



DOI: 10.22034/FR.2021.20743.1459

تخمین چروکیدگی و بازجذب آب در برش‌های سیب خشک شده توسط پرتودهی مادون قرمز به روش حرارت دهی متناوب

حسن صباغی^۱، امان محمد ضیائی‌فر^{۲*} و مهدی کاشانی‌نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۲۱

^۱ دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲ دانشیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۳ استاد گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* مسئول مکاتبه: Email: Ziiaifar@gamil.com

چکیده

زمینه مطالعاتی: پرتودهی متناوب مادون قرمز با ثابت نگه‌داشتن دمای سطحی محصول، یک روش خشک‌کردن نوین در تولید میوه‌ها و سبزیجات آبدایی شده با کیفیت بالا است. هدف: اثر این روش حرارت‌دهی روی خصوصیات کیفی-فیزیکی برش‌های سیب خشک‌شده شامل حجم، دانسیته، چروکیدگی و رفتار بازجذب آب مطالعه شد. روش کار: برش‌های سیب (واریته زرد لبنانی) در سه ضخامت ۵، ۹ و ۱۳ mm و با قطر ۲۰ mm تهیه شدند. عملیات پرتودهی مادون قرمز با روش حرارت‌دهی متناوب در سه دمای ثابت ۷۰، ۷۵ و ۸۰ °C انجام شد. ضریب چروکیدگی محصول با دو روش تئوری (β_{theo}) و عملی (β) تخمین زده شد. همچنین، مدل‌های ریاضی پلگ و نمایی برای توصیف فرآیند بازجذب رطوبت محصول با ضریب همبستگی تصحیح شده ($Adj.R^2$) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مقایسه شدند. **نتایج:** افزایش دما موجب تغییرات بیشتر حجم و دانسیته حین آبدایی سریع محصول شد. تغییر چروکیدگی در محصول طی فرآیند الگوی نمایی افزایشی داشت و تحت تاثیر مقدار آب تبخیر شده بود. ضریب چروکیدگی به طور معنی‌داری در دمای فرآوری بالا و ضخامت بیشتر محصول افزایش یافت (β برابر با ۰/۱۶۴)، که نشان‌دهنده شدت بیشتر پدیده فروپاشی ساختاری در محصول است. محدود شدن ظرفیت بازجذب آب (RC) در برش‌هایی با تنش چروکیدگی بالا، تائیدکننده آسیب بافتی محصول بود (کاهش محتوی رطوبت تعادلی پیش‌بینی‌شده: X_e از ۶/۵۲۳ تا ۴/۱۴۸ بر حسب kg/kg, db). فرآیند بازجذب در ضخامت‌های مختلف نیز توسط مدل پلگ با برازش مطلوب‌تری ($Adj.R^2$ بالاتر و RMSE کمتر) در مقایسه با مدل نمایی توصیف شد. **نتیجه‌گیری نهایی:** شرایط ملایم حرارتی طی پرتودهی مادون قرمز موجب جلوگیری از فروپاشی ساختاری برش‌های سیب (به خصوص در ضخامت کم) شد.

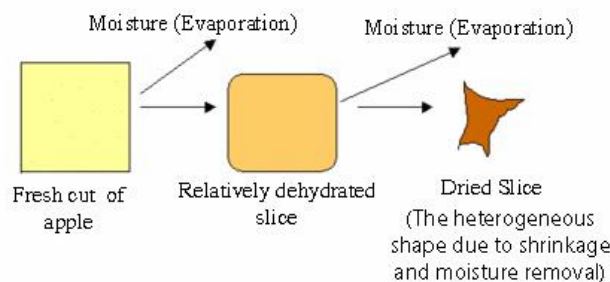
واژگان کلیدی: مادون قرمز، خشک‌کردن، سیب، دانسیته، چروکیدگی، بازجذب آب

مقدمه

تخلخل مواد تاثیر گذاشته و در تخمین خصوصیات انتقال جرم، خصوصیات مکانیکی و بافت محصول مهم است (ویترو-راجچرت و رزاکا ۲۰۰۹). سه پارامتر کیفی درجه چروکیدگی، دانسیته و سفتی محصول با یکدیگر مرتبط هستند (فانبو و همکاران ۲۰۰۰). چروکیدگی و تغییر شکل محصولات غذایی یک پارامتر منفی در کیفیت کلی محصول آبدایی شده است. بنابراین، حداکثر چروکیدگی و فروپاشی ساختاری بایستی کاهش یابد تا خصوصیات کیفی حفظ شود (برزاقی و همکاران ۲۰۰۸). فاکتورهای موثر در میزان چروکیدگی شامل حجم آب خارج شده از محصول، تحرک مکانیکی ماتریس جامد، نرخ خشک کردن و شرایط فرآیند (دما، سرعت جریان هوا، رطوبت نسبی هوا) می‌باشند (موریرا و همکاران ۲۰۰۰). تحرک مکانیکی بافت جامد محصولات غذایی بر پایه گیاهی طی فرآوری تحت تاثیر ماده خشک، نشاسته و ترکیبات سازنده دیواره سلولی است و می‌توان گفت به دلیل ضخامت بالای دیواره سلولی، جدا شدن سلول‌ها حاصل از فشار تبخیر آب بیشتر از متلاشی شدن سلولی است (صباغی و همکاران ۲۰۱۷).

آبدایی میوه‌ها و سبزیجات از عملیات واحد معمول در صنایع غذایی است (فانبو و همکاران ۲۰۰۰). این فرآیند با کاهش فعالیت آبی، موجب حداقل‌سازی تغییرات فیزیکی و شیمیایی طی انبارش می‌گردد (مائور و سرنو ۲۰۰۴). صنعت غذا همواره نیازمند بهره‌گیری از تکنولوژی‌های جدید خشک کردن با هدف بهبود کیفیت محصول نهایی می‌باشد. عملیات همزمان بلانچینگ خشک مادون قرمز و آبدایی (SIRDBD) در میوه‌ها و سبزیجات با روش حرارت‌دهی متناوب فرآیندی نوین است که طی آن دمای سطحی محصول ثابت نگه داشته می‌شود و این امر موجب ذخیره انرژی و بهبود کیفیت محصول نهایی می‌گردد (ژو و پن ۲۰۰۹ و ژو و همکاران ۲۰۱۰).

