

بررسی خشک شدن شلتوک در یک خشک کن مایکروویو جریان مداوم

حسن جعفری^۱، داود کلانتری^{۲*}، محسن آزادبخت^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- عضو هیأت علمی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

* نویسنده مسئول (d.kalantari@sanru.ac.ir)

۳- عضو هیأت علمی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر به کارگیری خشک کن‌های مایکروویو جهت سرعت بخشیدن به عملیات خشک کردن محصولات کشاورزی در حال گسترش است. لذا در کار تحقیقاتی اخیر خشک کن مایکروویو جریان مداوم به منظور خشک کردن دانه‌های شلتوک ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این آزمون، فرایند خشک شدن دو رقم شلتوک طارم هاشمی و شلتوک نعمت در ۳ سطح توان مایکروویو ۹۰، ۲۷۰ و ۴۵۰ وات، ۳ ضخامت مختلف لایه شلتوک ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و ۵ سرعت تغذیه محصول به دستگاه ۰/۲۴، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۶ متر بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. شیب متوسط کسر رطوبتی در ابتدای خشک کردن رقم طارم هاشمی برای لایه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر به ترتیب برابر با $10^{-3} \times 1/6$ ، $10^{-3} \times 1/47$ و $10^{-3} \times 3/16$ و برای رقم نعمت به ترتیب $10^{-3} \times 2$ ، $10^{-3} \times 2/1$ و $10^{-3} \times 2/4$ به دست آمد که نشان دهنده کاهش سریع تر رطوبت برای ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر نسبت به ۸ لایه دیگر می‌باشد. با ارزیابی تمامی پارامترهای خشک کن مایکروویو ساخته شده روی کسر رطوبتی و درصد شکست دانه، توان ۹۰ وات، سرعت نوارنقاله ۰/۲۴ متر بر دقیقه و ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر جهت خشک کردن شلتوک رقم طارم هاشمی پیشنهاد می‌گردد. درصد شکست دانه‌ها در شرایط پیشنهادی برای رقم طارم هاشمی در همه موارد آزمون کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی

خشک کن

درصد شکستگی

شلتوک

کسر رطوبتی

مایکروویو

مقدمه

با جریان هوای گرم بر اساس انتقال حرارت همرفت از هوای گرم به محصول در حال خشک شدن است. از معایب استفاده از جریان هوای گرم، بازده پایین انرژی مصرفی و زمان خشک شدن زیاد آن می‌باشد (Gowen *et al.*, 2008). به همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از تابش امواج مایکروویو با فرکانسی در محدوده ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز و طول موجی بین ۱ متر تا ۱ میلی‌متر برای خشک کردن محصولات کشاورزی و غذایی مورد توجه قرار گرفته است (Kouchakzadeh

خشک کردن یکی از مهم‌ترین فرایندهای پس از برداشت برنج برای افزایش مدت انبارمانی، کنترل فعالیت‌های نامطلوب شیمیایی مانند اکسیداسیون و قهوه‌ای شدن محصول و رشد میکروارگانیسم‌ها می‌باشد (Goksu *et al.*, 2005; Dadali *et al.*, 2008; Doymaz & Kocayigit, 2011; Discala *et al.*, 2013). در همین راستا یکی از گسترده‌ترین روش‌های خشک کردن شلتوک استفاده از جریان هوای گرم معرفی شده است. اصول اصلی خشک کردن محصولات

Sangdao و همکاران (۲۰۰۱) خشک‌کن مایکروویو بستر سیال جریان مداومی را برای خشک‌کردن شلتوک ارائه کردند که نسبت به روش‌های خشک‌کردن با جریان هوای داغ و خشک‌کردن با مایکروویوهای خانگی دارای ظرفیت خشک‌کردن بالاتری بود. آنها در این سیستم شکاف‌های عمودی بر یک مخزن استوانه‌ای متحدالمرکزی ایجاد کردند که توسط موج‌برهایی عمود بر این مخزن استوانه‌ای تحریک می‌شد. آنها نشان دادند که سیستم طراحی‌شده با مصرف انرژی ۵/۲ کیلوژول، رطوبت شلتوک را از ۲۴ درصد به ۱۴ درصد بر پایه‌ی تر می‌رساند. ظرفیت این سیستم ۳/۱ کیلوژول بر ساعت اعلام شده است. Jindarat و همکاران (۲۰۱۱) خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم ترکیب‌شده با جریان هوای گرم را طراحی و ساختند. آنها در این تحقیق انرژی مصرفی را در فرایند خشک‌کردن با استفاده از بستر متخلخل غیرجاذب رطوبت مورد بررسی قرار دادند. آنها از ۱۲ عدد مگنترون که هرکدام از آنها روی توان ۸۰۰ وات تنظیم شده بودند و هوای گرمی با حداکثر دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد که با استفاده از ۲۴ المنت الکتریکی تولید می‌شد، استفاده کردند. در این تحقیق، آنها تأثیرات زمان خشک‌کردن، دمای هوای داغ، ساختار متخلخل بستر و موقعیت‌های مگنترون را روی سینتیک خشک‌کردن^۳ و مصرف انرژی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سینتیک خشک‌کردن و مصرف انرژی به ساختار متخلخل بستر، دمای هوای گرم و موقعیت مگنترون‌ها بستگی دارد.

باتوجه‌به گسترش استفاده از روش‌های نوین در فراوری محصولات غذایی و لزوم بهینه‌سازی به‌کارگیری آنها، در کار تحقیقاتی حاضر تأثیر پارامترهای مختلف یک مایکروویو جریان مداوم شامل توان مایکروویو، سرعت تغذیه محصول به دستگاه و ضخامت محصول روی سینتیک کاهش رطوبت و درصد شکستگی شلتوک مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت ترکیب مناسب ضخامت شلتوک، سرعت تغذیه محصول به داخل دستگاه و توان مایکروویو برای

(Shafeei, 2010). در گرمادهی با مایکروویو، میدان الکترومغناطیس مگنترون^۱ باعث قطبش مولکول‌های مواد دی‌الکتریک و در نتیجه ایجاد گشتاور دو قطبی می‌شود. گشتاور ایجادشده باعث چرخش مولکول‌های ماده دی‌الکتریک شده و اصطکاک بین مولکولی پدیدآمده در اثر این چرخش‌ها باعث تولید حرارت در داخل محصول می‌شود (Oliveira & Franca, 2002). از مزایای به‌کارگیری مایکروویو نسبت به روش‌های مرسوم خشک‌کردن می‌توان به کاهش نسبی انرژی مصرفی در خشک‌کردن محصولات کشاورزی و افزایش نرخ فرایند انتشار رطوبت در استفاده از امواج مایکروویو اشاره نمود (Mullin, 1995; Sanga *et al.*, 2000; Oghbaei & Mirzaee, 2010; Monteiro *et al.*, 2015; Cheenkachorn, 2007; Karaaslan & Tuncer, 2008).

Alibas (۲۰۱۴) و Darvishi و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌هایی را در زمینه رفتار محصولات کشاورزی و تحلیل انرژی با استفاده از خشک‌کن‌های مایکروویو انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیق‌ها نشان داده است که با افزایش توان مایکروویو، رطوبت محصولاتی مانند شلتوک با سرعت بیشتری کاهش پیدا می‌کند. Hazer vazifeh و همکاران (۲۰۱۲) خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرمی را طراحی، ساخت و ارزیابی کردند. در این تحقیق، از یک مگنترون با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز و توان نامی ۱/۳ کیلووات جهت تولید امواج مایکروویو و از ۶ المنت حرارتی ۷۰۰ وات به همراه فن ۱۷۵۰ دور در دقیقه برای ایجاد جریان هوای گرم استفاده شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش توان مایکروویو و افزایش دمای جریان هوا، رطوبت محصول با سرعت بیشتری کاهش پیدا می‌کند. Gholikhani و همکاران (۲۰۱۵) خشک‌کن هیبریدی مایکروویو- هوای داغ^۲ مجهز به سامانه تصویربرداری بر خط را ساخته و ارزیابی کردند. در این تحقیق، سامانه ساخته‌شده با ترکیب هم‌زمان هوای داغ و اشعه مایکروویو در ۳ سطح سرعت هوای ۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه و ۳ سطح دمای ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس و ۳ سطح توان تابشی ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ وات مورد آزمون قرار گرفت.

