

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسرخ

فخرالدین صالحی^{a*}، مریم تشکری^b، کیمیا ثمری^b

^a دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^b دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

چکیده

مقدمه: گرمایش مایکروویو شکلی از گرمایش دی الکتریک است که به وسیله آن تولید گرما در مواد با رسانایی الکتریکی پایین توسط یک میدان الکتریکی با فرکانس بالا امکان پذیر است.

مواد و روش ها: برای اعمال پیش تیمار مایکروویو، پرتقال ها به مدت ۰، ۱، ۲ و ۳ دقیقه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از تیماردهی، برش هایی با ضخامت ۰/۵ سانتی متر از پرتقال ها تهیه و سپس برش ها توسط لامپ فرسرخ با توان ۲۵۰ وات خشک شدند.

یافته ها: با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافت. نتایج مدل سازی سینتیکی داده های آزمایشگاهی خشک کردن برش های پرتقال نشان داد که بهترین مدل برای این فرآیند مدل میدیلی است. اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر چروکیدگی سطحی برش های پرتقال خشک شده و آبگیری شده داشت ($p < 0.05$) و اعمال این پیش تیمار باعث کاهش چروکیدگی سطحی محصول شد. اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر شاخص های رنگ (زردی، قرمزی، روشنایی و تغییر رنگ کل) برش های پرتقال خشک و آبگیری شده نداشت ($p > 0.05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، میانگین آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده در خشک کن فرسرخ از ۱۵۴/۲۵ درصد به ۲۱۲/۸۵ درصد افزایش یافت.

نتیجه گیری: به طور کلی، استفاده از پیش تیمار مایکروویو قبل از خشک کردن برش های پرتقال به دلیل افزایش سرعت انتقال جرم، کاهش چروکیدگی سطحی و افزایش آبگیری مجدد، چروکیدگی، شاخص های رنگ، فرسرخ، مدل میدیلی

واژه های کلیدی: آبگیری مجدد، چروکیدگی، شاخص های رنگ، فرسرخ، مدل میدیلی

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسرخ

مقدمه

پرتقال حاوی انواع ویتامین ها و مواد مغذی مختلف با اثرات مفید برای سلامتی انسان است. مدت ماندگاری پرتقال کوتاه بوده و در صورت عدم نگهداری در سردخانه های مناسب و فرآوری، در اثر رشد میکروارگانیسم های مختلف سریع فاسد می شود. لذا به منظور افزایش ماندگاری این میوه، علاوه بر نگهداری محصول در سردخانه های مجهز، می توان محصول را به شکل های منجمد، خشک، کنسرو، مربا و آب میوه فرآوری کرد (Özkan-Karabacak et al., 2020). به خصوص در فصولی که برداشت پرتقال بیش از حد است می توان این میوه را به صورت برش های نازک خشک کرد و آن را به یک محصول با ارزش تجاری بالاتر تبدیل کرد (Eftekhari et al., 2023a, b; Özkan-Karabacak et al., 2020).

خشک کردن یک روش مهم نگهداری مواد غذایی است که از طریق کاهش محتوای آب، فعالیت آب را کاهش می دهد و از خراب شدن و فساد احتمالی در طول دوره های طولانی نگهداری جلوگیری می کند. اهداف مهم دیگر خشک کردن مواد غذایی کاهش وزن و حجم است که برای کاهش هزینه های حمل و نقل و ذخیره سازی در نظر گرفته شده است (Darvishi et al., 2014). در پژوهش های اخیر، استفاده از پیش تیمارهای مختلف قبل از خشک کردن برش های پرتقال در خشک کن های مختلف بررسی شده است. برای مثال Eftekhari و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر پیش تیمارهای فراصوت و شرایط فرآیند بر سرعت انتقال جرم طی آبیگری اسمزی برش های پرتقال را بررسی کردند. این پژوهشگران اعمال ۵ دقیقه فراصوت با توان ۱۵۰ وات، به دلیل کاهش جذب مواد جامد و افزایش درصد آبیگری مجدد، قبل از فرآیند آبیگری اسمزی از برش های پرتقال توسط محلول حاوی ۴۰ درصد ساکارز را توصیه کرده اند. Özkan-Karabacak و همکاران (۲۰۲۰) اثر پیش تیمار مایکروویو بر سینتیک انتقال جرم و ظرفیت آبیگری مجدد برش های پرتقال خشک شده در خلأ را بررسی و استفاده از این پیش تیمار را برای کاهش زمان خشک کردن و بهبود خصوصیات کیفی برش های پرتقال خشک شده توصیه کردند.

خشک کردن با مایکروویو، یک فناوری نسبتاً جدید، به عنوان یک روش خشک کردن سریع و مؤثر جایگزین

خشک کردن با هوای داغ توصیه شده است. با این حال، هنگامی که به تنهایی اعمال می شود، کارایی زیادی ندارد و باعث آسیب به بافت و کاهش کیفیت محصول خشک شده می شود؛ لذا بهتر است به صورت ترکیبی یا پیش تیمار قبل از خشک کردن تکمیلی استفاده شود (Horuz et al., 2017; Motevali and Minaei, 2012; Özkan-Karabacak et al., 2020; Seremet et al., 2020). علاوه بر اینها، قرار گرفتن محصولات کشاورزی و میوه ها (پس از برداشت) در معرض مایکروویو می تواند منجر به افزایش ماندگاری محصول شود (Verma et al., 2020). در روش مایکروویو، گرما در محصول از طریق القای مولکولی دوقطبی و جهت گیری ناشی از میدان الکترومغناطیسی متناوب تولید می شود (Talens et al., 2016). Horuz و همکاران (۲۰۱۷) خشک کردن آلبالو با هوای داغ و ترکیبی مایکروویو-هوای داغ را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که از نظر پارامترهای رنگی اختلافی بین نمونه های خشک شده در هر کدام از خشک کن ها نبود، اما نمونه های خشک شده توسط خشک کن ترکیبی مایکروویو-هوای داغ ظرفیت آبیگری مجدد بالاتری داشتند و استفاده از مایکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن آلبالو شد. Salehi و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر رنگ، چروکیدگی و آبیگری مجدد برش های پرتقال خشک شده را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که پیش تیمار مایکروویو بر تغییر چروکیدگی سطحی محصول تأثیر معنی داری ندارد، اما از نظر شاخص تغییرات رنگ، نمونه های تیمار و خشک شده، تغییرات کمتری از نظر رنگ ظاهری نسبت به نمونه اولیه دارند.

دمای بالا (حدود ۶۰ درجه سلسیوس و بالاتر) یا زمان خشک شدن طولانی در خشک کردن با هوای داغ، ممکن است باعث آسیب جدی به طعم، رنگ و مواد مغذی محصول شود و باعث کاهش ظرفیت آبیگری مجدد محصول خشک شود (Díaz et al., 2003). امروزه استفاده از خشک کردن مصنوعی در نگهداری محصولات کشاورزی گسترش یافته است و نیاز به تحقیقات و استفاده از روش های سریع تر و فرآیندهای که منجر به صرفه جویی در مصرف انرژی شوند، بیشتر شده است (Sánchez-Sáenz et al., 2015). خشک کردن با استفاده از اشعه فرسرخ روشی است که در مقایسه با خشک کردن همرفتی

– خشک کردن با پرتو فرسرخ

برش‌های پرتقال تیمار شده با مایکروویو جهت خشک شدن با لامپ فرسرخ (شرکت نور، ایران) با توان ۲۵۰ وات به صورت لایه‌نازک داخل دستگاه قرار داده شدند. فاصله نمونه‌ها از سطح لامپ ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تغییرات وزن نمونه‌ها طی زمان خشک شدن هر ۱ دقیقه توسط ترازوی دیجیتالی (لوترون، تایوان) با دقت ± 0.1 گرم که در زیر خشک‌کن قرار گرفته بود تا زمان رسیدن به ثبات وزن، ثبت گردید.

– محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

نفوذ مؤثر رطوبت بیانگر شرایط هدایت تمام مکانیسم‌های انتقال رطوبت است و معمولاً توسط منحنی‌های خشک کردن تجربی تعیین می‌شود (Srikiatden and Roberts, 2006). برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت^۲ برش‌های پرتقال تیمار شده هنگام خشک شدن توسط خشک‌کردن فرسرخ، ابتدا مختصات نمونه تیغه در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک^۳ استفاده گردید. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک‌کردن محاسبه شد (Salehi and Satorabi, 2021).