یکی از مهمترین تغییرات فیزیکی کیفی در مواد غذایی طی خشک کردن، کاهش حجم خارجی است. این تغییر حجم را چروکیدگی می‌گویند و پدیده‌ای غیرقابل اجتناب طی فرآیند خشک کردن است (شکل ۱). چروکیدگی اغلب به صورت نسبت حجم نمونه قبل و بعد از خشک کردن معرفی می‌شود (یان و همکاران ۲۰۰۸). چروکیدگی روی



شکل ۱- چروکیدگی برش سیب طی خشک کردن

Figure 1- Shrinkage of apple slice during drying

شاخص آسیب‌دیدگی بافت مطالعه می‌گردد (گیرالدو و همکاران ۲۰۰۶). فرآیند بازجذب شامل سه مرحله همزمان به صورت جذب آب به داخل بستر خشک، تورم محصول و انتشار ترکیبات محلول است. قابلیت

یکی از پیامدهای مهم چروکیدگی کاهش قابلیت بازجذب آب است. بیشتر محصولات خشک هنگام مصرف در معرض بازجذب آب قرار می‌گیرند (کروکیدا و مارینوس-کوریس ۲۰۰۳). رفتار بازجذب به عنوان

¹ Rehydration capability

تاکنون مطالعه همزمان چروکیدگی و بازجذب آب در برش‌های سیب خشک‌شده با روش پرتودهی متناوب مادون قرمز کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، همچنین مقایسه روش‌های محاسبه ضریب چروکیدگی در محصول نیز انجام شده است و دو مدل ریاضی مختلف در بیان رفتار بازجذب آب، ارزیابی شدند. به طور کلی، تاثیر شرایط فرآیند (دمای سطحی محصول) و شرایط محصول (ضخامت برش) روی تغییرات حجم، دانسیته، چروکیدگی و بازجذب آب محصول بررسی گردید. بدین منظور مطابق پژوهش تالا و همکاران (۲۰۰۴)، فرض شده است که تغییرات حجم با توجه به چروکیدگی محصول، معادل با حجم آب تبخیر شده از محصول خواهد بود و محصول از یک ساختار جامد [دانسیته (ρ_d) و حجم (V_d)] و منافذ اشغال شده با آب [دانسیته (ρ_w) و حجم (V_w)] تشکیل شده است.

مواد و روش‌ها

آماده سازی برش‌های سیب

سیب واریته زرد لبنانی (*Golden delicious*) از بازار محلی در استان گلستان (شهرستان گرگان) تهیه گردید و مطابق روش آکیودو و همکاران (۲۰۰۸) در دمای $^{\circ}\text{C}$ 1 ± 0 و رطوبت نسبی ۹۰-۹۵ درصد نگهداری شد. نمونه‌ها پس از پوست‌گیری در سه اندازه به صورت برش‌هایی با ضخامت ۵، ۹ و ۱۳ mm و با قطر ۲۰ mm توسط کاتر آماده شدند. میانگین محتوی رطوبت سیب توسط آون (Binder FD53) با دمای $^{\circ}\text{C}$ ۱۰۳ به مدت ۲۴ ساعت برابر با 84 ± 1 درصد بر مبنای وزن مرطوب اندازه‌گیری شد (AOAC ۲۰۰۰).

ظرفیت بازجذب (RA) به صورت توانایی محصول خشک برای جذب مجدد آب تا حد اشباع‌شدگی تعریف می‌گردد (مالدونادو و همکاران ۲۰۱۰). مدل‌های ریاضی بازجذب در طراحی و بهینه‌سازی این عملیات مفید خواهند بود که به صورت مدل‌های نمایی یا تئوری جذب مؤئینگی یا قوانین انتشار فیک^۲ به کار رفته‌اند (لی و همکاران ۲۰۰۶).

تیمومی و همکاران (۲۰۰۷) تاثیر دمای خشک‌کردن مادون قرمز را روی چروکیدگی برش‌های سیب بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، چروکیدگی مداوم در رطوبت معادل ۲ کیلوگرم بر کیلوگرم ماده خشک متوقف شد و با ادامه خشک‌شدن چروکیدگی با شیب کمی تغییر کرد. ویتروا-راجرت و رزاکا (۲۰۰۹) تاثیر روش خشک‌کردن (جابه‌جایی، جابه‌جایی-میکروویو، جابه‌جایی-مادون قرمز) را روی خصوصیات ساختاری سیب مانند چگالی و چروکیدگی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نمونه‌های خشک شده با کمک روش میکروویو و مادون قرمز ۱۲-۱۱ درصد چروکیدگی کمتری در مقایسه با روش جابه‌جایی دارند. همچنین، ریز و همکاران (۲۰۱۱) رفتار خشک‌شدن سیب را در روش خشک‌کردن انجمادی تحت خلاء و تحت شرایط اتمسفری بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که بازجذب آب در نمونه‌های خشک‌شده در شرایط خلاء با هم اختلاف معنی‌دار ندارد، در حالی که در شرایط اتمسفری اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها مشاهده کردند. پردون و همکاران (۲۰۰۱) رفتار بازجذب سیب آبدایی شده با روش ترکیبی اسمز و میکروویو را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ظرفیت بازجذب آب برای نمونه‌های فاقد تیمار اسمزی بیشتر است، زیرا نمونه‌های تحت تیمار اسمزی تخلخل کمتری به دلیل نفوذ محلول شکر دارند.