¹ Magnetron electromagnetic field

² Hybrid microwave-hot air dryer

³ Drying kinetics

است (S.E.R, 2011). در همین راستا برای خشک کردن مگنترون‌ها از ۲ فن دمنده (مدل P/N 2123XSL، ساخت چین) استفاده شد (شکل ۱؛ شماره ۵). توان نامی این فن دمنده ۲۳ وات و دور آن ۲۶۰۰ دور در دقیقه می‌باشد. برای خارج کردن رطوبت از داخل محفظه خشک‌کن مایکروویو، از یک فن مکنده (مدل FL085034Y-10، ساخت چین) با ظرفیت ۱۰۰ مترمکعب در ساعت، ۹۶۴ دور در دقیقه و توان ۳۰ وات استفاده شد (شکل ۱؛ شماره ۶). جهت اندازه‌گیری رطوبت و دمای هوای خروجی از فن مکنده، ۲ سنسور رطوبت و دما در مسیر خروج هوا نصب گردید. برای به حرکت درآوردن مجموعه نوارنقاله از یک الکتروموتور با ۱۵۰۰ دور در دقیقه و توان نامی ۱/۱ کیلووات استفاده شد (شکل ۱؛ شماره ۱۲). باتوجه به اینکه حداکثر توان دستگاه به ۴۵۰ وات محدود شد، لذا حداکثر مدت توقف قابل قبول شلتوک در داخل دستگاه نیز براساس همین توان به دست آمد. در توان ۴۵۰ وات و در زمان‌های توقف بیشتر از ۱۵۰ ثانیه درصد شکستگی با سرعت بیشتری افزایش می‌یافت. به همین دلیل حداکثر مدت توقف شلتوک در داخل دستگاه نیز برابر با ۱۵۰ ثانیه انتخاب شد. باتوجه به طول مفید نوارنقاله برابر با ۶۰ سانتی‌متر، طبق رابطه ساده $v = \Delta l / \Delta t$ ، حداقل سرعت نوارنقاله برابر با ۰/۲۴ متر بر دقیقه تعیین شد. سرعت‌های بعدی نوارنقاله براساس مدت توقف‌های کمتر از ۱۵۰ ثانیه و در چندین سطح مختلف انتخاب شدند. بین هر دو مدت توقف ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد، لذا مدت توقف‌های بعدی به ترتیب ۱۲۰، ۹۰، ۶۰ و آخری هم ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد. طبق همان رابطه ساده فوق، سرعت‌های بعدی نوارنقاله برابر با ۰/۳، ۰/۴، ۰/۶ و ۱/۲ متر بر دقیقه به دست آمد. به منظور کاهش سرعت دورانی غلتک‌های محرک نوارنقاله از مجموعه ترکیبی تسمه-پولی و گیربکس حلزونی استفاده شد (شکل ۱؛ شماره ۱۱). بدین منظور ابتدا دور خروجی الکتروموتور با نسبت کاهش ۱۰:۱۶ به ورودی گیربکس منتقل و سپس با نسبت ۱:۱۰۰ از گیربکس حلزونی خارج و به غلتک محرک نوارنقاله انتقال یافت. کنترل دقیق‌تر سرعت نوارنقاله توسط یک اینورتر

کاهش مناسب رطوبت با حداقل درصد شکستگی محصول تعیین گردید.

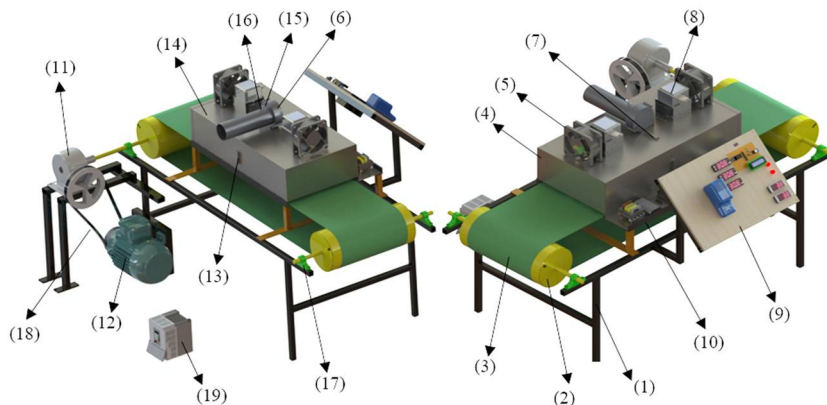
مواد و روش‌ها

تصاویر نشان‌داده شده در شکل (۱) شماتیک خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم ساخته شده را نشان می‌دهد. جهت تولید امواج مایکروویو در خشک‌کن حاضر از ۲ مگنترون (مدل LG 2M246، ساخت کره جنوبی) با حداکثر توان خروجی ۹۰۰ وات و فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده شد. برای توزیع یکنواخت‌تر امواج در داخل محفظه مایکروویو، ۲ مگنترون استفاده شده در راستای طولی دستگاه نصب گردید (شکل ۱؛ شماره ۸). محفظه خشک‌کن حاضر از فولاد ضدزنگ با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰×۶۰۰ میلی‌متر ساخته شد که فضای قابل استفاده محفظه ۲۷ لیتر می‌باشد. به منظور جلوگیری از نشت زیاد امواج، دو درپوش از جنس فولاد ضدزنگ در دو انتهای محفظه قرار داده شد. برای عبور نوارنقاله جهت انتقال محصول از داخل محفظه خشک‌کن مایکروویو به سمت خروجی دستگاه، درپوش‌های ساخته شده نسبت به کف مخزن به اندازه ۲ سانتی‌متر فاصله داده شدند (شکل ۱، شماره ۱۴ و ۴). از آنجایی که شرکت سازنده مگنترون‌ها، ولتاژ مورد نیاز برای به کارانداختن مگنترون مورد استفاده را ۴۰۰۰ ولت اعلام نموده بود، لذا یک مدار الکتریکی ولتاژ بالا برای دستگاه حاضر طراحی شد. مدار طراحی شده برای تغذیه مگنترون، شامل ۲ ترانسفورماتور و ۱ مدار سلفی-خازنی^۱ می‌باشد که برق ۲۲۰ ولت شهری بعد از عبور از ترانسفورماتور و مدار سلفی-خازنی به ۴۰۰۰ ولت که ولتاژ آستانه تحریک مگنترون است، افزایش پیدا می‌کند (Datta & Ananthewaran, 2001). برای اینکه توزیع ولتاژ ۲۲۰ ولت در ترانسفورماتورهای به کارگرفته شده به صورت یکسان باشد، ۲ ترانسفورماتور به صورت موازی به یکدیگر متصل شدند. باتوجه به اینکه درصد قابل توجهی از توان مگنترون به صورت گرما در خود بدنه مگنترون هدر می‌رود، لذا دمای بدنه مگنترون به سرعت بالا رفته و در نتیجه استفاده از یک سیستم خنک‌کننده امری ضروری

¹ Inductive- capacitive circuit

Hyundai N100 plus, 1.5KW, made in (مدل

انجام شد. (South Korea)



شکل ۱- مدل سه بُعدی خشک کن طراحی شده: (۱) شاسی اصلی، (۲) غلتک نوارنقاله، (۳) نوارنقاله، (۴) درپوش های محفظه خشک کن میکروویو، (۵) فن خنک کننده مگنترون، (۶) فن مکنده، (۷) سنسور دمای بالای محفظه خشک کن میکروویو، (۸) مگنترون، (۹) صفحه کنترل، (۱۰) مجموعه ترانسفورماتور ولتاژ بالا، خازن، دیود ولتاژ بالا و فیوز، (۱۱) گیربکس، (۱۲) الکتروموتور، (۱۳) سنسور دمای کنار خشک کن میکروویو، (۱۴) محفظه خشک کن میکروویو، (۱۵) سنسور دمای هوای خروجی فن مکنده، (۱۶) سنسور رطوبت هوای خروجی فن مکنده، (۱۷) یاتاقان، (۱۸) تسمه، (۱۹) اینورتر (مبدل فرکانس)

به هم زده سپس دمای آن توسط یک دماسنج دیجیتال (مدل G-WON GMK-910T، ساخت کره جنوبی) با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد اندازه گیری می شد و هر آزمون ۳ بار تکرار گردید. در این دوره های زمانی، توان جذب شده از طریق رابطه (۲) محاسبه گردید:

رابطه (۲)

$$P = 4187 \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

برای کنترل توان میکروویو، از یک برد الکترونیکی شامل یک مدار مجتمع (IC) Atmega-8 برای کنترل و فرمان دادن پالس های روشن/خاموش مگنترون ها استفاده گردید. به همین منظور با استفاده از نرم افزار Bascom.8051.v2.0.14.0 کدنویسی انجام شد. سپس برای شبیه سازی و اطمینان از شرایط کاری مدار کنترل توان، از نرم افزار Peroteus 8 Professional استفاده گردید.

