

مطالعه برخی خصوصیات فیزیکی و جنبه‌های انرژی فرآیند خشک کردن سیب‌زمینی در روش مادون قرمز-خلأ

نگار حافظی^۱ - محمد جواد شیخ داودی^{۲*} - سید مجید سجادی^۳ - محمد اسماعیل خراسانی فردوانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶

چکیده

هدف عمده خشک کردن ماده غذایی، افزایش ماندگاری محصول نهایی و کاهش رطوبت محصول می‌باشد، فرآیند خشک کردن باید تا حدی انجام شود که بتواند رشد میکروبی و واکنش‌های شیمیایی را محدود کند. یکی از روش‌های جدید در خشک کردن مواد غذایی، استفاده از گرمایش مادون قرمز تحت شرایط خلأ است که باعث افزایش سرعت خشک شدن و حفظ کیفیت محصول خشک شده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از یک خشک‌کن آزمایشگاهی مادون قرمز-خلأ، خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی در سه سطح شدت تابش اشعه مادون قرمز ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ وات بر سانتی‌متر مربع، چهار سطح فشار مطلق ۲۰، ۸۰، ۱۴۰ و ۷۶۰ میلی‌متر جیوه با سه ضخامت ورقه ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر در سه تکرار آزمایشی انجام شد. نتایج نشان که ضخامت ورقه اثر بسیار معنی‌داری در سطح یک درصد بر مقدار ظرفیت باز جذب آب و تغییرات رنگ ورقه‌های سیب‌زمینی خشک شده داشته است. همچنین مشاهده شد که شدت تابش لامپ مادون قرمز و میزان فشار مطلق روی میزان انرژی ویژه مصرفی طی فرآیند خشک شدن سیب‌زمینی اثر مهمی داشتند به گونه‌ای که با افزایش شدت تابش لامپ مادون قرمز، کاهش فشار مطلق (اعمال خلأ) در محفظه خشک‌کن میزان مصرف انرژی ویژه کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: انرژی ویژه مصرفی، خشک کردن، سیب‌زمینی، مادون قرمز-خلأ، ظرفیت باز جذب آب

مقدمه

سیب‌زمینی در طی فرآیند سرخ کردن به‌طور معمول ۴۰-۳۵ درصد روغن جذب می‌کند. این مقدار روغن علاوه بر اینکه از نظر اقتصادی و مقدار کالری قابل جذب برای مصرف‌کننده مناسب نیست، بلکه نوع روغن مصرفی و تغییراتی که محصول در جریان سرخ کردن و در طول نگهداری بعد از تولید پیدا خواهد کرد، قابل توجه و اهمیت است. پژوهش‌های اخیر ثابت کرده‌اند که در اثر سرخ کردن سیب‌زمینی ماده سمی و سرطان‌زایی به نام اکریل آمید^۶ به‌وجود می‌آید. مقدار این اسید در یک بسته چپس سیب‌زمینی ۵۰۰ برابر حد مجاز توصیه شده برای آب آشامیدنی به‌وسیله سازمان بهداشت جهانی^۷ (W.H.O) گزارش کرده‌اند. با توجه به خطرات ناشی از مصرف چپس سیب‌زمینی و به منظور استفاده بیشتر از این محصول با ارزش، حذف مرحله سرخ کردن (به روش خشک)، با رعایت ویژگی‌های حسی محصول (رنگ، شکل ظاهری، تردی، طعم و مزه)، توصیه می‌شود (Hoffman, 2004).

یکی از راه‌های کاهش ضایعات سیب‌زمینی، خشک کردن مناسب

سیب‌زمینی گیاهی یک‌ساله با نام علمی سولانوم توبروسوم (*Solanum tuberosum* L.) است که برای استفاده از غده زیرزمینی آن کشت می‌گردد. براساس آمار فائو^۴ ایران با تولید سالانه ۴/۱ میلیون تن سیب‌زمینی^۵ در رتبه شانزدهم تولید این محصول در جهان قرار دارد و هر ساله حدود ۲۰۰ هزار تن از این محصول را به کشورهای عراق، ترکمنستان، افغانستان و آذربایجان صادر می‌کند (FAO, 2013).

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

*- نویسنده مسئول: (Email: mj.davoodi@scu.ac.ir)

۳- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

6- Acrylamide (C₃H₅NO)

7- World health organization

4- FAO (Food and agriculture organization)

5- Potato

یکنواخت محصول اشاره کرد (Sharma et al., 2005).

در روش تابش مادون قرمز، به دلیل اینکه امواج مادون قرمز در محدوده طول موج‌های قابل جذب به‌وسیله آب هستند، با جذب این امواج به‌وسیله رطوبت موجود در محصول و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما به صورت یکسان در درون ماده تولید می‌گردد و در نتیجه فشار بخار سبب انتقال رطوبت به سطح شده و به راحتی توسط محیط اطراف حذف می‌شود. استفاده از خلأ به همراه گرمایش می‌تواند روش مؤثری برای خشک کردن باشد. زیرا در این حالت بدون نیاز به افزایش زیاد دما، می‌توان به ظرفیت بالایی از تولید محصول خشک شده دست یافت. به این ترتیب می‌توان مواد حساس به دماهای بالا را در مدت زمان کوتاهی به خوبی خشک کرد. در این روش خشک کردن که از خلأ و گرما در کنار یکدیگر استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که تنها از گرمایش استفاده شود، نتیجه بهتری به‌دست خواهد آمد، به‌خصوص در موادی که دارای خلل و فرج بوده یا سطح مقطع ماده دارای مساحت بسیار بالا باشد.

در فرآیند خشک کردن مقدار قابل توجهی از آب ماده غذایی کاهش یافته و از این طریق فعالیت آبی، میکروبی و آنزیمی محصول محدود شده و تغییرات فیزیکی و شیمیایی حین انبارداری به حداقل می‌رسد و به تبع آن عمر انبارداری محصول افزایش می‌یابد (Li et al., 2011). برای بررسی میزان تغییرات به‌وجود آمده در محصول تولیدی از فرآیند خشک شدن، عمدتاً دو ویژگی رنگ و جذب آب مجدد^۳ ارزیابی می‌شود (Bhandri and Howes, 1999). سرعت و میزان جذب آب مجدد به‌عنوان شاخص کیفی مواد غذایی خشک شده می‌باشد. مواد غذایی که تحت شرایط بهینه خشک شوند کمتر آسیب دیده و سریع‌تر و کامل‌تر آب جذب می‌کنند (Francis, 2000).

قابلیت جذب آب مجدد، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مورد بررسی بر روی موادی که خشک شده‌اند، می‌باشد به طوری که اگر ماده‌ای در پایان فرآیند خشک کردن، دارای کیفیت تغذیه‌ای مناسبی باشد اما قدرت جذب آب مناسبی نداشته باشد، عملاً ماده‌ای نامناسب و غیر قابل مصرف تلقی می‌شود (Lee et al., 2006). رنگ به‌عنوان یک ویژگی فیزیکی اساسی در غذاها و محصولات کشاورزی به حساب می‌آید. آزمایش بصری، متداول‌ترین روش برای ارزیابی رنگ محصولات است. تغییرات در رنگ محصولات به خاطر واکنش‌های ترکیبی داخل محصول در طول فرآیند خشک کردن می‌باشد. همچنین تغییرات در نتیجه واکنش‌های متغیر مثل واکنش قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی و تخریب رنگدانه‌ها به‌وجود می‌آید (Prachayawarakorn, 2004).