¹ Rehydration ability or capacity

² Fick's diffusion laws

برش‌های سیب بلافاصله وارد عملیات همزمان بلانچینگ و خشک‌کردن مادون‌قرمز شد. جهت انجام آزمایش، عملیات پرتودهی متناوب در سه دمای سطحی ثابت برابر با ۷۵، ۷۰ و ۸۰ °C انجام شد. برش‌های سیب پس از توزین اولیه در داخل خشک‌کن قرار گرفت و جهت سنجش تغییرات حجم و وزن، با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه از خشک‌کن خارج شدند. محدوده حداکثر زمان فرآیند برای دماها و ضخامت‌های آزمون تا رسیدن به وزن ثابت در جدول ۱ ذکر شده است

جدول ۱- زمان تقریبی فرآیند برای تیمارهای مختلف تا دستیابی به وزن ثابت

Table 1- Approximate process time for different treatments to achieve constant weight

Thickness (mm)	Temperature (°C)	Time (min)
5	70	195
	75	165
	80	135
9	70	300
	75	240
	80	210
13	70	390
	75	300
	80	255

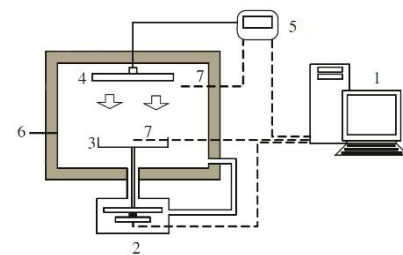
$$V = V_f - \frac{M_s}{\rho_s} \quad 1$$

$$V_r = \frac{V}{V_0} \quad 2$$

است. نسبت حجم کاهش‌یافته (V_f) برای نمونه‌ها نیز مطابق رابطه ۲ محاسبه شد که معادل نسبت چروکیدگی توده‌ای نیز می‌باشد. V_0 متوسط حجم اولیه نمونه است.

تخمین دانسیته

به منظور تخمین دانسیته نمونه‌ها (ρ)، مشابه مائور و سرنو (۲۰۰۴) از طریق تقسیم جرم (m) به حجم (V) مطابق با رابطه ۳ عمل شد. نسبت دانسیته کاهش‌یافته^۱ (ρ_f) نیز مطابق رابطه ۴ محاسبه شد. ρ_0 دانسیته نمونه



شکل ۲- سیستم خشک‌کن مادون‌قرمز و لوازم آن، (۱) کامپیوتر (۲) ترازو (۳) سینی نمونه (۴) تابش‌کننده سرمایی مادون‌قرمز با توان ۱۰۰۰ وات (۵) کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر یا PLC (۶) محفظه خشک‌کن (۷) ترموکوپل‌ها

Figure 2- Infrared dryer system and accessories, (1) Computer (2) Balance (3) Sample tray (4) Infrared ceramic radiator with power of 1000 Watt (5) Programmable Logic Controller or PLC (6) Dryer chamber (7) Thermocouples

سیستم آنزیم‌بر و خشک‌کن مادون قرمز

شکل ۲ اجزای دستگاه خشک‌کن اتوماتیک را مشابه سیستم لیو و همکاران (۲۰۱۴) نشان می‌دهد که توسط نویسندگان ساخته شد. این سیستم قابلیت مانیتورینگ وزن و کنترل دما را طی پرتودهی دارد. دمای سطحی نمونه در محفظه خشک‌کن به طور مداوم با استفاده از ترموکوپل نوع K و کنترل‌کننده منطقی برنامه‌پذیر یا PLC کنترل می‌گردد.

عملیات پرتودهی متناوب مادون قرمز

اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها

محاسبه حجم نمونه‌ها با روش جابجایی آب با اندازه‌گیری اختلاف وزن آب موجود در یک فلاسک ۱۵۰ میلی‌لیتری در حضور و غیاب نمونه انجام شد. پس از توزین، نمونه‌های خشک‌شده به منظور جلوگیری از جذب آب با پارافین پوشانیده شد و در فلاسک قرار گرفت. مشابه یان و همکاران (۲۰۰۸) حجم نمونه از رابطه ۱ قابل محاسبه است. در این معادله، V حجم نمونه (cm^3)، V_f حجم فلاسک (cm^3)، M_s جرم حلال (gr) اضافه شده به فلاسک و ρ_s دانسیته حلال (1 gr/cm^3)

¹ Reduced density

تخمین بازجذب آب

بازجذب آب مطابق روش پردون و همکاران (۲۰۰۱) در دمای اتاق (۲۰ °C) برای نمونه‌های خشک‌شده سیب بررسی شد. نمونه کاملاً خشک‌شده پس از توزین (W_d) به یک بشر حاوی ۲۰۰ mm آب مقطر منتقل شد. نمونه تا زمان اشباع‌شدگی از آب (رسیدن به وزن ثابت) با فاصله زمانی ۵ دقیقه بعد از جداسازی رطوبت سطحی توسط جاذب، توزین گردید (W_r). مطابق فانبو و همکاران (۲۰۰۰) نرخ بازجذب یا ظرفیت بازجذب (RC) از رابطه ۹ محاسبه شد.

$$RC = \frac{W_r}{W_d} \quad 9$$

مدلسازی سینتیک بازجذب آب

به منظور توصیف سینتیک بازجذب، از دو مدل ریاضی استفاده شد. مدل اول مطابق ریز و همکاران (۲۰۱۱) معادله پلگ نام دارد و به صورت رابطه ۱۰ بیان می‌گردد. در این رابطه k_1 و k_2 ثابت‌های مدل، t زمان X_t (min)، رطوبت در زمان t برحسب (kg/kg, db) است که برابر تغییرات وزن نمونه طی بازجذب آب است و X_i رطوبت نمونه قبل از غوطه‌وری در آب می‌باشد. برآزش در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۰۹ انجام شد.

$$X_t = X_i + \frac{t}{(k_1 + k_2 \cdot t)} \quad 10$$

مدل دوم، به صورت مدل سینتیکی درجه یک نمایی مطابق کروکیدا و مارینوس-کوریس (۲۰۰۳) به صورت رابطه ۱۱ برآزش شد. در این رابطه X_e محتوی تعادلی^۳ رطوبت بازجذب شده برحسب (kg/kg, db) است و به صورت غلظت آب در شرایط اشباع بیان می‌گردد. k_r ثابت سینتیکی مدل است.