برای تعیین حداکثر عمق نفوذ مؤثر امواج میکروویو در دانه های شلتوک از رابطه (۳) استفاده گردید (Vongpradubchai & Rattanadecho, 2009):

رابطه (۳)

$$D_p = \frac{v}{2\pi f} \left(\frac{\epsilon'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)^{-1/2}$$

به منظور تعیین توان خروجی حقیقی و تعیین سیکل وظیفه مگنترون باتوجه به شرایط خاص دستگاه، از رابطه (۱) استفاده شد. باتوجه به استاندارد بین المللی IEC 705 (۱۹۸۸) و (Houšová & Hoke, 2002) رابطه بین توان میکروویو جذب شده و افزایش درجه حرارت ماده به کمک رابطه (۱) ارائه شده است:

رابطه (۱)

$$\Delta T = \frac{P \times t}{V \times C_p \times \rho}$$

در رابطه (۱)، ΔT : مقدار افزایش درجه حرارت ماده (کلوین)، P : توان میکروویو جذب شده برای گرمایش (وات)، t : زمان گرم کردن (ثانیه)، V : حجم ماده (مترمکعب)، C_p : ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم کلوین)، و ρ : چگالی ماده (کیلوگرم بر مترمکعب) می باشد.

در ادامه برای تعیین توان خروجی مگنترون باتوجه به استاندارد بین المللی IEC 705 (۱۹۸۸)، ۱ لیتر آب سرد آشامیدنی (2 ± 10 درجه سانتیگراد) در یک ظرف پلاستیکی با ضخامت ۲ میلی متر در مرکز خشک کن میکروویو قرار گرفت. زمان های اعمال شده از ۱۰ تا ۶۰ ثانیه با گام ۱۰ ثانیه بود. پس از انجام هر آزمایش، دریچه خروجی دستگاه باز شده، سپس به منظور اندازه گیری دمای آب گرم، ابتدا آن را

(۴)، میانگین محتوای رطوبتی رقم طارم هاشمی و نعمت که به‌طور تازه از زمین کشاورزی جمع‌آوری شده بودند به‌طور میانگین برابر با ۲۵/۴۶ درصد و ۲۴/۵۴ درصد بر پایه‌ی تر تعیین گردید.

همچنین کسر رطوبتی شلتوک در طول فرایند خشک‌شدن با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Diamante & Munro, 1991):

رابطه (۵)

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_o - M_e)}$$

در رابطه (۵)، MR: کسر رطوبتی (بدون بُعد)، M_t : میزان رطوبت در هر لحظه (وزن ماده جامد بر پایه تر/وزن آب)، M_e : رطوبت تعادلی (وزن ماده جامد بر پایه تر/وزن آب) و M_o : محتوای رطوبت اولیه (وزن ماده جامد بر پایه تر/وزن آب) می‌باشد.

در پیش‌آزمون‌های انجام‌شده، استفاده از توان‌های بالاتر از ۴۵۰ وات به علت ایجاد تنش‌های حرارتی بیش از حد تحمل شلتوک و ترکیدن دانه‌ها رد شد، لذا آزمایش اصلی در ۳ سطح توان خروجی مایکروویو ۹۰، ۲۷۰ و ۴۵۰ وات و ۵ سرعت نوارنقاله ۱/۲، ۱، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲۴ متر بر دقیقه به‌ترتیب معادل با زمان‌های (۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه) و ۳ لایه ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر انجام شد.

بعد از خشک‌شدن، ۱۰۰ عدد دانه سالم انتخاب شده، سپس پوسته خارجی دانه‌های انتخاب‌شده با استفاده از یک پوست‌کن آزمایشگاهی (مدل TZ4.5، ساخت چین) از دانه جدا گردید. سپس دانه‌های شکسته‌شده و سالم شمارش گردید. دانه‌های شکسته‌شده برنج، دارای طولی کمتر از ۷۵ درصد طول دانه سالم می‌باشند (Kalantari & Eshtevad, 2007; Heidariesoltanabadi et al., 2013).

ارزیابی آماری نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از یک طرح کاملاً تصادفی ۵×۲×۳×۳ (۳ سطح توان، ۳ سطح لایه، ۲ سطح رقم و ۵ سطح سرعت تغذیه محصول به دستگاه) و در ۳ تکرار انجام شد. آنالیز واریانس جهت ارزیابی اثرات توان، لایه، رقم و زمان خشک‌شدن روی کسر رطوبتی و درصد شکست انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام گرفت. کلیه داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.2 آنالیز شدند.

در رابطه (۳)، D_p : عمق نفوذ مؤثر (متر)، E' : ثابت دی‌الکتریک (برای شلتوک ۳/۲۵)، E'' : ضریب افت دی‌الکتریک نسبی (برای شلتوک ۰/۴۴) و ν : سرعت امواج مایکروویو (متر بر ثانیه) می‌باشد. باتوجه‌به رابطه (۴)، حداکثر عمق نفوذ مؤثر امواج مایکروویو در نمونه‌های شلتوک مورد آزمون برابر با ۱۲/۷ میلی‌متر به‌دست آمد. یافته‌های تجربی سایر محققین نشان می‌دهد چنانچه ضخامت لایه ماده از عمق نفوذ امواج در آن ماده کمتر باشد، فقط بخشی از امواج توسط مواد جذب می‌شود (Datta & Anantheswaran, 2001; Jindarat et al., 2011). به‌همین‌منظور ضخامت یکی از لایه‌های مورد آزمون بیشتر از حداکثر عمق نفوذ مؤثر امواج مایکروویو در نظر گرفته شد. درنهایت ۳ لایه مورد آزمون با ضخامت‌های زیر انتخاب شدند:

- لایه‌ای با ضخامت نصف عمق نفوذ مؤثر امواج مایکروویو در جسم (ضخامت ۶ میلی‌متر)؛
- لایه‌ای با ضخامت حداکثر عمق نفوذ مؤثر امواج مایکروویو در جسم (لایه‌ای به ضخامت ۱۲ میلی‌متر)؛
- لایه‌ای با ضخامت ۱/۵ برابر حداکثر عمق نفوذ مؤثر امواج مایکروویو (لایه‌ای به ضخامت ۱۸ میلی‌متر)؛

برای بررسی سینتیک خشک‌شدن شلتوک از ۲ رقم طارم هاشمی و نعمت که به‌ترتیب از ارقام «کیفی رایج» و «پرمحصول» در شمال ایران می‌باشند، استفاده گردید (Zareiforoush et al., 2009). برای تعیین میزان محتوای رطوبتی شلتوک، نمونه‌های ۵۰ گرمی از رقم طارم هاشمی و نعمت به‌صورت تصادفی و در شرایط یکسان تهیه شدند. نمونه‌های ۵۰ گرمی از هر رقم به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون آزمایشگاهی با دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و رطوبت اولیه نمونه‌ها به روش وزنی براساس استاندارد شماره S352.1 (۱۹۹۹) تعیین گردید (رابطه ۴) (Sacilik et al., 2003).

