



ساخت و ارزیابی خشک‌کن هیبریدی میکروویو- هوای داغ مجهز به سامانه تصویربرداری بر خط

ابوالفضل قلیخانی^{۱*}، شاهین رفیعی^۲، ناهید عقیلی ناطق^۲، مرتضی آغباشلو^۳، سلیمان حسین پور^۴

۱- دانشجوی ارشد، ۲- دانشجو دکتری، ۳- استاد و ۴- استادیاران گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

* ایمیل مکاتبه کننده: A.Gholikhani@ut.ac.ir

چکیده:

استفاده از امواج میکروویو در خشک‌کن‌ها یکی از روش‌های نوین خشک‌کردن می‌باشد. در این پژوهش با توسعه یک دستگاه خشک‌کن هوای داغ، دستگاه خشک‌کن هوای داغ-میکروویو مجهز به سیستم تصویربرداری برخط، طراحی و ساخته شد. سپس سامانه با ترکیب همزمان هوای داغ و اشعه میکروویو در سه سطح سرعت هوا ۱، ۱/۵ و ۲ متربرثانیه و سه سطح دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سطح توان تابشی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات ارزیابی گردید. در نهایت داده‌های حاصل از تغییرات رطوبت نسبت به زمان، توسط برخی مدل‌های تجربی برازش گردید. مدل هندرسون پایس اصلاح شده به عنوان بهترین مدل ریاضی با توجه به معیارهای R^2 و RMSE انتخاب شد. به منظور ارزیابی سامانه تصویربرداری، از تصاویر گرفته شده از روند فرآیند، شاخص‌های قطر اصلی بزرگ و کوچک و تغییرات مساحت سطح نمونه‌ها، استخراج گردید.

واژگان کلیدی: "خشک‌کن ترکیبی"، "میکروویو-هوای داغ"، "پردازش تصویر"، "سیب"

۱- مقدمه

برخلاف سیستم‌های گرمایشی متداول، اشعه میکروویو به دلیل نفوذ به داخل ماده غذایی، حرارت را در سرتاسر ماده غذایی منتشر می‌دهد. به همین دلیل در روش میکروویو سرعت انتقال گرما سریع‌تر از سایر روش‌های حرارتی است (Abbasi and Rahimi, 2007). هدف از ترکیب روش‌های خشک‌کردن با هوای داغ و خشک‌کردن با میکروویو، استفاده از مزایای آنها و به ویژه کاهش هزینه‌های خشک‌کردن است. استفاده از انرژی میکروویو به جهت پیچیدگی و زمان استفاده از آن، می‌تواند نتایج متفاوتی به عنوان متضاد داشته باشد. اثرات این انرژی بر روی رینگ محصول نیز می‌تواند منجر به تغییرات ناخواسته در خواص آن شود (Krokida and Maroulis, 1997). با توجه به بررسی منابع علمی، روش‌های ممکن برای ترکیب جریان هوای گرم و میکروویو به شرح زیر می‌باشد که در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده در هر حوزه اشاره خواهد گردید:

۱-۱- خشک‌کردن با هوای گرم تا رطوبت بحرانی، سپس امواج میکروویو.

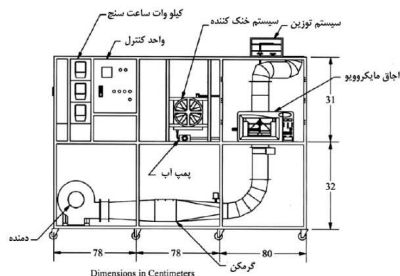
در تحقیقی با هدف مقایسه روش‌های خشک‌کردن هوای گرم و روش ترکیبی هوای گرم - میکروویو، نمونه‌ها تا