$$X_t = X_e - (X_e - X_i)e^{-k_r t} \quad 11$$

قبل از فرآوری است. واحد دانسیته برحسب (gr/cm^3) در نظر گرفته شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 3$$

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad 4$$

درصد چروکیدگی

محاسبه درصد چروکیدگی (S)، مطابق تران و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از رابطه ۵ انجام شد و تغییرات آن طی زمان فرآیند بررسی شد.

$$S = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 = (1 - V_r) \times 100 \quad 5$$

تخمین ضریب چروکیدگی تئوری

به منظور تخمین ضریب چروکیدگی تئوری (β_{theo})، مطابق با تالا و همکاران (۲۰۰۴)، از برآزش رابطه ۶ روی داده‌های تجربی نسبت حجم کاهش یافته (V_r) در برابر رطوبت تبخیر شده ($X_0 - X_t$) در نرم افزار متلب استفاده شد. در این مدل X_0 متوسط رطوبت اولیه در زمان صفر و X_t متوسط رطوبت در زمان t برحسب (kg/kg, db) می‌باشد.

$$V_r = 1 - \beta_{\text{theo}}(X_0 - X_t) \quad 6$$

تخمین ضریب چروکیدگی عملی

بدین منظور، ابتدا برای هریک از نمونه‌های آزمایشی در هر زمان، مقدار ضریب چروکیدگی (β_i) براساس رابطه ۷ و مطابق با تالا و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه شد. سپس مطابق رابطه ۸ ضریب چروکیدگی عملی (β) برای هر دما و ضخامت محاسبه گردید. نمایه i نشان‌دهنده نمونه آزمایشی است و n تعداد کل نمونه‌های مورد استفاده در هر دما می‌باشد.

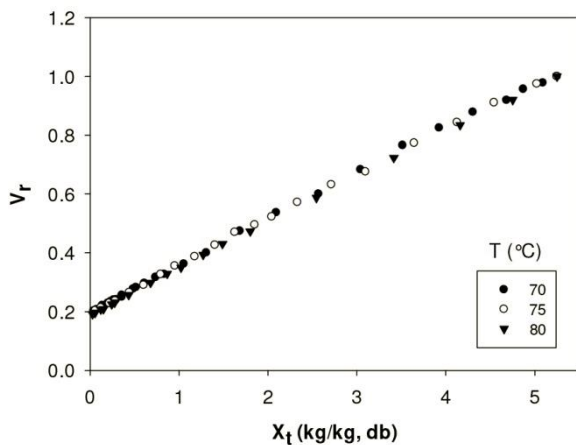
$$\beta = \frac{1 - V_r}{X_{0i} - X_{ti}} \quad 7$$

$$\beta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \beta_i \quad 8$$

² Peleg

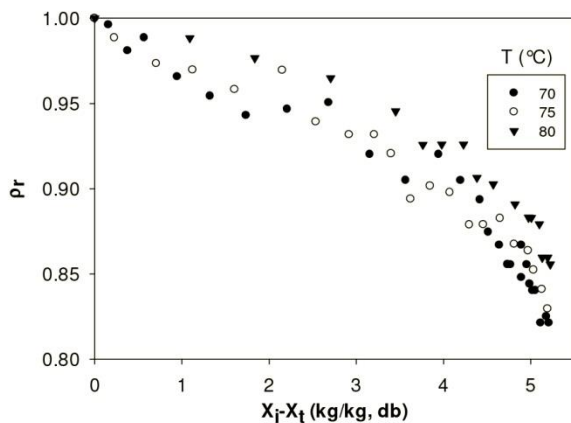
³ Equilibrium

¹ MATLAB



شکل ۳- ارتباط نسبت حجم کاهش یافته در برابر رطوبت لحظه‌ای در دماهای سطحی مختلف طی پرتودهی مادون قرمز (۱۳ میلی‌متر)

Figure 3- Relationship of the ratio of reduced volume vs. instantaneous moisture at different surface temperatures during infrared irradiation (13 mm)



شکل ۴- ارتباط دانسیته کاهش یافته برش‌های سیب در برابر رطوبت تبخیر شده در دماهای سطحی مختلف طی پرتودهی مادون قرمز (۱۳ میلی‌متر)

Figure 4- Relationship of reduced density of apple slices vs. evaporated moisture at different surface temperatures during infrared irradiation (13 mm)

شکل (۴) تغییرات دانسیته کاهش یافته (ρ_r) را در برابر رطوبت تبخیر شده از محصول ($X_0 - X_t$) نشان می‌دهد. با افزایش تبخیر آب از محصول، نمونه‌ها میزان دانسیته کمتر و نزدیک‌تری را به یکدیگر نشان داد. این نتایج با گزارش ویتروا-راجرت و رزاکا (۲۰۰۹) سازگار است

جهت ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، از ضریب همبستگی تصحیح شده ($Adj.R^2$) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب مطابق رابطه ۱۲ و رابطه ۱۳ استفاده شد. در این روابط، O و P به ترتیب مقدار مشاهده شده و مقدار پیش بینی شده است. n تعداد مشاهده و p تعداد پارامترهای مدل می‌باشد.

$$Adj.R^2 = R^2 - \frac{p-1}{n-p} (1 - R^2) \quad 12$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(O-p)^2}{n-p}} \quad 13$$

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری اثر ضخامت و دما روی میزان ضرایب چروکیدگی (β , β_{theo}) در نرم افزار SPSS نسخه ۱۹ انجام شد. بدین منظور از طرح کاملاً تصادفی (CRD) در قالب فاکتوریل، با دو فاکتور ضخامت (در سه سطح) و دما (در سه سطح) استفاده گردید. همچنین دو روش محاسبه ضریب چروکیدگی (تئوری و عملی) با آزمون F یک طرفه با هم مقایسه شد. مقایسه میانگین به صورت آزمون دانکن با سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P < 0.05$) انجام گرفت. کلیه آزمایشات در سه تکرار انجام شد.

