسیب‌های ناشی از خشک‌شدن در مواد، مانند ازدست‌دادن یکپارچگی و کاهش خواص آب‌دوست، در نظر گرفته شده است (Marques *et al.*, 2009). از نظر تئوری، اگر هیچ اثر نامطلوبی طی فراوری مواد غذایی بر یکپارچگی ساختار بافت وجود نداشته باشد، باید ماده غذایی، آب را به همان میزان رطوبت محصول اولیه جذب کند (Senadeera *et al.*, 2000). مطابق با شکل (۳-ب) اختلاف آماری معنی‌داری بین نمونه‌های پیش‌تیمار شده، با نمونه شاهد وجود ندارد. با این حال پیش‌تیمار فراصوت-خلأ در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری باعث جذب بیشتر آب نسبت به دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد شد ($P < 0.05$). کاهش درصد جذب آب با افزایش دمای فراوری به دلیل آسیب ساختار سلولی است، که منجر به تغییرات خواص اسمزی سلول و همچنین انتشار کمتر آب از طریق سطح در طول آب‌رسانی مجدد می‌شود (Lewicki, 2006; Papageorge *et al.*, 2003). مطابق نتایج شکل (۳-الف) نمونه شاهد کمترین درصد حفظ ماده خشک را نسبت به سایر نمونه‌ها داشت و پس از آن نمونه‌ای که پیش‌تیمار فراصوت-خلأ بر آن اعمال شد دارای درصد حفظ ماده خشک کمتر از سایر نمونه‌ها بود. همچنین مشاهده می‌شود که بالاترین میزان حفظ ماده خشک به‌طور معنی‌داری توسط تیمار بن‌ماری-خلأ نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است ($P < 0.05$). اثر اسفنجی ناشی از اعمال فراصوت و تأثیر آن بر تخلخل و تخریب سلولی باعث ازدست‌رفتن بیشتر مواد جامد محلول در آب نسبت به نمونه‌هایی است که فراصوت بر آنها اعمال نشده است. همچنین کاهش مواد جامد در نمونه شاهد ممکن است به دلیل تغییرات در ساختار و بافت نمونه‌ها در طول خشک‌کردن مایکروویو به دلیل افزایش دما باشد (Ratti, 1994). به‌طور کلی اعمال خلأ در هنگام خشک‌کردن منجر به جمع‌شدگی و چروکیدگی کمتر در نمونه‌ها می‌شود (Sette *et al.*, 2016). با این حال، انقباض بالاتر و سریع نمونه‌های خشک‌شده توسط مایکروویو وجود داشت. این به دلیل تولید گرمای گسترده است که باعث تسریع حذف آب از بافت‌های نمونه توسط مایکروویو می‌شود. با انقباض بالا در ابتدا و تسطیح تدریجی در پایان خشک‌کردن به‌طوری‌که اندازه و شکل نهایی نمونه‌ها قبل از اتمام خشک‌شدن ثابت می‌شود (Ratti, 1994).