– مدل‌سازی سینتیکی

سینتیک خشک‌کردن تجربی با ایجاد نمودارهای بین تغییر محتوای رطوبت در مقابل زمان و سرعت انتقال جرم در مقابل محتوای رطوبت ارزیابی شد (Özkan-Karabacak et al., 2020). بررسی سینتیک خشک شدن برش‌های پرتقال تیمار شده با مایکروویو و مدل‌سازی رفتار خروج رطوبت طی خشک شدن محصول با خشک‌کن فرسرخ مهم است. لذا در این مطالعه، داده‌های آزمایشی خشک‌کردن برش‌های پرتقال توسط شش مدل سینتیکی پرکاربرد برازش شدند. در این پژوهش مدل‌های پیچ، ونگ و سینگ، هندرسون و پایس، تقریب انتشار، نیوتن و میدیلی برای مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال و انتخاب بهترین مدل، انتخاب و بررسی شدند

تلفات انرژی کمتری را ارائه می‌دهد، زیرا انرژی در یک موج الکترومغناطیسی مستقیماً توسط محصول جذب می‌شود (Mongpraneet et al., 2002; Salehi, 2020). این امر به این دلیل اتفاق می‌افتد که مواد به سرعت و یکنواخت گرم می‌شوند و انرژی تابش فرسرخ بدون گرم کردن هوای اطراف به محصول منتقل می‌شود (Swadisevi et al., 2007).

استفاده از مایکروویو و فرسرخ برای بهبود کیفیت محصولات خشک‌شده، آبیگری مجدد بیشتر و سریعتر، صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی و زمان خشک شدن بسیار کوتاه‌تر در مقایسه با خشک‌کردن با هوای گرم توصیه شده است (Díaz et al., 2003; Salehi, 2020). لذا در این پژوهش اثر پیش تیمار مایکروویو قبل از فرآیند خشک‌کردن برش‌های پرتقال توسط خشک‌کن فرسرخ بررسی شد و پارامترهای سرعت انتقال جرم، چروکیدگی، شاخص‌های رنگ، تغییر رنگ کلی و آبیگری مجدد محاسبه شدند.

مواد و روش‌ها

– تعیین درصد رطوبت اولیه برش‌ها

برای انجام این پژوهش، پرتقال تامسون با اندازه و شکل یکسان از شهرستان قائم‌شهر تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. برای تعیین رطوبت اولیه برش‌ها، نمونه‌های تازه پرتقال داخل آون فن‌دار (شیماز، ایران) با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت زمان ۴ ساعت قرار گرفتند.

– تیماردهی برش‌های پرتقال با امواج مایکروویو

برای تیماردهی با مایکروویو، پرتقال‌ها درون دستگاه مایکروویو آزمایشگاهی (جی‌پلاس، مدل GMW-M425S.MIS00، شرکت گلدیران، ایران) قرار گرفتند و به مدت ۰، ۱، ۲ و ۳ دقیقه با توان ۳۳۰ وات تیماردهی شدند. بعد از تیماردهی، برش‌هایی با ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر توسط اسلایسر صنعتی (جرمی، ایتالیا)^۱ از پرتقال‌ها تهیه و به صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن فرسرخ قرار گرفتند.

¹ Girmi, Italy ² Effective moisture diffusivity coefficient (D_{eff})

³ Fick's second law of diffusion

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسوخ

در این رابطه، A_1 : سطح نمونه تازه (سانتی متر مربع) و A_2 : سطح نمونه خشک شده (سانتی متر مربع) است. در نرم افزار ایمیج جی برای تبدیل فضای رنگی RGB به $L^* a^* b^*$ از پلاگین Color Space Converter استفاده شد. مقادیر پارامتر تغییر رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه محاسبه شد (Salehi, 2019).

- ظرفیت آگیری مجدد

برش های پرتقال خشک در ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر (در بشر شیشه ای با حجم ۲۵۰ میلی لیتر) در دمای ۵۰ درجه سلسیوس غوطه ور شدند و ظرفیت آگیری مجدد نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفت. یک حمام آب (مدل R.J42، شرکت پارس آزما، ایران) ۳۰ دقیقه قبل از انجام این آزمایش در دمای مورد نظر تنظیم و برای فرآیند آگیری مجدد استفاده شد. بعد از ۳۰ دقیقه و پس از حذف آب، وزن نمونه های آگیری شده ثبت شد. آزمایش های آگیری مجدد در سه تکرار انجام شد (Salehi et al., 2022).

- تجزیه و تحلیل آماری

تمامی آنالیزها با سه تکرار انجام شدند. نرم افزار SPSS برای ویندوز (نسخه ۲۱) برای تجزیه و تحلیل های آماری استفاده شد و نتایج به صورت میانگین \pm انحراف معیار گزارش شدند. از آزمون چند دامنه ای دانکن برای تعیین تفاوت معنی دار در سطح اطمینان ۹۵٪ بین میانگین ها استفاده شد.

یافته ها

- اثر پیش تیمار مایکروویو بر زمان خشک شدن پیش تیمار میوه ها قبل از خشک شدن به عنوان روشی مناسب برای بهبود کیفیت میوه های خشک و کاهش زمان خشک شدن پیشنهاد شده است (Mothibe et al., 2014; Zhou et al., 2021). میانگین رطوبت اولیه برش های پرتقال استفاده شده در این پژوهش (با پوست) برابر ۸۴/۵۳ درصد بر پایه مرطوب بود. خروج ۸۰ درصد رطوبت از برش های پرتقال به عنوان زمان خشک شدن در نظر گرفته

(Salehi and Satorabi, 2021). به منظور مدل کردن داده های تجربی خشک کردن و به دست آوردن ثابت های مدل ها نیز از نرم افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد. برای محاسبه مجموع مربعات خطا، جذر میانگین مربعات خطا^۱ و ضریب تبیین (r)^۲ به ترتیب از معادلات ۱، ۲ و ۳ استفاده شد (Salehi and Satorabi, 2021).

$$SSE = \sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - T_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N [O_i - T_i]^2}{\sum_{i=1}^N [O_i - T_m]^2}} \quad (3)$$

در این معادلات، O مربوط به داده های آزمایشگاهی، T مقادیر پیش بینی شده و N تعداد داده ها است. T_m نیز با استفاده از معادله ۴ به دست می آید:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N} \quad (4)$$

- تغییرات سطح و شاخص های رنگی

جهت بررسی تغییرات سطح و رنگ برش های پرتقال خشک و آگیری شده از روش پردازش تصویر استفاده گردید. در این روش از یک اسکنر اچ پی^۴، جهت تهیه عکس از نمونه های تازه، خشک و آگیری شده استفاده شد. تصاویر گرفته شده توسط نرم افزار Image J (Image J software version 1.42e, USA) آنالیز و مساحت و پارامترهای رنگی آنها شامل روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*) و زردی (b^*) محاسبه شد. درصد تغییر اندازه سطح برش های پرتقال خشک و آگیری شده که معیاری از چروکیدگی و کاهش سطح محصول در طی فرآیند خشک کردن می باشد، با استفاده از روش پردازش تصویر و رابطه ۵ محاسبه و گزارش شد.

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (5)$$

¹ Sum of squared error (SSE)

³ Correlation coefficient (r)

² Root mean square error (RMSE)

⁴ Hp Scanjet 300, China

قابل ملاحظه زمان فرآوری مواد غذایی و افزایش ظرفیت تولید و همچنین بهبود کیفیت و ماندگاری محصولات نهایی می شود (Díaz *et al.*, 2003; Lagnika *et al.*, 2021). در این پژوهش، همه برش‌های پرتقال تا رسیدن به وزن ثابت درون خشک کن فرورسرخ شدند و هر ۱ دقیقه تغییرات وزن آنها ثبت شد. شکل ۲ افت رطوبت برش‌های پرتقال تیمار شده با مایکروویو طی فرآیند خشک شدن با فرورسرخ را نشان می‌دهد.