مشکلات استفاده از انرژی خورشید در خشک کردن محصولات

آن و نگهداری آن به صورت خشک شده می‌باشد. سبب‌زمینی خشک شده را می‌توان در مکان‌هایی که مصرف بالایی دارند نظیر رستوران‌ها و هتل‌ها به راحتی در انواع سوپ‌ها و خورش‌ها به کار برد. با توجه به مشکلات نگهداری، حمل و نقل و نوسان فصلی قیمت سبب‌زمینی تازه، تولید فرآورده‌های آماده مصرف نظیر چیپس^۱، خلال، قطعات مکعبی و پودر خشک شده‌ی سبب‌زمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از ویژگی‌های مهم خشک کردن سبب‌زمینی، کاهش میزان مصرف و جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن در دمای بالا می‌باشد. به علت این که سبب‌زمینی مرطوب در زمان سرخ شدن مقدار زیادی روغن جذب می‌کند. از این رو، استفاده از مرحله پیش خشک کردن قبل از سرخ کردن سبب کاهش رطوبت کل محصول شده و میزان جذب روغن را محدود می‌سازد (Leeratanarak et al., 2006).

خشک کردن^۲ عبارت است از خارج نمودن آب از ماده غذایی به گونه‌ای که محصول خشک حاصل از این عمل را بتوان به مدت طولانی، سالم نگهداری کرد. میوه‌ها و سبزیجات به دلیل رطوبت بالا از جمله غذاهای فسادپذیر محسوب می‌شوند. در فرآیند خشک کردن مقدار قابل توجهی از آب ماده غذایی کاهش یافته و از این طریق فعالیت آبی، میکروبی و آنزیمی محصول محدود شده و تغییرات فیزیکی و شیمیایی حین انبارداری به حداقل می‌رسد و به تبع آن عمر انبارداری محصول افزایش می‌یابد. بدین ترتیب محصولاتی با خواص کیفی و تغذیه‌ای جدیدی تولید می‌شوند. خشک کردن همچنین باعث کاهش وزن و حجم بسته‌بندی و هزینه‌های حمل و نقل و انبارداری می‌شود (Li et al., 2011). استفاده از فن‌آوری خلأ در خشک کردن محصولات غذایی پدیده‌ای جدید و تازه می‌باشد. خشک کردن خلأی روشی جایگزین برای روش خشک کردن مرسوم اتمسفری است. در این روش خارج شدن رطوبت از محصول در فشارهای پایین انجام می‌شود. وجود خلأ سبب منبسط شدن هوا و بخار آب موجود در ماده غذایی شده، ساختاری متخلخل در ماده غذایی ایجاد کرده و نسبت سطح به حجم بیشتری برای انتقال جرم و حرارت به‌وجود می‌آورد. در نتیجه با استفاده از خشک کردن خلأی می‌توان به سرعت خشک کردن بالاتر، دمای خشک کردن پایین‌تر و محیط فرآیند با اکسیژن کمتر دست پیدا کرد (Lee and Kim, 2009).

در سال‌های اخیر در میان روش‌های خشک کردن، روش مادون قرمز محبوبیت خوبی به‌دست آورده است. استفاده از تکنولوژی تشعشعات مادون قرمز در خشک کردن محصولات کشاورزی چندین مزیت را در پی دارد که از جمله آن می‌توان به کاهش زمان فرآیند، بازدهی بالای انرژی، کیفیت بالای محصول خشک شده و دمای

3- Color
4- Rehydration

1- Chips
2- Drying

به‌دست آمد. استفاده از خلأ در تلفیق با ماکروویو مصرف انرژی فرآیند را نسبت به خشک کردن با ماکروویو افزایش داده بود. همچنین به این نتیجه رسیدند که استفاده از اشعه مادون قرمز در تلفیق با هوای داغ مصرف انرژی را نسبت به استفاده از مادون قرمز به تنهایی، کاهش داده است (Motevali *et al.*, 2011).

اهداف این مطالعه عبارتند از بررسی پارامترهای کیفی از جمله رنگ و ظرفیت باز جذب آب ورقه‌های سیب زمینی و نیز ارزیابی میزان انرژی مخصوص خشک کردن و بازده مصرف انرژی طی فرآیند خشک کردن به‌وسیله خشک‌کن تلفیقی مادون قرمز- خلأ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از سیب‌زمینی، رقم مارفونا با وزن مخصوص ۱/۰۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ماده خشک ۱/۳۵ ± ۱۹/۰۱٪ استفاده شد. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت سیب‌زمینی‌ها از روش استاندارد انجمن شیمی آمریکا (AOAC, 1990) استفاده گردید. در این حالت، نمونه‌های ۲۵ گرمی به کمک آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. این روند چندین مرحله تکرار شد تا محتوای رطوبت اولیه سیب‌زمینی‌ها در حدود ۱۱/۷۷٪ بر پایه تر به‌دست آمد. در این تحقیق از یک خشک‌کن خلأی به همراه وسیله گرمایشی (لامپ مادون قرمز) در مقیاس آزمایشگاهی موجود در کارگاه آموزشی مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز، با طرح‌واره کلی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. اجزای اصلی دستگاه شامل یک محفظه‌ی استوانه‌ای شکل از جنس فولاد و یک پمپ خلأ پیستونی با ولتاژ ۲۲۰ ولت، فرکانس ۵۰ هرتز و شدت جریان الکتریکی ۵/۱ آمپر بود. درون محفظه تعدادی میله به‌صورت افقی و موازی با هم جهت قرار دادن ترازو و سینی نمونه تعبیه شده بود. به منظور ایجاد شدت تابش‌های مختلف بر روی نمونه از یک لامپ مادون قرمز با توان ۲۵۰ وات و ولتاژ ۲۳۰ ولت ساخت کشور اسلواکی و شرکت OSRAM استفاده شد.

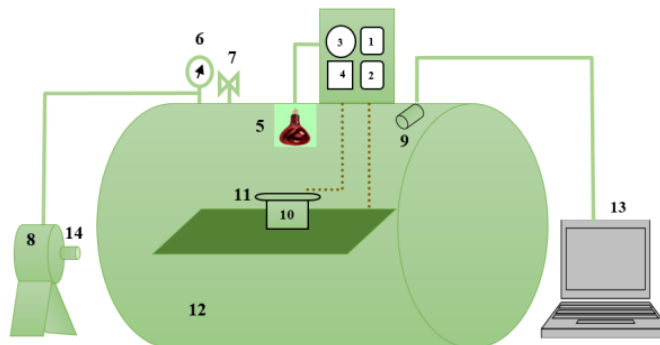
در همه تیمارهای آزمایشی لامپ مادون قرمز درون دستگاه به مدت ۱۵ دقیقه جهت یکسان شدن شرایط دمایی درون محفظه قبل از شروع آزمایش‌ها روشن می‌شد. پیش از شروع کار پمپ، فشار مخزن با فشار هوا یکسان بوده است، سیکل کاری دستگاه با تابش لامپ مادون قرمز برای ایجاد حرارت و به‌کار انداختن پمپ خلأ جهت مکش هوای درون محفظه‌ی خلأ آغاز می‌شد، در این حالت با مکش هوا توسط پمپ، فشار درون محفظه کاهش می‌یافت.