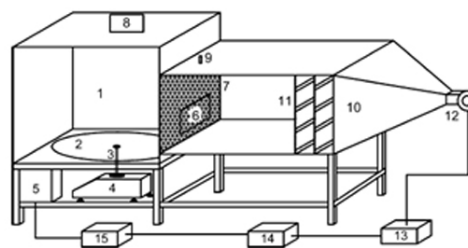
رسیدن به رطوبت بحرانی با هوای گرم خشک شدند و سپس از امواج مایکروویو استفاده شد. توان خروجی مایکروویو، دما و سرعت جریان هوا به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. پارامترهای ظرفیت آبرسانی، چگالی توده و رنگ برای تعیین کیفیت مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کمترین سرعت (یک متر بر ثانیه) باعث قهوه‌ای شدن محصول نهایی شد. استفاده از امواج مایکروویو باعث کاهش سرعت خشک شدن به اندازه دو برابر برای سیب و چهار برابر برای قارچ شد (Funabo and Ohlsson, 1998). در پژوهشی دیگر محققین به منظور بررسی تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی برگه‌های سیب حین خشک کردن با خشک‌کن هوای گرم و مایکروویو دریافتند در صورتی که میزان آب محصول زیاد باشد، انرژی مایکروویو باعث تخریب کلی ساختار درونی نمونه خواهد شد که نتیجه آن چروکیدگی محصول است. با توجه به این که انرژی مایکروویو در هر شرایطی موجب کاهش پایداری بافت نمونه می‌شود، استفاده از پوشش جهت حفظ ساختار حجیم به وجود آمده ضروری است، که در اینجا پوشش‌های نشاسته‌ای و پکتینی بهترین تاثیر را داشتند. پوشش و انرژی مایکروویو به تنهایی اثر قابل توجهی در افزایش تخلخل نمونه‌ها ندارند، تاثیر مهمتر هنگامی مشاهده می‌شود که این دو با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند. به کارگیری انرژی مایکروویو در شرایطی که موجب افزایش حجم نمونه‌ها شود، ویژگی‌های رنگی آنها را نیز بهبود می‌بخشد که علت این امر کاهش تراکم رنگدانه‌ها در واحد سطح است (عسگری و همکاران، ۱۳۸۴).

۲-۱- استفاده همزمان از هوای گرم و تابش امواج مایکروویو (به دو روش پیوسته و ناپیوسته)

در خشک کردن فلفل قرمز به روش ترکیبی سینتیک خشک شدن، تغییر در بافت و رنگ فلفل اندازه‌گیری شد. بطور کلی، خشک کردن به روش ترکیبی با استفاده همزمان از هوای گرم و تابش مداوم امواج مایکروویو کمترین زمان خشک شدن و پایین‌ترین کیفیت محصول را در میان سایر روش‌های ترکیبی خشک کردن نتیجه داد. این در حالی است که استفاده همزمان از هوای گرم و تابش متناوب امواج مایکروویو به تولید محصولی با کیفیت بالا نسبت به سایر روش‌های ترکیب، انجامید. بر اساس نتایج این مطالعه، استفاده همزمان از هوای گرم و تابش متناوب امواج مایکروویو، در ۳۵ درجه سلسیوس با نسبت پالس ۳ در توان ۵۹۷/۲۰ وات صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان خشک کردن در مقایسه با روش هوای گرم (جابه‌جایی) داشته و محصول نهایی از نظر رنگ، بافت و ویژگی‌های حسی بالاتری داشته است (Soysal et al, 2009).



شکل ۲.



شکل ۱.

خشک‌کن ترکیبی مورد استفاده سوسالو همکاران (Soysal et al) دستگاه مورد استفاده هواریسو همکاران برای خشک کردن میوه‌ها (Varith

et al, 2007)

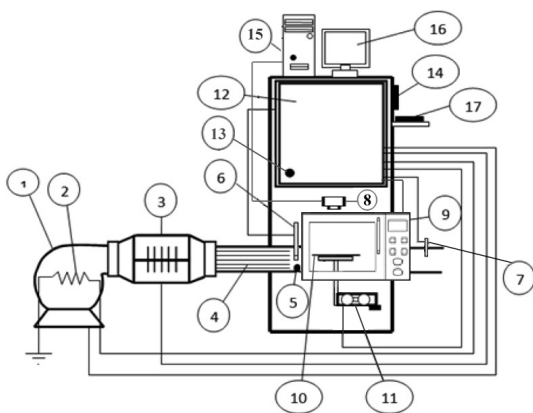
(al, 2009)

در آزمایش دیگر با خشک‌کن ترکیبی بر روی ورقه‌های نازک موز به دو روش: الف) همرفت (دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱/۴۵ متربرثانیه) و سپس استفاده از مایکروویو (در توان‌های ۳۵۰، ۴۹۰ و ۷۰۰ وات؛ ب) همرفت (شرایط قبلی) و مایکروویو (در توان ۳۵۰ وات) به صورت همزمان؛ به این نتیجه رسیدند که استفاده همزمان از هوای گرم و مایکروویو سرعت خشک شدن را افزایش و زمان آن را کاهش می‌دهد. بعلاوه تاثیر کمی بر رنگ و ظرفیت آبرسانی محصول نهایی دارد (Maskan, 2000). در آزمایشی که برای خشک کردن میوه لونگان^۱ با استفاده از خشک‌کن ترکیبی انجام شد، سطوح دما ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سطوح توان مایکروویو ۱۰۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ وات در نظر گرفته شد. هوای گرم و مایکروویو به صورت همزمان بر محصول اعمال شدند. نتایج نشان داد که دمای ۴۰ درجه سلسیوس و توان ۴۵۰ وات با زمان ۱/۷ ساعت و دمای ۶۰ درجه سلسیوس و توان ۳۰۰ وات با زمان ۳/۳ ساعت، بیشترین بازده خشک کردن را تامین نمودند (Varith et al, 2007).