در شکل ۱ اثر زمان اعمال مایکروویو بر زمان خشک شدن برش‌های پرتقال در خشک کن فرورسرخ گزارش شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با اعمال مایکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش یافته است. گرمایش مایکروویو شکلی از گرمایش دی‌الکتریک است که به وسیله آن تولید گرما در مواد با رسانایی الکتریکی پایین توسط یک میدان الکتریکی با فرکانس بالا امکان پذیر است (Seremet *et al.*, 2020). استفاده از انرژی مایکروویو در برخی از فرآیندها منجر به کاهش

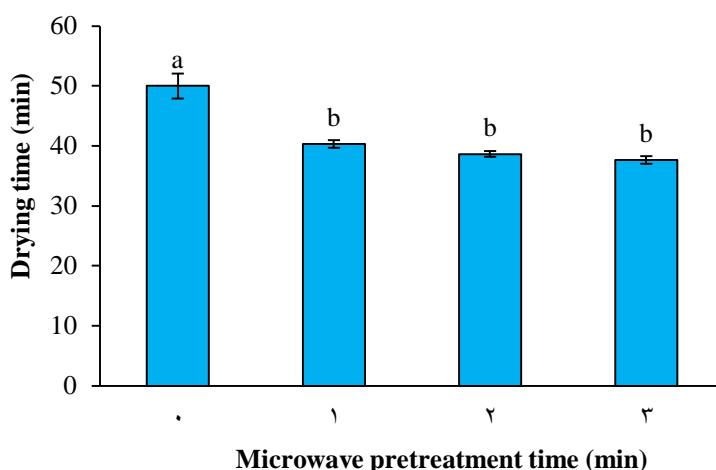


Figure 1- Impact of microwave pretreatment on drying time of orange slices in infrared dryer. Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

شکل ۱- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر زمان خشک شدن برش‌های پرتقال در خشک کن فرورسرخ. حروف مختلف بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$).

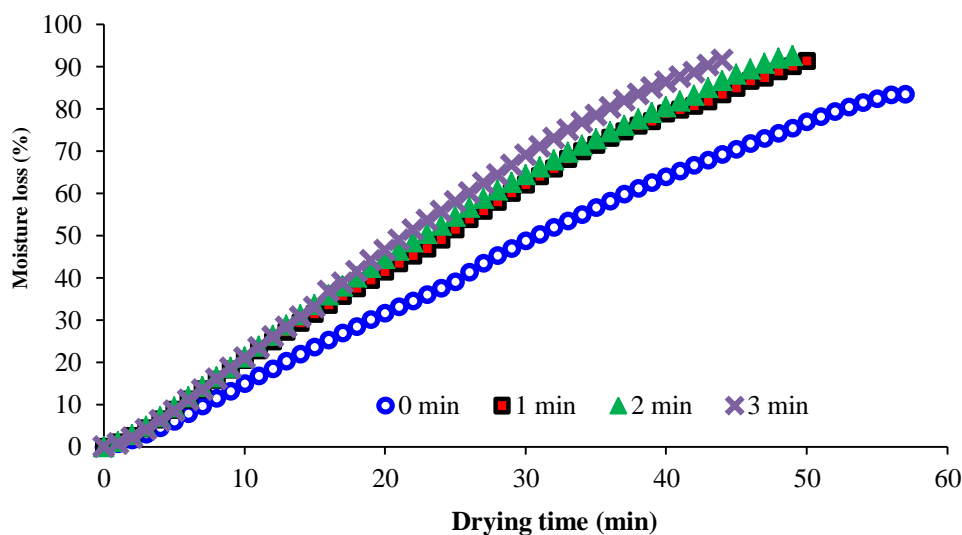


Figure 2- Impact of microwave pretreatment on moisture loss rate of orange slices during drying process in infrared dryer

شکل ۲- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر سرعت افت رطوبت برش‌های پرتقال طی فرآیند خشک شدن در خشک کن فرورسرخ

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسرخ

رطوبت مؤثر میوه ها و سبزی ها مسائل مهمی برای شبیه سازی خشک کردن توسط مدل های سینتیکی هستند و برای تجزیه و تحلیل انتقال رطوبت از محصولات طی فرآیند خشک کردن اساسی است (Darvishi *et al.*, 2014). با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک کردن برش های پرتقال با خشک کن فرسرخ و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل های سینتیکی مختلف، نتایج برای هر مدل مورد بررسی در جداول ۱ تا ۶ گزارش شد. در جدول ۱ ضرایب مدل پیچ برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (n و k) برای برش های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل پیچ به ترتیب در محدوده ۰/۰۳۰ تا ۰/۰۱۵۴، ۰/۹۹۶۱ تا ۰/۹۹۹۰ و ۰/۰۷۵ تا ۰/۰۱۷۷ به دست آمد.

- اثر مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

در سیستم خشک کردن مایکروویو، انرژی مایکروویو دارای ظرفیت تولید حرارت داخلی است و می تواند به راحتی به لایه های داخلی محصول نفوذ کند. جذب سریع انرژی باعث تبخیر سریع آب و ایجاد یک شار خروجی بخار می شود، بنابراین، در این سیستم گرادیان حرارتی و گرادیان رطوبت در یک جهت هستند (Darvishi *et al.*, 2014). در شکل ۳ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر تغییر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش های پرتقال طی خشک شدن در خشک کن فرسرخ گزارش شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت از برش های پرتقال و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن شده است.

- مدل سازی فرآیند خشک شدن برش های پرتقال

مدل های نیمه نظری و تجربی نه تنها برای توصیف سینتیک خشک کردن میوه ها و سبزی ها، بلکه طراحی و بهینه سازی خشک کن ها نیز استفاده می شوند. برآورد سرعت خشک کردن برای خشک کردن لایه نازک و عوامل انتشار

۳۶

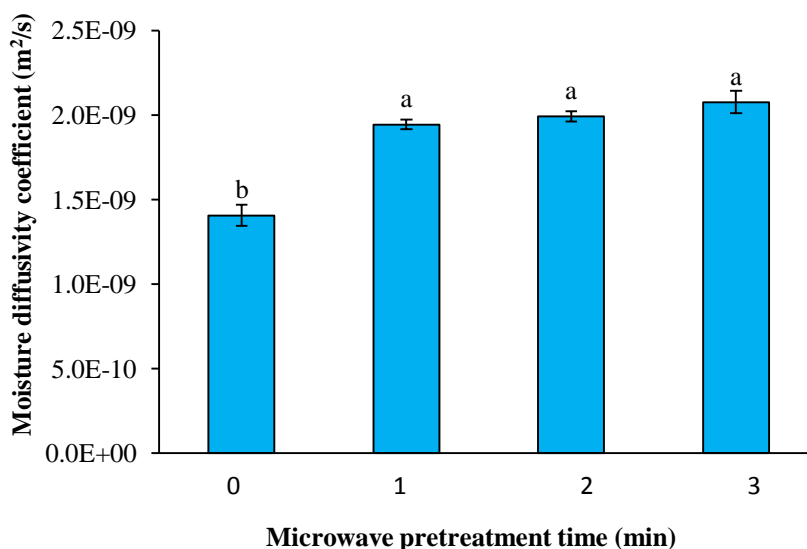


Figure 3- Impact of microwave pretreatment on effective moisture diffusivity coefficient of orange slices in infrared dryer.

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

شکل ۳- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش های پرتقال در خشک کن فرسرخ.

حروف مختلف بالای ستون ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$).

جدول ۱- ضرایب مدل بیج برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ

Table 1- The coefficients of Page model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	k ¹	n ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	0.0062	1.4202	0.0058	0.9980	0.0105
1 min	0.0079	1.4393	0.0114	0.9985	0.0153
2 min	0.0093	1.4097	0.0096	0.9986	0.0145
3 min	0.0076	1.4753	0.0092	0.9988	0.0142

¹ The coefficients of Page model ($MR = \exp(-kt^n)$)

برای برش‌های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل تقریب انتشار به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۳۲ تا ۰/۰۲۳۰، ۰/۹۹۷۲ تا ۰/۹۹۹۵ و ۰/۰۰۷۹ تا ۰/۰۲۱۹ به دست آمد.

در جدول ۵ ضرایب مدل نیوتن برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضریب ثابت مدل نیوتن (k) برای برش‌های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل نیوتن به ترتیب در محدوده ۰/۱۱۲۴ تا ۰/۱۳۰۲، ۰/۹۶۹۱ تا ۰/۹۸۱۲ و ۰/۰۵۱۷ تا ۰/۰۷۲۴ به دست آمد.