مختلف کشاورزی سبب شد تا خشک‌کن‌های صنعتی جایگزین روش‌های سنتی خشک کردن گردند. در مقابل استفاده از خشک‌کن‌های صنعتی باعث مصرف انرژی زیادی در صنعت خشک کردن می‌شوند. در واقع عمل خشک کردن نیاز به انرژی زیادی دارد، این مقدار زیاد انرژی به علت زیاد بودن گرمای ویژه کل آب تبخیر شده و بازده پایین خشک‌کن‌های صنعتی است. معمولاً خشک‌کن‌ها حدود ۲۰-۱۰٪ انرژی کل فرآیند را مصرف می‌کنند. مقدار مصرف انرژی در خشک‌کن‌ها هم‌چنین به میزان رطوبت اولیه مواد بستگی دارد، در تحقیقات زیادی به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش مقدار رطوبت اولیه مواد خشک شونده، مقدار انرژی ویژه مصرفی جهت خشک کردن آن‌ها کمتر می‌شود (Strumillo and Kudra, 1986).

لین و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی به بررسی تغییرات رنگی و میزان آبگیری مجدد ورقه‌های سیب‌زمینی شیرین در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-انجمادی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از مادون قرمز در روش خشک کردن انجمادی سبب کوتاه شدن زمان خشک شدن می‌شود. از سوی دیگر افزایش ضخامت ورقه و کاهش دما موجب طولانی شدن زمان خشک کردن می‌گردد. همچنین مشاهده کردند که میزان قابلیت جذب مجدد آب با افزایش دما و کاهش ضخامت رابطه مستقیم دارد به گونه‌ای که بیشترین ظرفیت آبگیری مجدد در کمترین میزان ضخامت ورقه سیب‌زمینی و بالاترین دمای خشک شدن به‌دست آمده است (Lin *et al.*, 2006).

کانترانگ و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه بر روی خصوصیات کیفی و ویژگی‌های خشک کردن ورقه‌های قارچ توسط خشک‌کن ماکروویو-خلأ در ترکیب با روش مادون قرمز پرداختند. نتایج نشان داد که در بیشترین توان ماکروویو، کمترین میزان فشار مطلق (بیشترین میزان خلأ) و بالاترین سطح توان مادون قرمز رنگ ورقه‌ی خشک شده قارچ روشن‌تر بوده و تغییرات کمتری نسبت به سایر تیمارهای آزمایشی داشته است. کمترین میزان تغییرات رنگ در توان ماکروویو ۲۶۷ وات، خلأ ۱۸/۶۶ کیلو پاسکال و توان تابشی ۲۰۰ وات مشاهده شد (Kantrong *et al.*, 2012).

متولی و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای به مقایسه مصرف انرژی و انرژی مخصوص ورقه‌های قارچ در روش‌های مختلف خشک کردن پرداختند. آزمایش‌ها در شش سطح دما (۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس) و سه سطح سرعت هوای ورودی (۰/۵، ۰/۷ و ۱ متر بر ثانیه)، سه سطح شدت تابش مادون قرمز (۰/۲۲، ۰/۳۱ و ۰/۴۹ وات بر سانتی‌متر مربع)، در چهار سطح توان ماکروویو (۱۳۰، ۲۶۰، ۳۸۰ و ۴۵۰ وات) و چهار سطح فشار هوای مطلق (۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌بار) در ضخامت ۳ میلی‌متر انجام شدند. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین میزان انرژی مصرفی طی خشک شدن ورقه‌های قارچ به‌ترتیب در روش‌های خشک کردن با ماکروویو و خلأ



شکل ۱- طرح‌واره دستگاه خشک‌کن مادون قرمز - خلأ

۱: نمایشگر سنسور رطوبت ۲: نمایشگر ترموکوپل ۳: دیمر لامپ مادون قرمز ۴: ولت‌متر ۵: لامپ مادون قرمز ۶: خلأسنج ۷: شیر تنظیم خلأ ۸: پمپ خلأ ۹: دوربین ۱۰: ترازوی دیجیتال ۱۱: سینی نمونه‌ها ۱۲: محفظه خشک‌کن ۱۳: رایانه ۱۴: مجرای خروج هوا

Fig. 1. Schematic diagram of a vacuum-infrared drying system

1) Humidity sensor displayer; 2) Thermocouple displayer; 3) Infrared lamp power controller; 4) Voltmeter; 5) Infrared lamp; 6) Vacuum gauge; 7) Vacuum valve; 8) Vacuum pump; 9) Camera; 10) Electronic weight scale; 11) Sample tray; 12) Drying chamber; 13) Laptop; 14) Air outlet duct

خلأسنج (WKP-SH01) نصب شده روی قسمت فوقانی محفظه خشک‌کن کنترل گردید. میزان خلأ در چهار سطح فشار مطلق ۲۰، ۸۰، ۱۴۰ و ۷۶۰ میلی‌متر جیوه سنجیده شد. رطوبت نسبی هوای محفظه تحت خلأ از طریق حسگر رطوبت‌سنج پایش می‌شد. رطوبت نسبی درون محفظه خشک‌کن در شروع آزمایش‌ها به‌طور میانگین برابر با ۳۵ درصد بود. تغییرات محتوای رطوبتی محصول دائماً از طریق اندازه‌گیری وزن سیب‌زمینی‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۵ گرم (Lutron, GM-1500P, Taiwan) جای داده شده درون محفظه خشک‌کن سنجیده شد. جهت قرائت کردن لحظه‌ای کاهش وزن سیب‌زمینی‌ها از یک دوربین (Farassoo-FC-2370) نصب شده بر روی سقف محفظه خشک‌کن استفاده گردید. دوربین به‌طور مداوم از صفحه نمایشگر ترازوی دیجیتال فیلم‌برداری می‌نمود. دوربین از طریق سیم رابط به رایانه متصل شده بود. در کلیه آزمایش‌ها سیب‌زمینی‌ها تا زمان انجام آزمایش جهت کاهش میزان شدت تنفس و تغییرات فیزیولوژی و شیمیایی در سردخانه‌ی دانشکده کشاورزی با دمای ۴-۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵ درصد نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش‌ها تعدادی از نمونه‌های سیب‌زمینی را شسته تا مواد خارجی و ذرات خاک، به خوبی از آن جدا گردد. سپس مدتی در آبکش قرار داده شد تا آب آن به‌طور کامل گرفته شود. بعد از آن سیب‌زمینی، مرحله پوست‌گیری را طی کرده و توسط دستگاه لایه‌کن دستی به ورقه‌هایی با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برش داده شد. جهت یکسان بودن مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی از یک قالب استوانه‌ای فلزی به قطر ۵ سانتی‌متر استفاده شد. ورقه‌های سیب‌زمینی روی سینی به‌صورت یک لایه قرار دادند. نمونه‌ها قبل از چیده شدن روی سینی خشک‌کن توزین می‌شدند، همچنین در