۲- مواد و روشها

۲-۱- خشک‌کن:

برای ساخت دستگاه خشک‌کن ترکیبی هوای داغ- مایکروویو همراه با سیستم تصویربرداری برخط^۲ (شکل ۳ و ۴)، از خشک‌کن لایه نازک موجود در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران، استفاده شد (حسین‌پور، ۱۳۹۰). اجزای خشک‌کن هوای داغ- مایکروویو ساخته شده در شکل (۴) نشان داده شده است. اجزای اصلی عبارتند از سامانه تولید امواج مایکروویو (شامل دستگاه مگنترون SAMSUNG به همراه یک ترانس ولتاژ بالا (۲۲۰ ولت به ۲۱۰۰ ولت) و یک خازن (1F AC) ولتاژ بالا و دیود)، یک فن سانتریفیوژ، کانال عبور جریان هوا، چهار المنت حرارتی (یک عدد المنت ۷۵۰ واتی به منظور پیش گرم کردن جریان هوا، سه المنت ۲۰۰۰ واتی به منظور گرم کردن جریان هوا)، لوله‌های مستقیم کننده، واحد کنترل، لودسل تک نقطه‌ای، سنسورهای اندازه‌گیری دما، محفظه خشک‌کن، واحد تصویربرداری، واحد کنترل منطقی به منظور ثبت اطلاعات و کنترل سرعت فن، دمای هوا و توان مایکروویو است.



^۱Longan

^۲Online



شکل ۳. تصویر دستگاه خشک‌کن ترکیبی هوا-ماکروویو

شکل ۴. شمایی از طرح خشک کن هوای داغ - ماکروویو.

۱- فن؛ ۲- المنت پیش گرمایش؛ ۳- المنت های حرارتی؛ ۴-

لوله‌های مستقیم کننده؛ ۵- سنسور سرعت هوا؛ ۶ و ۷-

سنسورهای دما؛

۸- دوربین دیجیتالی؛ ۹- محفظه تولید مایکروویو؛ ۱۰- صفحه

پلت فرم؛ ۱۱- لود سل؛ ۱۲- واحد کنترل؛ ۱۳- سنسور دمای

بیرون؛

۱۴- HMI؛ ۱۵ و ۱۶- کامپیوتر؛ ۱۷- صفحه کلید.

۲-۲- آماده سازی نمونه و نحوه انجام آزمایش

برای ارزیابی دستگاه آزمایش ترکیب مایکروویو- هوای داغ به صورت همزمان (در سه سطح سرعت ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و سه سطح دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و سه سطح توان مایکروویو ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات) طراحی و اجرا شد. در این تحقیق از سیب رقم رد دلشس^۳ که از بازار میوه و تره بار کرج تهیه شد، استفاده کردیم و به منظور کاهش تنفس و تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی تا لحظه آزمایش در یخچال نگهداری شدند. برای تعیین وزن خشک سیب، ابتدا سیب پوست گرفته و بدون هسته را وزن کرده و سپس در آن با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۸ ساعت قرار داده شدند (Askari et al, 2004). محتوای رطوبت اولیه سیب در حدود ۸۴٪ - ۸۶٪ بر پایه خشک بدست آمد. بلافاصله پس از آنکه سیب‌ها شسته و پوست گرفته شدند، با استفاده از دستگاه ورقه‌بر (کالاس‌بر) به ضخامت ۶ میلی‌متر برش داده می‌شدند. سپس سینی خالی نمونه‌ها را بر روی پایه T شکل قرار داده و با استفاده از دکمه پارسنگ طراحی شده در صفحه HMI وزن نشان داده شده توسط سیستم توزین صفر می‌شد. پس از آن سینی را بیرون آورده و ۱۳۰ گرم برگه نازک سیب با استفاده از ترازوی دیجیتال توزین شد (ترازوی مورد استفاده در دستگاه خشک‌کن مدل GF3000 ساخت شرکت A&D ژاپن می‌باشد. این ترازو دارای دقت^۴ ۰/۰۱ گرم و حداکثر وزن قابل اندازه‌گیری ۳۱۰۰ گرم می‌باشد). سپس برگه‌های سیب بر روی سینی دستگاه به گونه‌ای قرار داده می‌شد که تنها یک لایه از محصول روی سینی قرار بگیرد. حال سینی حامل نمونه‌ها دوباره به دستگاه منتقل گردیده و با تنظیم دوباره شرایط آزمایش با توجه به تیمار مورد بررسی و زدن دکمه