رابطه (۴)

$$MC = \frac{w_w - w_d}{w_w}$$

در رابطه (۴)، MC: محتوای رطوبتی محصول بر پایه تر، w_w : وزن محصول تر (کیلوگرم)، w_d : وزن محصول خشک (کیلوگرم) می‌باشد. باتوجه‌به رابطه

نتایج و بحث

نتایج کسر رطوبتی

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) مربوط به اثر توان مایکروویو، ضخامت لایه شلتوک، رقم و سرعت تغذیه محصول به دستگاه روی کاهش کسر رطوبتی در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این جدول نشان می‌دهد که در توان، ضخامت لایه و سرعت‌های مختلف اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. همچنین برای رقم‌های مختلف اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد مشاهده شد. تأثیر متقابل لایه و رقم، لایه و توان، لایه و سرعت بر کسر رطوبتی در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل رقم و توان، توان و سرعت بر کسر رطوبتی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بودند. اثر متقابل رقم و سرعت تغذیه محصول به دستگاه روی کاهش کسر رطوبتی معنی‌دار نبود.

جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس تأثیر توان مایکروویو، ضخامت لایه، رقم و سرعت تغذیه محصول به دستگاه روی کسر رطوبتی

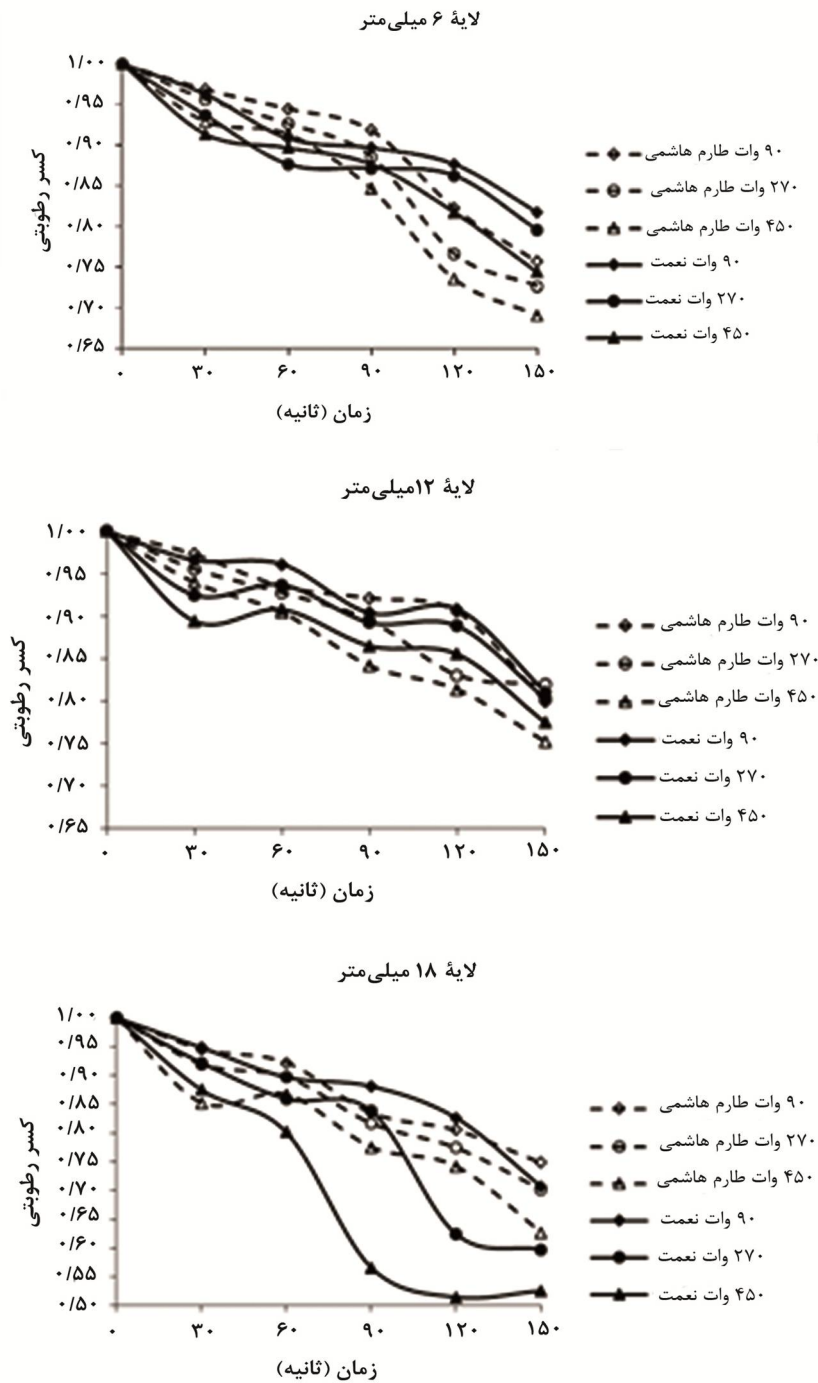
منابع خطا	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
لایه	۲	۰/۴۵	۰/۲۳	۱۶۶/۱۸**
رقم	۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۸/۳۴*
توان	۲	۰/۳۲	۰/۱۶	۱۱۷/۳۸**
سرعت	۴	۱/۳۹	۰/۳۵	۲۵۶/۷۳**
لایه × رقم	۲	۰/۰۶	۰/۰۳	۲۳/۱۵**
لایه × توان	۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۱۲/۰۸**
لایه × سرعت	۸	۰/۱۱	۰/۰۱	۱۰/۳۰**
رقم × توان	۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۵/۸۱*
رقم × سرعت	۴	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۷۳ ^{ns}
توان × سرعت	۸	۰/۰۳	۰/۰۱	۳/۰۸*
خطا	۲۳۲	۰/۳۱	۰/۰۰۱	

** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد (LSD) و ns عدم اختلاف معنی‌دار (CV = ۴/۳۶)

باتوجه به ضخامت‌های در نظر گرفته شده برای خشک کردن شلتوک (ضخامت‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر)، تغییرات کسر رطوبتی نمونه‌های مورد آزمون نسبت به تغییرات زمان خشک کردن برای توان‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل (۲)، شیب متوسط کسر رطوبتی در ابتدای خشک کردن رقم طارم هاشمی برای لایه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر به ترتیب

برابر با $10^{-3} \times 1/6$ ، $10^{-3} \times 1/47$ و $10^{-3} \times 3/16$ و برای رقم نعمت به ترتیب $10^{-3} \times 2/1$ ، $10^{-3} \times 2/4$ و $10^{-3} \times 2/4$ به دست آمد. نتیجه به دست آمده نشان‌دهنده کاهش سریع‌تر رطوبت برای ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر نسبت به ۲ لایه دیگر می‌باشد به طوری که در انتهای زمان ۱۵۰ ثانیه، در لایه ۱۸ میلی‌متری تقریباً بخش اعظمی از توان مایکروویو توسط محصول جذب شده و این امر باعث افزایش بیشتر دمای محصول نسبت به لایه‌های نازک‌تر و در نتیجه کاهش سریع‌تر کسر رطوبتی از محصول شده است. این یافته با نتایج سایر محققین مطابقت دارد که بیان می‌کند اگر ضخامت مواد در معرض امواج مایکروویو از عمق نفوذ امواج در آن ماده کمتر باشد، فقط بخشی از امواج مایکروویو توسط مواد جذب شده و طبق رابطه (۱) افزایش دمای کمتری خواهد یافت (Datta & Ananthswaran, 2001; Jindarat *et al.*, 2011). باتوجه به رابطه (۱)، افزایش توان خروجی مایکروویو موجب افزایش بیشتر دمای شلتوک شده و در نتیجه کسر رطوبتی شلتوک‌های مورد آزمون با شیب بیشتری کاهش می‌یابد. باتوجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۲)، نرخ کاهش کسر رطوبتی شلتوک با افزایش زمان امواج‌دهی به محصول (از طریق کاهش سرعت نوارنقاله) به سرعت در حال افزایش می‌باشد. این نتیجه با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی شلتوک و آزادبخت و همکاران (۱۳۹۱)، Alibas (۲۰۰۷) و Darvishi و همکاران (۲۰۱۳) روی سایر محصولات کشاورزی مطابقت دارد. باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل (۲)، کسر رطوبتی در رقم‌های طارم هاشمی و نعمت تقریباً به صورت یکسانی در حال کاهش می‌باشد، به جزء لایه ۱۸ میلی‌متر که در این لایه میزان کاهش رطوبت رقم نعمت در مقایسه با طارم هاشمی پس از زمان خشک کردن ۹۰ ثانیه با سرعت بیشتری صورت می‌پذیرد. نکته قابل توجه دیگر نوسانی بودن تغییرات کسر رطوبتی در زمان‌های مختلف خشک شدن می‌باشد. علت این موضوع، عدم یکنواختی حرکت آب داخل منافذ میکروسکوپی دانه در حال خشک شدن به سمت بیرون می‌باشد. گاهی با گرم شدن دانه و در نتیجه افزایش فشار آب متراکم داخل منافذ میکروسکوپی درون دانه، حرکت آب به سمت بیرون دانه با سرعت بیشتری اتفاق افتاده،

