

بررسی اثر پرتو دهی گاما روی چروکیدگی سطحی و جذب مجدد آب طی خشک کردن قارچ دکمه‌ای

احسان فرتاش نعیمی^۱، محمد هادی خوش تقاضا^{۲*}، سلیمان عباسی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۸/۰۱)

چکیده

کیفیت نهایی محصول خشک شده به عنوان یکی از شاخص‌های مهم در فرآیند خشک کردن باید مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، تأثیر دز پرتو دهی گاما (۰، ۱/۲، ۲/۴ و ۳/۶ کیلوگری)، دمای خشک کردن (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و ضخامت برش قارچ‌ها (۳ و ۵ میلی‌متر) روی میزان چروکیدگی سطحی و جذب مجدد آب مورد بررسی قرار گرفت. خشک کردن توسط خشک‌کن لایه نازک بر مبنای سامانه ماشین بینایی اعمال گردید. نتایج نشان داد اثر ساده و متقابل فاکتورها روی میزان چروکیدگی سطحی و جذب مجدد آب در اکثر موارد معنی‌دار بود ($P < 0.01$). با افزایش دز پرتو دهی، چروکیدگی به میزان جزئی افزایش یافت و میزان باز جذب آب در نمونه‌های خشک شده نیز با افزایش همراه بود. همچنین، بیشترین میزان باز جذب آب برابر 3.43 g/g مربوط به دز ۳/۶ کیلوگری و دمای خشک کردن ۶۰ درجه سلسیوس و در ضخامت ۳ میلی‌متر بود. در نهایت، با افزایش دما و کاهش ضخامت برش نمونه‌ها، میزان چروکیدگی قارچ نیز افزایش یافت؛ به طوری که کمترین و بیشترین مقدار شاخص چروکیدگی سطحی به ترتیب ۰/۶۶۷ و ۰/۶۶۷ بود.

کلید واژگان: پرتو دهی گاما، خشک کردن، قارچ خوراکی، چروکیدگی سطحی، جذب مجدد آب.

*مسئول مکاتبات: khoshtag@modares.ac.ir

۱- مقدمه

قارچ خوراکی دکمه‌ای^۱ از جمله فراآورده‌های کشاورزی می‌باشد که کیفیت آن به دلیل دارا بودن مواد مغذی و حساسیت بافت، به سرعت تحت تأثیر عوامل مختلف قرار گرفته و فاسد می‌شود. خشک کردن یکی از مهم‌ترین روش‌های نگهداری محصولاتی است که رطوبت آن‌ها بالای ۹۰ درصد می‌باشد، که قارچ خوراکی هم جزو این دسته به شمار می‌رود [۱]. لازم به ذکر است که امروزه طولانی بودن زمان خشک کردن، کاهش بهره‌وری، کاهش کیفیت مواد غذایی خشک شده و بالا بودن انرژی مصرفیه موانعبرگی برای توسعه و کاربرد خشک‌کن‌ها تبدیل شده‌اند [۲]. یکی از مهمترین تغییرات فیزیکی که طی فرآیند خشک کردن مواد غذایی ایجاد می‌شود، کاهش حجم آن است. از دست دادن رطوبت و گرم شدن ماده باعث ایجاد تنش در ساختار سلولی مواد غذایی می‌گردد که نتیجه‌ی این حالت، تغییر شکل و کاهش ابعاد آن است. اگر چروکیدگی از قسمت‌های داخلی و خارجی ماده کنترل شود، در آن صورت تنش‌های سلولی و در نتیجه ترک خوردگی کاهش می‌یابد [۳]. امروزه یکی از تکنیک‌های نوین برای اندازه‌گیری میزان چروکیدگی در حین خشک شدن، استفاده از روش ماشین بینایی می‌باشد [۴].

راه حل‌های مختلفی برای کاهش تلفات و کیفیت قارچ خوراکی در فرآیند خشک کردن پیشنهاد شده است که همه‌ی آن‌ها بر استفاده از خشک‌کن مناسب، پیش‌تیمار قارچ قبل از خشک کردن و اینکه محصول نباید در گستره‌ی رطوبت بحرانی در برابر گرمای غیرضروری باشد، تاکید دارند [۵، ۶].

همچنین، جذب مجدد آب یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تعیین کیفیت محصولات خشک شده می‌باشد [۷]. مواد غذایی که تحت شرایط بهینه خشک می‌شوند، صدمه‌ی کمتری متحمل شده و سریع‌تر و کامل‌تر جذب آب می‌کنند [۸]. اگر جذب آب سریع و کامل انجام شود، در این صورت ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی محصول حفظ شده و کیفیت آن از لحاظ طعم، بافت و رنگ ثابت باقی می‌ماند [۹].