در جدول ۶ ضرایب مدل میدیلی برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل میدیلی (a, k, n) برای برش‌های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل میدیلی به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۲۳، ۰/۹۹۹۷ تا ۰/۹۹۹۹ و ۰/۰۰۳۴ تا ۰/۰۰۶۷ به دست آمد.

در جدول ۲ ضرایب مدل ونگ و سینگ برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل ونگ و سینگ (a و b) برای برش‌های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل ونگ و سینگ به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۴۳ تا ۰/۰۲۶۵، ۰/۹۹۶۴ تا ۰/۹۹۹۳ و ۰/۰۱۰۳ تا ۰/۰۲۲۴ به دست آمد.

در جدول ۳ ضرایب مدل هندرسون و پاییس برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل هندرسون و پاییس (a و k) برای برش‌های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به دست آمده توسط مدل هندرسون و پاییس به ترتیب در محدوده ۰/۰۶۲۹ تا ۰/۱۳۱۳، ۰/۹۸۲۵ تا ۰/۹۹۱۱ و ۰/۰۳۵۲ تا ۰/۰۵۵۳ به دست آمد.

در جدول ۴ ضرایب مدل تقریب انتشار برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش‌های پرتقال طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرسرخ گزارش شده است. در این جدول، مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل تقریب انتشار (a, k, b)

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسرخ

جدول ۲- ضرایب مدل ونگ و سینگ برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ

Table 2- The coefficients of Wang and Singh model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	a ¹	b ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	-0.0183	0.0000	0.0144	0.9980	0.0160
1 min	-0.0235	0.0001	0.0078	0.9990	0.0128
2 min	-0.0248	0.0001	0.0058	0.9992	0.0114
3 min	-0.0242	0.0001	0.0109	0.9985	0.0154

¹ The coefficients of Wang and Singh model ($MR=1+at+bt^2$)

جدول ۳- ضرایب مدل هندرسون و پابیس برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ

Table 3- The coefficients of Henderson and Pabis model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	a ¹	k ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	1.0987	0.0294	0.0765	0.9893	0.0384
1 min	1.1030	0.0376	0.1031	0.9866	0.0465
2 min	1.0977	0.0391	0.0847	0.9881	0.0433
3 min	1.1110	0.0398	0.1063	0.9856	0.0487

¹ The coefficients of Henderson and Pabis model ($MR=aexp(-kt)$)

جدول ۴- ضرایب مدل تقریب انتشار برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ

Table 4- The coefficients of Approximation of diffusion model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	a ¹	k ¹	b ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	-9.9827	0.0598	0.8929	0.0077	0.9989	0.0120
1 min	-21.0033	0.0717	0.9573	0.0168	0.9979	0.0187
2 min	-13.2233	0.0748	0.9370	0.0131	0.9982	0.0171
3 min	-27.9267	0.0768	0.9622	0.0154	0.9979	0.0186

¹ The coefficients of Approximation of diffusion model ($MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)$)

جدول ۵- ضرایب مدل نیوتن برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ

Table 5- The coefficients of Newton model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	k ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	0.0258	0.1538	0.9783	0.0541
1 min	0.0334	0.5078	0.9772	0.0599
2 min	0.0349	0.1462	0.9793	0.0564
3 min	0.0351	0.1858	0.9747	0.0637

¹ The coefficients of Newton model ($MR=exp(-kt)$)

جدول ۶- ضرایب مدل میدیلی برای محاسبه مقادیر نسبت رطوبت برش های پرتقال طی خشک کردن با خشک کن فرسرخ

Table 6- The coefficients of Midilli model for calculating moisture ratio values of orange slices during drying by infrared dryer

Microwave time	a ¹	k ¹	n ¹	b ¹	Sum of squared error (SSE)	Correlation coefficient (r)	Root mean square error (RMSE)
0 min	1.0048	-0.0220	0.9868	-0.0285	0.0018	0.9997	0.0060
1 min	1.0016	-0.0218	0.9557	-0.0339	0.0012	0.9998	0.0049
2 min	1.0070	0.0135	1.1997	-0.0039	0.0007	0.9999	0.0042
3 min	1.0023	-0.0132	1.0619	-0.0237	0.0010	0.9999	0.0048

¹ The coefficients of Midilli model ($MR=aexp(-kt^n)+bt$)

تازه استفاده شده در این پژوهش به ترتیب برابر ۳۵/۴۳، ۰/۹۶ و ۵۲/۸۵ بود. شکل ۵ اثر زمان اعمال مایکروویو بر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال خشک‌شده توسط خشک‌کن فرسرخ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال خشک‌شده ندارد ($p > 0.05$). متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال تیمار شده با مایکروویو و خشک‌شده توسط خشک‌کن فرسرخ به ترتیب برابر ۴۴/۷۰، ۳/۰۴ و ۵۵/۷۹ بود. در پژوهشی تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو بر پارامترهای رنگی برش‌های پرتقال خشک‌شده بررسی شده و متوسط شاخص‌های زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال خشک‌شده با هوای داغ به ترتیب برابر ۴۰/۷۱، ۲/۰۲ و ۵۲/۶۵ گزارش شده است (Salehi *et al.*, 2024). در شکل ۶ اثر زمان اعمال مایکروویو بر شاخص‌های رنگی برش‌های پرتقال آبیگری شده گزارش شده است. متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال آبیگری شده به ترتیب برابر ۴۱/۴۹، ۱/۶۱ و ۶۰/۵۰ بود. اعمال تیمار مایکروویو باعث کاهش روشنایی سطحی برش‌های پرتقال آبیگری شده شد؛ البته این کاهش معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). همچنین این شکل نشان می‌دهد که اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر شاخص‌های رنگی قرمزی و زردی برش‌های پرتقال آبیگری شده ندارد ($p > 0.05$).

اثر مایکروویو بر چروکیدگی سطحی

چروکیدگی مواد غذایی یک پدیده فیزیکی رایج است که طی فرآیندهای مختلف خشک‌کردن مشاهده می‌شود. این تغییرات بر کیفیت محصول خشک‌شده تأثیر می‌گذارد و باید در هنگام بررسی پروفایل‌های رطوبت و دما در ماده خشک‌شده، در نظر گرفته شود (Mayor and Sereno, 2004). متوسط اندازه برش‌های تازه پرتقال‌های استفاده شده در این پژوهش، ۴۵/۹۶ سانتی مترمربع بود که بعد از خشک شدن توسط خشک‌کن فرسرخ، متوسط اندازه آنها به ۳۴/۳۳ سانتی مترمربع کاهش یافت و بعد از آبیگری نیز متوسط اندازه آنها ۳۸/۵۵ سانتی مترمربع شد. در شکل ۴ اثر زمان اعمال مایکروویو بر چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک‌شده و آبیگری شده گزارش شده است.

اثر مایکروویو بر شاخص‌های رنگ

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک‌کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک‌کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش‌تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (Sahin and Doymaz, 2017). روش مورد استفاده برای خشک‌کردن مواد به‌طور قابل‌توجهی بر سه پارامتر رنگی تأثیر می‌گذارد (Krokida *et al.*, 2001). متوسط شاخص زردی، قرمزی و روشنایی برش‌های پرتقال

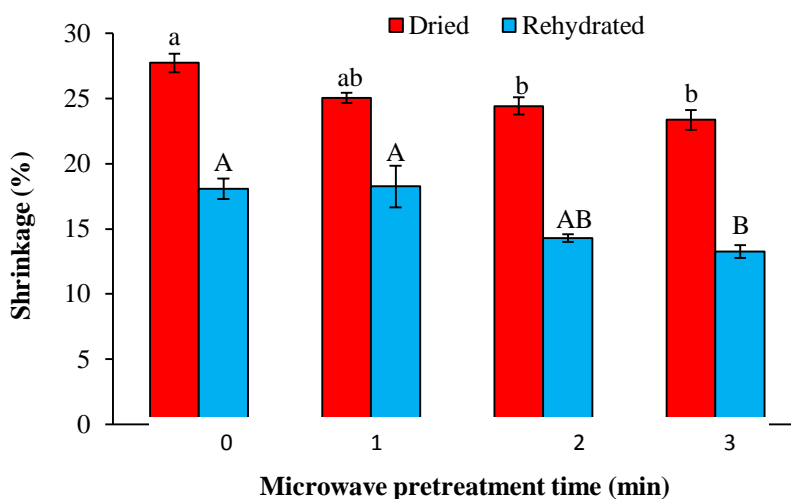


Figure 4- Impact of microwave pretreatment on shrinkage of dried and rehydrated orange slices. Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

شکل ۴- تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو بر چروکیدگی برش‌های پرتقال خشک و آبیگری شده.