می‌گردد. سپس با تخلیه آب و اُفت فشار داخل منافذ میکروسکوپی، دوباره حرکت آب در منافذ کُند



شکل ۲ - تأثیر توان‌ها، رقم‌ها و زمان‌های مختلف خشک کردن بر سینتیک خشک کردن در لایه ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر

(۲) بیشترین مقدار کسر رطوبتی (۰/۹۱) در لایه ۱۲ میلی‌متر و توان ۹۰ وات و کمترین مقدار کسر رطوبتی (۰/۷۱) در لایه ۱۸ میلی‌متر و توان ۴۵۰ وات اتفاق افتاد. در توان مایکروویو ۴۵۰ وات انرژی بیشتری از مایکروویو ساعت شده و در نتیجه انرژی

نتایج اثرات متقابل پارامترهای مورد ارزیابی روی کاهش کسر رطوبتی باتوجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۲)، کمترین مقدار کسر رطوبتی برای رقم نعمت (۰/۷۶) در ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر به دست آمد. طبق جدول

افزایش دما موجب افزایش فشار سیال متراکم می‌گردد. همچنین در لایه ۱۸ میلی‌متری قسمت اعظم امواج مایکروویو تابیده شده در داخل توده شلتوک به دام افتاده و توسط شلتوک جذب می‌گردد. تعامل هم‌زمان و اثر متقابل دو عامل ذکر شده باعث کاهش بیشتر مقدار کسر رطوبتی شده است.

بیشتری توسط محصول جذب می‌شود. جذب بیشتر توان مایکروویو موجب افزایش بیشتر دمای دانه و در نتیجه باعث افزایش فشار آب در منافذ میکروسکوپی دانه شده و ضریب دیفیوژن^۱ را افزایش می‌دهد. لازم به ذکر اینکه برای آب متراکم موجود در فضای نیمه بسته داخل منافذ میکروسکوپی،

جدول ۲ - میانگین اثر متقابل پارامترهای مختلف بر کسر رطوبتی

اثر متقابل رقم و ضخامت لایه					
ضخامت لایه (میلی‌متر)					رقم
۱۸	۱۲	۶			
۰/۸۱ ^{Ca}	۰/۸۸ ^{Aa}	۰/۸۵ ^{Ba}	طارم هاشمی		
۰/۷۶ ^{Bb}	۰/۸۹ ^{Aa}	۰/۸۶ ^{Aa}	نعمت		
اثر متقابل ضخامت لایه و توان مایکروویو					
توان مایکروویو (وات)					ضخامت لایه (میلی‌متر)
۴۵۰	۲۷۰	۹۰			
۰/۸۲ ^{Ba}	۰/۸۶ ^{ABa}	۰/۸۹ ^{Aab}	۶		
۰/۸۵ ^{Ba}	۰/۸۹ ^{ABa}	۰/۹۱ ^{Aa}	۱۲		
۰/۷۱ ^{Bb}	۰/۷۹ ^{Ab}	۰/۸۵ ^{Ab}	۱۸		
اثر متقابل لایه و سرعت نوارنقاله					
سرعت نوارنقاله (متر بر دقیقه)					ضخامت لایه (میلی‌متر)
۰/۲۴	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۱/۲۷	
۰/۷۶ ^{Da}	۰/۸۱ ^{Caa}	۰/۸۸ ^B	۰/۹۰ ^{Ba}	۰/۹۴ ^{Aa}	۶
۰/۸۰ ^{Ca}	۰/۸۷ ^{Baa}	۰/۸۹ ^B	۰/۹۳ ^{Aa}	۰/۹۴ ^{Aa}	۱۲
۰/۶۵ ^{Cb}	۰/۷۱ ^{BCbb}	۰/۷۹ ^B	۰/۸۷ ^{Ab}	۰/۹۱ ^{Ab}	۱۸
اثر متقابل رقم و توان					
توان مایکروویو (وات)					رقم
۴۵۰	۲۷۰	۹۰			
۰/۸۱ ^{Ba}	۰/۸۵ ^{ABa}	۰/۸۸ ^{Aa}	طارم هاشمی		
۰/۷۸ ^{Ba}	۰/۸۴ ^{Aa}	۰/۸۸ ^{Aa}	نعمت		
اثر متقابل توان و سرعت نوارنقاله (سرعت تغذیه محصول)					
سرعت تغذیه محصول (متر بر دقیقه)					توان مایکروویو (وات)
۰/۲۴	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۱/۲۷	
۰/۷۷ ^{Ea}	۰/۸۶ ^{Da}	۰/۸۹ ^{Ca}	۰/۹۳ ^{Ba}	۰/۹۶ ^{Aa}	۹۰
۰/۷۴ ^{Cab}	۰/۷۹ ^{Cab}	۰/۸۷ ^{Ba}	۰/۹۰ ^{ABab}	۰/۹۴ ^{Ab}	۲۷۰
۰/۶۹ ^{Cb}	۰/۷۴ ^{BCb}	۰/۷۹ ^{Bb}	۰/۸۸ ^{Ab}	۰/۹۰ ^{Ac}	۴۵۰

حروف مشابه کوچک در هر ستون و حروف مشابه بزرگ در هر سطر عدم معنی داری را نشان می‌دهد.

رطوبتی نمونه‌ها معنی دار نبوده است (حروف مشابه بزرگ در سطرها). این نتیجه از نظر مصرف انرژی بسیار

باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، با افزایش توان مایکروویو از ۹۰ وات به ۲۷۰ وات، کاهش کسر

¹ Diffusion coefficient

نتایج شکست

اثر توان مایکروویو، ضخامت لایه، رقم و سرعت نوارنقاله (زمان توقف محصول در محفظه خشک کن) بر درصد شکست دانه‌های شلتوک در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد که در رقم، توان، ضخامت لایه و سرعت‌های مختلف تغذیه محصول به دستگاه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد. تأثیر متقابل لایه و سرعت، رقم و توان، رقم و سرعت و لایه و رقم بر درصد شکست دانه‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. در مقابل اثر متقابل ضخامت لایه و توان مایکروویو، همچنین اثر متقابل توان و سرعت تغذیه محصول به دستگاه روی درصد شکست دانه‌ها معنی‌دار نبود.