در سال‌های اخیر، استفاده از تکنیک پرتودهی برای مواد غذایی خشک شده رواج یافته است که علت این امر بهبود ایمنی و افزایش انبارمانی مواد غذایی می‌باشد. با این حال، تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از پرتودهی قبل از خشک کردن مواد غذایی به

منظور کاهش زمان خشک شدن در حالی که کیفیت محصول از نظر چروکیدگی، رنگ و بافت ثابت باقی بماند، محدود بوده است. در این ارتباط، استفاده از ترکیب حرارت متوسط، دز پایین پرتو و بسته‌بندی مناسب برای محصولاتی که ممکن است به دز بالای پرتو حساسیت نشان بدهند، با موفقیت بکار برده شده است [۱۰]. در تحقیقی، قارچ صدفی ورقه شده توسط پرتو گاما در دزهای ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ کیلوگری پیش‌تیمار و در دمای $53/2 \pm 6/4^{\circ}\text{C}$ خشک گردید. داده‌های تجربی به دست آمده توسط ۵ مدل که برای خشک کردن لایه نازک تعریف شده بودند، مدل‌سازی شدند. مدل پیچ و مدل انتشار به ترتیب ویژگی‌های خشک کردن در دزهای پایین و بالا را بهتر از مدل‌های دیگر تخمین زدند. همچنین، پرتودهی باعث افزایش نرخ خشک شدن قارچ و درصد جذب مجدد آب گردید [۱۱]. افزایش راندمان آب‌گیری از سبزی‌ها، انگور و آلو [۱۲] و بررسی ویژگی‌های خشک‌کردن محصول برنج [۱۳] و گندم [۱۴] بخشی از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ترکیب پرتودهی و خشک‌کردن محصولات کشاورزی می‌باشند. یداللهی‌نیا و جهانگیری (۲۰۰۹) از سامانه ماشین بینایی و تکنیک پردازش تصویر برای بررسی چروکیدگی لایه‌های سیب زمینی طی فرآیند خشک شدن استفاده کردند. آن‌ها در سامانه خود تنها تصویر سطح محصول را دریافت می‌کردند؛ بنابراین، مبنای چروکیدگی را تغییرات سطح، محیط، میزان کشیدگی و میزان گردی نمونه‌ها قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که با کاهش محتوای رطوبتی محصول، میزان کشیدگی آن افزایش و میزان گردی کاهش می‌یابد. همچنین، دریافتند که میزان تغییرات سطح و محیط نسبت به حالت اولیه، رابطه خطی با نسبت محتوای رطوبتی محصول دارد [۱۵]. در دهه‌های گذشته تحقیقات گسترده‌ای به منظور کاهش زمان خشک کردن محصولات کشاورزی و انرژی مصرفی خشک‌کن‌ها صورت گرفته که اکثر آن‌ها روی تغییر در مشخصات فنی خشک‌کن‌ها تمرکز دارد. لذا استفاده از روشی کم هزینه و در عین حال کارآمد همچون پیش تیمار محصول قبل از خشک کردن لازم به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر، تأثیر پیش تیمار پرتودهی گاما روی چروکیدگی سطحی و جذب مجدد آبدر حین خشک شدن قارچ خوراکی با توجه به زمان خشک کردن آن مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Agaricus bisporus

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه و انجام آزمایش‌ها

قارچ خوراکی دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) از کارخانه‌ی قارچ ملارد (ملارد، کرج، ایران) خریداری شد. در این تحقیق، خشک کردن لایه نازک قارچ خوراکی تحت سه فاکتوردز پرتودهی (۰، ۱/۲، ۲/۴ و ۳/۶ کیلوگری)، دمای خشک کردن (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس) و ضخامت برش قارچ‌ها (۳ و ۵ میلی‌متر) انجام شد و اثرات این تیمارها بر روی میزان چروکیدگی سطحی در هر لحظه از خشک شدن و میزان جذب مجدد آب نمونه‌های خشک شده مورد ارزیابی قرار گرفت. پرتودهی محصول با سرعت ۱/۹۸ گری بر ثانیه و قدرت منبع ۸۳۰۲ کوری در دمای محیط و در سازمان انرژی اتمی تهران انجام شد. برای هر آزمایش، ۵۰ گرم قارچ تیمار شده با پرتو گاما استفاده شد و خشک کردن توسط یک خشک‌کن لایه نازک (از نوع هوای داغ) بر مبنای سامانه‌ی ماشین بینایی استفاده گردید (شکل ۱). جهت جریان هوا به صورت موازی با ورقه‌های قارچ بود. برای گرفتن عکس از یک دوربین ویدئویی مجهز به حسگر CCD مدل HPK-6301S ساخت شرکت Hi-Peak استفاده شد. در مطالعه‌ی حاضر، برای داشتن یک نورپردازی یکنواخت، از منبع نور LED نواری با مشخصات رنگ نور سفید و توان ۲۴ وات استفاده شد. همچنین، صفحه‌ای از جنس فایبرگلاس جلوی منبع نورپردازی قرار داده شد. دوربین و منبع نور به ترتیب در فاصله‌ی ۱۳ و ۱۵ سانتی‌متری از صفحه‌ی فایبرگلاس قرار داشتند. ابتدا تصویر بلاد رنگی که دوربین به رایانه می‌فرستد توسط نرم‌افزار MATLAB فراخوانده شد. سپس، در فاصله‌های زمانی مورد نظر یک تصویر توسط نرم افزار MATLAB 2015 گرفته و در فایل مورد نظر ذخیره گردید. برای محاسبه‌ی رطوبت اولیه قارچ، تعدادی از ورقه‌های توزین شده درون دستگاه آون (Memmert, D06836, Germany) در دمای ۱۰۳°C تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند [۱۶]. سپس، مقدار رطوبت اولیه با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد [۱۷].

(۱)

$$MC = m_1 - m_2 / m_2 \times 100$$

که در آن، MC میزان رطوبت نمونه بر پایه‌ی تر (درصد)، m_1 جرم اولیه نمونه (g)، m_2 جرم نهایی محصول پس از خشک شدن (g) می‌باشد.