^۳ Red delicious

^۴ Accuracy



Run در برنامه *Matlab*، آزمایش مربوطه انجام می‌شد. وزن نمونه‌ها هر ۶۰ ثانیه یک بار توسط دستگاه ثبت با دقت ± 0.01 ثبت و در همین زمان تصاویر روبرو و بالا از نمونه گرفته می‌شد. این کار تا زمانی که محتوای رطوبت نمونه‌ها به مقدار ثابت رسید ادامه می‌یافت.

۲-۳- مدل‌سازی ریاضی منحنی خشک شدن

برای مدل‌سازی ریاضی خشک شدن توده بستر نازک سیب، از نسبت رطوبت در طی خشک شدن توده استفاده می‌شود. نسبت رطوبت با توجه به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت توده در هر لحظه در طی خشک شدن به وسیله رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

که در آن MR نسبت رطوبت، M_o رطوبت اولیه، M_e مقدار رطوبت تعادلی و M_d رطوبت در لحظه جاری برپایه خشک است. براساس تحقیقات انجام شده، در محصولاتی که دارای رطوبت زیاد هستند معادله نسبت رطوبت در طی خشک شدن به جای رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) ساده می‌گردد (Doymaz, 2007; Meisami-asl and Rafiee, 2009).

$$MR = \frac{M_d}{M_o} \quad (2)$$

در نتیجه برای محاسبه نسبت رطوبت نیازی به اندازه‌گیری رطوبت تعادلی نیست. نسبت رطوبت به دست آمده در طی آزمایش با چهار مدل از مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک محصولات کشاورزیکه در جدول (۱) آمده است، مقایسه گردید. مدل‌های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک شدن براساس متغیر مستقل زمان با استفاده از نرم افزار *MATLAB* نسخه *R2010b* استخراج گردید. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین (R^2)، مجموع مربعات خطا (*SSE*) و ریشه متوسط خطای داده‌ها (*RMSE*) استفاده شد.

جدول ۱. مدل‌های خشک‌کردن به روش لایه نازک



مدل	نام مدل	ردیف
$MR = a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی [۵]	۱
$MR = 1 + at + bt^2$	ونگ و سینگ [۱۳]	۲
$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	هندرسون و پاییس اصلاح شده [۷]	۳
$MR = \exp\left(-\frac{k_1 t}{1 + k_2 t}\right)$	آغاباشلو و همکاران [۲]	۴

در مقایسه بین دو مدل، مدل با R^2 بیشتر و مقدار SSE و RMSE کمتر، بهتر می‌تواند تغییرات نسبت رطوبت را در طی خشک شدن

پیش‌بینی کند. معادلات (R^2)، RMSE و SSE به ترتیب از معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})(MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (5)$$

که در آن $MR_{(exp,i)}$ نسبت رطوبت به دست آمده در طی خشک شدن، $MR_{(pre,i)}$ نسبت رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل، n

تعداد مشاهده‌ها و N تعداد ثابت‌های مدل است.

