نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۵، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۴، ص ۱۵۳-۱۴۳

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 5, No. 1, Spring - Summer 2015, p. 143-153

مقایسه دو روش خشک کردن بر مصرف انرژی و پارامترهای کیفی شلغم رقم سر ارغوانی

حسن صدرنیا[1*]- هادی منفرد[2]- مهدی خجسته پور[3]

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۴

چکیده

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری محصولات کشاورزی است که بازار محصولات زراعی را وسیع‌تر کرده است. با استفاده از این روش می‌توان محصولات را با هزینه کمتر انبار و در تمام طول سال به بازارهای مصرف منتقل نمود. یکی از سبزی‌های مهم و مغذی که می‌توان با خشک کردن، خارج از فصل نیز استفاده نمود محصول شلغم است. در این تحقیق علاوه بر خشک کردن شلغم، مقایسه دو دستگاه خشک‌کن هوای داغ و خشک‌کن تحت خلأ نیز انجام شد. اثر فاکتورهای مستقل دما و خلأ بر فاکتورهای وابسته نظیر چروکیدگی، آبگیری مجدد و انرژی الکتریکی مصرفی در محصول نهایی خشک شده بررسی شدند. طرح کاملاً تصادفی برای خشک‌کن هوای داغ و آزمایش فاکتوریل با طرح پایه کاملاً تصادفی برای خشک‌کن تحت خلأ استفاده شد. نتایج نشان داد فاکتورهای دما و خلأ بر چروکیدگی، آبگیری مجدد و مصرف انرژی الکتریکی تأثیر دارند. پارامتر چروکیدگی بیشتر به رطوبت نهایی محصول و پارامتر انرژی مصرفی دستگاه‌ها نیز به زمان وابسته است. در این تحقیق، بهترین کیفیت محصول خشک شده شلغم در دستگاه خشک‌کن هوای داغ با در نظر گرفتن رطوبت نهایی ۱±۱۴ درصد، چروکیدگی ۳۹/۹۸ درصد، آبگیری مجدد ۴/۴۵ و انرژی الکتریکی مصرفی ۳۲/۳۶ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم ماده خشک در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد و برای دستگاه خشک کن تحت خلأ، چروکیدگی ۳۸/۱۲ درصد، آبگیری مجدد ۴/۸۷ و انرژی الکتریکی مصرفی ۳۰/۵۸ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم ماده خشک در شرایط با خلأ ۱۰ کیلو پاسکال، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. مقایسه نتایج نشان داد خشک‌کن خلائی با خشک کردن شلغم با کیفیت بالاتر و مصرف انرژی الکتریکی کمتر مناسب‌تر از خشک‌کن هوای داغ است.

واژه‌های کلیدی: آبگیری، چروکیدگی، خشک‌کن خلأ، شلغم

مقدمه

خشک کردن قدیمی‌ترین روشی است که برای نگهداری مواد غذایی استفاده شده است. انسان‌های اولیه دریافتند که بعد از رسیدن محصول، دانه‌هایی که به‌طور طبیعی روی ساقه خشک می‌شوند قابل استفاده خواهند بود. در زمان‌های قدیم نور خورشید برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شد، اما مشکلات زیادی در استفاده از این روش از جمله تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی و فقدان کنترل کافی در طول دوره خشک کردن وجود داشت. بنابراین، استفاده از فن‌آوری‌های جدید برای فرآیند خشک کردن را ضروری می‌سازد. براساس روش انتقال حرارت به محصول، خشک‌کن‌ها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: خشک کردن به روش هدایت، خشک کردن به روش همرفت (هوای داغ) و خشک کردن به روش تابش. اگر هوای استفاده شده در حین خشک کردن با سرعتی بالاتر از سرعت حد ماده باشد، خشک شدن ماده در شرایط معلق یا در حال حرکت انجام می‌شود و به این پدیده خشک شدن با بستر متحرک گفته می‌شود (Aghbashlo *et al.*, 2009).

شلغم در طی چهار هزار سال یا بیشتر توسط انسان‌ها کشت می‌شد و این نبات آنقدر قدیمی است که هیچ‌کس محل پیدایش اصلی آن را نمی‌داند، بعضی‌ها منشأ اصلی آن را سایبریا و بعضی‌ها متعقد هستند که منشأ آن سواحل مدیترانه یا چین می‌باشد. بر طبق آمارهای موجود، تولید کل شلغم و هویج ایران در سال ۲۰۰۵ چهل هزار تن بوده است که ایران رتبه ۵۱ را در بین سایر کشورها داشته است و این در سال ۲۰۱۰ به ۳۰۵ هزار تن رسیده که رتبه ایران را به ۲۱ رسانده است (FAO, 2011). براساس رنگ گوشت ریشه، ارقام شلغم به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول دارای گوشت سفید و دسته دیگر دارای گوشت زرد می‌باشند. معمولاً ارقام دارای گوشت سفید در سطح بیشتری نسبت به گوشت زرد کاشته می‌شوند، چون کیفیت ریشه آن‌ها بهتر است و از برگ آن‌ها استفاده غذایی می‌شود.

۱و۳- به‌ترتیب استادیار و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم و اعضای مرکز پژوهشی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir
۲- مدرس آموزشکده کشاورزی، سمنگان، آشخانه

Archive of SID
www.SID.ir

(d) (c) (b) (a)

شکل ۱ – ارقام شلغم؛ (a) سر ارغوانی، (b) اسنوبال، (c) گلدن بال، (d) توکیو کراس

Fig.1. The turnip varieties; (a) Purple top white globe, (b) Snowball, (c) Golden ball, (d) Tokyo Cross

مهم‌ترین ارقام شلغم دارای گوشت سفید عبارت هستند از: سر ارغوانی زمینه سفید[1]، اسنوبال، توکیو کراس، وایت فلت داچ و وایت میلان. از ارقام دارای گوشت زرد می‌توان از بلو آبردین، جاست رایت و گلدن بال نام برد. بعضی از ارقام شلغم را فقط به‌خاطر استفاده از برگ‌شان می‌کارند مانند: سون تاپ و ژپو نیز شوگواین (شکل ۱).