در هنگام شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ها ۹۲/۵±۰/۳۹ درصد بر پایه تر بود و خشک کردن تا رسیدن به رطوبت تعادلی ادامه داشت. همچنین، سرعت هوای خشک‌کن ۱ m/s و رطوبت نسبی هوا ۲۶٪ بود. برای کنترل دور دمنده از یک اینورتر (ENC, 0.4 KW, China) استفاده شد که دارای ورودی تک فاز و خروجی سه فاز بود و از طریق مبدل D/A از رایانه فرمان می‌گرفت.

۲-۲- اندازه‌گیری تغییرات مساحت سطح

پردازش تصاویر دریافتی از دوربین در چهار مرحله انجام شد. در مرحله اول، تصویر توسط نرم افزار متلب فراخوانی شد و نویزهای ایجاد شده توسط اینورتر با استفاده از فیلتر medfilt2 حذف شدند. در مرحله دوم، تصویر فراخوانی شده از پس‌زمینه‌ی خود جدا گشت. در مرحله سوم، قالب تصویر به شکل دودویی تغییر یافت؛ بدین شکل که به پس زمینه‌ی تصویر عدد صفر (رنگ سیاه) و به تصویر اصلی (ورقه‌های قارچ) عدد یک (رنگ سفید) اختصاص داده شد (شکل ۲). در این مرحله، نویزهای موجود به دلیل لکه‌های باقیمانده از آزمایش قبل و نقطه‌های روشن ایجاد شده به دلیل بازتاب نور توسط سینی به وسیله‌ی فیلترهای imopen و imfill حذف گردید. در مرحله‌ی نهایی، مساحت سطح قارچ در لحظه‌ی مورد نظر با استفاده از دستور regionprops به صورت پیکسل به دست آمد [۱۸].

برای محاسبه‌ی چروکیدگی سطحی، از اندازه‌گیری مساحت سطح محصول در هر لحظه از خشک کردن استفاده شد. ابتدا تعداد پیکسل‌های با مقدار ۱ شمارش و سپس برای نرمال‌سازی، مقدار مساحت در هر گام زمانی بر مقدار اولیه‌ی آن تقسیم شد (رابطه‌ی ۲).

(۲)

$$S = A_t / A_0$$

که در آن، S شاخص چروکیدگی سطحی، A_t مساحت سطح محصول در لحظه‌ی مورد نظر (تعداد پیکسل) و A_0 مساحت اولیه‌ی محصول (تعداد پیکسل) می‌باشد.

برای مدل‌سازی شاخص چروکیدگی سطحی نسبت به محتوای رطوبتی، از مدل خطی طبق رابطه‌ی ۳ استفاده شد [۱۹].

(۳)

$$S = A_0 + B$$

که در آن، A و B ضرایب ثابت مدل و X نسبت رطوبت می‌باشد. برای محاسبه‌ی مقدار X از رابطه ۴ استفاده شد.

(۴)

$$X = MR = M/M_0$$

که در آن، M رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه و M_0 رطوبت اولیه نمونه‌ها می‌باشد.

۲-۳- اندازه‌گیری جذب مجدد آب

میزان ۵ گرم از قارچ خشک شده در داخل ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دمای 100°C قرار گرفتند و نمونه‌ها هر ۲ دقیقه (جمعاً ۱۰ دقیقه) از آب خارج شده، آب سطحی توسط کاغذ صافی مختصراً برداشته شد و نمونه‌ها توزین گردیدند

[۲۰، ۲۱]. در نهایت، از رابطه‌ی ۵ میزان جذب مجدد آب

محاسبه گردید.

(۵)

$$PR = W_r/W_d$$

که در آن، RR میزان جذب مجدد آب W_r و W_d به ترتیب وزن نمونه‌ی خشک شده بعد از جذب آب و قبل از آنمی‌باشد (g).

۲-۴- طرح آماری

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. تعیین معنی‌دار بودن اختلاف‌ها و مقایسه‌ی میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن توسط نرم افزار SPSS 16.0 انجام شد.

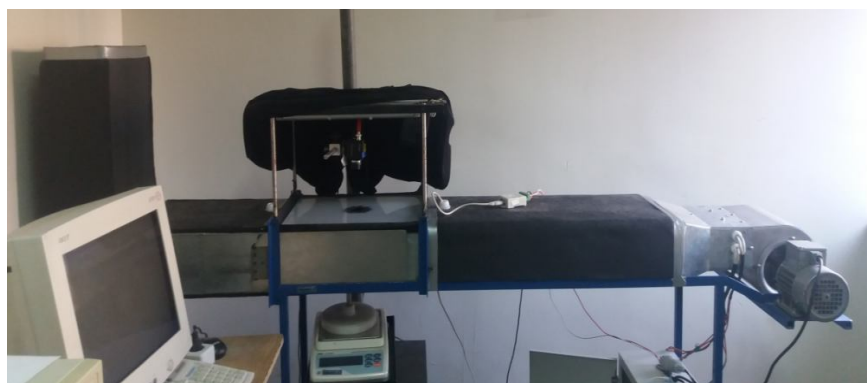


Fig 1 Experimental dryer equipped with image processing system

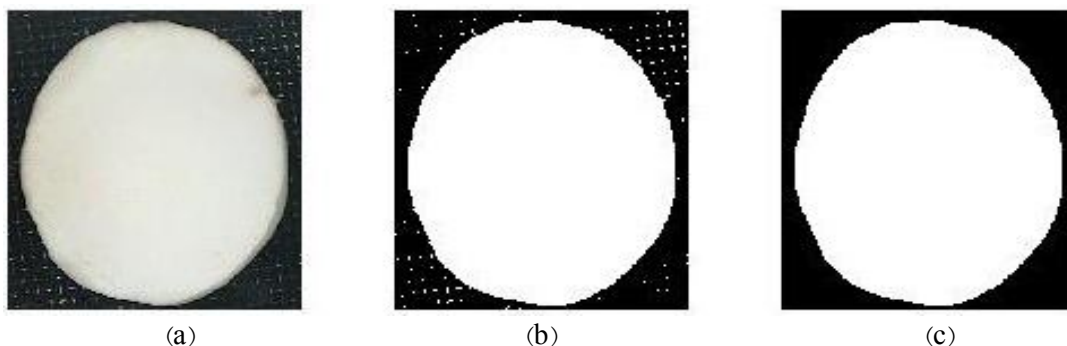


Fig 2 (a)Original image (b) Binary image before noise elimination (c) Binary image after noise elimination