در این وضعیت هرچند فشار درون محفظه از فشار هوا کمتر شده اما هنوز از فشار اشیاع محصول بیشتر بوده است و رطوبت اولیه محصول حفظ می‌شد. زمانی که فشار درون محفظه به فشار اشیاع می‌رسید، به دلیل اختلاف فشار به‌وجود آمده در سطح با درون محصول، بخار آب از درون محصول به طرف سطح کشیده می‌شد. در نتیجه آب درون محصول شروع به تبخیر می‌کرد و محتوای رطوبتی محصول کاهش می‌یافت. زمان خشک شدن با رسیدن رطوبت محصول به رطوبت نهایی و توقف پمپ خلأ، خاموش شدن لامپ و نیز باز شدن شیر تهویه و ورود هوا به درون محفظه متوقف شد. از لامپ مادون قرمز در قسمت فوقانی محفظه خلأ جهت حرارت دادن به محصول و تسریع عمل خشک شدن استفاده شد. ارتفاع نصب لامپ تا سینی نمونه‌ها در یک سری پیش‌آزمایش‌ها اندازه‌گیری و مقدار ثابت ۱۵ سانتی‌متر تعیین شد. دمای ناشی از تابش نور لامپ به سطح محصول به‌وسیله یک حسگر دما (SAMWON ENG, SU-105KRR) که در زیر سینی نمونه قرار داشت، سنجیده شد. دمای شروع کار جهت انجام آزمایش‌ها (در ۱۵ دقیقه ابتدایی پیش از شروع فرآیند) در تمام تیمارها یکسان و به میزان ۵۰ درجه سلسیوس بود. دمای هوای محفظه تحت خلأ نیز توسط دو حسگر دما که بر روی سقف و دیواره داخلی محفظه نصب شده بود، اندازه‌گیری شد. میزان ولتاژ لامپ با استفاده از یک دیمر در تمام آزمایش‌ها قابل تنظیم بود. در این حالت میزان شدت جریان نیز به تبع تغییر ولتاژ متغیر می‌باشد. مقدار توان مصرفی لامپ مادون قرمز جهت انجام فرآیند خشک کردن در سه سطح شدت تابش اشعه مادون قرمز ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ وات بر سانتی‌متر مربع مورد بررسی قرار گرفت. شرایط خلأ درون محفظه توسط شیر تنظیم خلأ کنترل شد و میزان خلأ مرتباً توسط

$$\Delta B = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100 \quad (4)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta R + \Delta G + \Delta B}{3} \quad (5)$$

در این روابط R_1 ، G_1 و B_1 به ترتیب میزان رنگ قرمز، سبز و آبی قبل از خشک شدن نمونه و R_2 ، G_2 و B_2 به ترتیب نشان‌دهنده میزان رنگ قرمز، سبز و آبی بعد از خشک شدن نمونه، ΔR ، ΔG ، ΔB به ترتیب بیانگر درصد تغییرات رنگ قرمز، سبز، آبی و ΔL سطح خاکستری می‌باشد که به‌عنوان میانگینی از تغییرات RGB در نظر گرفته شده است.

ارزیابی انرژی ویژه مورد نیاز طی فرآیند خشک کردن:

میزان انرژی مخصوص برابر است با میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم سیب‌زمینی که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد (Motevali et al., 2011):

$$E_s = \frac{E_t}{W_n} \quad (6)$$

E_s : انرژی ویژه مورد نیاز محصول (kWhkg^{-1}); W_0 : میزان آب از دست رفته محصول طی فرآیند خشک شدن (kg); E_t : کل انرژی مصرفی خشک‌کن (kWh). کل انرژی مصرفی خشک‌کن از روابط زیر قابل محاسبه بود:

$$E_1 = \int_{t=1}^{t^f} V \cdot I \cdot \Delta t \cdot \cos\phi \quad (7)$$

$$E_2 = \int_{t=1}^{t^f} V \cdot I \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$E_t = E_1 + E_2 \quad (9)$$

در این روابط E_1 : انرژی مصرفی پمپ خلأ (kWh)، V : ولتاژ پمپ خلأ (v)، I : شدت جریان الکتریکی پمپ خلأ (A)، ϕ : ضریب توان الکتروموتور (یک مقدار ثابت)، Δt : تغییرات زمانی و T : زمان کل فرآیند خشک شدن (h). E_2 : انرژی مصرفی لامپ مادون قرمز (kWh)، V : ولتاژ لامپ مادون قرمز (v)، I : شدت جریان الکتریکی لامپ مادون قرمز (A)، Δt : تغییرات زمانی و T : زمان کل فرآیند خشک شدن (h) (Motevali et al., 2011).

ارزیابی بازده مصرف انرژی: بازده مصرف انرژی (TUE) به

صورت نسبت گرمای نهان تبخیر^۳ آب موجود در محصول به مقدار انرژی که برای تبخیر رطوبت از آب آزاد نیاز است تعریف شده است و از رابطه (۱۰) محاسبه گردید (UmeshHebber et al., 2004; Singh, 1994). در این رابطه رطوبت اولیه نمونه (M_i) به‌طور متوسط ۷۷/۱۱٪ بر پایه تر و رطوبت نهایی (M_0) ۶٪ بر پایه تر در نظر گرفته شد. بیش از ۷۷٪ سیب‌زمینی را آب تشکیل می‌دهد، به همین دلیل از گرمای نهان تبخیر آب که معادل با ۲۲۵۷ کیلوژول بر کیلوگرم است در رابطه (۱۰) استفاده شده است (Darvishi, 2012).

$$T.U.E = \frac{L \cdot A_d \cdot I_2 \cdot (M_i - M_0)}{3600 E_t (100 - M_0)} \times 100 \quad (10)$$

طی خشک شدن وزن کل ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و ثبت گردید.

محاسبه ظرفیت باز جذب آب: برای بررسی توانایی جذب

آب نمونه‌ها، از روش غوطه‌ورسازی در آب مقطر^۱ استفاده شد. پس از طی فرآیند خشک کردن، زمانی که رطوبت محصول به رطوبت نهایی رسید، به منظور بررسی میزان جذب آب مجدد، ۵ گرم از نمونه‌های خشک شده در ۲۰۰cc آب مقطر غوطه‌ور شدند. دمای آب مورد استفاده برای جذب آب مجدد نمونه‌ها با توجه به تأثیری که بر بافت ماده دارد، می‌تواند هم در سرعت و هم در میزان جذب آب تأثیرگذار باشد (Garcia et al., 2005). به این منظور از دمای جوش آب (۱۰۰ درجه سلسیوس) به مدت ۳ دقیقه استفاده شد. بعد از سپری کردن مدت زمان تعیین شده جهت جذب آب، نمونه‌ها از آب مقطر خارج و روی کاغذ صافی پهن شدند تا آب سطحی آن‌ها خارج شود سپس نمونه‌ها توزین و در نهایت نسبت باز جذب آب نمونه‌ها توسط رابطه (۱) تعیین گردید (Reyes et al., 2007):

$$R_r = \frac{M_t - M_f}{M_i - M_f} \quad (1)$$

R_r : ظرفیت باز جذب آب (بدون بعد)، M_i : محتوای رطوبتی اولیه نمونه بر پایه تر (%), M_f : محتوای رطوبتی کاهش یافته بر پایه تر (%), M_t : نسبت وزنی نمونه قبل و بعد از جذب آب مجدد (بدون بعد) محاسبه تغییرات رنگ: اندازه‌گیری رنگ در این پژوهش با

بررسی پیکسل‌های عکس دیجیتالی سطح محصول خشک شده و مرطوب انجام شد که از طریق شدت رنگ، توزیع و میانگین آن به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری رنگ، ابتدا نمونه خشک شده در زیر دستگاه ساخته شده برای عکس‌برداری قرار گرفت و سپس با وضوح تصویر 3648×2736 پیکسل و رزولوشن ۹۶ dpi تصویربرداری شدند. سپس از سه تکرار انجام شده یک نمونه به‌طور تصادفی جهت آنالیز رنگ با استفاده از نرم‌افزار متلب^۲ انتخاب گردید. جهت تحلیل رنگ نمونه‌های خشک شده از مدل رنگی RGB استفاده شد که شامل سه طیف رنگی قرمز (Red)، سبز (Green) و آبی (Blue) با دامنه‌ی شدت نور ۰-۲۵۵ (به این صورت که به ازای رنگ سیاه مقدار صفر و به ازای رنگ سفید مقدار ۲۵۵ در پیکسل ذخیره می‌گردد) می‌باشد. زمینه مورد استفاده جهت عکس‌برداری از ورقه‌های خشک شده سیب‌زمینی به رنگ سفید انتخاب گردید. در نهایت با استفاده از روابط ذیل مقادیر شاخص رنگ و ΔL به‌عنوان سطح خاکستری محاسبه شدند (Fealehkari et al., 2012).