حروف مختلف بالای ستون‌ها نشان‌دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$).

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فروسرخ

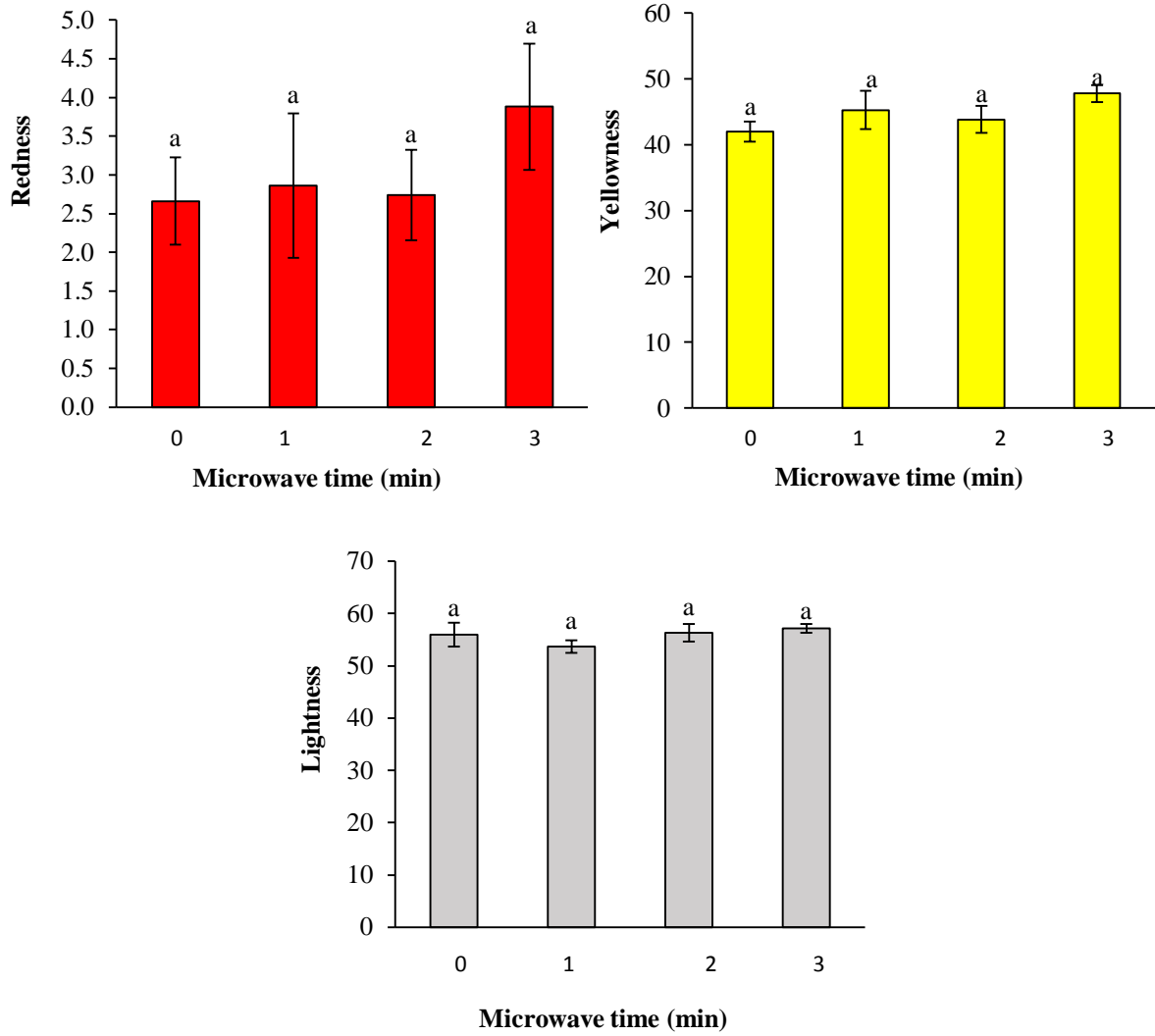
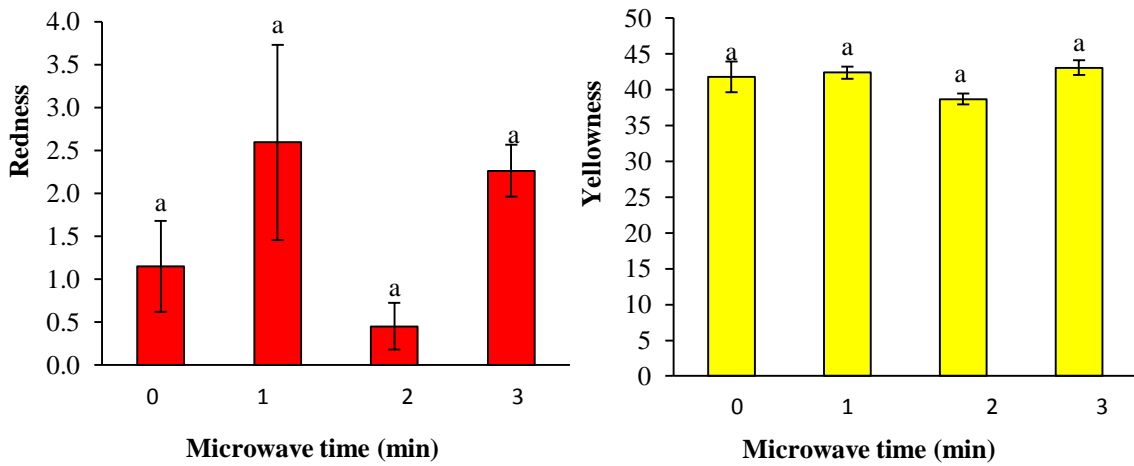


Figure 5- Impact of microwave pretreatment on color indexes of dried orange slices. Same letters above the columns indicate no significant difference between means ($p>0.05$).

شکل ۵- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر شاخص های رنگی برش های پرتقال خشک شده.
حروف یکسان بالای ستون ها نشان دهنده عدم تفاوت معنادار بین میانگین ها است ($p>0.05$).



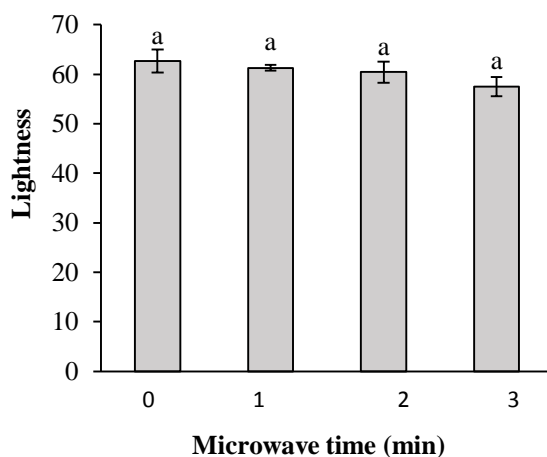


Figure 6- Impact of microwave pretreatment on color indexes of rehydrated orange slices.
Same letters above the columns indicate no significant difference between means ($p > 0.05$).

شکل ۶- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر شاخص های رنگی برش های پرتقال آبگیری شده.

حروف یکسان بالای ستون ها نشان دهنده عدم تفاوت معنادار بین میانگین ها است ($p > 0.05$).

(Salehi *et al.*, 2024).