۳- نتایج و بحث

در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود و تنها در سه حالت اثر متقابل دز-دما و دز-ضخامت روی میزان چروکیدگی سطحی و اثر متقابل دز-ضخامت روی میزان جذب مجدد آب معنی‌دار نبود (جدول ۱).

نتایج تجزیه واریانس متغیرها نشان داد که اثر ساده تیمارهای دز پرتودهی، دمای خشک کردن و ضخامت ورقه‌ها و همچنین، اثر متقابل آن‌ها بر میزان چروکیدگی سطحی و جذب مجدد آب

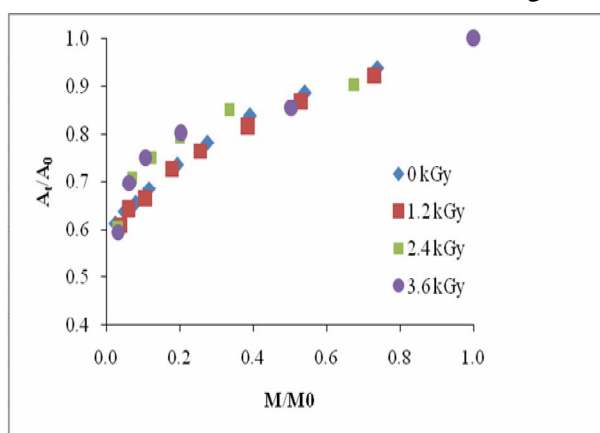
Table 1 Mean square from ANOVA on the main effects and interaction

Source of variables	df	Area shrinkage	Rehydration ratio
Dose	3	0.001*	0.769*
Temperature	2	0.092*	0.187*
Thickness	1	0.081*	7.23*
Dose×Temperature	6	3.54E ⁻⁵ ns	0.004*
Temperature×Thickness	2	0.001*	0.008*
Dose×Thickness	3	8.66E ⁻⁶ ns	7.91E ⁻⁵ ns
Dose×Temperature×Thickness	6	7.54E ⁻⁶ *	0*
Error	48	2.13E ⁻⁵	8.75E ⁻⁵

ns and *, nonsignificant and significant difference at 1% level, respectively

بنابراین، میزان چروکیدگی در ضخامت ۵ میلی‌متر کمتر بود. قابل ذکر است که به منظور کاهش چروکیدگی در ساختار ماده باید عوامل زیادی از قبیل رطوبت نسبی هوا، سرعت خروج آب، دمای خشک‌کردن، استفاده از پیش‌تیمار، ابعاد و مقدار ماده در طی فرآیند خشک‌کردن کنترل شوند [۲۲، ۲۳]. همچنین، جهت باد روی محصول و نوع خشک‌کن مورد استفاده از عوامل تأثیرگذار بر میزان چروکیدگی محصول به شمار می‌روند [۱۵].

نتایج مدل‌سازی تجربی شاخص چروکیدگی سطحی به صورت تابعی از نسبت رطوبت، بالا بودن مقدار ضریب تبیین (R^2) را نشان می‌دهد (جدول ۳). به عبارتی شاخص چروکیدگی سطحی به صورت تقریباً خطی با تغییر محتوای رطوبتی محصول انجام شده است. همچنین، مقایسه‌ی ضریب A مدل در آزمایش‌های مختلف نشان داد که با کاهش ضخامت و افزایش دما، مقدار این ضریب افزایش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده‌ی بالابودن نرخ تغییر سطح محصول در ضخامت کمتر و دماهای بالا می‌باشد. مقایسه‌ی تأثیر دز پرتو روی مقدار این ضریب، نتیجه‌ی مشخصی نداشت.