با توجه به این‌که مدت ماندگاری این محصول در سردخانه‌های محصولات کشاورزی فقط به مدت سه الی چهار هفته می‌باشد (Suslow, 2000) و همچنین ضایعات پس از برداشت شلغم قابل توجه است این محصول برای خشک کردن انتخاب گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تهیه برگه شلغم به‌صورت تجاری در ایران چندان معمول نمی‌باشد ولی در برخی کشورها مانند چین و نیوزیلند تولید تجاری این محصول مرسوم است.

مطالعات چندی در مورد خشک‌کن‌های خلائی از جمله خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در تحقیقی سرعت خشک کردن، آبگیری مجدد و چروکیدگی کیوی طی خشک کردن توسط جریان هوای داغ، مایکروویو و روش ترکیبی مایکروویو- هوای داغ بررسی شد. نتایج نشان داد که در هر سه روش مورد استفاده، خشک کردن در دوره‌ی سرعت نزولی صورت می‌گیرد. همچنین خشک کردن توسط انرژی مایکروویو باعث افزایش سرعت خشک کردن، افزایش چروکیدگی و افزایش سرعت جذب آب و کاهش آبگیری مجدد نسبت به دو روش دیگر می‌شود (Maskan, 2001).

یک خشک‌کن خلائی آزمایشگاهی برای بررسی اثر فشار مطلق در سه سطح ۲/۵، ۵، ۱۰ کیلو پاسکال و دما در دو سطح ۳۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد بر سرعت خشک شدن و آبگیری مجدد بادنجان استفاده شد. همچنین سرعت خشک شدن با یک مدل مناسب ارائه شد که نسبت به مدل‌های دیگر از دقت بالایی برخوردار بود. در این آزمایش بین افزایش دما و سرعت خشک شدن یک رابطه مستقیم مشاهده شد، در حالی‌که فشار داخل محفظه در نرخ خشک شدن تأثیر معنی‌داری نداشت و یک رابطه خطی بین آبگیری مجدد و محتوای رطوبتی پایه به‌دست آمد (Wua *et al.*, 2007).

در تحقیقی پودر موز با استفاده از سه روش خشک کردن خلائی، انجمادی و هوای داغ تولید و کیفیت آن‌ها از نظر مواد عطری با هم مقایسه شدند. در نهایت مشخص شد که کیفیت روش خشک کردن انجمادی بالاتر از سایر روش‌های مورد بررسی بود. کیفیت خشک کردن خلائی و خشک کردن با هوا به‌ترتیب در رده دوم و سوم قرار داشت. آن‌ها همچنین دریافتند که درجه حرارت‌های بالا آسیب‌هایی به ترکیبات اصلی محصول در خشک کردن خلائی و هوای داغ وارد می‌کند (Wang *et al.*, 2007).

در خصوص خشک کردن شلغم به‌طور خاص پژوهشی در بررسی منابع مشاهده نشد لیکن در خصوص سایر محصولات ریشه‌ای مطالعاتی انجام شده است که به‌دلیل مشابهت بافت آن‌ها با محصول شلغم ارائه می‌شود. در یک بررسی، اثر ضخامت و دما در سرعت خشک شدن تربچه با یک لایه به ضخامت‌های متغیر ۴ و ۶ میلی‌متر در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در فشار ثابت ۵ کیلو پاسکال با استفاده از یک دستگاه خشک‌کن خلائی آزمایشگاهی انجام شد. زمان خشک شدن در بازه گرمایی فوق برای ضخامت ۴ میلی‌متر بین ۳ تا ۷ ساعت و در ضخامت ۶ میلی‌متر از ۷ تا ۱۰ ساعت گزارش شد. مقایسه دقیق‌تر نشان داد زمان خشک شدن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و ضخامت ۴ میلی‌متر با زمان خشک شدن تربچه در ضخامت ۶ میلی‌متر و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد یکسان بوده است. آن‌ها همچنین ضریب نفوذ حرارتی تربچه را با استفاده از مدل فیک بررسی نمودند که افزایش دما افزایش ضریب نفوذ حرارتی را نشان داده است (Lee and Kim, 2009).

تربچه سفید آسیایی تا رطوبت ۱۰ درصد با سه دستگاه خشک‌کن هوای داغ (دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، خشک‌کن پمپ

1- Purple top white globe

Archive of SID

www.SID.ir

حرارتی (دمای ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ درجه سانتی‌گراد) و خشک‌کن انجمادی خشک گردید. ماده عطری در خشک‌کن هوای داغ و خشک‌کن پمپ حرارتی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. این تلفات با افزایش دما افزایش نشان می‌داد لیکن در یک دمای یکسان مقدار تلفات ماده عطری در خشک‌کن پمپ حرارتی کمتر از خشک‌کن هوای داغ بود (Coogan and Wills, 2002).

تأثیر سطوح مختلف خلأ و انرژی مایکروویو بر روند خشک شدن قطعات هویج به ضخامت ۳ تا ۵ میلی‌متر مطالعه شد. نتایج نشان داد تغییرات خلأ در بازه ۲۰ تا ۷۰ میلی‌بار (۲ تا ۷ کیلو پاسکال) تأثیر کمی بر روند خشک کردن قطعات هویج داشته است. در این تحقیق همچنین مدل تئوری خشک کردن قطعات هویج در خلأ- مایکروویو ارائه شد و ضرایب مناسب برای پیش‌بینی مراحل نهایی خشک کردن به‌دست آمد (Cui *et al*., 2004).