بحث

خشک کردن یک روش متداول نگهداری است که برای ماندگاری طولانی مدت غذاها استفاده می شود. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، میانگین زمان خشک شدن برش های پرتقال در خشک کن فروسرخ به صورت معناداری از ۵۰/۰۰ به ۳۷/۶۷ دقیقه کاهش یافت ($p < 0.05$). از نظر آماری اختلاف معناداری بین اثر زمان های مختلف تیماردهی با مایکروویو بر زمان خشک شدن برش های پرتقال در خشک کن فروسرخ نبود ($p > 0.05$). Özkan-Karabacak و همکاران (۲۰۲۰) اثر پیش تیمار مایکروویو بر سینتیک انتقال جرم و ظرفیت آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده در خلأ را بررسی و گزارش کردند که استفاده از این پیش تیمار باعث افزایش سرعت خروج آب و کاهش زمان خشک شدن برش های پرتقال طی فرایند خشک کردن با خلأ می شود.

با توجه به شکل ۲، تیماردهی برش های پرتقال توسط امواج مایکروویو باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه ها شده است. همراستا با نتایج این پژوهش، Minaei و Motevali (۲۰۱۲) گزارش کردند که استفاده از پیش تیمار مایکروویو باعث کاهش مصرف انرژی و زمان خشک شدن دانه های انار می شود.

شکل ۷ تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر شاخص تغییر رنگ کل برش های پرتقال خشک و آبگیری شده را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر شاخص تغییر رنگ کل برش های پرتقال خشک و آبگیری شده ندارد ($p > 0.05$).

- اثر مایکروویو بر آبگیری مجدد

در روش مایکروویو، جذب سریع انرژی توسط مولکول های آب باعث تبخیر سریع آب شده که منجر به افزایش سرعت خشک شدن محصولات کشاورزی می گردد. طی این فرآیند جریانی از بخار به سمت سطح بیرونی محصول ایجاد می شود. علاوه بر بهبود سرعت خشک کردن، این شار خروجی می تواند به جلوگیری از چروکیدگی و انقباض ساختار بافت که در اکثر روش های خشک کردن سنتی رخ می دهد، کمک کند؛ بنابراین ویژگی های آبرسانی بهتری در محصولات خشک شده در مایکروویو قابل انتظار است (Díaz *et al.*, 2003). در شکل ۸ اثر زمان اعمال مایکروویو بر آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده توسط خشک کن فروسرخ گزارش شده است. همراستا با نتایج این پژوهش، Salehi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر درصد آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده توسط هوای داغ دارد ($p < 0.05$) و با اعمال ۲ و ۳ دقیقه مایکروویو بر برش های پرتقال، درصد آبگیری مجدد افزایش یافته است

استفاده از مایکروویو به عنوان پیش تیمار قبل از خشک کردن برش های پرتقال توسط پرتو فرسرخ

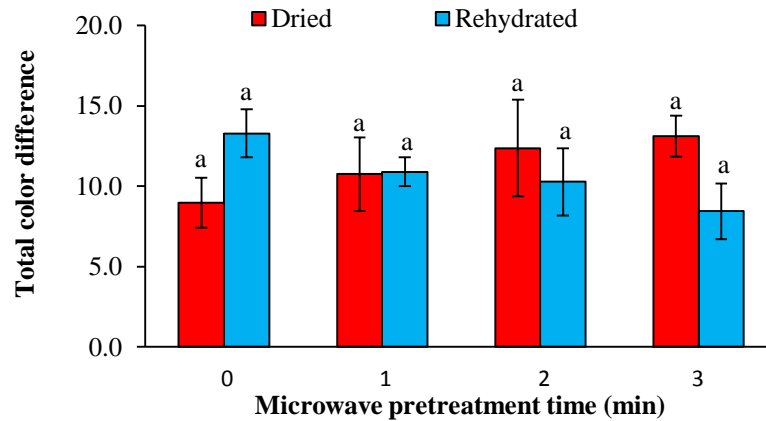


Figure 7- Impact of microwave pretreatment on total color difference index of dried and rehydrated orange slices.

Same letters above the columns indicate no significant difference between means ($p > 0.05$).

شکل ۷- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر شاخص تغییر رنگ کلی برش های پرتقال خشک و آبگیری شده.

حروف یکسان بالای ستون ها نشان دهنده عدم تفاوت معنادار بین میانگین ها است ($p > 0.05$).

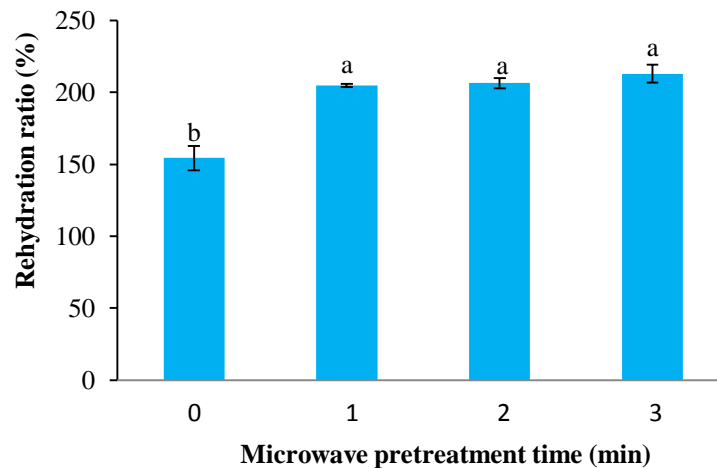


Figure 8- Impact of microwave pretreatment on rehydration ratio of dried orange slices by infrared dryer.

Different letters above the columns indicate significant difference ($p < 0.05$).

شکل ۸- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده با خشک کن فرسرخ.

حروف مختلف بالای ستون ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ($p < 0.05$).

مؤثر رطوبت و بالاترین سرعت خشک شدن مربوط به روش مایکروویو-خلأ است. همچنین زمان خشک شدن پوست پرتقال در خشک کن های سینی، فرسرخ-خلأ و مایکروویو - خلأ به ترتیب برابر ۳۰۰، ۱۰۶ و ۲۰/۷ دقیقه بوده است (Abderrahim, Bozkir *et al.*, 2021). همکاران (۲۰۲۲) تأثیر خشک کردن همرفتی و مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش های پرتقال خونی طی فرآیند خشک کردن را بررسی کردند. در این پژوهش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش های پرتقال برای خشک کردن با مایکروویو در محدوده $2/07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $15/67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و برای خشک کردن همرفتی از $0/07 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/97 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش شده است.

در این پژوهش، با افزایش زمان تیماردهی با مایکروویو از صفر به ۳ دقیقه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای برش های پرتقال قرار گرفته در خشک کن فرسرخ به صورت معنی داری از $1/41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ به $2/08 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش یافت ($p < 0.05$). البته از نظر آماری اختلاف معناداری بین اثر زمان های مختلف تیماردهی با مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برش های پرتقال هنگام خشک شدن در خشک کن فرسرخ نبود ($p > 0.05$). گروهی از پژوهشگران تأثیر روش های مختلف خشک کردن شامل سینی، فرسرخ-خلأ و مایکروویو-خلأ بر ویژگی های کیفی پوست پرتقال را بررسی کردند. بر اساس نتایج گزارش توسط این پژوهشگران، بیشترین مقدار ضریب نفوذ

تجزیه و تحلیل سینتیک خشک کردن روشی برای پیش‌بینی رفتار محصولات در طول فرآیندهای خشک کردن است. امکان مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک کردن و فراهم کردن مناسب‌ترین شرایط عملیاتی در مرحله طراحی از مزایای کلیدی این روش است و برای بهینه‌سازی فرآیند خشک کردن، طراحی تجهیزات و بهبود کیفیت محصول قابل توجه است (Aykin-Dinçer *et al.*, 2020; Karimi *et al.*, 2021). خشک شدن برش‌های پرتقال با انتخاب بهترین تناسب بین نسبت رطوبت آزمایشی و نسبت رطوبت پیش‌بینی شده به دست آمده از شش مدل مختلف خشک کردن لایه‌نازک، مدل‌سازی و نتایج هر مدل گزارش شد. در مجموع، نتایج مدل‌سازی سینتیکی داده‌های آزمایشگاهی خشک کردن برش‌های پرتقال نشان داد که بهترین مدل برای این فرآیند با بالاترین برازش، بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین خطا، مدل میدیلی است. مشابه این پژوهش، Karimi و همکاران (۲۰۲۱) نیز استفاده از مدل میدیلی برای مدل‌سازی و بررسی سینتیک خشک شدن کنگر پیش‌تیمار شده با مایکروویو را پیشنهاد کرده‌اند.