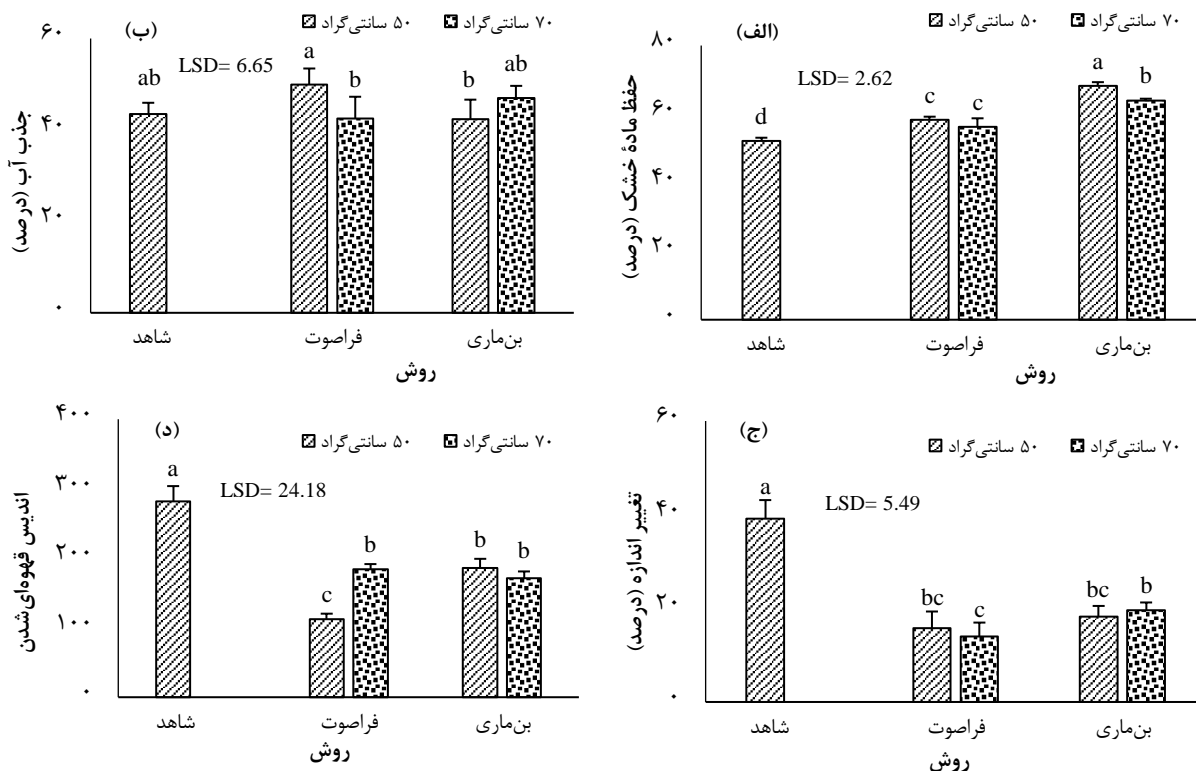


شکل ۱- سینتیک خشک‌کردن بر اساس رطوبت بر پایه خشک نسبت به زمان



شکل ۲- مقایسه ضریب انتشار در نمونه شاهد و نمونه‌های دارای پیش‌تیمار، حروف متفاوت روی تیرک‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0.05$).

ضریب انتشار می‌تواند به عنوان یک شاخص خاص برای سرعت خشک‌شدن استفاده شود. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبت در خشک‌کن مایکروویو در نمونه تیمار شده با فراصوت-خلأ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. بدیهی است که ضرایب انتشار رطوبت با زمان خشک‌شدن مطابقت دارد. اگرچه هیچ تفاوت معنی‌داری در ضریب انتشار برای نمونه‌های تیمار شده با فراصوت-خلأ (در دو دمای ۷۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و بن‌ماری-خلأ (در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد) وجود نداشت، اما ضریب انتشار رطوبت طی مرحله خشک‌کردن در مایکروویو به‌طور معنی‌داری از نمونه شاهد بیشتر بود ($P < 0.05$). فراصوت باعث ایجاد یک سری انقباض و انبساط سریع بافت می‌شود، که می‌تواند آب را از مواد خام به محیط اطراف منتقل کند و باعث افزایش ضرایب انتشار رطوبت نمونه‌ها در مایکروویو شود (Nowacka *et al.*, 2012).



شکل ۳- الف) درصد حفظ ماده خشک، ب) درصد جذب آب، ج) اندیس قهوه‌ای شدن و د) تغییر اندازه فلفل سبز تند خشک شده به روش مایکروویو، حروف متفاوت روی تیرک‌ها نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری آماری می‌باشد ($P < 0.05$).

درصد تغییر اندازه

جهت بررسی اثر خشک شدن بر پروکیدیگی، درصد تغییر اندازه بررسی شد که مطابق با نتایج شکل ۳-ج) نمونه شاهد بیشترین جمع‌شدگی و تغییر اندازه، و نمونه‌های پیش تیمار شده کمترین تغییر اندازه را از خود نشان دادند. نمونه‌های پیش تیمار شده تفاوت اندکی با یکدیگر داشتند، درحالی‌که تفاوت معنی‌داری آنها با نمونه شاهد مشاهده شد. همچنین دمای پیش تیمارهای اعمال شده بر نمونه‌ها تأثیر قابل توجهی بر تغییر اندازه آنها نداشت.

اگرچه کاهش حجم بیشتر با ازدست دادن آب در طول خشک شدن مرتبط است، اما نشان داده شده است که تغییرات در شکل و ابعاد محصولات به واکنش خاص هر ماده به نیروهای القایی ایجاد شده در طول خشک شدن و به روش خشک کردن بستگی دارد. هنگام خشک شدن ماده غذایی که آب از ماده خارج می‌شود، عدم تعادل فشار بین فشار داخلی و خارجی ایجاد می‌شود، لذا با ایجاد تنش‌های انقباضی، تغییر شکل و گاهی اوقات ترک خوردن محصول رخ می‌دهد (Mayor & Sereno, 2004). به‌طور کلی اعمال خلأ در هنگام خشک کردن منجر به جمع‌شدگی و پروکیدیگی کمتر در نمونه‌ها می‌شود (Sette et al.,)

2016). انقباض شدیدتر و سریع نمونه‌های خشک شده توسط مایکروویو به دلیل تولید گرمای گسترده است که باعث تسریع حذف آب از بافت نمونه توسط مایکروویو می‌شود (Ratti, 1994).