۲-۴- شاخص‌های تغییر شکل

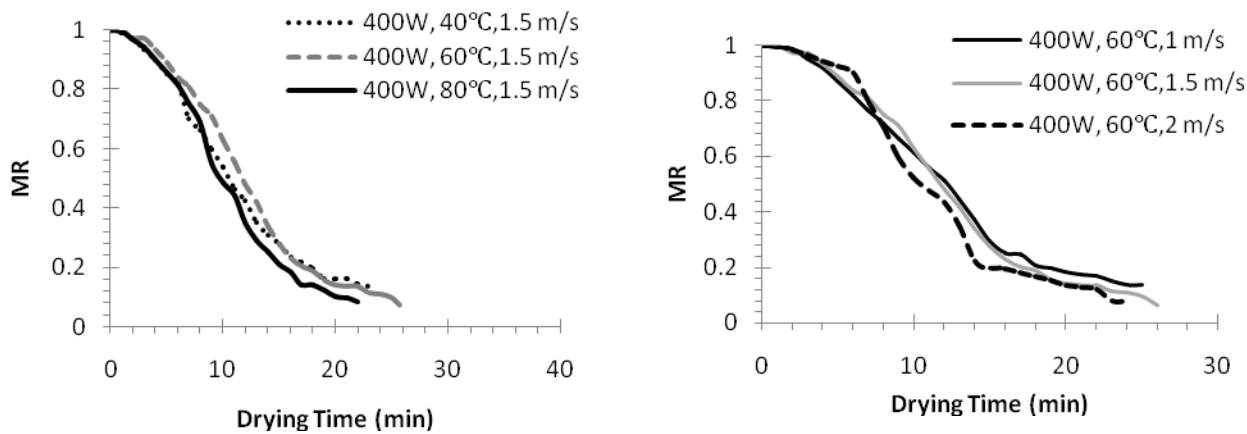
برای بدست آوردن اطلاعات تغییر ابعاد نمونه‌ها از تصاویر دودویی^۵ استفاده شد. برخی شاخص‌هایی که در این تحقیق به منظور ارزیابی خشک‌کن استخراج شدند عبارتند از؛ قطر اصلی بزرگ^۶ و قطر اصلی کوچک^۷، تغییرات سطح برگه‌های سیب.

^۵Binary

^۶Major Axis Length

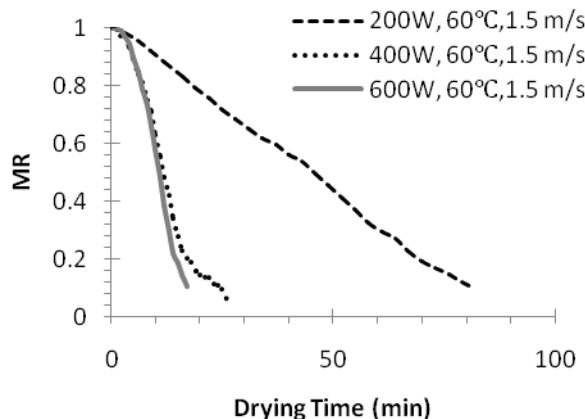
^۷Minor Axis Length

با افزایش سطح توان تابشی میکروویو و افزایش دمای هوا، آهنگ خشک شدن افزایش یافت. استفاده از توان تابشی اشعه میکروویو موجب افزایش چشمگیر آهنگ افت رطوبت نسبت به خشک کردن با هوای داغ تنها شده است با افزایش سطح توان تابشی میکروویو از ۲۰۰ به ۶۰۰ وات از اثر دمای هوا بر فرآیند خشک کردن کاسته می‌شود (شکل ۶ و ۷). علت این امر را می‌توان افزایش شدید دمای ایجاد شده در نمونه‌ها در توان‌های ۴۰۰ و ۶۰۰ وات دانست. بعلاوه این تابش میکروویو است که سبب خروج رطوبت از درون تا سطح ماده می‌شود و جریان هوا تنها وظیفه برداشتن رطوبت از سطح را دارد (شکل ۶ و ۷). به همین دلیل در توان تابشی ثابت افزایش دما تاثیر مشخصی نداشت. این در حالی است که در استفاده از هوای داغ تنها، جریان هوا می‌بایست هر دو وظیفه انتقال رطوبت از درون تا سطح ماده و برداشتن آن از سطح را انجام دهد. به همین دلیل افزایش دمای هوا در استفاده از هوای داغ تنها، سبب کاهش میانگین مدت زمان خشک شدن می‌شود.



شکل ۶. تغییر محتوای رطوبت بر حسب زمان در دماهای متفاوت و تجربی آنها

شکل ۵. تغییر محتوای رطوبت بر حسب زمان در سرعت‌های متفاوت و تجربی آنها



شکل ۷. تغییر محتوای رطوبت بر حسب زمان در توان‌های تابشی متفاوت و اشعه میکروویو

نسبت محتوای رطوبتی سیب به صورت تابعی از زمان بوسیله چهار مدل ذکر شده در جدول (۱)، مدل سازی شد. این مدل سازی در جعبه ابزار نرم افزار (MATLAB R2010b) صورت گرفت. اساس عملکرد این نرم افزار بدین صورت بود که ابتدا یک مقدار تقریبی به ضرایب مدل مورد نظر نسبت داده می‌شد و سپس مدل سازی تا رسیدن به حداقل خطای