چروکیدگی، کوچک شدن یا کاهش حجم خارجی مهمترین تغییر فیزیکی است که یک محصول در طول خشک شدن متحمل می‌شود. این فرآیند با انتقال رطوبت داخلی همراه است. عواملی که در تغییر شکل و چروکیدگی نقش دارند عبارتند از انتقال همزمان جرم و حرارت در طول خشک شدن محصول و تنش‌های اعمال شده بر ساختار سلولی (Mayor and Sereno, 2004; Rokhbin and Azadbakht, 2021). براساس نتایج گزارش شده در شکل ۴، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک‌شده و آگیری شده داشت ($p < 0.05$) و اعمال این پیش‌تیمار باعث کاهش درصد چروکیدگی سطحی محصول شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، میانگین چروکیدگی سطحی برش‌های پرتقال خشک‌شده به صورت معنی‌داری از ۲۷/۴۲ درصد به ۲۳/۳۶ درصد کاهش یافت ($p < 0.05$). بعد از فرآیند آگیری مجدد، از نظر پارامتر تغییرات سطح (چروکیدگی سطحی) نسبت به نمونه تازه، نمونه شاهد بیشترین مقدار (۱۸/۰۸٪) و نمونه پیش‌تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳ دقیقه کمترین مقدار (۱۳/۲۴٪) را

داشتند. Rokhbin and Azadbakht (۲۰۲۱) چروکیدگی برش‌های پرتقال در طول خشک کردن مایکروویو همراه با پیش‌تیمار اهمی را بررسی کردند. طی فرآیند خشک کردن در مایکروویو، نمونه‌ها عکس‌برداری شدند و در فواصل ۱ دقیقه‌ای وزن شدند تا درصد چروکیدگی بررسی شود. نتایج نشان داد که در طول فرآیند گرمایش با مایکروویو، هرگونه افزایش قدرت مایکروویو (از ۹۰ به ۹۰۰ وات) منجر به تشدید سطح انقباض برش‌های پرتقال می‌شود.

رنگ عامل قابل‌توجهی برای ترجیح خرید مصرف‌کنندگان است. به‌طور کلی، تجزیه رنگ‌دانه (به‌ویژه کاروتنوئیدها) و واکنش‌های غیر آنزیمی (واکنش میلارد) منجر به تغییر رنگ در برش‌های پرتقال می‌شود (Özkan-Karabacak *et al.*, 2020). با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو به مدت ۳ دقیقه، مقدار عددی شاخص تغییر رنگ کل برای برش‌های پرتقال خشک توسط فروسرخ از ۸/۹۷ به ۱۳/۱۳ افزایش یافت ($p > 0.05$). برای نمونه‌های آگیری شده نیز مشاهده شد که با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو به مدت ۳ دقیقه، مقدار عددی شاخص تغییر رنگ کل از ۱۳/۲۷ به ۸/۴۵ کاهش یافت ($p > 0.05$). این موضوع نشان می‌دهد که با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو، تغییرات رنگی نمونه آگیری شده کمتر شده و از نظر ظاهری و شاخص‌های رنگی، این برش‌ها به برش‌های تازه پرتقال نزدیک‌تر هستند. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، Salehi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که اعمال پیش‌تیمار مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر شاخص تغییر رنگ کل برش‌های پرتقال خشک (توسط هوای داغ) و آگیری شده دارد ($p < 0.05$) و شاخص تغییر رنگ کل با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو کاهش یافته و از نظر آماری اختلاف معناداری بین نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳ دقیقه با نمونه شاهد وجود داشته است ($p < 0.05$). Özkan-Karabacak و همکاران (۲۰۲۰) مقدار شاخص تغییر رنگ کل برش‌های پرتقال پیش‌تیمار شده توسط مایکروویو و خشک‌شده در خلأ را در محدوده ۵/۸۰ تا ۱۱/۶۲ گزارش کردند.

براساس نتایج گزارش شده در شکل ۸، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آگیری مجدد برش‌های پرتقال خشک‌شده دارد ($p < 0.05$) و با اعمال تیمار مایکروویو بر برش‌های پرتقال، درصد آگیری مجدد

افزایش یافت. البته بین زمان های مختلف تیمار مایکروویو از نظر آماری اختلاف معناداری مشاهده نشد ($p > 0.05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، میانگین آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده از ۱۵۴/۲۵ درصد به ۲۱۲/۸۵ درصد افزایش یافت. Özkan-Karabacak و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که استفاده از پیش تیمار مایکروویو باعث افزایش ظرفیت آبگیری مجدد برش های پرتقال خشک شده با خشک کن خلأ می شود. این افزایش می تواند به دلیل شکاف های بین سلولی ایجاد شده توسط انرژی مایکروویو باشد که در این صورت نمونه خشک می تواند آب بیشتری در طول آبگیری مجدد جذب کند (Horuz et al., 2017). Delfiya و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که پیش تیمار مایکروویو به مدت ۳ دقیقه باعث افزایش سرعت خشک شدن و بهبود آبگیری مجدد هویج خشک شده می شود. همچنین با اعمال این پیش تیمار تغییرات در سفتی بافت و رنگ حداقل گزارش شده است.

نتیجه گیری

به دلیل تنوع زیاد روش های خشک کردن، انتخاب بهترین روش برای یک محصول معین دشوار است. هنگام انتخاب یک روش یا فرآیند، پارامترهای مختلفی از جمله کنترل دقیق فرآیند، زمان خشک کردن کوتاه، مصرف انرژی کم و کیفیت محصول خشک شده باید در نظر گرفته شود. خشک کردن با استفاده از اشعه فرسرخ روشی است که در مقایسه با خشک کردن همرفتی تلفات انرژی کمتری را ارائه می دهد، زیرا انرژی در یک موج الکترومغناطیسی مستقیماً توسط محصول جذب می شود. در این پژوهش اثر پیش تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک کردن برش های پرتقال در خشک کن فرسرخ بررسی شد. پیش تیمار مایکروویو سبب افزایش سرعت خروج رطوبت، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک کردن برش های پرتقال شد. اعمال تیمار مایکروویو باعث کاهش زمان خشک شدن برش های پرتقال شد و این تأثیر معنی دار بود ($p < 0.05$). با افزایش زمان تیمار مایکروویو، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت معنی داری افزایش یافت. جهت بررسی سینتیک خشک شدن برش های پرتقال تیمار شده،

مدل های ریاضی بر داده های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل میدیلی بر اساس بالاترین برازش، بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین خطا، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، مقدار تغییرات سطح برش های پرتقال خشک شده به صورت معنی داری از ۲۷/۷ درصد به ۲۳/۴ درصد کاهش یافت ($p < 0.05$). همچنین با افزایش زمان تیمار مایکروویو از ۰ به ۳ دقیقه، مقدار تغییرات سطح برش های پرتقال آبگیری شده به صورت معنی داری از ۱۸/۱ درصد به ۱۳/۲ درصد کاهش یافت ($p < 0.05$). اعمال مایکروویو تأثیر معنی داری بر تغییر شاخص های رنگی (زردی، قرمزی و روشنائی) برش های پرتقال خشک و آبگیری شده نداشت ($p > 0.05$). اعمال پیش تیمار مایکروویو تأثیر معنی داری بر شاخص تغییر رنگ کل برش های پرتقال خشک و آبگیری شده نداشت ($p > 0.05$). با اعمال تیمار مایکروویو، آبگیری مجدد برش های پرتقال به صورت معنی داری افزایش یافت. به طور کلی، استفاده از پیش تیمار مایکروویو قبل از خشک کردن برش های پرتقال به دلیل افزایش سرعت انتقال جرم، کاهش زمان خشک شدن، کاهش چروکیدگی سطحی و افزایش آبگیری مجدد توصیه می شود.

سپاسگزاری

از حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا از این پژوهش، قدردانی می کنیم.

منابع

- Abderrahim, K.A., Remini, H., Dahmoune, F., Mouhoubi, K., Berkani, F., Abbou, A., Aoun, O., Dairi, S., Belbahi, A., Kadri, N. & Madani, K. (2022). Influence of convective and microwave drying on Algerian blood orange slices: Drying kinetics and characteristics, modeling, and drying energetics. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14176. <http://doi.org/10.1111/jfpe.14176>.
- Aykın-Dinçer, E., Kılıç-Büyükkurt, Ö. & Erbaş, M. (2020). Influence of drying techniques and temperatures on drying kinetics and quality characteristics of beef slices. *Heat and Mass Transfer*, 56(1), 315-320. <http://doi.org/10.1007/s00231-019-02712-z>.