در تحقیق دیگری مکعب‌های سیب زمینی به ابعاد ۱۰ میلی‌متر در شرایط مختلف خشک شدند. زمان مورد نیاز برای خشک کردن مکعب‌های سیب زمینی در شرایط تحت خلأ ۶ کیلو پاسکال، شش برابر کمتر از زمان مورد نیاز برای خشک کردن آن‌ها با هوای داغ ۷۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. نتایج آزمایش‌های عملی نشان داد تمام خصوصیات مورد مطالعه شامل رنگ و ریز ساختار نمونه‌های خشک شده وابسته به سطح خلأ استفاده شده است (Bondaruk *et al*., 2007).

تاکنون تحقیقی برای بررسی امکان خشک کردن گیاه دارویی شلغم و تأثیر دما و خلأ در چروکیدگی، آبگیری مجدد و مصرف انرژی در خشک‌کن‌ها انجام نشده است که در این تحقیق تأثیر خلأ در چروکیدگی، آبگیری مجدد و مصرف انرژی در خشک کردن شلغم تا رسیدن به رطوبت ۱±۱۴درصد مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

شلغم تازه رقم گرد سفید سر ارغوانی از بازار تهیه شده و در یخچال با دمای ۵+ درجه سانتی‌گراد برای اجرای آزمایش‌ها نگهداری شد. محتوای رطوبت اولیه‌ی شلغم با استفاده از روش آون داغ تعیین گردید. خشک کردن تا زمانی ادامه یافت که تغییرات وزن نمونه‌ها از بین برود. نهایتاً آزمایش با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که رطوبت اولیه شلغم ۸۴/۵ درصد بود. یک خشک‌کن خلائی آزمایشگاهی با سیکل بسته ساخته شده توسط گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد و یک خشک کن هوای داغ بستر ثابت ساخت آلمان برای آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. خشک‌کن خلائی استفاده شده در این پژوهش مجهز به سیستم کنترل دما و فشار مطلق در محفظه داخلی بود (شکل ۲). ضخامت ورقه‌های شلغم مورد استفاده ۴/۶ میلی‌متر بوده است. آزمایش‌های اولیه و بررسی پژوهش‌های انجام شده بر روی محصولات مشابه توسط سایر محققین (Cui *et al*., 2004; Lee and Kim, 2009) دلیل انتخاب این ضخامت بود. آزمایش‌ها تا موقعی که رطوبت شلغم‌ها به ۱±۱۴ درصد برسد ادامه یافتند. قبل از انجام آزمایش‌ها برای رسیدن به شرایط پایدار، خشک‌کن نیم ساعت روشن می‌شد.

به‌منظور تعیین محتوای رطوبتی شلغم تازه و خشک شده، ۲۰ گرم از آن درون بشقاب چینی قرار گرفت و در درون آون با دمای ۱۰۵ °C تا رسیدن به وزن ثابت قرار داده شد. پس از خارج کردن از درون آون و توزین، محتوای رطوبتی بر مبنای وزن مرطوب (M_C) از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید.

$$M_C=\frac{W_{in}-W_{out}}{W_{in}}\times 100 \qquad (۱)$$

که W_{in} و W_{out} به‌ترتیب وزن نمونه قبل و بعد از قرار دادن در آون است. لازم به ذکر است محتوای رطوبتی شلغم تازه بر مبنای وزن مرطوب ۸۴/۵ درصد بود.

شکل ۲- خشک‌کن خلأ مجهز به کنترل‌کننده دما و حسگر فشار مطلق (Kamali, 2011)

Fig.2. Vacuum dryer equipped with temperature controller and absolute pressure sensor (Kamali, 2011)

اندازه‌گیری ظرفیت آبگیری مجدد

برای اندازه‌گیری ظرفیت آبگیری مجدد (RC)، نمونه‌ها پس از خارج شدن از خشک‌کن و توزین (W_d) در درون آب با دمای ۵۰ °C غوطه‌ور شدند (Maskan, 2001). پس از ۳۰ دقیقه شلغم از درون آب خارج و سطح خارجی آن با کاغذ صافی خشک گردید و مجدداً توسط ترازوی دیجیتال وزن شدند (W_{reh}). ظرفیت آبگیری مجدد (RC) با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه شد.

Archive of SID

www.SID.ir

$$RC = \frac{W_{reh}-W_d}{W_f-W_d}\times 100 \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، W_f وزن شلغم تازه قبل از خشک کردن است.

اندازه‌گیری چروکیدگی شلغم فرآوری شده

قبل از اندازه‌گیری حجم توسط تولوئن، دانسیته‌ی دقیق آن با استفاده از روش پیکنومتری تعیین گردید. بدین منظور وزن پیکنومتر خشک و پر شده با آب مقطر تعیین و براساس اختلاف وزن این دو، وزن آب درون پیکنومتر مشخص شد. سپس با توجه به دانسیته‌ی آب ($۱۰۰۰\ kg\ m^{-3}$)، حجم پیکنومتر خالی (V_p) محاسبه گردید. پیکنومتر مجدداً با تولوئن پر و وزن تولوئن درون آن تعیین شد. در نهایت با توجه به وزن تولوئن و حجم پیکنومتر دانسیته‌ی تولوئن (ρ_t) برابر $۸۶۷\ kg\ m^{-3}$ محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها (V) با استفاده از روش جابه‌جایی مایع، وزن یک بشر خالی (m_p) تعیین گردید. بشر تا نیمه با تولوئن پر شد و نمونه‌ی توزین شده (m_s) در داخل آن قرار گرفت. سپس بشر از حلال پر گردید. با وزن کردن مجدد، وزن بشر و تولوئن و نمونه (m_{p+t+s}) اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه گردید.

$$V = \frac{V_p\times\rho_t - (m_{p+t+s} - m_p - m_s)}{\rho_t}\times 100 \quad (۳)$$

لازم به ذکر است به‌منظور تعیین حجم اولیه‌ی شلغم (V_1) دانسیته‌ی یک قطعه از همان شلغم با استفاده از روش مذکور تعیین گردید و سپس حجم نمونه با توجه به وزن و دانسیته‌ی آن اندازه‌گیری شد. درصد چروکیدگی (Sh) با تعیین حجم اولیه و حجم نهایی (V_2) با استفاده از رابطه‌ی (۴) محاسبه شد (Mortazavi, 2004).

$$Sh = \frac{V_1-V_2}{V_1}\times 100 \quad (۴)$$

اندازه‌گیری انرژی الکتریکی مصرفی

انرژی الکتریکی مصرفی هر دو دستگاه توسط یک کنتور برق ۵ آمپر در زمان خشک شدن محصول اندازه‌گیری شد. سپس انرژی الکتریکی مصرفی هر دستگاه به کیلووات ساعت بر کیلوگرم ماده خشک تبدیل گردید.