اندیس قهوه‌ای شدن

نتایج شکل ۳-د) نشان می‌دهد که وجود فراصوت-خلأ به‌طور معنی‌داری باعث کاهش میزان قهوه‌ای شدن در برش‌های فلفل نسبت به نمونه‌های بن‌ماری-خلأ شد. همچنین دمای پیش تیمارهای اعمال شده قبل از خشک کردن مایکروویو نیز باعث تأثیر معنی‌دار بر میزان قهوه‌ای شدن نمونه‌های فلفل شد. بیشترین میزان قهوه‌ای شدن در نمونه شاهد و کمترین آن در نمونه پیش تیمار شده توسط فراصوت-خلأ در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. تفاوت آماری معنی‌داری بین نمونه فراصوت-خلأ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه‌های بن‌ماری-خلأ در دماهای ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده نشد. اندیس قهوه‌ای شدن ممکن است نتیجه واکنش‌های شیمیایی مختلف از جمله تخریب رنگدانه باشد. ضمن آنکه به دلیل گرمایش غیریکنواخت، در نتیجه توزیع

تحقیق‌های آینده در این زمینه بتواند ما را به سمت استفاده از روش‌های خشک‌کردن مایکروویو به صورت صنعتی با کیفیت بالا پیش‌برد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی-واحد اصفهان (خوراسگان) که امکانات آزمایشگاهی جهت انجام این پژوهش را فراهم نمودند، کمال تشکر را داریم.

مشارکت نویسندگان

مهشید جهادی: ارائه ایده پژوهشی و طراحی مطالعه، آنالیز داده‌ها، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، بازبینی و اصلاح مقاله، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخه نهایی؛ **مولود نورانی:** تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، بازبینی و اصلاح مقاله، آنالیز داده‌ها، نظارت بر مطالعه، تأیید نسخه نهایی؛ **ثمین ایروانی:** ارائه ایده پژوهشی و طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله، بازبینی و اصلاح مقاله.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

غیریکنواخت میدان مایکروویو گرمای بیش‌ازحد و آفت کیفیت رخ می‌دهد (Roshanak et al., 2016).

نتیجه‌گیری

اعمال پیش‌ تیمار فراصوت-خلأ سبب کاهش قابل توجه زمان خشک‌شدن نمونه‌ها در مایکروویو شد، به طوری که زمان حضور نمونه‌های پیش‌ تیمار شده توسط فراصوت در مایکروویو حدوداً نصف نمونه‌هایی بود که فراصوت بر آنها اعمال نشده است و فقط توسط خلأ رطوبت آنها کاهش یافته بود. افزایش معنی‌دار ضرایب انتشار نمونه‌های پیش‌ تیمار شده توسط فراصوت نسبت به نمونه‌های بن‌ماری-خلأ و شاهد نتایج حاصل از سینتیک را تأیید کرد. افزایش ضریب انتشار خشک‌کردن نمونه‌های پیش‌ تیمار شده توسط فراصوت باعث سرعت بیشتر خشک‌شدن نمونه‌ها در خشک‌کن مایکروویو شد. به طور کلی کمترین تغییر اندازه در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده توسط فراصوت-خلأ مشاهده شد و بیشترین میزان جذب آب نمونه‌ها پس از خشک‌شدن نیز متعلق به نمونه‌های پیش‌ تیمار شده بود. همچنین اعمال پیش‌ تیمار به طور معنی‌داری از افزایش اندیس قهوه‌ای شدن نسبت به نمونه شاهد جلوگیری کرد. به طور کلی دمای کمتر طی فرایند پیش‌ تیمار تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های کیفی نمونه‌ها داشت. به نظر می‌رسد به کارگرفتن پیش‌ تیمار فراصوت در دماهای پایین می‌تواند تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری فلفل خشک داشته باشد و

منابع

- Başlar, M., Kılıçlı, M., Toker, O. S., Sağdıç, O., & Arıcı, M. (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.06.008>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K., & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 70, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Bisht, A., Kaur, A., Singh, P., Pranshu, & Alam, F. (2022). A study on the dehydration of vegetables using novel drying techniques. *The Pharma Innovation Journal*, SP-11(1), 978-989. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue1S/PartO/S-11-1-161-142.pdf>
- Brines, C., Mulet, A., García-Pérez, J. V., Riera, E., & Cárcel, J. A. (2015). Influence of the Ultrasonic Power Applied on Freeze Drying Kinetics. *Physics Procedia*, 70, 850-853. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.174>
- Chen, Z.-G., Guo, X.-Y., & Wu, T. (2016). A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics sonochemistry*, 30, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.026>
- de la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.181>
- Dehghannya, J., Hosseinlar, S.-H., & Heshmati, M. K. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 132-151. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.007>