Bozkir, H., Tekgül, Y. & Erten, E.S. (2021). Effects of tray drying, vacuum infrared drying, and vacuum microwave drying techniques on quality characteristics and aroma profile of orange peels. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1), e13611. <http://doi.org/10.1111/jfpe.13611>.

Darvishi, H., Asl, A.R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G. & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 130-138. <http://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.03.002>.

Delfiya, A., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N. & Mishra, A.K. (2018). Effect of microwave blanching and brine solution pretreatment on the quality of carrots dried in solar-biomass hybrid dryer. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2), e13510. <http://doi.org/10.1111/jfpp.13510>.

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. [http://doi.org/10.1016/S1466-8564\(03\)00016-X](http://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00016-X).

Eftekhari, A., Salehi, F., Gohari Ardabili, A. & Aghajani, N. (2023a). Effect of ultrasonic pretreatments and process condition on mass transfer rate during osmotic dehydration of orange slices. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 20(135), 21-30. <http://doi.org/10.22034/fsct.19.135.31>.

Eftekhari, A., Salehi, F., Gohari Ardabili, A. & Aghajani, N. (2023b). Effects of basil seed and guar gums coatings on sensory attributes and quality of dehydrated orange slices using osmotic-ultrasound method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127056. <http://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127056>.

Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H. & Maskan, M. (2017). Effects of hybrid (microwave-convective) and convective drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, 230, 295-305. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.046>.

Karimi, S., Layeghinia, N. & Abbasi, H. (2021). Microwave pretreatment followed by associated microwave-hot air drying of *Gundelia tournefortii* L.: drying kinetics,

energy consumption and quality characteristics. *Heat and Mass Transfer*, 57(1), 133-146. <http://doi.org/10.1007/s00231-020-02948-0>.

Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. & Saravacos, G.D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(1), 53-59. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x>.

Lagnika, C., Riaz, A., Jiang, N., Song, J., Li, D., Liu, C., Wei, Q. & Zhang, M. (2021). Effects of pretreatment and drying methods on the quality and stability of dried sweet potato slices during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), e15807. <http://doi.org/10.1111/jfpp.15807>.

Mayor, L. & Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373-386. [http://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](http://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4).

Mongpraneet, S., Abe, T. & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. *Journal of Food Engineering*, 55, 147-156.

Motevali, A. & Minaei, S. (2012). Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 18(1), 63-72. <http://doi.org/10.2298/CICEQ110702047M>.

Mothibe, K.J., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Wang, Y.C. & Cheng, X. (2014). Effects of ultrasound and microwave pretreatments of apple before spouted bed drying on rate of dehydration and physical properties. *Drying Technology*, 32(15), 1848-1856. <http://doi.org/10.1080/07373937.2014.952381>.

Özkan-Karabacak, A., Acoğlu, B., Yolci Ömeroğlu, P. & Çopur, Ö.U. (2020). Microwave pre-treatment for vacuum drying of orange slices: Drying characteristics, rehydration capacity and quality properties. *Journal of Food Process Engineering*, 43(11), e13511. <http://doi.org/10.1111/jfpe.13511>.

Rokhbin, A. & Azadbakht, M. (2021). The shrinkage of orange slices during microwave drying and ohmic pretreatment. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15400. <http://doi.org/10.1111/jfpp.15400>.

Sahin, M. & Doymaz, İ. (2017). Estimation of cauliflower mass transfer parameters during

convective drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(2), 507-517. <http://doi.org/10.1007/s00231-016-1835-0>.

Salehi, F. (2019). Color changes kinetics during deep fat frying of kohlrabi (*Brassica oleracea var. gongylodes*) slice. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 511-519. <http://doi.org/10.1080/10942912.2019.1593616>.

Salehi, F. (2020). Recent applications and potential of infrared dryer systems for drying various agricultural products: A review. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 586-602.

<http://doi.org/10.1080/15538362.2019.1616243>.

Salehi, F., Cheraghi, R. & Rasouli, M. (2022). Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. *Scientific Reports*, 12(1), 15392. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-19826-w>.

Salehi, F., Samary, K. & Tashakori, M. (2024). Effect of microwave pretreatment on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration of dried orange slices. *Food Research Journal*, 33(4), 63-75. <http://doi.org/10.22034/fr.2024.59519.1913>.

Salehi, F. & Satorabi, M. (2021). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 519-527. <http://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>.

Sánchez-Sáenz, C.M., Nascimento, V.R., Biagi, J.D. & Oliveira, R.A.d. (2015). Mathematical modeling of the drying of orange bagasse associating the convective method and infrared radiation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(12), 1178-1184. <http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1178-1184>.

Seremet, L., Nistor, O.-V., Andronoiu, D.G., Mocanu, G.D., Barbu, V.V., Maidan, A., Rudi, L. & Botez, E. (2020). Development of several hybrid drying methods used to obtain red beetroot powder. *Food Chemistry*, 315, 125637.

<http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125637>.

Srikiatden, J. & Roberts, J.S. (2006). Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *Journal of Food Engineering*, 74(1), 143-152. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.02.026>.

Swasdisevi, T., Devahastin, S., Ngamchum, R. & Soponronnarit, S. (2007). Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(3), 809-816.

Talens, C., Castro-Giraldez, M. & Fito, P.J. (2016). A thermodynamic model for hot air microwave drying of orange peel. *Journal of Food Engineering*, 175, 33-42. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.12.001>.

Verma, S., Sharma, V. & Kumari, N. (2020). Microwave pretreatment of tomato seeds and fruit to enhance plant photosynthesis, nutritive quality and shelf life of fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 111015. <http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111015>.

Zhou, Y.-H., Staniszewska, I., Liu, Z.-L., Zielinska, D., Xiao, H.-W., Pan, Z., Nowak, K.W. & Zielinska, M. (2021). Microwave-vacuum-assisted drying of pretreated cranberries: Drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity. *LWT*, 146, 111464. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111464>.

Application of Microwave as Pretreatment before Drying of Orange Slices by Infrared Radiation

F. Salehi ^{a*}, M. Tashakori ^b, K. Samary ^b

^a Associate Professor of the Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

^b MSc Student of the Department of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Received: 9 January 2024

Accepted: 13 June 2024

Abstract

Introduction: Microwave heating is a form of dielectric heating by which it is possible generate heat in materials of low electrical conductivity by an applied high-frequency electric field. Drying by the use of infrared radiation is a method that offers lower energy loss as compared to the convective drying, since the energy in an electromagnetic wave is directly absorbed by the product.

Materials and Methods: In order to apply microwave pretreatment, the oranges were placed in the microwave for 0, 1, 2, and 3 min, and after the treatment, slices with a thickness of 0.5 cm were prepared from the oranges and, then the slices were dried using an infrared lamp with a power of 250 W. In this research, the effect of microwave pretreatment on mass transfer rate, effective moisture diffusivity coefficient, shrinkage, color indexes, and rehydration of orange slices dried by infrared method was investigated and its drying kinetics was modeled.

Results: By increasing the microwave treatment time from 0 to 3 minutes, the effective moisture diffusivity coefficient was increased. Kinetic modeling results of the experimental data of drying orange slices showed that the best model for this process with the highest fit, the highest value of correlation coefficient, and the lowest error is Midilli's model. The application of microwave had a significant effect on the change of surface shrinkage of dried and rehydrated orange slices ($p < 0.05$) and application of this pretreatment reduced the surface shrinkage of the product. Application of microwave had no significant effect on the change of color indexes (yellowness, redness, lightness, and total color change) of dried and rehydrated orange slices ($p > 0.05$). By increasing the microwave treatment time from 0 to 3 min, the average rehydration of dried orange slices in the infrared dryer increased from 154.25% to 212.85%.

Conclusion: In general, the use of microwave pretreatment before drying orange slices due to increasing mass transfer rate, reducing surface shrinkage, and increasing rehydration, is recommended.

Keywords: Color Indexes, Infrared, Midilli Model, Rehydration, Shrinkage.

* Corresponding Author: F.Salehi@Basu.ac.ir