بین داده‌های مدل و مقدار واقعی ادامه می‌یافت. نتایج آماری موجود در جدول (۲)، میانگین مقادیر R^2 ، $RMSE$ و SSE را در تمامی شرایط خشک کردن نمایش می‌دهد. بر این اساس پس از مقایسه بین مدل‌های مختلف این نتیجه حاصل شد که در تمام دماها، سرعت‌های مختلف جریان هوا و توان‌های مختلف تابش مایکروویو، مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده دارای بیشترین R^2 و کمترین $RMSE$ و SSE نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی بود. در نتیجه این مدل به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. مقادیر ثابت‌وضرایمدلهندرسونپاییساصلاحشدهدرتوان ۴۰۰ واتدر جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲. میانگین مقادیر R^2 ، $RMSE$ و SSE برای هر یک از مدل‌های استفاده شده

نام مدل	میانگین R^2	میانگین $RMSE$	میانگین SSE
هندرسون و پاییس اصلاح شده	۰/۹۹۳۹	۰/۰۲۵۹	۰/۰۱۴۵
مدل آغباشلو	۰/۹۸۳۴	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۸۳
لگاریتمی	۰/۹۸۰۵	۰/۰۴۴۰	۰/۰۴۶۷
ونگ و سینگ	۰/۹۷۶۷	۰/۰۴۶۷	۰/۰۵۷۸

به منظور ارزیابی سامانه تصویربرداری خشک کن، از روند خشک شدن نمونه‌ها، به صورت برخط عکس برداری شد. روند تغییرات قطرها و مساحت سطح نمونه‌ها به طور کلی نزولی بود (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۰). نتایج حاصل از تحلیل تصاویر (شکل ۸ برای قطر بزرگ و شکل ۹ برای قطر کوچک) حاکی از آن است که تاثیر افزایش توان تابشی بیشتر از تاثیر افزایش دماست. زیرا در ترکیب هوای داغ و مایکروویو، هوای داغ، تنها نقش برداشتن رطوبت از سطح نمونه‌ها را دارد و تغییرات ابعاد بیشتر به تابش امواج مایکروویو بستگی دارد به طوری که با افزایش توان از ۲۰۰ وات تا ۶۰۰ وات تاثیر تغییر دما بر سرعت تغییر قطر مشخص نیست. اما در توان تابشی ۲۰۰ وات افزایش دما سبب افزایش شیب نزولی تغییرات قطر شده است. نکته قابل توجه در استفاده از امواج مایکروویو، تاثیر آن بر ابعاد نمونه است. این موضوع با افزایش توان محسوس تر نیز می‌شود و علت آن فرآیند حرارتی شدید، سرعت زیاد تبخیر آب و در نتیجه فشرده شدن لایه‌های بیرونی و بسته شدن منافذ برگه‌های سیب است. قطع تابش مایکروویو و سرد شدن برگه‌های سیب، سبب میعان مجدد آب شده و فشار درون نمونه‌ها کاهش می‌یافت و در نتیجه حجم برگه‌های سیب کاهش پیدا می‌کرد. این امر در توان ۴۰۰ و ۶۰۰ وات باعث افزایش حجم در لحظه تابش اشعه می‌شود. نوسانات مشاهده شده در تغییرات قطر و سطح برگه‌های سیب (شکل ۱۰) ناشی از تلاقی زمان عکس برداری با زمان تابش اشعه مایکروویو است.