جدول ۳ - نتایج آنالیز واریانس تأثیر توان، لایه، رقم و زمان خشک شدن بر درصد شکستگی دانه‌های شلتوک

منابع خطا	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
لایه	۲	۱۰۹۰/۱۱۸	۵۴۵/۰۹	۲۸/۸۴**
رقم	۱	۳۵۴۵۴/۹۴	۳۵۴۵۴/۹۵	۱۸۷۶/۰۸**
توان	۲	۱۶۵۰/۰۹	۱۶۵۰/۱۰	۴۳/۶۶**
سرعت	۴	۴۶۹/۳۸	۴۶۹/۳۹	۶۲/۰۶**
لایه × رقم	۲	۱۰۵۵/۱۱	۱۰۵۵/۱۲	۲۷/۹۲**
لایه × توان	۴	۲۵/۳۷	۲۵/۳۷	۰/۳۴ ^{ns}
لایه × سرعت	۸	۹۲۷/۴۸	۹۲۷/۴۸	۶/۱۳**
رقم × توان	۲	۳۷۰/۹۴	۳۷۰/۹۴	۹/۸۱**
رقم × سرعت	۴	۲۰۲۷/۵۳	۲۰۲۷/۵۳	۲۶/۸۲**
توان × سرعت	۸	۲۴۰/۲۳	۲۴۰/۲۳	۱/۵۹ ^{ns}
خطا	۲۳۲	۴۳۸۴/۴۲	۱۸/۸۹	

** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد (LSD) و ns عدم اختلاف معنی‌دار (CV=۲۷/۳۸)

شکل (۳) تغییرات درصد دانه‌های شکسته را در لایه‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر برای رقم طارم هاشمی و رقم نعمت نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۳)، در توان‌های یکسان، درصد شکستگی دانه‌ها در لایه ۶ و ۱۲ میلی‌متر به یکدیگر نزدیک می‌باشد، در حالی که در ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر، درصد شکستگی دانه‌ها به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است. حداکثر درصد شکستگی دانه‌ها بخصوص برای رقم نعمت در لایه‌های مختلف ۶ تا ۱۸ میلی‌متر در توان ۴۵۰ وات و زمان ۱۵۰ ثانیه مشاهده شد. همچنین باتوجه به شکل (۳)،

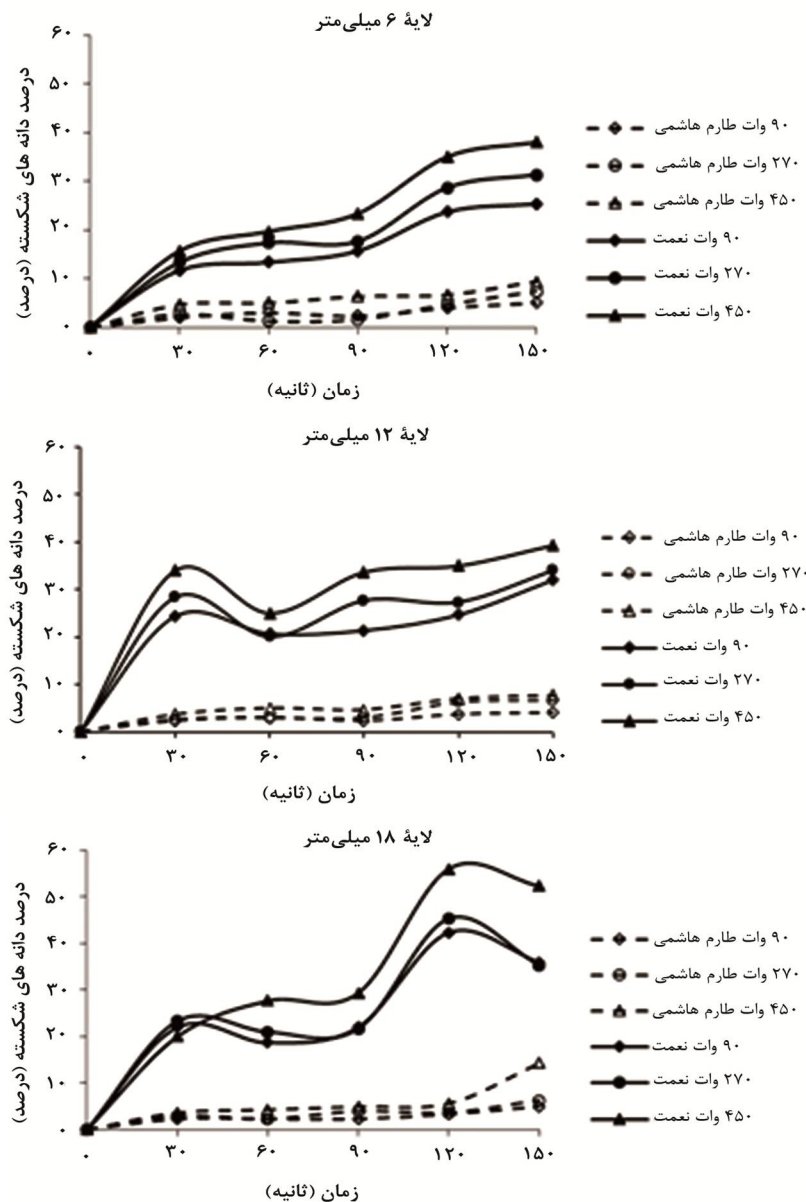
قابل توجه است، چرا که در توان ۲۷۰ وات ۳ برابر انرژی بیشتری نسبت به توان ۹۰ وات مصرف شده، در حالی که کاهش رطوبت ناچیز بوده و از نظر آماری معنی‌دار نشده است. لیکن با افزایش توان مصرفی از ۲۷۰ به ۴۵۰ وات، میزان کسر رطوبتی به طور معنی‌داری کاهش یافته است. این نتیجه با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی خشک کردن شلتوک مطابقت دارد.

باتوجه به داده‌های نشان داده شده در جدول (۲)، کمترین مقدار کسر رطوبتی (۰/۶۵) در لایه ۱۸ میلی‌متر و سرعت نوارنقاله ۰/۲۴ متر بر دقیقه (زمان ۱۵۰ ثانیه توقف محصول در داخل دستگاه) اتفاق افتاد. همان طوری که اشاره شد با افزایش ضخامت محصول، قسمت اعظم امواج مایکروویو توسط شلتوک جذب می‌گردد. همچنین با کاهش سرعت نوارنقاله مدت زمان توقف محصول در داخل دستگاه افزایش یافته و در نتیجه انرژی بیشتری توسط شلتوک جذب شده است. به همین دلیل اثر متقابل ضخامت لایه و سرعت تغذیه محصول به دستگاه معنی‌دار شده و در نتیجه باعث کاهش بیشتر کسر رطوبتی در شلتوک شده است.

طبق جدول (۲) کمترین مقدار کسر رطوبتی ۰/۷۸ در رقم نعمت و در توان ۴۵۰ وات مشاهده گردید. باتوجه به نتایج جدول (۲)، به طور میانگین با کاهش سرعت نوارنقاله (افزایش زمان توقف محصول در دستگاه) میزان کسر رطوبتی به طور معنی‌داری کاهش یافته است. طبق داده‌های ارائه شده در جدول (۲)، بیشترین مقدار کسر رطوبتی ۰/۹۶ در توان ۹۰ وات و سرعت نوارنقاله ۱/۲۷ متر بر دقیقه (زمان ۳۰ ثانیه) و کمترین مقدار کسر رطوبتی ۰/۶۹ در توان ۴۵۰ وات و سرعت نوارنقاله ۰/۲۴ متر بر دقیقه (زمان ۱۵۰ ثانیه) اتفاق افتاد. با افزایش توان و افزایش زمان توقف محصول در دستگاه انرژی بیشتری از مایکروویو در محفظه خشک کن توزیع شده که باعث کاهش بیشتر مقدار کسر رطوبتی گردیده است. این نتیجه با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی شلتوک و Alibas (۲۰۰۷) و Darvishi و همکاران (۲۰۱۳) روی سایر محصولات کشاورزی مطابقت دارد.

مطابقت دارد. از طرف دیگر باتوجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۳)، درصد شکستگی دانه‌ها در رقم نعمت نسبت به رقم طارم هاشمی به طور قابل توجهی بیشتر می‌باشد. تفاوت‌هایی که بین ۲ نمونه مورد آزمون وجود داشت، یکی بالاتر بودن نسبت طول به قطر دانه در رقم نعمت و دیگری بالاتر بودن درصد نسبت وزنی پوسته به وزن کل دانه در رقم نعمت بود. به این ترتیب که در رقم نعمت، نسبت طول به قطر متوسط دانه برابر با ۵/۷۷ و در رقم طارم هاشمی برابر با ۴/۸۱ بود. همچنین نسبت وزنی پوسته به وزن کل دانه در رقم نعمت ۴۳/۱۵ درصد و در رقم طارم هاشمی برابر با ۲۰/۹۰ درصد به دست آمد.