نتایج و بحث

تغییرات حجم و دانسیته محصول

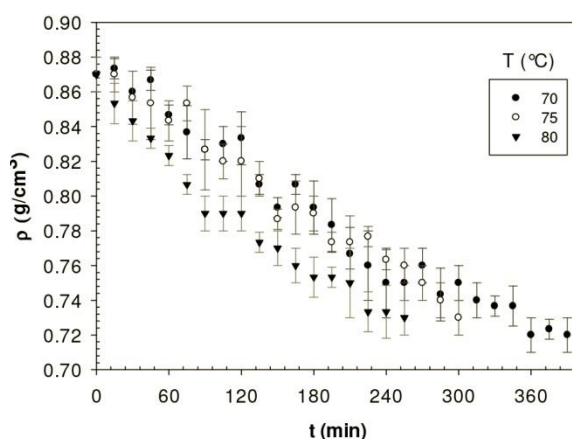
شکل (۳) رابطه میان نسبت حجم کاهش یافته (V_r) و محتوی رطوبت محصول را برای یک ضخامت خاص در دماهای مختلف آزمون نشان می‌دهد. در ضخامت‌های مختلف، رابطه خطی میان این دو پارامتر مشاهده شد. تالا و همکاران (۲۰۰۴) بیان کردند که حجم محصول رابطه مستقیم با محتوی رطوبت آن در دماهای مختلف داشت و در محتوی رطوبت پایین، همگرایی (انطباق کامل منحنی‌ها با یکدیگر) منحنی‌های تجربی نشان‌دهنده حجم مواد جامد محصول می‌باشد.

تغییرات چروکیدگی طی زمان خشک کردن

شکل (۶) تغییرات درصد چروکیدگی برش‌های سیب را طی زمان پرتودهی مادون قرمز نشان می‌دهد. تغییرات چروکیدگی محصول طی فرآیند از یک الگوی نمایی افزایشی پیروی کرد. با افزایش ضخامت محصول، میزان نهایی درصد چروکیدگی محصول بیشتر بود (کاهش V_r) و تغییرات چروکیدگی در دماهای بالای فرآیند نیز سریع‌تر اتفاق افتاد. مطابق گزارش مائور و سرنو (۲۰۰۴)، حرارت‌دهی و خروج رطوبت از ماتریس غذایی منجر به ایجاد تنش در ساختار سلولی می‌شود که این امر موجب کاهش ابعاد محصول و انقباض ساختار موئینگی می‌گردد. نواک و لویکی (۲۰۰۵) از نمودارهای بافت سنجی نتیجه گرفتند که در دمای بالا تبخیر آب سریع‌تر است و تحت این شرایط تنش چروکیدگی بزرگی ایجاد می‌شود. کاتاکاوا و سیلوا (۲۰۰۶) بیان کردند که نرخ چروکیدگی به طور معنی‌داری با افزایش سختی محصول (خشک شدن محصول) کاهش یافت. همچنین بیان کردند که چروکیدگی مواد غذایی با کاهش محتوی رطوبت افزایش یافت که به معنی کاهش نسبت حجمی (V_r) است. نواک و لویکی (۲۰۰۴) بیان کردند طی خشک شدن مادون قرمز چروکیدگی سطحی محصول تحت تاثیر مقدار آب تبخیرشده نیز قرار گرفت. صباغی و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که شدت زیاد تبخیر آب برش سیب (در شرایط: دمای بالا یا ضخامت زیاد یا سطح رطوبت نهایی پایین) طی خشک کردن می‌تواند موجب بروز تنش چروکیدگی بیشتری در بافت آن گردد و در نتیجه محصول نهایی دارای پذیرش کیفی کمتری خواهد بود.

(در شکل ۳ و ۴، انحراف معیار با هدف نمایش واضح‌تر روند تغییرات نمایش داده نشد).

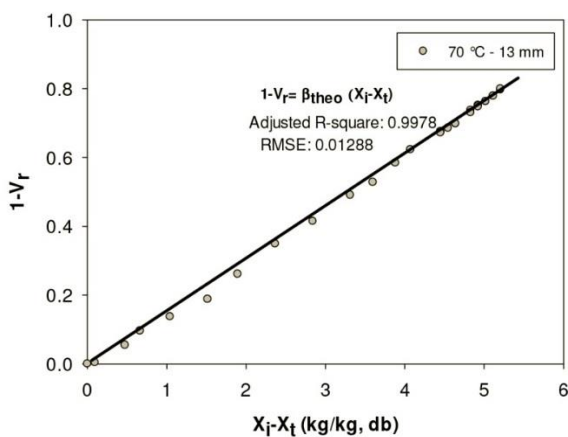
در نهایت، شکل (۵) تغییرات دانسیته را برای نمونه‌های آزمایشی طی خشک کردن به همراه انحراف معیار نشان می‌دهد. شدت تغییرات دانسیته برای محصول نازک بیشتر بود (کاهش دانسیته نهایی تا حدود ۰/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب). در حالی که برای محصولات ضخیم تغییرات دانسیته طی فرآیند با روند کندتری صورت گرفت (کاهش دانسیته نهایی تا حدود ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب). در پژوهش‌ها، تاثیر ضخامت روی تغییرات دانسیته بررسی نشده است، اما با توجه به این که ضخامت نازک سریع‌تر خشک می‌شود؛ ویترو-راجچرت و رزاکا (۲۰۰۹) گزارش کردند که تغییرات دانسیته حین خشک شدن سریع محصول، بیشتر خواهد بود. فانبو و همکاران (۲۰۰) بیان کردند که با افزایش دمای فرآوری دانسیته برش‌های سیب کاهش یافت. آن‌ها افزایش دانسیته نمونه‌های فرآوری شده در دمای پایین را به زیاد شدن زمان فرآوری و کند شدن شدت تبخیر آب نسبت دادند.