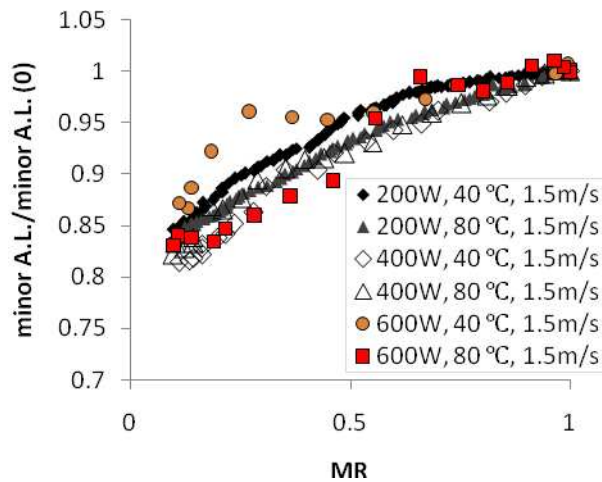


جدول ۳. مقادیر ثابت‌وضرایبمدلهندرسونپایباصلا حشدهدرتوان ۴۰۰ وات

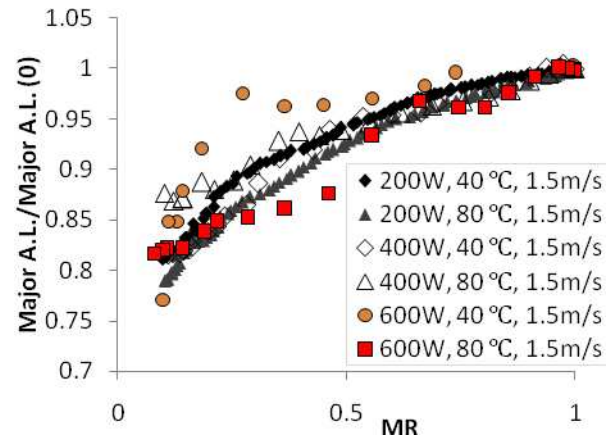
ضرایب مدل						شرایط خشک کردن		
k	h	g	C	B	a	توان تابشی (W)	دما (°C)	سرعت (m/s)
۰/۴۷۰۹	۰/۴۰۶۳	۰/۱۱۹۴	-۵/۹۱۹	۲/۲۹۳	۴/۶۳۲	۱		
۰/۶۰۲	۰/۴۹۶	۰/۱۲۴	-۳/۲۰۸	۱/۸۷۲	۲/۳۳۹	۱/۵	۴۰	
۰/۳۱۱۱	۰/۲۱۰۵	۰/۱۸۶	-۲۶/۹۴	۲۳/۹۵	۴/۰۰۱	۲		
۰/۴۲۷۹	۰/۳۶۲۱	۰/۱۲۶۶	-۴/۷۸۶	۲/۳۸۱	۳/۴۱	۱		
۰/۳۶۵۷	۰/۳۳۷۸	۰/۱۷۲۳	-۲۴/۲۳	۵/۰۹۴	۲۰/۱۵	۱/۵	۶۰	۴۰۰
۰/۲۳۵۱	۰/۱۱۶۱	۰/۱۱۵۷	۲۸۸/۳	-۲۸۴/۷	-۲/۶۲۶	۲		
۰/۲۱۴۱	۰/۱۶۹۶	۰/۱۶۹	۱۴۸/۹	-۱۴۰/۵	-۷/۴۳۴	۱		
۰/۱۹۸۶	۰/۱۱۷۳	۰/۱۲۲۴	-۳۱/۵	۳۶/۹۲	-۴/۴۴۸	۱/۵	۸۰	
۰/۳۸۴	۰/۲۴۰۷	۰/۲۲۶۷	-۴۹/۰۴	۴۶/۸۵	۳/۱۹۶	۲		

۴- نتیجه‌گیری

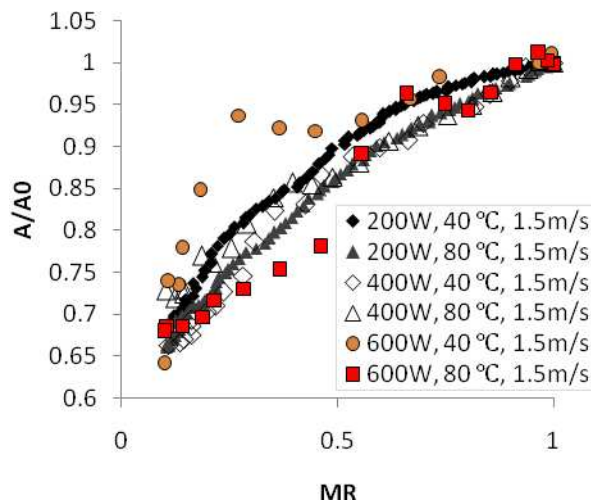
افزایش دمای جریان هوا و توان تابشی اشعه مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک کردن می‌شود و با افزایش توان تابشی از تاثیر دما جریان هوا بر فرآیند کاسته شد. با کاهش رطوبت، از میزان جذب اشعه مایکروویو توسط نمونه‌ها کاسته می‌شود. نمودار تغییرات محتوای رطوبتی در مقابل زمان خشک شدن، در ابتدای استفاده از اشعه مایکروویو تقعر رو به پایین و در انتهای آزمایش تقعر رو به بالا دارد که نشان می‌دهد تغییرات رطوبت در ابتدا تند شونده و سپس کند شونده است. در میان مدل‌های تجربی استفاده شده برای برازش منحنی خشک شدن، مدل هندرسون و پایس اصلاح شده با میانگین مقادیر R^2 ۹۹/۳۹٪ برای آزمایش‌های مقایسه‌ای در میان مدل‌های تجربی بهترین همخوانی را با داده‌ها داشت. تغییرات اقطار نمونه و مساحت سطح آن، به طور کلی در طول فرآیند روند نزولی داشت. نوسانات ایجاد شده در روند تغییر ابعاد نمونه ناشی از فرآیند حرارتی شدید و سرعت زیاد تبخیر آب بود و با افزایش توان تابشی بیشتر می‌شد.