روش تجزیه و تحلیل نتایج

در این تحقیق برای خشک‌کن هوای داغ از طرح کاملاً تصادفی و برای خشک‌کن تحت خلأ از آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. تجزیه واریانس جهت ارزیابی اثرات ($p<۰/۰۵$) چروکیدگی، آبگیری مجدد و مصرف انرژی الکتریکی انجام گرفت. آزمون مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح اطمینان ۹۵ درصد و ۹۹ درصد انجام گرفت. کلیه آزمون‌ها با استفاده از نرم افزار JMP4 انجام گرفتند. طرح آماری در خشک‌کن هوای داغ مورد نظر با ۳ تیمار مستقل در ۳ تکرار به تعداد ۹ آزمایش مطابق جدول ۱ می‌باشد. طرح آماری مورد نظر برای خشک‌کن تحت خلأ با ۲ فاکتور مستقل در ۳ سطح و در سه تکرار به تعداد ۲۷ آزمایش مطابق جدول ۲ می‌باشد. سطوح فاکتورها با توجه به این نکته که دمای خشک کردن محصولات کشاورزی باید تا حد امکان پایین باشد تا کیفیت آن کاهش نیابد و از طرفی نباید موجب طولانی شدن فرآیند خشک کردن گردد، براساس آزمایش‌های اولیه و تحقیقات انجام شده انتخاب شدند.

جدول ۱- طرح آزمایش مورد استفاده در خشک‌کن هوای داغ

Table 1- Experimental design for hot air dryer

شماره آزمایش Test No.	دما Temperature (°C)
1	50
2	60
3	70

جدول ۲- طرح آزمایش مورد استفاده برای خشک‌کن تحت خلأ

Table 2- Experimental design for vacuum dryer

شماره آزمایش Test No.	خلأ Vacuum (kPa)	دما Temperature (°C)
1	30	50
2	20	50
3	10	50
4	30	60
5	20	60
6	10	60
7	30	70
8	20	70
9	10	70

نتایج و بحث

پس از خارج کردن محصول از دستگاه‌های خشک‌کن، چروکیدگی، آبگیری مجدد و انرژی الکتریکی مصرفی با استفاده از روش‌های داده شده محاسبه گردید. در ادامه اثر فاکتورها بر پارامترهای اندازه‌گیری شده بررسی می‌گردد.

چروکیدگی

تأثیر فاکتور دما بر چروکیدگی شلغم خشک شده در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، اختلاف بین تیمارها در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نیست. این بدان معنی است که دما در چروکیدگی شلغم تأثیر نداشته و با افزایش یا

Archive of SID

www.SID.ir

کاهش آن، چروکیدگی شلغم خشک شده تغییری نمی‌کند بلکه چروکیدگی به رطوبت نهایی محصول وابسته است و این نتیجه با نتایج (Schultz *et al.*, 2007) مطابقت دارد. آن‌ها تأثیر خشک کردن را روی چروکیدگی قطعات سیب با خشک‌کن هوای داغ بررسی نموده و نتیجه گرفتند تغییرات چروکیدگی با محتوای رطوبتی محصول خشک شده همبستگی زیادی دارد و با کاهش نسبت رطوبت سیب، چروکیدگی نیز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اثر خلأ بر چروکیدگی شلغم در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. این بدان معنی است که با افزایش یا کاهش خلأ، چروکیدگی شلغم نیز تغییر می‌کند. این وضعیت در شکل ۲ مشاهده می‌شود. افزایش خلأ (کاهش فشار مطلق) باعث کاهش چروکیدگی گردیده است. اثر متقابل خلأ و دما در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نشد، این بدان معنی است که دما و خلأ با هم تأثیر متقابلی بر چروکیدگی شلغم خشک شده ندارند.

هنگام فرآیند خشک شدن مواد غذایی، رطوبت از درون و محیط مواد غذایی خارج شده و فضای بین بافت مواد غذایی خالی می‌شود که منجر به ایجاد تنش در محصول گردیده و محصول چروکیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش خلأ مقدار چروکیدگی در شلغم کاهش می‌یابد. خلأ، این اختلاف فشار و در نتیجه تنش به‌وجود آمده را کاهش داده و چروکیدگی را کاهش می‌دهد. این نتیجه با نتایج (Kamali, 2011) هم‌خوانی دارد. ایشان تأثیر خلأ را بر روی چروکیدگی قطعات کیوی در خشک‌کن تحت خلأ بررسی نمودند و نشان دادند که با افزایش خلأ مقدار چروکیدگی کاهش می‌یابد. جدول ۵ نشان می‌دهد که در فشارهای پایین (۳۰ کیلو پاسکال) شلغم خشک شده دارای بیشترین چروکیدگی می‌باشد و بهترین دما برای کمترین چروکیدگی شلغم خشک شده، دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و خلأ ۱۰ کیلو پاسکال مطلق می‌باشد.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر دما بر چروکیدگی شلغم در خشک‌کن هوای داغ

Table 3- ANOVA results for the effect of temperature on shrinkage in hot air dryer

منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square	F F-value
دما Temperature	2	45.63	4.20^{ns}
خطای آزمایش Error	6	10.85	--
کل Total	8	19.55	1.80