- Diaz, G. R. z., Martinez-Monzó, J., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(2), 203-209. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00016-X)
- Feng, H. (2002). Analysis of microwave assisted fluidized-bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(8), 1021-1028. [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(02\)00430-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(02)00430-X)
- Guclu, G., Keser, D., Kelebek, H., Keskin, M., Emre Sekerli, Y., Soysal, Y., & Selli, S. (2021). Impact of production and drying methods on the volatile and phenolic characteristics of fresh and powdered sweet red peppers. *Food Chemistry*, 338, 128129. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128129>
- Hernández-Pérez, T., Gómez-García, M. D. R., Valverde, M. E., & Paredes-López, O. (2020). Capsicum annum (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 19(6), 2972-2993. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics sonochemistry*, 63, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- Kowalski, S. J., Mierzwa, D., & Stasiak, M. (2017). Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions. *Drying Technology*, 35(8), 939-947. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1239631>
- Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17(4), 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.012>
- Marques, L. G., Prado, M. M & ,Freire, J. T. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *LWT - Food Science and Technology*, 42(7), 1232-1237. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.02.012>
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373-386. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)
- Nourani, M., Hamdami, N., Keramat, J., Moheb, A., & Shahedi, M. (2016). Preparation of a stable nanocomposite phase change material (NCPCM) using sodium stearoyl lactylate (SSL) as the surfactant and evaluation of its stability using image analysis. *Renewable Energy*, 93, 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.073>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.013>
- Orsat, V., Raghavan, G. S. V., & Krishnaswamy, K. (2017). 5 - Microwave technology for food processing: An overview of current and future applications. In M. Regier, K. Knoerzer, & H. Schubert (Eds.), *The Microwave Processing of Foods (Second Edition)* (pp. 100-116). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00005-X>
- Ozkan, I. A., Akbudak, B., & Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 577-583. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.026>
- Papageorge, L. M., McFeeters, R. F., & Fleming, H. P. (2003). Factors Influencing Texture Retention of Salt-free, Acidified, Red Bell Peppers during Storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(5), 1460-1463. <https://doi.org/10.1021/jf025788e>
- Paran, I., & van der Knaap, E. (2007). Genetic and molecular regulation of fruit and plant domestication traits in tomato and pepper. *Journal of Experimental Botany*, 58(14), 3841-3852. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm257>
- Prosapio, V., & Norton, I. (2018). Simultaneous application of ultrasounds and firming agents to improve the quality properties of osmotic + freeze-dried foods. *Lwt*, 96, 402-410. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.068>
- Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91-105. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90125-2)
- Rodríguez, Ó., Santacatalina, J. V., Simal, S., Garcia-Perez, J. V., Femenia, A., & Rosselló, C. (2014). Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.001>
- Roshanak, S., Rahimmalek, M., & Goli, S. A. (2016). Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content ,chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves. *J Food Sci Technol*, 53(1), 721-729. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2030-x>
- Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., & Wijesinghe, B. (2000). Chapter 6- Physical property changes of fruits and vegetables during hot air drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying technology in agriculture and food sciences* (pp. 149-166). Science Publishers, USA .
- Sette, P., Salvatori, D., & Schebor, C. (2016). Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. *Food and Bioprocess Processing*, 100, 156-171. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.06.018>

Effect of Ultrasound-vacuum Pretreatment on Drying Kinetics and Physical Characteristics of Hot Green Pepper

Samin Iravani¹, Mahshid Jahadi^{1*}, Moloud Nourani¹

1-Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

* Correspond author (m.jahadi@khuisf.ac.ir)

Abstract

Hot green pepper (*Capsicum annuum*) is a commonly used spice, that is highly spoilable due to high moisture content. Therefore, drying is valuable in order to reduce volume, transportation cost and longer shelf life. For this purpose, using an ultrasound-vacuum bath and a water bath-vacuum (50 and 70 °C), under vacuum condition, until reaching 50% humidity were used as a pre-treatment. Then all samples were dried using microwave (360 w) until reaching 10% final moisture content. The diffusion coefficient of hot green pepper slices was calculated using the Fick diffusion model. Applying ultrasound-vacuum pretreatment caused a decrease of the drying time, and increased the diffusion coefficient and drying speed of the product in the microwave sample compared to other samples significantly ($P<0.05$). Ultrasonic pretreatment significantly reduced changes in the percentage of size change and browning index and increased the rehydration ratio of the sample significantly ($P<0.05$). In general, applying ultrasonic as a pre-treatment helps to dry green pepper in microwave conditions and increases the speed of drying in microwave and better maintaining the physical characteristics of the product. Finally, the use of ultrasonic can be a perspective to produce a product with better quality and appearance characteristics and more marketability.

Keywords: Drying kinetic, Hot green pepper, Microwave, Ultrasound