**Fig 3** Variation of surface shrinkage at different irradiation doses (air temperature 50°C, slice thickness 3 mm)

۳-۱- شاخص چروکیدگی سطحی

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، شاخص چروکیدگی سطحی برای دمای ۵۰°C و ضخامت ۳ میلی‌متر در دزهای ۰، ۱/۲، ۲/۴ و ۳/۶ کیلوگری در انتهای فرآیند خشک کردن به ترتیب ۰/۶۱۵، ۰/۶۱، ۰/۶۰۴ و ۰/۵۹۳ بدست آمده است. همچنین نتایج نشان داد زمان خشک شدن نمونه‌ها تحت همین شرایط به ترتیب ۳۱۰، ۲۹۰، ۲۵۰ و ۱۹۰ دقیقه می‌باشد. این نتیجه نشان می‌دهد که به ازای افزایش جزئی چروکیدگی در دزهای بالاتر، زمان خشک شدن محصول به طور معنی‌داری کاهش یافته است؛ به طوری که زمان خشک شدن در نمونه‌ی پرتو دهی نشده ۳۱۰ دقیقه و در نمونه‌ی پرتو دهی شده با دز ۳/۶ کیلوگری، ۱۹۰ دقیقه می‌باشد. همچنین، اختلاف بین نمونه‌های پرتو دهی شده با یکدیگر معنی‌دار نبود؛ ولی اختلاف بین نمونه‌های پرتو دهی شده و پرتو دهی نشده معنی‌دار بود. نتایج بدست آمده نشان داد با افزایش دمای خشک کردن، میزان چروکیدگی به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (شکل ۴). نمونه‌هایی که در دمای ۵۰ و ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند، به ترتیب کمترین و بیشترین شاخص چروکیدگی سطحی را داشتند. مطابق جدول ۲، در حالت کلی اثر متقابل دما و ضخامت روی میزان چروکیدگی معنی‌دار بود و تنها در دو مورد اختلاف‌ها معنی‌دار نبودند. این نتایج نشان می‌دهد افزایش دما، سرعت خروج آب را افزایش داده و باعث چروکیدگی بافت محصول شده است. به طوری که تأثیر دما روی میزان چروکیدگی بیشتر از دو فاکتور دز و ضخامت بوده است. همچنین، خشک کردن در دمای پایین باعث شد که اختلاف رطوبت در داخل محصول به کمترین مقدار برسد که این امر کاهش چروکیدگی را به همراه داشت. علاوه بر این، با افزایش ضخامت برش‌های محصول از ۳ به ۵ میلی‌متر، سرعت خشک شدن محصول به طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۵).

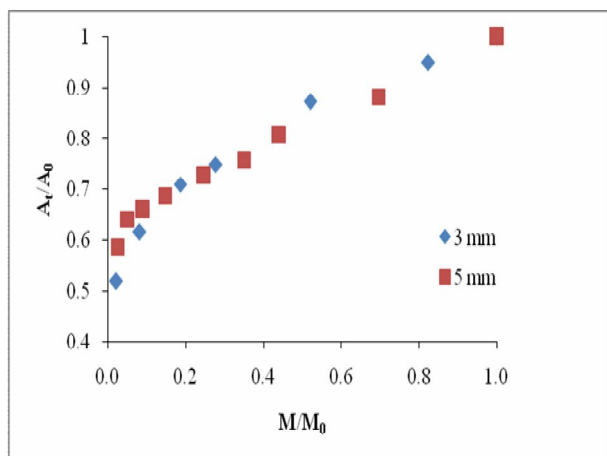


Fig 5 Variation of surface shrinkage at different slice thicknesses (irradiation dose 3.6 kGy, air temperature 60°C)

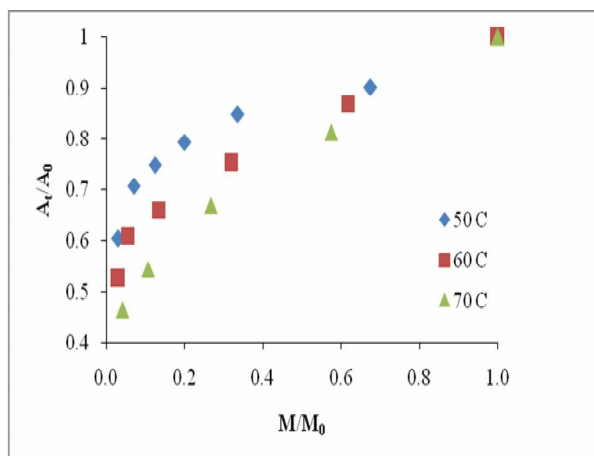


Fig 4 Variation of surface shrinkage at different drying temperatures (irradiation dose 2.4 kGy, slice thickness 3 mm)

Table 2 The interaction of temperature and thickness on surface shrinkage (s) and rehydration ratio (RR)

Thickness (mm)	Temperature (°C)	S	RR
3	50	0.60 ^b	3.06 ^{ab}
	60	0.52 ^c	3.19 ^a
	70	0.46 ^d	3.02 ^b
5	50	0.65 ^a	2.46 ^{cd}
	60	0.59 ^b	2.54 ^c
	70	0.54 ^c	2.36 ^d

In each column, no significant differences between the values with the same letters

Table 3 Coefficients of linear modeling at the different drying conditions

Dose (kGy)	Thickness (mm)	50°C			60°C			70°C		
		A	B	R ²	A	B	R ²	A	B	R ²
0	3	0.41	0.63	0.95	0.45	0.60	0.89	0.55	0.46	0.99
	5	0.33	0.69	0.96	0.39	0.62	0.98	0.43	0.54	0.98
1.2	3	0.41	0.63	0.96	0.45	0.60	0.91	0.55	0.47	0.99
	5	0.35	0.69	0.94	0.40	0.62	0.98	0.44	0.54	0.99
2.4	3	0.37	0.66	0.86	0.46	0.57	0.95	0.56	0.48	0.98
	5	0.32	0.70	0.89	0.38	0.63	0.95	0.44	0.53	0.98
3.6	3	0.36	0.66	0.85	0.48	0.58	0.92	0.58	0.47	0.98
	5	0.36	0.68	0.92	0.38	0.62	0.98	0.47	0.54	0.99