شکل ۵- تغییرات دانسیته برش‌های سیب طی زمان خشک کردن مادون قرمز در دماهای مختلف آزمون (۱۳ میلی‌متر)

Figure 5- Density changes of apple slices during infrared drying at different test temperatures (13 mm)

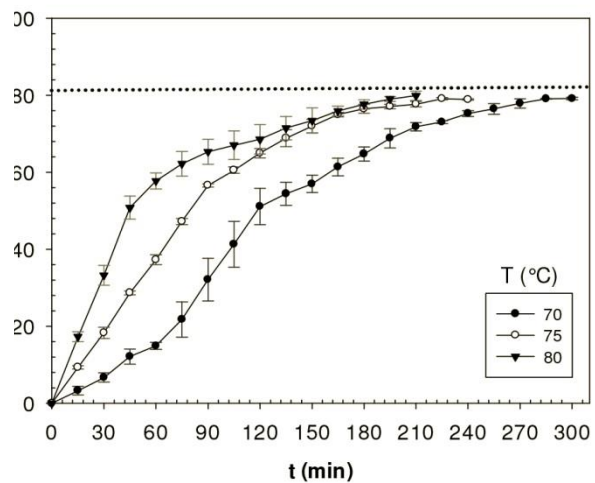
(۷۵)، به خصوص اگر محصول در شرایط لاستیکی در سطح رطوبتی بالا باشد. در محتوی رطوبت پایین، دمای انتقال شیشه‌ای افزایش یافت و این امر موجب انتقال فاز از حالت لاستیکی به شیشه‌ای شد. با افزایش ضخامت نیز به طور معنی‌داری ضریب چروکیدگی افزایش یافت. تفاوت میان دو روش محاسبه نیز معنی‌دار بود و با افزایش دما اختلاف محاسبه بیشتر شد (بیش از ۶ درصد). جانوت و همکاران (۲۰۰۲) نیز بروز خطا در روش عملی را ناشی از اغتشاش در داده‌های تجربی (انحراف از مقدار واقعی) دانستند.



شکل ۷- برازش معادله خطی روی داده‌های تجربی برای

محاسبه ضریب چروکیدگی تئوری

Figure 7- Fitting the linear equation on the experimental data to calculate the theoretical shrinkage coefficient



شکل ۶- درصد چروکیدگی برش‌های سیب طی زمان

خشک‌کردن در دماهای مختلف آزمون (۹ میلی‌متر)

Figure 6- Percentage of shrinkage for apple slices during drying at different test temperatures (9 mm)

ضریب چروکیدگی محصول

شکل (۷) نحوه محاسبه ضریب چروکیدگی تئوری را برای یکی از نمونه‌های تحت تیمار نشان می‌دهد. جدول (۲) ضریب چروکیدگی محاسبه شده تئوری و عملی را به همراه مقایسه آماری نشان می‌دهد. جدول ANOVA نیز برای تجزیه و تحلیل‌های آماری در جدول (۳) نشان داده شده است. دمای ۸۰ °C به طور معنی‌داری نسبت به دو دمای دیگر مورد آزمون ضریب چروکیدگی تئوری و عملی بالاتری نشان داد ($P < 0.05$). تالا و همکاران (۲۰۰۴) بیان کردند که دمای خشک‌کردن به تنهایی تاثیر معنی‌داری روی چروکیدگی ندارد (۷۰ و ۸۰ °C).

جدول ۲- مقایسه ضریب چروکیدگی تئوری و عملی در دماها و ضخامت‌های مختلف آزمون ($P < 0.05$)Table 2- Comparison of theoretical and practical shrinkage coefficient at different test temperatures and thicknesses ($P < 0.05$)

Thickness (mm)	Temperature (°C)	Shrinkage coefficient		$ \beta - \beta_{theo} $	$ \beta - \beta_{theo} /\beta$ (%)
		β_{theo}	β		
5	70	0.140±0.001 ^{Bcy}	0.142±0.002 ^{Bba}	0.002±0.001	1.576±0.952
	75	0.137±0.004 ^{Bcy}	0.137±0.006 ^{Bba}	0.002±0.0003	1.950±0.324
	80	0.143±0.002 ^{Acy}	0.153±0.002 ^{Abα}	0.01±0.004	6.658±2.609
9	70	0.149±0.001 ^{Bby}	0.149±0.003 ^{Baa}	0.001±0.0009	1.104±0.667
	75	0.149±0.00005 ^{Bby}	0.155±0.001 ^{Baa}	0.005±0.001	3.579±0.847
	80	0.151±0.001 ^{Abγ}	0.161±0.001 ^{Aaa}	0.01±0.0004	6.266±0.215
13	70	0.151±0.0009 ^{Bay}	0.156±0.004 ^{Baa}	0.004±0.004	2.910±2.516
	75	0.151±0.001 ^{Bay}	0.153±0.001 ^{Baa}	0.002±0.0007	1.702±0.458
	80	0.154±0.002 ^{Aaγ}	0.164±0.004 ^{Aaa}	0.01±0.003	6.257±1.657

* Upper case letters are comparisons between test temperatures (rows).

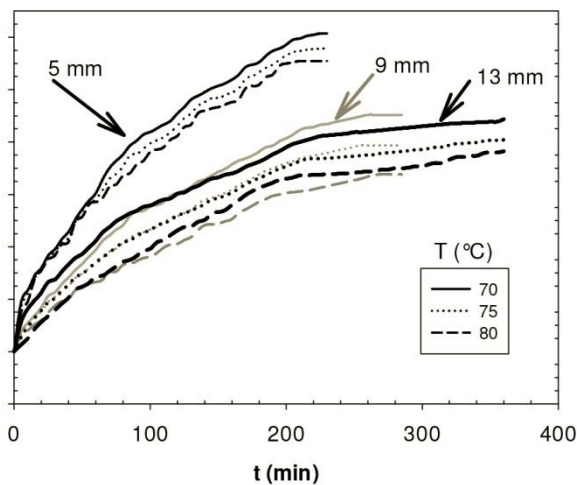
* Lower case letters are comparisons between slices thickness (rows).

* Greek letters show comparisons between methods of calculating the shrinkage coefficient (columns).