با افزایش زمان توقف محصول از ۹۰ ثانیه به ۱۵۰ ثانیه، درصد دانه‌های شکسته شده با شیب بیشتری در حال افزایش می‌باشد. به این علت که در این شرایط تولید حرارت داخلی در محصول به طور پیوسته افزایش یافته و احتمالاً تنش‌های حرارتی ایجاد شده در داخل محصول بیش از حد تحمل دانه بوده است. این نتیجه با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی درصد شکستگی دانه‌های شلتوک با روش خشک کردن مایکروویو و Zecchi و Gerla (۲۰۰۷) و Kalantari و Eshthead (۲۰۱۳) روی درصد شکستگی دانه‌های شلتوک با روش خشک کردن با جریان هوای گرم



شکل ۳- تأثیر توان‌ها، رقم‌ها و زمان‌های مختلف خشک کردن بر درصد دانه‌های شکسته شده در ۳ لایه ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر

مایکروویو، درصد شکستگی محصول به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. این نتیجه با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی خشک‌کردن شلتوک با استفاده از مایکروویو مطابقت دارد. نکته دیگر اینکه برای هر ۲ رقم طارم هاشمی و رقم نعمت، افزایش توان مایکروویو از ۹۰ به ۲۷۰ وات تأثیر معنی‌داری روی درصد شکست دانه نداشته است. نکته قابل توجه در جدول (۴) این است که درصد شکست رقم نعمت همچنان بسیار بالا بوده و به‌طور متوسط ۶ برابر درصد شکست رقم طارم هاشمی به‌دست‌آمده است. در جدول (۴) اثر متقابل رقم و سرعت تغذیه محصول به دستگاه روی درصد شکستگی دانه نشان داده شده است. باتوجه به نتایج نشان‌داده‌شده در جدول (۴)، بیشترین درصد دانه‌های شکسته (۳۵/۹۶ درصد) برای رقم نعمت و در سرعت تغذیه ۰/۲۴ متر بر دقیقه (زمان ۱۵۰ ثانیه) مشاهده شده است. کمترین درصد دانه‌های شکسته نیز در رقم طارم هاشمی و سرعت تغذیه ۱/۲۷ متر بر دقیقه (زمان ۳۰ ثانیه) مشاهده شد. با کاهش سرعت نوارنقاله به کمتر از ۰/۳ متر بر دقیقه و در نتیجه افزایش زمان امواج‌دهی به محصول در حال خشک‌شدن، درصد شکست محصول افزایش یافته است. این نتایج با نتایج Cheenkachorn (۲۰۰۷) و Yongsawatdikul و Gunasekaran (۱۹۹۶) روی درصد شکستگی دانه‌های شلتوک با روش خشک‌کردن مایکروویو و Zecchi و Gerla (۲۰۰۷) و Kalantari و Eshtevad (۲۰۱۳) روی درصد شکستگی دانه‌های شلتوک با روش خشک‌کردن با جریان هوای گرم مطابقت دارد.

نتایج اثرات متقابل پارامترهای متغیر بر درصد دانه‌های شکسته

طبق جدول (۴)، بیشترین درصد دانه‌های شکسته (۳۱/۵۳) مربوط به رقم نعمت و لایه ۱۸ میلی‌متر و کمترین درصد دانه‌های شکسته (۴/۳۳) مربوط به رقم طارم هاشمی و ضخامت لایه ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. نکته قابل تأمل در جدول (۴)، درصد بالای شکست رقم نعمت در خشک‌کردن به روش مایکروویو می‌باشد. این یافته با نتیجه Kalantari و Eshtevad (۲۰۱۳) در خشک‌کردن شلتوک نعمت با مایکروویو خانگی (Media, MW-F304ADY-W، ساخت چین) و خشک‌کردن با جریان هوای گرم مطابقت دارد. طبق جدول (۴) بیشترین درصد دانه‌های شکسته (۲۴/۸۹) در ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر و سرعت ۰/۲۴ متر بر دقیقه (زمان ۱۵۰ ثانیه) و کمترین درصد دانه‌های شکسته (۸/۳۳) در لایه ۶ میلی‌متر و سرعت ۱/۲۷ متر بر دقیقه (زمان ۳۰ ثانیه) اتفاق افتاد. باتوجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۴)، سرعت تغذیه محصول به دستگاه را می‌توان از نظر درصد شکست به ۲ سرعت تغذیه آرام با درصد شکست بالاتر (سرعت ۰/۳ متر بر دقیقه و کمتر) و تغذیه سریع با درصد شکست پایین‌تر (سرعت ۰/۴ متر بر دقیقه و بیشتر) تقسیم‌بندی نمود (حروف مشابه بزرگ در سطرها). در جدول (۴) اثر متقابل رقم و توان مایکروویو بر درصد شکستگی دانه شلتوک ارائه شده است. بیشترین درصد دانه‌های شکسته (۳۲/۲۷) مربوط به رقم نعمت و توان ۴۵۰ وات و کمترین درصد دانه‌های شکسته (۳/۱۳) مربوط به رقم طارم هاشمی و توان ۹۰ وات می‌باشد. در توان ۴۵۰ وات به علت انرژی بیشتر

جدول ۴- میانگین اثر متقابل پارامترهای مختلف بر درصد شکستگی دانه

رقم	ضخامت لایه (میلی‌متر)					توان مایکروویو (وات)				
	۶	۱۲	۱۸	۹۰	۲۷۰	۴۵۰				
طارم هاشمی	۴/۴ ^{Ab}	۴/۳۳ ^{Ab}	۴/۵۱ ^{Ab}	۳/۱۳ ^{Bb}	۳/۹۱ ^{Bb}	۶/۳ ^{Ab}				
نعمت	۲۱/۹۷ ^{Ba}	۲۸/۴۹ ^{Aa}	۳۱/۵۳ ^{Aa}	۲۳/۵۸ ^{Ba}	۲۶/۱۶ ^{Ba}	۳۲/۲۷ ^{Aa}				
ضخامت لایه (میلی‌متر)	سرعت تغذیه محصول (متر بر دقیقه)					توان (وات)				
۶	۱/۲۷	۰/۶	۰/۴	۰/۳	۰/۲۴	۰/۲۴				
۱۲	۰/۹۴ ^{Aa}	۰/۹۰ ^{Ba}	۰/۸۸ ^B	۰/۸۱ ^{Caa}	۰/۷۶ ^{Da}	۰/۷۷ ^{Ea}				
۱۸	۰/۹۴ ^{Aa}	۰/۹۳ ^{Aa}	۰/۸۹ ^B	۰/۸۷ ^{Baa}	۰/۸۰ ^{Ca}	۰/۷۴ ^{Cab}				
۹۰	۰/۹۱ ^{Ab}	۰/۸۷ ^{Ab}	۰/۷۹ ^B	۰/۷۱ ^{BCbb}	۰/۶۵ ^{Cb}	۰/۶۹ ^{Cb}				
۲۷۰	۰/۹۴ ^{Aa}	۰/۹۳ ^{Aa}	۰/۹۰ ^{Ba}	۰/۸۹ ^{Ca}	۰/۸۷ ^{Ba}	۰/۷۹ ^{Cab}				
۴۵۰	۰/۹۴ ^{Aa}	۰/۹۳ ^{Aa}	۰/۹۰ ^{Ba}	۰/۸۹ ^{Ca}	۰/۸۷ ^{Ba}	۰/۷۴ ^{Cab}				

حروف مشابه کوچک در هر ستون و حروف مشابه بزرگ در هر سطر عدم معنی‌داری را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور کاهش زمان خشک شدن و افزایش کیفیت محصول خشک شده، تأثیر پارامترهای مختلف میکروویو جریان مداوم روی سینتیک کاهش رطوبت و درصد شکستگی شلتوک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که بیشترین کاهش کسر رطوبتی در لایه ضخیم تر از عمق نفوذ مؤثر امواج میکروویو صورت می‌گیرد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که درصد شکست دانه‌های شلتوک به طور مستقیم با آهنگ تغییرات کسر رطوبتی و جذب انرژی میکروویو رابطه دارد، به طوری که با افزایش آهنگ تغییر کسر رطوبتی و افزایش جذب انرژی، درصد شکست دانه‌ها نیز افزایش پیدا کرد. با ارزیابی تمامی پارامترهای مؤثر خشک‌کن میکروویو ساخته شده روی کسر رطوبتی و درصد شکست دانه شامل توان‌های مختلف، سرعت‌های مختلف نوارنقاله و ضخامت محصول عبوری از دستگاه، توان ۹۰ وات، سرعت تغذیه ۰/۲۴