۳-۲- جذب مجدد آب

با افزایش دز پرتودهی، سرعت خشک شدن محصول بیشتر شده و میزان جذب مجدد آب در تمامی نمونه‌ها افزایش یافت (شکل ۶). به نظر می‌رسد با افزایش دز پرتودهی، منافذ موجود در دیواره‌ی سلولی گشادتر شده و نقاط بیشتری برای جذب آب در نمونه‌های خشک شده ایجاد می‌شود. از طرفی چون تأثیر پرتو فقط روی سطح محصول است، بنابراین هیچ‌گونه اثر منفی بر روی لوله‌های مویی موجود در داخل محصول ندارد. این گزارش با توجه به نتیجه‌ای که برای چروکیدگی ذکر شده، اینگونه توجیه می‌شود که با پرتودهی قارچ، حفره‌هایی در سطح آن ایجاد شده و سرعت خشک شدن افزایش یافته است. با توجه به این که خشک شدن محصول ابتدا از بخش‌های سطحی آغاز می‌شود و در حالت معمول سرعت از دست رفتن رطوبت در سطح محصول بیشتر از بخش‌های داخلی است، بنابراین سرعت خشک شدن تشدید شده و باعث بوجود آمدن تغییراتی در بافت محصول شده است [۱۴]. همچنین، چون چروکیدگی عمدتاً در لحظات اولیه فرآیند خشک کردن اتفاق می‌افتد، بنابراین می‌توان گفت مجموع این عوامل باعث ایجاد چروکیدگی بیشتر در دزهای بالا شده است [۲۴]. قابل ذکر است با اینکه در دزهای بالاتر مساحت سطح محصول کاهش یافته، ولی چون حفره‌های موجود در سطح قارچ گشادتر شده و هنگام خروج آب بر لوله‌های مویی آسیب کمتری وارد می‌شود (در نمونه‌ی شاهد به دلیل نبود حفره در سطح، فشار بر لوله‌های مویی بیشتر است)، بنابراین قارچ‌های خشک شده آب بیشتری را جذب کرده‌اند و میزان باز جذب آب در نمونه‌های پرتودهی شده به خصوص در دزهای بالا بیشتر بوده است. علاوه بر این، اثر متقابل دز پرتودهی و دمای خشک کردن روی میزان جذب مجدد آب معنی‌دار بود (شکل ۷). دمای بالای خشک کردن سبب تغییر غیرقابل برگشت لوله‌های مویی شده و بنابراین، در این تحقیق میزان جذب آب در نمونه‌هایی که تحت دمای 70°C خشک شده بودند، کمتر از دماهای 50°C و 60°C درجه سلسیوس بود (شکل ۸). همچنین، با افزایش ضخامت برش‌های قارچ، میزان جذب مجدد آب در نمونه‌های خشک شده کاهش یافت (شکل ۹). به نظر می‌رسد کهبه دلیل کم بودن لایه‌های محصول در ضخامت ۳ میلی‌متر، جذب آب راحت‌تر از ضخامت ۵ میلی‌متر انجام شده است. مطابق جدول ۲، اثر متقابل دما و ضخامت نمونه‌ها روی

میزان جذب مجدد آب معنی‌دار بود. به ازای ضخامت معین، با افزایش دما اختلاف بین نمونه‌ها از لحاظ میزان باز جذب آب افزایش پیدا کرد. برای مثال، در ضخامت ۳ mm، نمونه‌های خشک شده در دمای 50°C و 60°C درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری نداشتند؛ درحالی‌که اختلاف بین نمونه‌های خشک شده در دماهای 60°C و 70°C درجه سلسیوس معنی‌دار بود (جدول ۲).

در تحقیقی اثر پرتودهی با اشعه گاما روی درصد جذب مجدد آب در محصول سیب زمینی معنی‌دار بود؛ به طوری‌که با افزایش دز پرتو تا ۱۰ کیلوگری، درصد جذب مجدد آب همواره روند نزولی را نشان داد. نگارندگان عامل این نتیجه را اثرات مخرب پرتودهی گاما در دزهای بالا دانسته‌اند که احتمالاً باعث رادیولیز محصول قبل از خشک کردن و آسیب به بافت آن شده است. همچنین، تخریب برخی از لوله‌های مویی در دزهای بالاتر و در نزدیکی سطح محصول، از دیگر عوامل کاهش میزان جذب مجدد آب به شمار می‌رود. علاوه بر این، با افزایش ضخامت محصول و دمای خشک کردن، درصد جذب مجدد آب کاهش یافت [۲]. نتایج مشابهی برای محصول سیب گزارش شده است؛ با این تفاوت که با افزایش دمای خشک کردن تا 60°C ، درصد جذب مجدد آب افزایش و در دماهای بالاتر از آن، کاهش یافت [۲۵].

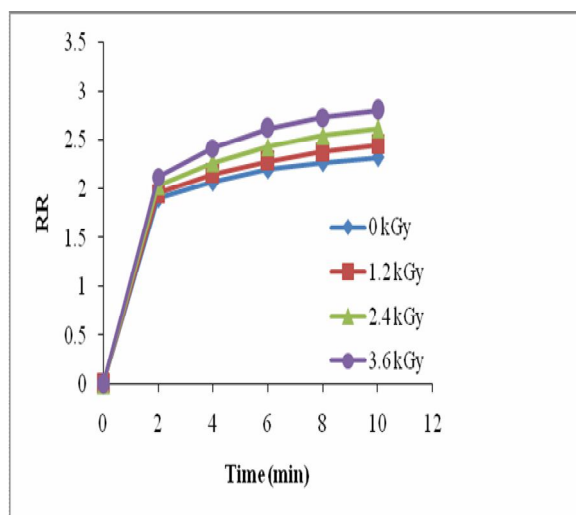


Fig 6 Variation of rehydration ratio at different irradiation doses (air temperature 60°C , slice thickness 5 mm)