* Identical letters indicate no significant difference ($P < 0.05$).

جدول ۳- جدول ANOVA برای مقایسه تاثیر دما و ضخامت روی ضریب چروکیدگی و روش تخمین ($P < 0.05$)Table 3- ANOVA table for comparison of the effect of temperature and thickness on the shrinkage coefficient and estimation Method ($P < 0.05$)

Shrinkage coefficient	Treatment	Sum of Square (SS)	Degree of Freedom (df)	Mean of Square (MS)	F	Significance (sig.)
β_{theo}	Model	0.588	9	0.065	18002.035	0.0000
	Temperature	6.24×10^{-5}	2	3.12×10^{-5}	8.593	0.002
	Thickness	0.001	2	0.0000	98.304	0.0000
	Temperature× Thickness	2.2×10^{-5}	4	5.501×10^{-6}	1.515	0.240
	Error	6.535×10^{-5}	18	3.631×10^{-6}		
	Total	0.588	27			
β	Model	0.630	9	0.07	5884.575	0.0000
	Temperature	0.001	2	0.0000	29.127	0.0000
	Thickness	0.001	2	0.0000	38.128	0.0000
	Temperature× Thickness	0.0000	4	3.132×10^{-5}	2.632	0.069
	Error	0.0000	18	1.190×10^{-5}		
	Total	0.631	27			
Estimation Method (one-way F test)	Between Groups	0.0000	1	0.000	6.453	0.014
	Within Groups	0.003	52	0.000		
	Total	0.003	53			



شکل ۸- ظرفیت بازجذب رطوبت برای ضخامت‌ها و دماهای مختلف آزمون طی زمان غوطه‌وری در آب
Figure 8- Moisture rehydration capacity for different thicknesses and temperatures of test during water immersion

مدل‌سازی بازجذب

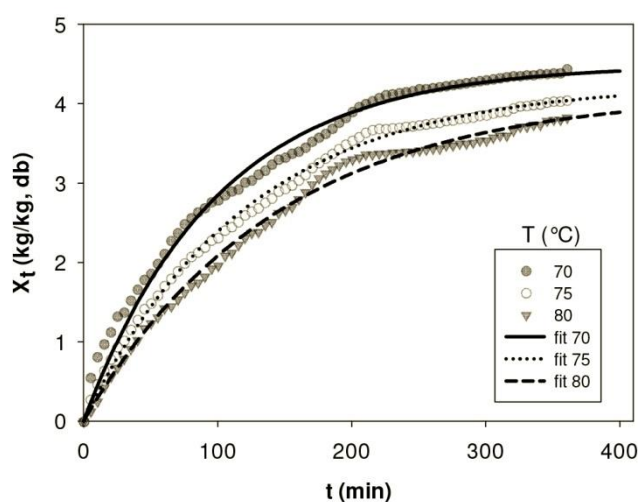
شکل (۹) برازش مدل نمایی را روی تغییرات رطوبت محصول طی زمان بازجذب آب نشان می‌دهد. نتایج حاصل از برازش مدل‌های پلگ و نمایی به ترتیب در جدول (۴) و جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، هر دو مدل برازش نسبتاً مناسبی داشتند اما در مجموع مدل پلگ با ضریب همبستگی تصحیح شده ($Adj.R^2$) بالاتر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر برازش مطلوب‌تری را نشان داد ($Adj.R^2$ بالای ۰/۹۹ در مدل پلگ). همچنین مدل پلگ تحت تاثیر الگوی رفتار بازجذب در ضخامت‌های مختلف قرار نگرفت (عدم کاهش ضریب همبستگی در ضخامت بالا). در مدل نمایی، محتوی رطوبت تعادلی پیش‌بینی شده (X_e) برای ضخامت‌های کمتر و همچنین دمای پایین خشک‌کردن بیشتر است (ظرفیت بازجذب بالاتر) که با مشاهدات مربوط به ضریب چروکیدگی مطابقت داشت. کروکیدا و مارینوس-کوریس (۲۰۰۳) ارتباط درجه مطلوب بازجذب آب در مدل را با میزان تخریب ساختاری و سلولی محصول معکوس گزارش

بازجذب آب در برش سیب

شکل (۸) تغییرات ظرفیت بازجذب آب توسط برش‌های سیب خشک‌شده را طی غوطه‌وری در آب برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با کاهش ضخامت و کاهش دما، ظرفیت بازجذب آب محصول افزایش یافت که همبستگی مشابهی با مشاهدات ضریب چروکیدگی عملی نشان می‌دهد. در همین راستا، گاون و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که هرچه قدر ساختار محصول طی خشک‌کردن حفظ شود بازجذب بیشتر است. مالدونادو و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که طی باز جذب آب، جذب آب در مراحل اولیه سریع است و سپس کاهش چشم‌گیری در نرخ جذب آب با رسیدن محتوی رطوبت محصول به سطح تعادلی مشاهده شد. در نزدیکی محدوده تعادلی، آب به میزان قابل توجهی خلل و فرج محصول را پر می‌کند و درصد قابل توجهی از محتوی رطوبت اولیه محصول بازیابی شده است. همان‌طور که مشخص است ضخامت روی نرخ بازجذب آب موثر است. در همین راستا، ریز و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند، ضخامت محصول موجب کند شدن فرآیند بازجذب آب شد. پردون و همکاران (۲۰۰۱) دماهای بالاتر خشک‌کردن را عامل اختلال در بازجذب آب دانستند. مسکان (۲۰۰۱) بیان کرد که ساختار بافتی با چروکیدگی کمتر دارای ظرفیت بازجذب آب بالاتری است. اشتیاقی و همکاران (۱۹۹۴) بیان کردند متلاشی‌شدن ساختار سلولی طی خشک‌کردن غیر قابل بازگشت است (چروکیدگی در در ضخامت بالای برش سیب و دمای خشک‌کردن بالا= کاهش پتانسیل بازجذب کامل آب). صباغی و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که با افزایش ضخامت به دلیل چروکیدگی از مطلوبیت کلی برش‌های سیب کاسته شد. همچنین آن‌ها بیان کردند که در دمای بالا یا ضخامت بالا شدت تبخیر آب افزایش می‌یابد و بافت برش‌ها در مقایسه با نمونه‌هایی که به آرامی خشک شدند، بیشتر دچار آسیب خواهد شد.