*و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

*, ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

جدول ٤- نتایج آنالیز واریانس اثر دما و خلأ بر چروکیدگی در خشک‌کن تحت خلأ

Table 4- ANOVA results for the effects of temperature and vacuum on shrinkage in vacuum dryer

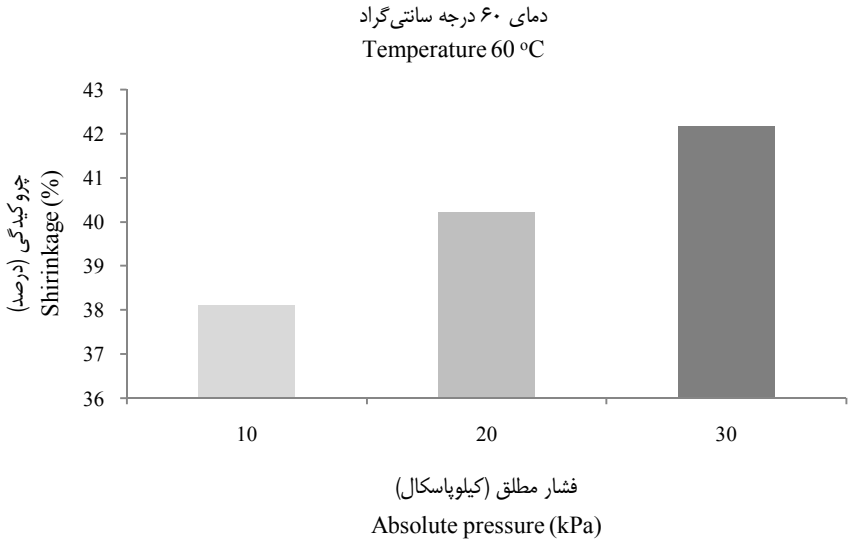
منبع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of square	میانگین مربعات Mean of square	F F-value
دما Temperature	2	31.45	15.72	2.66^{*}
خلأ Vacuum	2	128.26	64.13	10.86^{**}
خلأ×دما Vacuum×Temperature	4	11.76	2.94	0.49^{ns}
خطا Error	18	106.27	5.90	--
کل Total	26	277.75	--	--

*و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

*, ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۳- تأثیر خلأ بر چروکیدگی

Fig.3. The effect of vacuum on shrinkage

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین‌های چروکیدگی در سطوح مختلف دما و خلأ به روش LSD

Table 5- Comparison of shrinkage in different temperature and vacuum levels by LSD method

دما (خلأ) Temperature (Vacuum)	میانگین (درصد) Means (%)
50 (30)	46.83^{a}
70 (30)	44.18^{ab}
70 (20)	42.27^{bc}
60 (30)	42.18^{bc}
50 (20)	41.99^{bc}
60 (20)	40.23^{bc}
50 (10)	39.77^{c}
70 (10)	39.10^{c}
60 (10)	38.12^{c}

میانگین‌هایی که دارای حرف یا حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means with the same letter or letters are not significantly different.

آبگیری مجدد

تأثیر فاکتور دما بر آبگیری مجدد شلغم خشک شده در جدول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود اختلاف بین تیمارها در سطح ۹۵ درصد معنی دار است، این بدان معنی است که دما در آبگیری مجدد شلغم تأثیر گذار است. با افزایش دما، آبگیری مجدد شلغم خشک شده نیز افزایش پیدا می‌کند. در تحقیقی اثر دما بر آبگیری مجدد قطعات سیب بررسی و گزارش شد که افزایش دما موجب افزایش مقدار آبگیری مجدد شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Vega-Galvez *et al.,* 2012).

همچنین در طی خشک کردن حلقه‌های پیاز با روش هوای داغ در دماهای مختلف ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد نتایج مشابهی در خصوص اثر دما بر آبگیری مجدد به‌دست آمد (Abbasi *et al.,* 2011). آن‌ها گزارش دادند افزایش دمای خشک کردن موجب افزایش مقدار آبگیری مجدد می‌شود و بیشترین مقدار آبگیری مجدد در نمونه‌های خشک شده با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. لیکن در مواردی افزایش دمای خشک کردن موجب کاهش آبگیری مجدد شده است. محققینی گزارش دادند افزایش دما در خشک کردن الوورا منجر به کاهش آبگیری مجدد می‌شود (Miranda *et al.,* 2010). این اختلاف می‌تواند ناشی از واکنش‌های متفاوت بافت محصولات به دما باشد. استفاده از دمای بالا می‌تواند منجر به از بین رفتن سلول‌ها و ساختار آن‌ها گردد و آبگیری مجدد را کاهش دهد. از طرف دیگر افزایش دمای خشک کردن زمان فرآیند را کاهش می‌دهد و بر این اساس می‌تواند در مواردی که اشاره شد موجب بهبود آبگیری مجدد گردد.

جدول ۷ نشان می‌دهد که دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین آبگیری مجدد و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد دارای کمترین آبگیری مجدد می‌باشد و می‌توان بیان کرد که رابطه خطی بین آبگیری مجدد و دما وجود دارد. یعنی با افزایش دما، آبگیری مجدد نیز افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود اثر فاکتور خلأ در سطح ۹۹ درصد و فاکتور دما در سطح ۹۵ درصد بر آبگیری مجدد معنی‌دار می‌باشد. اثر متقابل دما و خلأ در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار شده، بنابراین دما و خلأ با هم در آبگیری مجدد شلغم خشک شده تأثیر گذار هستند.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس اثر دما بر آبگیری مجدد شلغم در خشک‌کن هوای داغ

Table 6- ANOVA results for the effects of temperature on dehydration in hot air dryer

F F-value	میانگین مربعات Mean of square	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
5.64*	0.18	0.36	2	دما Temperature
--	0.03	0.19	6	خطای آزمایش Error
0.04*	--	0.55	8	کل Total

*و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

*,** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین‌های آبگیری مجدد در سطوح مختلف دما به روش LSD

Table 7- Comparison of dehydration in different temperature levels by LSD method

میانگین Mean	تیمار دما Temperature treatment (°C)
4.94a	70
4.74ab	60
4.45b	50

میانگین‌هایی که دارای حرف یا حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means with the same letter or letters are not significantly different.