۴- نتیجه گیری

تأثیر پیش تیمار پرتودهی در ترکیب با فرآیند خشک کردن قارچ روی کیفیت آن از لحاظ چروکیدگی سطحی و میزان جذب مجدد آب بررسی شد. با افزایش دز پرتودهی، زمان خشک شدن نمونه‌ها کاهش یافت، اما تغییرات زیادی روی میزان چروکیدگی مشاهده نشد. همچنین، افزایش دما و کاهش ضخامت باعث افزایش چروکیدگی محصول شد. پرتودهی در افزایش میزان جذب آب در نمونه‌های خشک شده مؤثر بود؛ به طوریکه بیشترین میزان جذب آب در نمونه‌های پرتودهی شده با دز ۳/۶ کیلوگری به دست آمد. علاوه بر این، با افزایش دمای خشک کردن از ۵۰°C به ۶۰°C، میزان جذب آب افزایش و از دمای ۶۰°C به ۷۰°C کاهش یافت و در ضخامت ۳ میلی‌متر نیز میزان جذب آب بیشتر از ضخامت ۵ میلی‌متر بود. در مدل‌سازی تجربی تغییر سطح نمونه‌ها به صورت تابعی از نسبت رطوبت، ضریب تبیین بالایی برای همه‌ی تیمارها به دست آمد. بنابراین، می‌توان از پیش تیمار پرتودهی گاما برای کاهش زمان خشک کردن ورقه‌های قارچ در عین حفظ کیفیت محصول نهایی از نظر جذب مجدد آب که برای مصرف کنندگان حائز اهمیت است، استفاده کرد.

۵- منابع

- [1] Mohammadigoltapeh, A. and Pourjam, A. 2003. Edible mushroom breeding. Tarbiat Modares University, 604 p.
- [2] Wang, J. and Chao, Y. 2003a. Effect of ^{60}Co irradiation on drying characteristics of apple. Journal of Food Engineering, 56(4): 347-351.
- [3] Liu, L., Wang, X., Chen, H. and Wan, C. 2016. Microstructure-based modelling of drying shrinkage and microcracking of cement paste at high relative humidity. Construction and Building Materials, 126: 410-425.
- [4] Mohebbi, M., Akbarzadeh, T. M. R., Shahidi, F., Moussavi, M. and Ghoddusi, H. B. 2009. Computer vision systems (CVS) for moisture content estimation in dehydrated shrimp. Computers and Electronics in Agriculture, 69(2): 128-134.
- [5] Walde, S., Velu, V., Jyothirmayi, T. and Math, R. 2006. Effects of pretreatments and drying methods on dehydration of mushroom. Journal of Food Engineering, 74(1): 108-115.
- [6] Dinani, S.T. and Havet, M. 2015. Effect of voltage and air flow velocity of combined

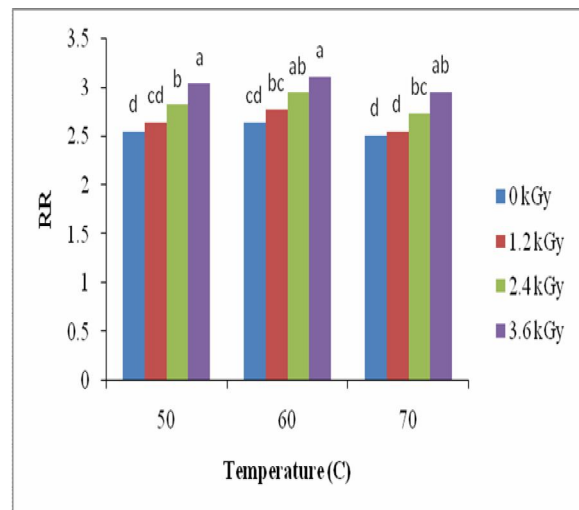


Fig 7 The interaction of irradiation dose and temperature on rehydration ratio

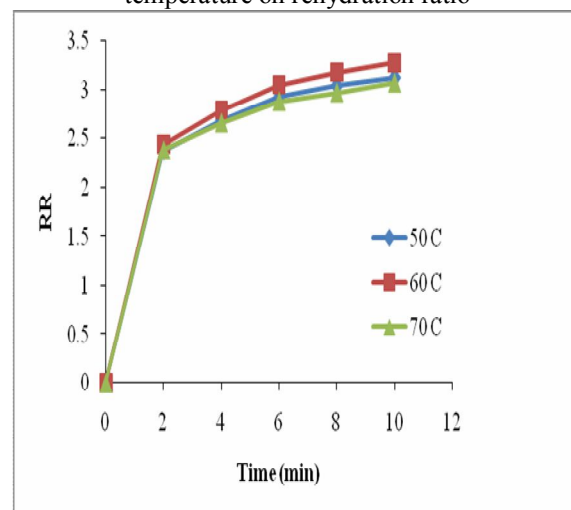


Fig 8 Variation of rehydration ratio at different air temperatures (irradiation dose 3.6 kGy, slice thickness 3 mm)