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100 \quad (3)$$

3-Thermal utilization efficiency
4-Vaporization latent heat

1-Distilled water
2-Matlab R2014a v8.3

نموده و پیش از آن که به بافت محصول صدمه‌ای وارد نماید به حداکثر میزان جذب آب می‌رسد.

مطابق با شکل ۳ با افزایش زمان خشک شدن که ناشی از افزایش ضخامت ورقه بوده است تغییرات سطوح خاکستری مربوط به رنگ ورقه‌های سیب‌زمینی افزایش یافته است که دلیل این امر را می‌توان کاهش سرعت تبخیر رطوبت از ورقه ضخیم‌تر ذکر نمود. بیشترین درصد تغییرات شاخص سطح خاکستری (ΔL) مربوط به ضخامت ورقه سه میلی‌متر بوده، زمانی که جهت انجام پروسه خشک شدن از شدت تابش لامپ مادون قرمز ۰/۲ وات بر سانتی‌متر مربع در فشار مطلق ۷۶۰ میلی‌متر جیوه استفاده شده است. کمترین درصد تغییرات رنگ براساس شاخص سطح خاکستری در ضخامت یک میلی‌متر با شدت تابش ۰/۴ وات بر سانتی‌متر مربع و میزان فشار ۸۰ میلی‌متر جیوه مشاهده شده که بیانگر پایدار بودن رنگ ورقه سیب‌زمینی قبل و بعد از خشک شدن است.

شکل‌های ۴ و ۵ میزان فراوانی سه رنگ قرمز، سبز و آبی را در شدت نور ۲۵۵-۰ مربوط به تصویر سیب‌زمینی مرطوب و خشک نشان می‌دهد. براساس بافت‌نگارهای نشان داده شده در دو تصویر زیر می‌توان تعداد پیکسل‌هایی که حاوی رنگ مربوطه هستند را به دست آورد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بالاترین میانگین توزیع رنگ در سیب‌زمینی قبل و بعد از فرآیند خشک شدن، رنگ سبز (G) بوده که بیشترین تعداد پیکسل را به خود اختصاص داده است.

L: تراکم جرمی لایه نازک محصول (kgm^{-2})، A_d : سطح کل محصول (m^2)، I_d : گرمای نهان تبخیر (kJkg^{-1})، M_i : میزان رطوبت اولیه محصول بر پایه تر (%) و M_o : میزان رطوبت نهایی محصول بر پایه تر (%). E_t : کل انرژی مصرفی خشک‌کن (kWh).

طرح آزمایشات: برای انجام محاسبات آماری، از آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. تحلیل آماری نتایج به کمک نرم‌افزارهای SPSS16 و MSTATC انجام گردید سپس اختلاف بین میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها در رابطه با ظرفیت باز جذب آب نشان داد که در دمای آب ۱۰۰ درجه سلسیوس ضخامت ورقه اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر ظرفیت باز جذب آب ورقه خشک شده سیب‌زمینی داشته است.

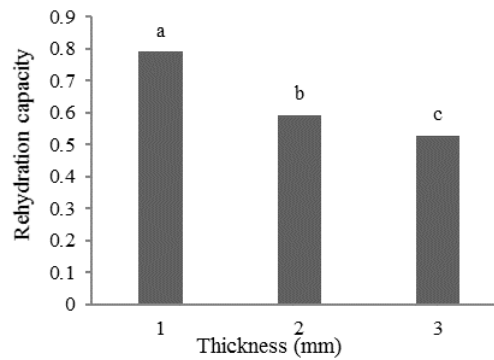
با توجه به شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که ورقه سیب‌زمینی خشک شده به ضخامت اولیه یک میلی‌متر در دمای جوش آب توانسته است به میزان ۸۰٪ رطوبت ورقه تازه را به دست آورد. از شکل مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت ورقه سیب‌زمینی ظرفیت باز جذب آب افزایش یافته است. از این رو می‌توان بیان داشت که به علت متخلخل بودن بافت سیب‌زمینی، محصول خشک به محض قرار گرفتن در آب جوش، با سرعت بالایی آب را جذب

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر ضخامت ورقه، فشار مطلق و شدت تابش لامپ مادون قرمز بر ظرفیت باز جذب آب ورقه‌های سیب زمینی

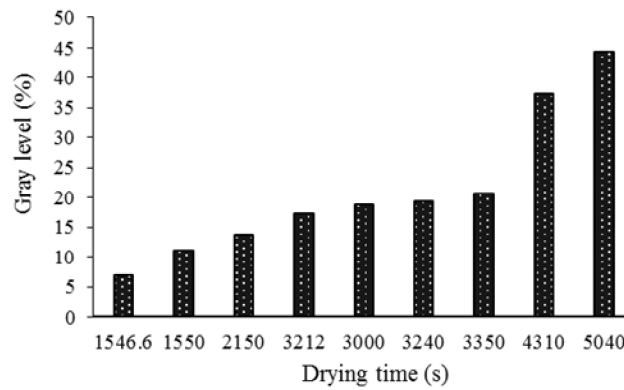
Table 1- ANOVA Results in evaluation the effect of slice thickness, absolute pressure and the radiation intensity on the rehydration capacity of potato slices

منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean square	مقدار F
ضخامت ورقه Slice thickness	0.152	2	0.076	3.725**
فشار مطلق Absolute pressure	0.002	3	0.001	0.305 ^{ns}
شدت تابش Radiation intensity	0.009	2	0.004	0.213 ^{ns}
ضخامت×فشار مطلق Thickness× Absolute pressure	0.051	6	0.008	0.414 ^{ns}
ضخامت×شدت تابش Thickness× Radiation intensity	0.034	4	0.008	0.414 ^{ns}
فشار مطلق×شدت تابش Absolute pressure× Radiation intensity	0.039	6	0.007	0.319 ^{ns}
ضخامت×فشار مطلق×شدت تابش Thickness× Absolute pressure× Radiation intensity	0.104	12	0.009	0.424 ^{ns}
اشتباه Error	1.468	72	0.20	
کل Total	1.858	107		