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس اثر دما و خلأ بر آبگیری مجدد شلغم در خشک‌کن تحت خلأ

Table 8- ANOVA results for the effects of temperature and vacuum on dehydration in vacuum dryer

F F-value	میانگین مربعات Mean of square	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
0.0140*	5.400	0.78	2	دما Temperature
0.0001**	52.400	7.59	2	خلأ Vacuum
0.3600*	3.220	0.93	4	خلأ×دما Temperature× Vacuum
--	0.072	1.30	18	خطا Error
0.0001**	--	10.63	26	کل Total

*و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

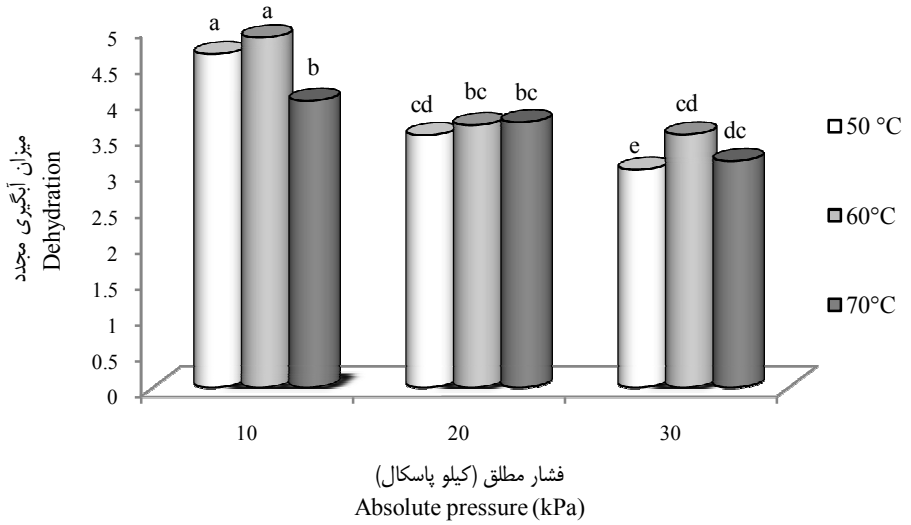
*,** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

با توجه به شکل ۴ می‌توان بیان کرد که رابطه‌ای مستقیم بین آبگیری مجدد و فشار خلأ وجود دارد. یعنی با افزایش خلأ، آب‌گیری مجدد شلغم خشک شده افزایش پیدا می‌کند. دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و خلأ ۱۰ کیلو پاسکال دارای بیشترین و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و خلأ ۳۰ کیلو پاسکال دارای کمترین آبگیری مجدد در شلغم خشک شده می‌باشد. در بررسی اثر سطوح خلأ بر آبگیری مجدد چیلی[1] گزارش شد افزایش فشار خشک کردن از ۱۰ کیلو پاسکال به ۴۰ کیلو پاسکال موجب کاهش چشمگیر آبگیری مجدد می‌گردد (Artnaseaw *et al.,* 2010)، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. آنان با بررسی ریز ساختار علت این امر را کاهش تخلخل در نمونه‌های خشک شده در فشار مطلق بالا عنوان نمودند.

1- Chilli

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٤- تأثیر متقابل دما و خلأ بر آبگیری مجدد

Fig.4. Interaction effect of temperature and vacuum on dehydration

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس اثر دما بر انرژی الکتریکی مصرفی در خشک‌کن هوای داغ

Table 9- ANOVA results for the effect of temperature on energy consumption in hot air dryer

F F-value	میانگین مربعات Mean of square	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
64.66**	66.12	132.25	2	دما Temperature
-----	1.02	6.13	6	خطای آزمایش Error
0.0001**	-----	138.39	8	کل Total

*و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

*, ** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

انرژی الکتریکی مصرفی

تأثیر فاکتور دما بر انرژی الکتریکی مصرفی در خشک‌کن‌ها در جدول‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود اختلاف بین تیمارها در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است، یعنی دما در انرژی الکتریکی مصرفی تأثیر دارد و با افزایش دما انرژی الکتریکی مصرفی در خشک‌کن کاهش می‌یابد که این به‌علت کوتاه‌تر شدن زمان خشک شدن می‌باشد. این نتیجه با نتایج تحقیق (Colak and Hepbasli, 2007) که روی زیتون در خشک‌کن هوای داغ بستر ثابت انجام شد، هم‌خوانی دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت رابطه‌ای معکوس بین دمای خشک‌کن و انرژی الکتریکی مصرفی در این نوع خشک‌کن‌ها وجود دارد. لیکن نتایج این تحقیق با نتایجی تحقیقاتی که روی هویج و سیب زمینی در خشک‌کن هوای داغ نوع بستر متحرک انجام شده هم‌خوانی ندارد و علت آن را می‌توان نوع دستگاه خشک‌کن بیان کرد (Aghbashlo *et al.*, 2009).

در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که بین دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۷۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد دارای کمترین انرژی الکتریکی مصرفی می‌باشند که علت آن را می‌توان به سپری شدن زمان خشک شدن اشاره نمود و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد دارای زمان خشک شدن کمتری نسبت به دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱۰- نتایج مقایسه میانگین‌های انرژی الکتریکی مصرفی در خشک‌کن هوای داغ به روش LSD

Table10- Comparison of energy consumption in hot air drying by LSD method

میانگین Means (kW kg^{-1})	تیمار Treatment
32.26[a]	50
30.50[a]	60
23.77[b]	70

میانگین‌هایی که دارای حرف یا حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means with the same letter or letters are not significantly different.