شکل ۹. نسبت تغییرات قطر کوچک به مقدار اولیهدر شرایط مختلف



شکل ۸. نسبت تغییرات قطر بزرگ به مقدار اولیهدر شرایط مختلف



شکل ۱۰. نسبت تغییرات سطح به مقدار اولیهدر شرایط مختلف

منابع:

حسین پور، س. (۱۳۹۰). طراحی، ساخت و ارزیابی سیستم کنترل بهینه مبتنی بر ماشین بینایی و منطق فازی برای فرایند خشک کردن لایه نازک میگو. رساله دکتری، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

عسکری، غ.، امام جمعه، ز.، ابراهیم زاده موسوی، س.م. (۱۳۸۴). بررسی تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی برگه‌های سیب خشک شده با روش ترکیبی خشک کن هوای گرم و مایکروویو. مجله



تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۶ (۲۴): ۱-۱۴.

ابراهیمی، م.؛ محتسبی، س.، س.؛ رفیعی، ش.؛ نصیری، ا. و حسین‌پور، س.؛ (۱۳۹۰)، بررسی تاثیر عوامل مختلف بر میزان چروکیدگی ورقه‌های نازک موز طی فرایند خشک کردن با استفاده از روش سطح پاسخ. مجله علمی کشاورزی، ۳۶ (۲)؛ ۸۱-۹۲.

- Abbasi, S., & Rahimi, S. (2007). Microwave and its application in food industries Sonboleh., 20, pp. 28-29.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H., Khani, S., and Ghasemi, M. (2009) a. Mathematical modeling of carrot thin-layer drying using new model. International Agrophysics, International Agrophysics 23(4): 313-317.
- Askari, G.R., Emam-Jomeh, Z. and Mousavi, M.A. (2004). "Effect of drying method on microstructural changes of apple slices". Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, vol. B: 1435-1441.
- Doymaz, I. (2007). "Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry". Journal of Food Engineering, 78, 591-596.
- Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. Chemical Engineering and Processing, 47, 914-919.
- Funebo, T. and T. Ohlsson. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. J. Food Eng. 38: 353-361.
- Karathanos, V. T. (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. Journal of Food Engineering, 39, 337-344.
- Krokida, M., & Maroulis, Z. (1997). "Effect of drying method on shrinkage and porosity". Drying Technology, 10 (15), 2441-2458.
- Maskan, M. (2000). "Microwave/air and microwave finish drying of banana". Food engineering, 44, 71-78.
- Meisami-asl E. and Rafiee S. (2009). "Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-layer Drying of Apple (var. Golab)". Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1185. Vol. XI. September, 2009.
- Soysal, Y., Ayhan, Z., and Eştürk, O., and M.F. Arıkan. (2009). "Intermittent microwave-convective drying of red pepper: Drying kinetics, physical (colour and



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون
پرديس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



texture) and sensory quality." *Biosystems Engineering* 103(4): 455-463.

Varith, J., P. Dijkanarukkul, A. Achariyaviriya and S. Achariyaviriya. (2007).
Combined Microwave-Hot Air Drying of Peeled Longan. *J. Food Eng.* 81: 459–
468.

Wang, C. Y. and Singh, R. P. (1978). Use of variable equilibrium moisture content in
modeling rice drying. *Transactions of the ASAE*, 11, 668-672.



Construction and evaluation of a hybrid dryer of Microwave-Hot air with online imaging system

Abstract:

Using of microwave power is a new method for drying. In this study a thin dryer was developed and microwave-hot air dryer equipped to imaging system was designed and fabricated. In order to evaluate the system, thin layers of apple were used with Microwave-Hot air drying (MH). The experiments were conducted at three levels of velocity of 1, 1.5, 2 (m/s) and at three levels of temperature of 40, 60 and 80 ($^{\circ}$ C) as well as three levels of microwave power of 200, 400 and 600 (W). In order to estimate the drying curve, four different thin layer mathematical drying models were fitted to experimental data (according to their R^2 , and RMSE) and according to the obtained results, Modified Henderson and Pabis model could satisfactorily describe the drying curve with average R^2 of 99.39% for MH. Kinetic of some appearance parameters (diameters and area) were achieved.

Keywords: "Hybrid dryer", "Microwave-Hot ", "Kinetic of drying", "Image processing"