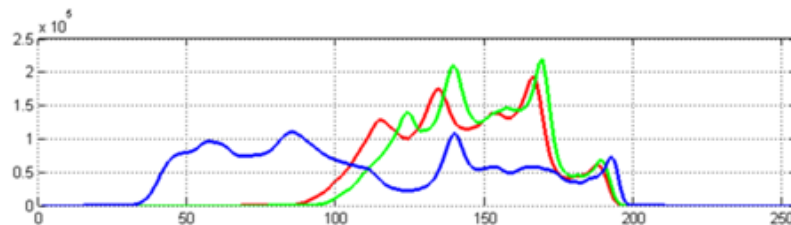
** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار
** Significant at the 1% level and ns No significant differences



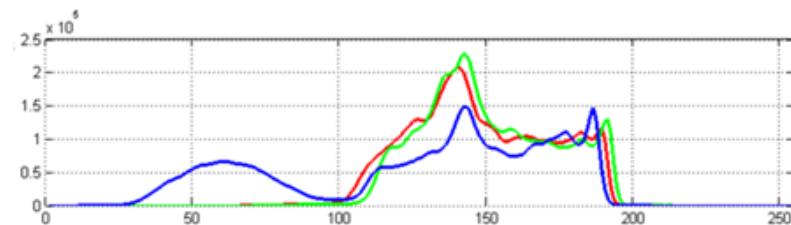
شکل ۲- اثر ضخامت ورقه بر ظرفیت باز جذب آب در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس
 Fig.2. The effect of slice thickness on the rehydration capacity at temperature of 100°C



شکل ۳- تغییرات رنگ ورقه سیب‌زمینی بر حسب زمان خشک کردن
 Fig.3. Color distribution of potato slice vs. drying time



شکل ۴- بافت‌نگار تغییرات رنگ ورقه سیب‌زمینی قبل از خشک کردن
 Fig.4. Histograms of color distribution of potato slice before drying



شکل ۵- بافت‌نگار تغییرات رنگ ورقه سیب‌زمینی بعد از خشک کردن
 Fig.5. Histograms of color distribution of potato slice after drying

سطح ۵٪ اثر معنی‌داری بر بازده حرارتی داشته است. مقدار بازده مصرف انرژی برای خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی از ۲/۱۳٪ تا ۳۱/۰۱٪ متغیر می‌باشد. مطابق با شکل ۷ میانگین بیشترین و کمترین بازده مصرف انرژی بدون در نظر گرفتن فشار مطلق ۷۶۰ میلی‌متر جیوه (در شرایط اتمسفری) به ترتیب مربوط به شدت تابش‌های ۰/۲ و ۰/۳ وات بر سانتی‌متر مربع در فشار مطلق ۸۰ میلی‌متر جیوه می‌باشد. در نهایت مشاهده شد که بدون در نظر گرفتن شرایط اتمسفری (زمانی که تنها از گرمای لامپ مادون قرمز جهت خشک کردن سیب‌زمینی استفاده شده است) با افزایش شدت تابش لامپ مادون قرمز و کاهش فشار مطلق (اعمال خلأ) درون محفظه خشک‌کن سرعت خروج رطوبت از ورقه سیب‌زمینی افزایش یافته و به همین سبب زمان خشک شدن محصول کوتاه‌تر و در نتیجه‌ی آن انرژی ویژه مصرف شده برای فرآیند خشک کردن، کاهش یافته است و به تبع آن بازده حرارتی افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان اظهار داشت که بازده مصرف انرژی در خشک‌کن مادون قرمز - خلأ به میزان کارکرد منابع انرژی بر (لامپ مادون قرمز و پمپ خلأ) بستگی دارد.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری بین داده‌ها در رابطه با برآورد انرژی مخصوص خشک کردن در جدول ۲ نشان داد که میزان فشار مطلق، توان لامپ مادون قرمز و اثر متقابل آن دو به ترتیب در سطوح ۵٪، ۱٪ و ۵٪ بر مقدار انرژی مخصوص خشک کردن معنی‌دار شده‌اند.

مطابق با شکل ۶ مشاهده می‌شود که کمترین میزان انرژی ویژه خشک کردن مربوط به شدت تابش ۰/۳ وات بر سانتی‌متر مربع و فشار ۲۰ میلی‌متر جیوه در ضخامت ۲ میلی‌متر است و بیشترین میزان آن مربوط به شدت تابش ۰/۲ وات بر سانتی‌متر مربع در فشار مطلق ۷۶۰ میلی‌متر جیوه و ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. به این صورت که در کل فرآیند خشک کردن با افزایش شدت تابش لامپ مادون قرمز و کاهش فشار مطلق (اعمال خلأ)، میزان انرژی مصرف شده به ازای تولید یک کیلوگرم از محصول مورد نظر کاهش یافته است.

با توجه به جدول ۳ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در مورد ارزیابی بازده مصرف انرژی نشان داد که میزان فشار مطلق در سطح ۱٪ بیشترین اثر را بر بازده مصرف انرژی داشته است همچنین اثر متقابل فشار مطلق و توان لامپ مادون قرمز نیز در

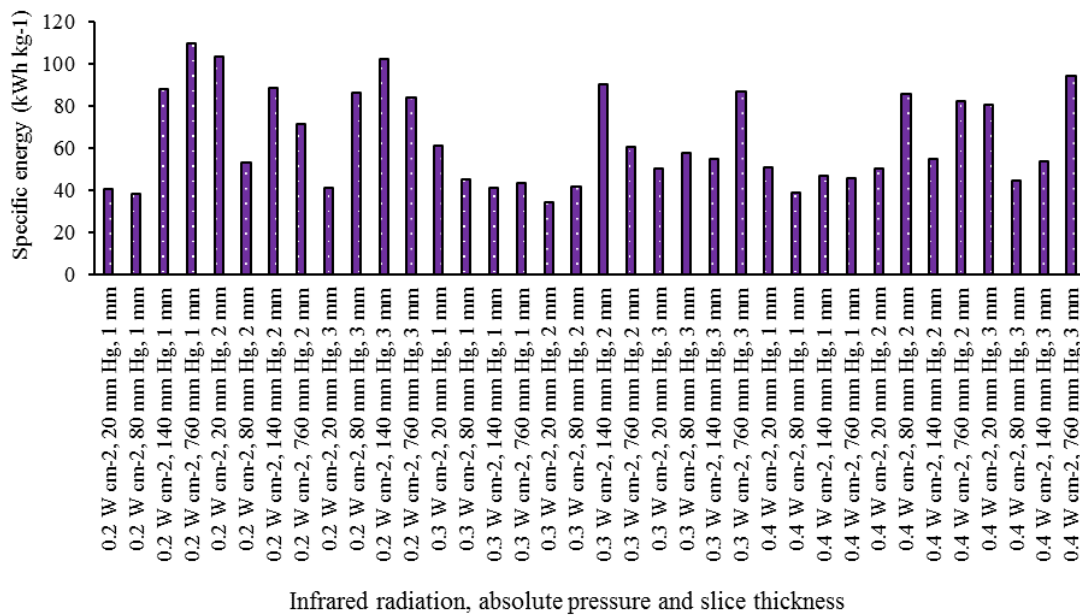
جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر ضخامت ورقه، فشار مطلق و شدت تابش مادون قرمز بر میزان انرژی ویژه مصرفی خشک کردن

Table 2- ANOVA Results in evaluation the effect of slice thickness, absolute pressure and infrared radiation intensity on the amount of specific energy in drying process

منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean square	مقدار F
ضخامت ورقه Slice thickness	12010.012	2	6005.006	1.099 ^{ns}
فشار مطلق Absolute pressure	32501.206	3	10833.735	1.982 [*]
شدت تابش Radiation intensity	71015.843	2	35507.922	6.496 ^{**}
ضخامت×فشار مطلق Thickness× Absolute pressure	7084.656	6	1180.776	0.216 ^{ns}
ضخامت×شدت تابش Thickness× Radiation intensity	8863.932	4	2215.983	0.405 ^{ns}
فشار مطلق×شدت تابش Absolute pressure× Radiation intensity	65196.766	6	10866.128	1.988 [*]
ضخامت×فشار مطلق×شدت تابش Thickness× Absolute pressure× Radiation intensity	73200.395	12	6100.033	1.116 ^{ns}
اشتباه Error	393568.309	72	5466.227	
کل Total	663441.120	107		

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

*Significant at 5%, **Significant at the 1% level and ns No significant differences

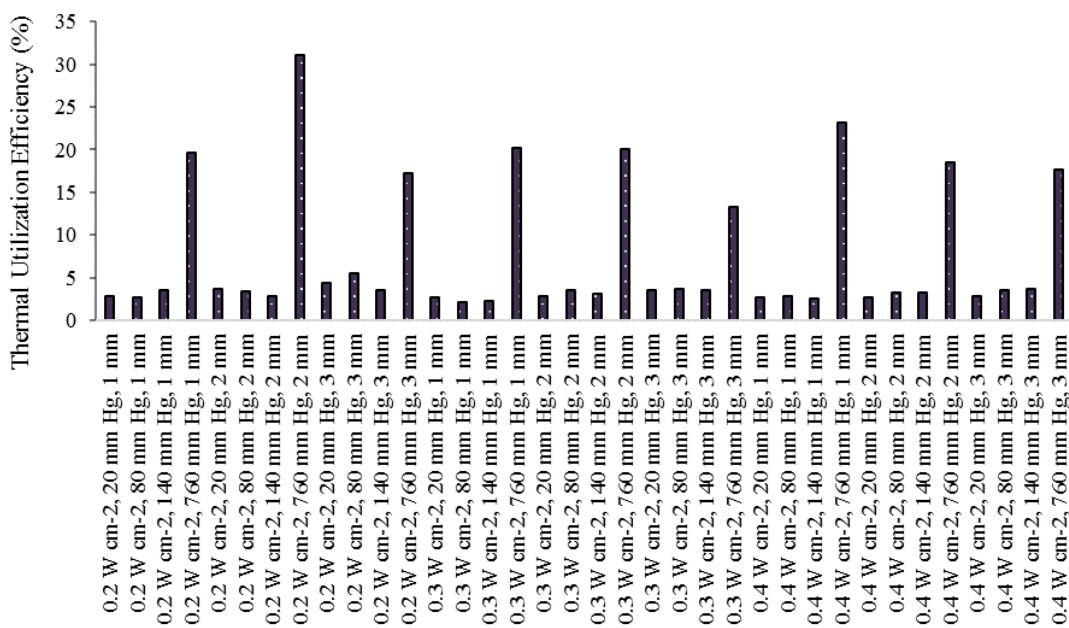


شکل ۶- اثر ضخامت ورقه، فشار مطلق و شدت تابش مادون قرمز بر انرژی ویژه مصرفی طی فرآیند خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی
 Fig. 6. The interaction between slice thickness, absolute pressure and infrared radiation intensity on the specific energy of potato slices during drying process

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر ضخامت ورقه، فشار مطلق و شدت تابش مادون قرمز بر میزان بازده مصرف انرژی
 Table 3- ANOVA results in evaluation the effect of slice thickness, absolute pressure and infrared-radiation intensity on the thermal utilization efficiency in drying process

منبع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean square	مقدار F
ضخامت ورقه Slice thickness	6.911	2	3.456	1.400 ^{ns}
فشار مطلق Absolute pressure	976.329	3	325.443	131.880 ^{**}
شدت تابش Radiation intensity	8.238	2	4.119	1.669 ^{ns}
ضخامت×فشار مطلق Thickness× Absolute pressure	9.908	6	1.651	0.669 ^{ns}
ضخامت×شدت تابش Thickness× Radiation intensity	7.354	4	1.838	0.745 ^{ns}
فشار مطلق×شدت تابش Absolute pressure× Radiation intensity	43.617	6	7.269	2.946 [*]
ضخامت×فشار مطلق×شدت تابش Thickness× Absolute pressure× Radiation intensity	25.171	12	2.098	0.850 ^{ns}
اشتباه Error	177.677	72	2.468	
کل Total	1255.205	107		

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار
 *Significant at 5%, **Significant at the 1% level and ns No significant differences



Infrared radiation, absolute pressure and slice thickness

شکل ۷- اثر ضخامت ورقه، فشار مطلق و شدت تابش مادون قرمز بر میانگین بازده مصرف انرژی طی فرآیند خشک کردن

Fig. 7. The interaction between slice thickness, absolute pressure and infrared radiation intensity on the mean thermal utilization efficiency of potato slices during drying process

رنگ قبل و بعد از فرآیند خشک شدن مربوط به نازک‌ترین ضخامت ورقه سیب‌زمینی می‌باشد. نتایج حاصل از مقایسه انرژی مصرفی فرآیند خشک کردن نشان داد که کوتاه‌ترین زمان خشک شدن در بهترین شرایط آزمایشی (شدت تابش ۰/۴ وات بر سانتی‌متر مربع، فشار مطلق ۸۰ میلی‌متر جیوه و ضخامت ورقه یک میلی‌متر) به مدت ۲۶ دقیقه به طول انجامید.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که ورقه خشک شده سیب‌زمینی با ضخامت یک میلی‌متر در دمای جوش آب به مدت سه دقیقه، بیشترین ظرفیت باز جذب آب را داشته است به طوری که توانست به مقدار ۸۶٪ رطوبت ورقه تازه را کسب کند. در ورقه‌های ضخیم‌تر به علت ایجاد یک لایه سطحی بر روی آن‌ها زمان خشک شدن طولانی‌تر، آهنگ خشک شدن نزولی می‌شود. کمترین میزان تغییر

References

1. AOAC. 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. No. 934-06
2. Bhandri, B., and T. Howes. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering* 40: 71-79.
3. Darvishi, H. 2012. Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14 (1): 94-101.
4. Fealehkari, M., R. AmiriChayjan, and J. AmiriParian. 2012. Study of the physical properties (color and shrinkage) of shallot using convective-infrared drying method. 7th National Conference on Agriculture Machinery Engineering and Mechanization, Shiraz.
5. FAO. 2013. Statistical Yearbook 2013 World food and agriculture. <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>
6. Francis, F. J. 2000. *Encyclopedia of Food Science and Technology*. John Wiley & Sons Inc.
7. Garcia, P., N. Sanjuan, J. Bon, J. Carreres, and A. Mulet. 2005. Rehydration process of *Boletus edulis*