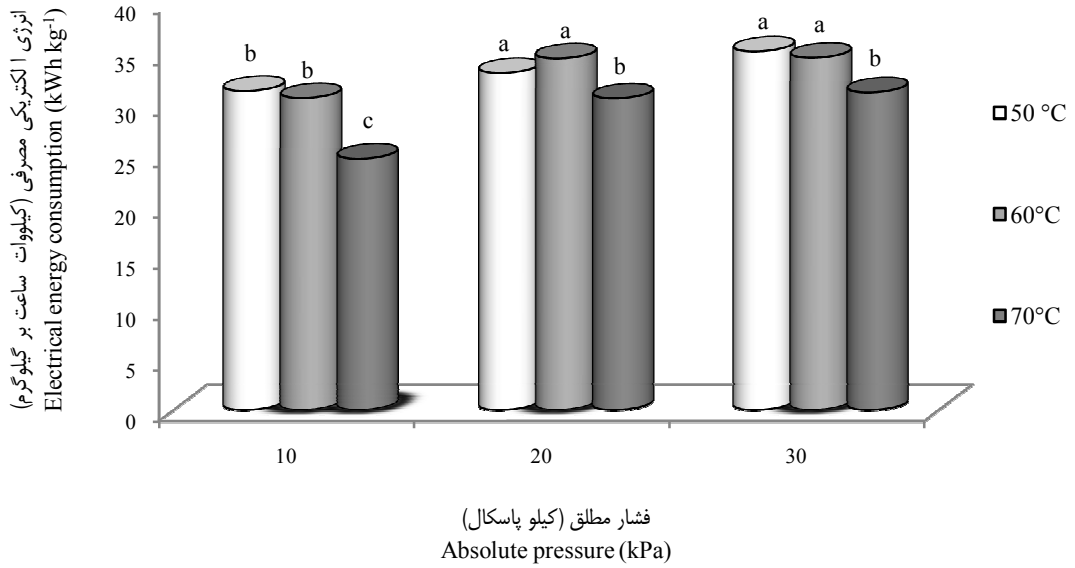
جدول ۱۱- نتایج تجزیه واریانس اثر دما و خلأ بر مصرف انرژی الکتریکی در خشک‌کن خلائی

Table 11- ANOVA results for the effects of temperature and vacuum on energy consumption in vacuum dryer

F F-value	میانگین مربعات Mean of square	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
28.69**	87.42	174.85	2	دما Temperature
28.40**	86.55	173.11	2	خلأ Vacuum
4.11*	12.52	50.11	4	خلأ×دما Temperature× Vacuum
--	3.04	54.58	18	خطا Error
0.0001**	--	452.93	26	کل Total

* و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، ns غیرمعنی‌دار

*,** Significant at 5% and 1% of probability levels, respectively, ns Non. Significant

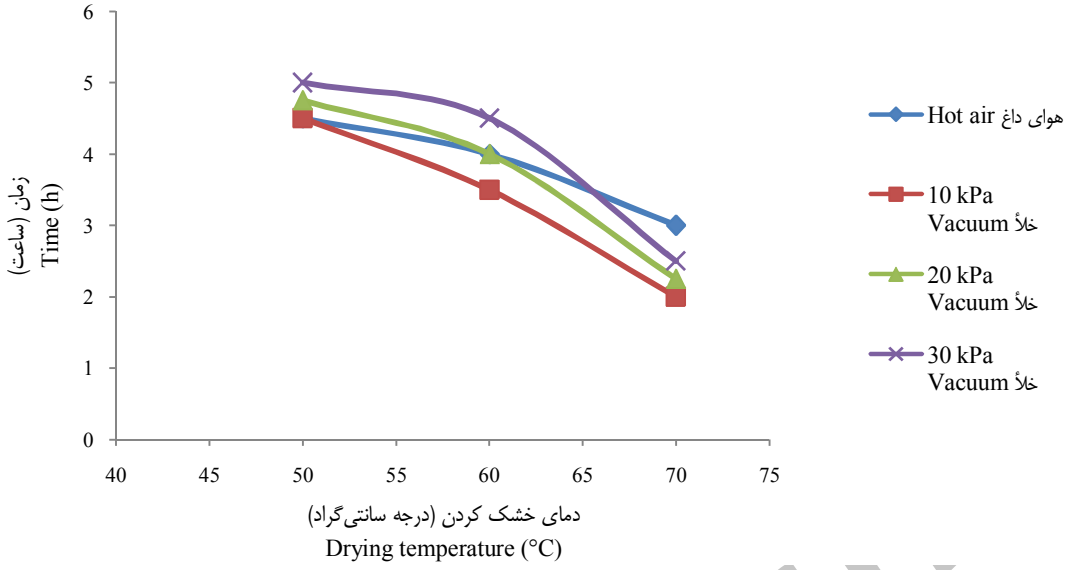


شکل ۵- تأثیر متقابل خلأ و دما بر انرژی الکتریکی مصرفی در هر کیلوگرم ماده خشک

Fig.5. Interaction effects of vacuum and temperature on energy consumption

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٦– نمودار تغییرات زمان مورد نیاز برای خشک کردن شلغم (تا رطوبت ۱۴ درصد) با افزایش دما در خشک‌کن هوای داغ و خلأ

Fig.6. The variation of time required for turnip drying (until moisture content 14%) with increasing temperature in the hot air and the vacuum dryers

همان‌طور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود؛ اثر دما و خلأ بر مصرف انرژی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد پس می‌توان گفت که یک رابطه معکوس بین دما و خلأ با مصرف انرژی الکتریکی وجود دارد. یعنی با افزایش خلأ (از ۳۰ به ۱۰ کیلو پاسکال فشار مطلق) مصرف انرژی الکتریکی کاهش پیدا می‌کند.