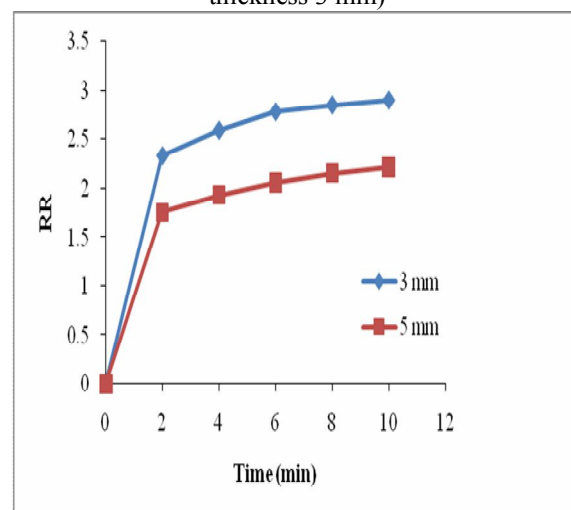


Fig 9 Variation of rehydration ratio at different slice thicknesses (irradiation dose 1.2 kGy, air temperature 70°C)

- layer drying kinetics of ghost chill pepper (*Capsicum Chinense Jacq.*) dried in a forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 105: 583-589.
- [18] Ebrahimi, M.A., 2011. Investigation of browning and shrinkage of banana in thin layer drying method using image processing technique. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran.
- [19] Aprajeeta, J., Gopirajah, R. and Anandharamakrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, 144: 119-128.
- [20] Giri, S. and Prasad, S. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 512-521.
- [21] Giri, S. and Prasad, S. 2013. Quality characteristics of microwave-vacuum dried button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Octa Journal of Biosciences*, 1(1): 24-31.
- [22] Shen, D., Jiang, J., Shen, J., Yao, P. and Jiang, G. 2016. Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age. *Construction and Building Materials*, 103: 67-76.
- [23] Shen, D., Wang, T., Chen, Y., Wang, M. and Jiang, G. 2015. Effect of internal curing with super absorbent polymers on the relative humidity of early-age concrete. *Construction and Building Materials*, 99: 246-253.
- [24] Aprajeeta, J., Gopirajah, R., and Anandharamakrishnan, C. 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, 144, 119-128.
- [25] Wang, J. and Chao, Y. 2003b. Effect of gamma irradiation on quality of dried potato. *Radiation Physics and Chemistry*, 66(4): 293-297.
- convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices. *Industrial Crops and Products*, 70: 417-426.
- [7] Crapo, C., Oliveira, A., Nguyen, D., Bechtel, P.J. and Fong, Q. 2010. Development of a method to produce freeze dried cubes from 3 pacific salmon species. *Journal of Food Science*, 75(5): 269-275.
- [8] Lee, K.T., Farid, M. and Nguang, S.K. 2006. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering*, 72(1): 16-23.
- [9] Sanjuan, N., Carcel, J.A., Clemente, G. and Mulet, A. 2001. Modelling of the rehydration process of broccoli florets. *European Food Research and Technology*, 212(4): 449-453.
- [10] Majd, F. and Ardakani, M. 2010. *Nuclear Techniques in Agricultural Science*. University of Tehran, 352 p.
- [11] Kortei, N., Odamtten, G., Ayim-Akonor, M. and Akonor, P. 2016. Modeling the solar drying kinetics of gamma irradiation-pretreated oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus*). *International Food Research Journal*, 23(1): 34-39.
- [12] Wierbicki, E. 1986. Ionizing energy in food processing and pest control. 1. Wholesomeness of food treated with ionizing energy. Council for Agricultural Science and Technology.
- [13] Yu, Y. and Wang, J. 2007. Effect of γ -irradiation treatment before drying on qualities of dried rice. *Journal of Food Engineering*, 78(2): 529-536.
- [14] Yu, Y. and Wang, J. 2006. Effect of gamma-ray irradiation on drying characteristics of wheat. *Biosystems Engineering*, 95(2): 219-225.
- [15] Yadollahinia, A., and Jahangiri, M. 2009. Shrinkage of potato slice during drying. *Journal of Food Engineering*, 94(1), 52-58.
- [16] AOAC. 1990. *Official methods of analysis*. 13th edn. Washington DC: Association of Official Analytical Chemists.
- [17] Rabha, D., Muthukumar, P. and Somayaji, C. 2017. Experimental investigation of thin

Effect of gamma irradiation on surface shrinkage and rehydration ratio during drying of mushroom (*Agaricus bisporus*)

Fartash Naeimi, E.¹, Khoshtaghaza, M. H.^{2*}, Abbasi, S.³

1. Msc. Student, Dept. of Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University

2. Associate Professor, Dept. of Mechanical and Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University

3. Professor, Dept. of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University

(Received: 2017/08/13 Accepted: 2017/10/23)

The final quality of drying product should be considered as one of the most important indicators in the drying process. In this research, the effects of gamma irradiation doses (0, 1.2, 2.4 and 3.6 kGy), drying temperature (50, 60 and 70°C) and slice thickness of mushrooms (3 and 5 mm) on the surface shrinkage and rehydration ratio were studied. Thin-layer dryer based on machine vision was used for the experiment. The results showed that the simple and interaction effects of the factors on the surface shrinkage and rehydration ratio were significant ($P < 0.01$) in most cases. By increasing irradiation dose, shrinkage slightly increased, and rehydration ratio in dried samples were increased. Also, the maximum rehydration ratio was 3.43 g/g in dose of 3.6 kGy and drying temperature of 60°C in the thickness of 3 mm. Finally, shrinkage increased by increasing drying temperature and decreasing slice thickness of mushroom. So that the minimum and maximum values of surface shrinkage were 0.461 and 0.667, respectively.

Keywords: Gamma irradiation, Drying, Mushroom, Surface shrinkage, Rehydration ratio.

* Corresponding Author E-Mail Address: khoshtag@modares.ac.ir