- mushroom: characteristics and modeling. Journal of the Science of Food and Agriculture 85: 1397-1404.
8. Hoffman, B. 2004. Cancer Threat for Snackers. <http://www.freerepublic.com/focus/news/673300/posts/>
 9. Kantrong, H., A. Tansakul, and G. S. Mittal. 2012. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. Journal Food Scientists and Technologists.
 10. Lee, J. H., and H. J. Kim. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanussativus L.*) slices. LWT – Food Science and Technology 42: 180-186.
 11. Lee, K. T., M. Farid, and S. K. Nguang. 2006. The mathematical modeling of the rehydration characteristics of fruit. Journal of Food Engineering 72 (1): 16-23.
 12. Leeratanarak, N., S. Devahastin, and N. Chiewchan. 2006. Drying Kinetics and Quality of Potato Chips Undergoing Different Drying Techniques. Journal of Food Engineering 77: 635-43
 13. Li, Z., G. S. V. Raghavan, N. Wang, and C. Vigneault. 2011. Drying rate control in the middle stage of microwave drying. Journal of Food Engineering 104: 234-238.
 14. Lin, Y. P., T. Y. Lee, J. H. Tsen, and V. A. King. 2006. Dehydration of yam slices using FIR-assisted freeze drying. Journal of Food Engineering 79: 1295-1301.
 15. Motevali, A., S. Minaei, M. H. Khoshtaghaza, and H. Amirnejat. 2011. Comparison of energy consumption and Specific Energy Requirements of Different methods for drying mushroom slices. Energy 36: 6433-6441.
 16. Prachayawarakorn, S., P. Prachayawasin, and S. Soponronnarit. 2004. Effective diffusivity and kinetics of urease inactivation and color change during processing of soybeans with superheated-steam fluidized bed. Drying Technology 22 (9): 2095-2118.
 17. Reyes, A., S. Ceron, R. Zuniga, and P. Moyano. 2007. A comparative study of microwave-assisted air drying of potato slices. Biosystems Engineering 98: 310-318.
 18. Singh, K. K. 1994. Development of a small capacity dryer for vegetables. Journal of Food Engineering 21: 19-30.
 19. Sharma, G. P., R. C. Verma, and P. B. Pathare. 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering 67: 361-366.
 20. Strumillo, C., and T. Kudra. 1986. drying principles, application and design. Routledge. pp 448.
 21. UmeshHebbar, H., K. H. Vishwanathan, and M. N. Ramesh. 2004. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. Journal Food Engineering 65 (4): 557-563.

The study of some physical properties and energy aspects of potatoes drying process by the infrared-vacuum method

N. Hafezi¹- M. J. Sheikhdavoodi^{2*}- S. M. Sajadiye³- M. E. Khorasani Ferdavani³

Received: 20-12-2014

Accepted: 27-05-2015

Introduction

Potato (*Solanumtuberosum* L.) is one of the unique and most potential crops having high productivity, supplementing major food requirement in the world. Drying is generally carried out for two main reasons, one to reduce the water activity which eventually increases the shelf life of food and second to reduce the weight and bulk of food for cheaper transport and storage. The quality evaluation of the dried product was carried out on the basis of response variables such as rehydration ratio, shrinkage percentage, color and the overall acceptability. Drying is the most energy intensive process in food industry. Therefore, new drying techniques and dryers must be designed and studied to minimize the energy cost in drying process. Considering the fact that the highest energy consumption in agriculture is associated with drying operations, different drying methods can be evaluated to determine and compare the energy requirements for drying a particular product. Thermal drying operations are found in almost all industrial sectors and are known, according to various estimates, to consume 10-25% of the national industrial energy in the developed world. Infrared radiation drying has the unique characteristics of energy transfer mechanism. Kantrong *et al.* (2012) were studied the drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum combined with infrared drying. Motevali *et al.* (2011) were evaluated energy consumption for drying of mushroom slices using various drying methods including hot air, microwave, vacuum, infrared, microwave-vacuum and hot air-infrared. The objectives of this research were to experimental study of drying kinetics considering quality characteristics including the rehydration and color distribution of potato slices in a vacuum- infrared dryer and also assessment of specific energy consumption and thermal utilization efficiency of potato slices during drying process.

Materials and Methods

A laboratory scale vacuum-infrared dryer, developed at the Agricultural Machinery and Mechanization Engineering Laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz has been used. The dryer consists of a stainless steel drying chamber; a laboratory type piston vacuum pump, which was used to maintain vacuum in the drying chamber; an infrared lamp with power of 250 W which was used to supply thermal radiation to a drying product; and a control system for the infrared radiator.

Sample Preparation

Fresh potatoes were purchased from a local market in Hamadan province. Potatoes were peeled, washed, and cut into sliced with thickness of 1, 2 and 3 mm by a manual slicer. Drying experiments of potato slices were performed in a vacuum chamber with absolute pressure levels of 20, 80, 140 and 760 mmHg; and radiation intensity of infrared lamp was 0.2, 0.3 and 0.4 W cm⁻². The mass change of the sample during drying was detected continuously using an electronic weight scale (Lutron, GM- 1500P, Taiwan) with the accuracy of ±0.05 g.

Evaluation of rehydration capacity of dried potato slices

The rehydration tests measured the gain in weight of dehydrated samples (~5 g), dehydrated samples were rehydrated in 200 cc of distilled water at 100°C for 3 minutes.

Evaluation of color

The color of potatoes was measured on five slices selected randomly, and was described by three coordinates

1- MSc student, Department of Mechanics of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery and Mechanization, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: mj.davoodi@scu.ac.ir)

in the RGB color space using computer vision.

Evaluation of specific energy consumption

Energy consumption of drying process came from the electrical energy consumed by the operation of the vacuum pump and the infrared lamp. Specific energy consumption was defined as the energy required for removing a unit mass of water in drying the potato slice.

Evaluation of thermal utilization efficiency

Thermal utilization efficiency is defined as the latent heat of vaporization of moisture of sample to the amount of energy required to evaporate moisture from free water. The latent heat of vaporization of water at the evaporating temperature of 100 °C was taken as 2257 kJkg⁻¹.

Results and Discussion

The results of the evaluation of rehydration capacity of potato slices during drying process are shown in Table 1. Statistical analysis (ANOVA, post-hoc Duncan) showed that thickness at probability level of 1% had statistically significant influence on rehydration capacity values of dried potato slices. Moisture of dried slice of potato compared to its fresh was obtained nearly 80% in boiling water (at temperature 100 °C) for 3 min. The most color changes of slice after drying was related to green color. According to Table 2 and statistical analysis results showed that factor of thickness was not statistically significant on specific energy. The effect of absolute pressure ($p < 0.05$) and radiation intensity ($p < 0.01$) parameters also interaction of absolute pressure and radiation intensity ($p < 0.05$) had statistically significant influence on specific energy of dried potato slices. According to Table 3 and statistical analysis the factor of absolute pressure had statistically significant at probability level of 5% on thermal utilization efficiency. Also the effect of interaction of absolute pressure and radiation intensity had statistically significant at probability level of 5% on thermal utilization efficiency of dried potato slices. The drying efficiency of potato slices varied between 2.13% to 31.01%.

Conclusions

Dried potato slices at a thickness of 1 mm put in boiling water for three minutes; showed the most amount of water absorption ratio that it was able to absorb the value of 86% more than the initial moisture. The lowest rate of color change before and after the drying process is related to the thickness of the thinnest sliced potatoes. Comparison of energy consumption showed that the radiation intensity of 0.4 W cm⁻², absolute pressure level of 80 mmHg and slice thickness of 1 mm had shorter drying time in experimental conditions.

Keywords: Drying, Infrared-vacuum, Potato, Rehydration capacity, Specific energy consumption