همچنین اثر متقابل دما و خلأ در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش خلأ و دما انرژی الکتریکی مصرفی نیز کاهش می‌یابد. کمترین انرژی الکتریکی مصرفی مربوط به خلأ ۱۰ کیلوپاسکال در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با دیگر تیمارها نیز اختلاف معنی‌دار دارد. پس با افزایش دما و افزایش خلأ، انرژی الکتریکی مصرفی کاهش می‌یابد و علت آن نیز مربوط به سپری شدن زمان کمتر می‌باشد چون هر چه دما و خلأ افزایش یابد زمان کمتری برای خشک کردن شلغم نیاز است. در این تحقیق زمان مورد نیاز برای خشک کردن ورقه‌های شلغم از دو ساعت در شرایط خلأ ۱۰ کیلو پاسکال و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا پنج ساعت برای شرایط خلأ ۳۰ کیلو پاسکال و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در خشک‌کن تحت خلأ به‌دست آمد. همان‌طور که در نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش دما در هر دو خشک‌کن هوای داغ و خشک کن خلأ، زمان مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت ۱۴ درصد به شدت کاهش می‌یابد.

همچنین تغییر در فشار مطلق از ۳۰ به ۱۰ کیلو پاسکال موجب کاهش زمان مورد نیاز برای خشک کردن محصول شد لیکن تأثیر آن نسبت به دما کمتر بود.

نتیجه‌گیری

از مقایسه دو دستگاه خشک‌کن هوای داغ و خشک‌کن تحت خلأ، با توجه به اندازه‌گیری متغیرهای وابسته در محصول نهایی و مقایسه میانگین‌ها، این نتیجه حاصل شد که روش خشک کردن تحت خلأ با توجه به داشتن برخی از پارامترهای کیفی بهتر در محصول خشک نهایی از قبیل چروکیدگی کمتر و ظرفیت آبگیری مجدد بیشتر شرایط بهتری را برای خشک کردن این نوع سبزی دارا می‌باشد. بهترین خلأ ۱۰ کیلو پاسکال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که سبب حداکثر کیفیت از لحاظ قابلیت آبگیری مجدد و چروکیدگی در نمونه‌ها گردید. یعنی می‌توان با اعمال حداکثر خلأ و یک دمای متوسط در کوتاه‌ترین زمان به محصولی با بهترین کیفیت، از لحاظ پارامترهای مورد بررسی، دست یافت. فاکتور خلأ باعث شد چروکیدگی نهایی محصول و مصرف انرژی الکتریکی کاهش پیدا کند و نیز آبگیری مجدد در محصول خشک شده افزایش یابد.

منابع

1. Abbasi, S., S. M. Mousavi, and M. Mohebbi. 2011. Investigation of changes in physical properties and

Archive of SID

www.SID.ir

microstructure and mathematical modeling of shrinkage of onion during hot air drying. Iranian Food Science and Technology Research Journal 7: 92-98.
2. Aghbashlo, M., M. H. Kianmehr, and A. Arabhosseini. 2009. Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer. Journal of Food Engineering 91: 99-108.
3. Artnaseaw, A., S. Theerakulpisut, and C. Benjapiyaporn. 2010. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. Biosystems Engineering 105: 130-138.
4. Bondaruk, J., M. Markowski, and W. Błaszczak. 2007. Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. Journal of Food Engineering 81: 306-312.
5. Colak, N., and A. Hepbasli. 2007. Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. Journal of Food Engineering 80: 1188-1193.
6. Coogan, R. C., and R. B. H. Wills. 2002. Effect of drying and salting on the flavour compound of Asian white radish. Food Chemistry 77: 305-307.
7. Cui, Z. W., S. Y. Xu, and D. W. Sun. 2004. Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices. Journal of Food Engineering 65: 157-164.
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2011. FAOSTAT. Available from: http://faostat.fao.org. Accessed 1 September 2013.
9. Kamali, E. 2011. Construction of a laboratory scale vacuum dryer and investigate the possibility of drying kiwifruit. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. (In Farsi).
10. Lee, J. H., and H. J. Kim. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus* L.) slices. LWT - Food Science and Technology 42 (1): 180-186.
11. Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering 48 (2): 177-182.
12. Miranda, M., A. Vega-Galvez, P. Garcia, K. Di Scala, J. Shi, S. Xue, and E. Uribe. 2010. Effect of temperature on structural properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel and Weibull distribution for modelling drying process. Food and Bioproducts Processing 88: 138-144.
13. Mortazavi, S. A. 2004. Dehydration of Foods. Ferdowsi University of Mashhad press. Mashhad. Iran.
14. Schultz, E. L., M. M. Mazzuco, R. A. F. Machado, A. Bolzan, M. B. Quadri, and M. G. N. Quadri. 2007. Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices. Journal of Food Engineering 78: 1103-1110.
15. Suslow, T. 2000. UC Davis Post Harvest Technology Research & Information Center Produce Facts-Apple: Golden Delicious. Department of Plant Sciences. University of California. Available from: http://postharvest.ucdavis.edu/Produce/ProduceFacts/Fruit/golden.shtml. Updated April 1, 2010. Accessed 1 September 2013.
16. Vega-Galvez, A., K. Ah-Hen, M. Chacana, J. Vergara, J. Martinez-Monzo, P. Garcia-Segovia, R. Lemus-Mondaca, and K. Di Scala. 2012. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices. Food Chemistry 132: 51-59.
17. Wang, J., Y. Z. Lia, R. R. Chenb, L. Y. Baoa, and G. M. Yang. 2007. Comparison of volatiles of banana powder dehydrated by vacuum belt drying, freeze-drying and air-drying. Food Chemistry 104: 1516-1521.
18. Wua, L., T. Orikasaa, Y. Ogawab, and A. Tagawa. 2007. Vacuum drying characteristics of eggplants. Journal of Food Engineering 83: 422-429.

Archive of SID

www.SID.ir