متر بر ثانیه و ضخامت لایه ۱۸ میلی‌متر پیشنهاد می‌گردد. درصد شکست دانه‌ها در شرایط پیشنهادی برای رقم طارم هاشمی در همه موارد مورد آزمون کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد. از طرف دیگر استفاده از انرژی میکروویو برای خشک کردن رقم نعمت به دلیل درصد شکست بالای دانه توصیه نمی‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که برای خشک کردن هر رقم شلتوک توسط امواج میکروویو، باید ابتدا پیش‌آزمونی در شرایط مختلف کاری انجام شده و کیفیت خشک شدن محصول و درصد شکست دانه تعیین گردد. بخصوص ارقام اصلاح شده و پر محصول جدید مانند رقم مورد آزمون در این تحقیق ممکن است به علت تغییر در خواص فیزیکی و خواص کیفی محصول، تحمل امواج میکروویو حتی در سطوح پایین را نداشته باشند. برای تحقیق‌های بعدی، ترکیب خشک‌کن‌های میکروویو صنعتی و نیمه صنعتی جریان مداوم با جریان هوای گرم یا تابش مادون قرمز و بررسی عملکرد آنها توصیه می‌گردد.

منابع

- 1- Alibas, I. 2014. Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy. *Journal of Food Science and Technology*, 34(2):394-401.
- 2- ASAE Standards. 1999. D245.5. Moisture relationship of plant based agricultural products (46th ed.). St. Joseph, Mich.: ASAE.
- 3- Cheenkachorn, K. 2007. Drying of rice paddy using a microwave-vacuum dryer. *Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6) Copenhagen*, 16-20 September.
- 4- Dadali, G., Demirhan, E., & Özbek, B. 2007. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach. *Food and Bio-products processing*, 86(4):235-241.
- 5- Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H., Najafi, G., & Zarein, M. 2013. Characteristics of sunflower seed drying and microwave energy consumption. *International Agro physics*, 27(2):127-132.
- 6- Datta, A.K., & Anantheswaran, R.C. 2001. *Handbook of microwave technology for food application*. Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York, NY 10016.
- 7- Diamante, L.M., & Munro, P.A. 1991. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Journal of Solar Energy*, 51(4):271-276.
- 8- Discala, K., Meschino, G., Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Roura, S., & Mascheroni, R. 2013. An artificial neural network model for prediction of quality characteristics of apples during convective dehydration. *Journal of Food Science and Technology*, 33(3):411-416.
- 9- Doymaz, Í., & Kocayigit, F. 2011. Drying and rehydration behaviors of convection drying of green peas. *Drying Technology*, 29(11):1273-1282.
- 10-Goksu, E. I., Sumnu, G., & Esin, A. 2005. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *Journal of Food Engineering*, 66(4):463-468.

- 11-Gowen, A.A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. 2008. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(1):129-137.
- 12-Housova', J., & Hoke, K. 2002. Microwave heating – the influence of oven and load parameters on the power absorbed in the heated load. *Czech Journal of Food Science*, 20(2):117-124.
- 13-IEC Publication 705. 1988. Methods for measuring the performance of microwave ovens for household and similar purposes. 2nd ed. Int. Electrotechn. Commis. Geneve.
- 14-Jindarat, W., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S., & Pianroj, Y. 2011. Analysis of energy consumption in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system (CMCB). *Drying Technology: An International Journal*, 29(8):926-938.
- 15-Kalantari, D., & Eshtevad, R. 2013. Influence of different of tempering period and vacuum conditions on the rice grain breakage in thin layer dryer. *Cercetări Agronomice în Moldova*, 47(4):5-12.
- 16-Karaaslan, S.N. & Tuncer, I.K. 2008. Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, 100(1): 44-52.
- 17-Kouchakzadeh, A., & Shafeei, S. 2010. Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Convers Manage* 51(10):2012-2015.
- 18-Monteiro, R.L., Carciofi, B.A.M., Marsaioli Jr, A., & Laurindo, J.B. 2015. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. *Journal of Food Engineering*, 166:276-284.
- 19-Mullin, J. 1995. Microwave processing. In *New Methods of Food Preservation*. Edited by G.W.Gould. Cornwall, UK: Blackie Academic & Professional.
- 20-Oghbaei, M., & Mirzaee, O. 2010. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 494(1-2):175-189.
- 21-Oliveira, M.E.C., & Franca, A.S. 2002. Microwave heating of foodstuff. *Journal of food Engineering*, 53(4):347-359.
- 22-Sacilik, K., Ozturk, R., & Keskin, R. 2003. Some physical properties of hempseed. *Bio-system Engineering*, 86(2):191-198.
- 23-Sanga, E., Mujumdar, A.S., & Raghavan, G.S.V. 2000. Principles and application of microwave drying. In: *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Edited by A.S. Mujumdar. Enfield, NH: Science Publishers, Inc.
- 24-Sangdao, Ch., Songsermpong, S., & Krariksh, M. 2011. A continuous fluidized bed microwave paddy drying system using applicators with perpendicular slots on a concentric cylindrical chamber. *Drying Technology: An International Journal*, 29:35-46.
- 25-The Sci. Electronics. Repair (S.E.R) FAQ Sam's Laser FAQ Silicon Sam's Technology Resource (SSTR) Other Sam's Documents Version 2011 (12-Sep-11), website: <http://www.repairfaq.org>.
- 26-Vongpradubchai, S., & Rattanadecho, P. 2009. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. *Chemical Engineering and Processing* 33: 472-481.
- 27-Yongsawatdikul, J., & Gunasekaran, S. 1996. Microwave-vacuum drying of cranberries: Part I. Energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2):121-143.
- 28-Zareiforoush, H., Komarizadeh, M.H., & Alizadeh, M.R. 2009. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains. *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 13:132-139.
- 29-Zecchi, B., & Gerla, P. 2007. Breakage and mass transfer models during drying of rough rice. *Drying Technology*, 25(9):1405-1410.

Investigating Drying of Rice Paddy Using a Continuous Band Microwave Dryer

Hassan Jafari¹, Davood Kalantari^{2*}, Mohsen Azadbakht³

1- MSc Student, Department of Bio-systems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

2- Assistant Professor, Department of Bio-systems Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

* Corresponding author (d.kalantari@sanru.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Bio-systems Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Abstract

In recent years, application of microwave dryer is expanding to speed up drying the agricultural products. Therefore, in this research a continuous band microwave dryer was fabricated and evaluated for drying paddy grains. In this experiments, drying process of two paddy varieties (Tarom Hashemi and Nemat) were studied in three levels of microwave power 90, 270 and 450 Watts, three different thicknesses of grain layer 6, 12 and 18 mm and five feeding speed 0.24, 0.3, 0.4, 0.6 and 1.2 mmin⁻¹. The average slope of moisture ratio at the beginning of drying was -1.6×10^{-3} , -1.47×10^{-3} and -3.16×10^{-3} for Tarom Hashemi and -2×10^{-3} , -2.1×10^{-3} and -2.4×10^{-3} for Nemat at 6, 12 and 18 mm layer thickness, respectively. The finding reflected faster decreasing in the moisture content in the 18 mm layer thickness compared to the two other examined layers. By evaluating all of the effective parameters of the fabricated microwave dryer on the moisture reduction and seed breakage percent, the power of 90 W, conveyor speed of 0.24 m/min⁻¹, and layer thickness of 18 mm can be suggested for drying Tarom Hashemi paddy variety. The seed breakage percent in the proposed conditions for Tarom Hashemi was less than 10% for all of the conducted measurements.

Keywords: Breakage percent, Dryer, Microwave, Moisture ratio, Paddy