فاز آب از مایع به بخار می‌شود. یک نقش آب دریافت انرژی حرارتی و انتقال آن به ماده غذایی است و نقش دیگر آب در پخت مواد غذایی گیاهی تاثیر بر پلی‌ساکاریدهای ساختاری آن است. در واقع باید انرژی حرارتی کافی به آب منتقل شود اما نباید موجب تبخیر شدید آب از بافت گیاهی گردد، زیرا این امر منجر به فروپاشی ساختمان داخلی ماده غذایی می‌شود.

کردند. ناتاکاراناکول و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان کردند که زمان طولانی‌تر خشک‌کردن باعث افزایش درصد بازجذب آب خواهد شد. آن‌ها کاربرد پرتودهی ملایم را عامل توسعه مطلوب حفرات در داخل محصول دانستند. صباغی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که طی فرآوری حرارتی درجه حرارت غذا فقط در حدود 100°C است که مطابق با نقطه جوش آب در ماده غذایی تحت شرایط فشار اتمسفری می‌باشد و گرمای اضافی صرف تغییر



شکل ۹- برازش مدل روی تغییرات رطوبتی محصول خشک‌شده در دماهای مختلف طی غوطه‌وری و بازجذب آب (۱۳ میلی‌متر) مدل پلگ و مدل نمایی روی هم تقریباً منطبق بودند و اختلاف ظاهری بسیار جزئی بود

Figure 9- Model fit on moisture changes of the dried product at different temperatures during water immersion and rehydration (13 mm)

The Peleg model and the exponential model were nearly identical and the differences were very slight

جدول ۴- برازش مدل پلگ روی داده‌های بازجذب آب برش‌های سیب در شرایط مختلف آزمون

Table 4- Fitting the Peleg model on rehydration data of apple slices under different test conditions

Thickness (mm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Model Parameters		Adj.R ²	RMSE
		k ₁	k ₂		
5	70	12.44	0.1112	0.992	0.145
	75	13.12	0.1157	0.9913	0.1444
	80	13.78	0.1193	0.99	0.1494
9	70	22.57	0.1357	0.9974	0.06615
	75	26.37	0.1529	0.996	0.07093
	80	35.48	0.1636	0.9942	0.07361
13	70	17.57	0.1742	0.9924	0.09781
	75	24.13	0.1749	0.9951	0.07738
	80	30.65	0.1717	0.991	0.103

جدول ۵- برآزش مدل نمایی روی داده‌های بازجذب آب برش‌های سیب در شرایط مختلف آزمون

Table 5- Fitting the exponential model on rehydration data of apple slices under different test conditions

Thickness (mm)	Temperature (°C)	Model Parameters		Adj.R ²	RMSE
		k _r	X _e		
5	70	0.011	6.523	0.987	0.184
	75	0.011	6.267	0.986	0.184
	80	0.010	6.069	0.984	0.189
9	70	0.008	5.168	0.996	0.080
	75	0.007	4.567	0.995	0.082
	80	0.006	4.126	0.993	0.080
13	70	0.010	4.493	0.986	0.133
	75	0.008	4.258	0.996	0.071
	80	0.007	4.148	0.994	0.081

نتیجه گیری

کاملاً تحت تاثیر ساختار و خصوصیات بافتی محصول خشک‌شده قرار دارد. بنابراین شرایط ملایم حرارتی موجب جلوگیری از فروپاشی ساختاری برش‌های سیب شد و در ضخامت‌های کم نیز به دلیل کاهش حجم آب تبخیرشده از محصول، ضریب چروکیدگی کمتر بود و این امر منجر به حفظ ساختار فیزیکی داخلی محصول گردید.

خصوصیات فیزیکی شامل چروکیدگی و دانسیته در محصول خشک‌شده تحت تاثیر شرایط فرآیند و شرایط محصول می‌باشند. پایین بودن مقدار چروکیدگی که نشان‌دهنده حفظ ساختار داخلی محصول است در چگونگی رفتار بازجذب آب موثر خواهد بود. در واقع، بازجذب را نمی‌توان به سادگی به صورت فرآیند بازگشت آبدزایی تعریف کرد. زیرا جذب مجدد رطوبت

منابع مورد استفاده

- Acevedo NC, Briones V, Buera P, and Aguilera JM, 2008. Microstructure affects the rate of chemical, physical and color changes during storage of dried apple discs. *Journal of Food Engineering* 85(2): 222-231.
- AOAC, 2000. Official methods of analysis. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, Unites States.
- Barzaghi S, Gobbi S, Torreggiani D, Tornielli C, and Giangiacomo R, 2008. Near infrared spectroscopy for the control of osmo-air dehydrated apple rings. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 16(3): 143-149.
- Eshtiaghi M, Stute R, and Knorr D, 1994. High-Pressure and Freezing Pretreatment Effects on Drying, Rehydration, Texture and Color of Green Beans, Carrots and Potatoes. *Journal of Food Science* 59(6): 1168-1170.
- Funebo T, Ahrné L, Kidman S, Langton M, and Skjöldebrand C, 2000. Microwave heat treatment of apple before air dehydration-effects on physical properties and microstructure. *Journal of Food Engineering* 46(3): 173-182.
- Giraldo G, Vázquez R, Martín-Esparza M, and Chiralt A, 2006. Rehydration kinetics and soluble solids lixiviation of candied mango fruit as affected by sucrose concentration. *Journal of Food Engineering* 77(4): 825-834.
- Gowen A, Abu-Ghannam N, Frias J, and Oliveira J, 2006. Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Trends in Food Science and Technology* 17(4): 177-183.

- Jannot Y, Batsale JC, Ahouannou C, Kanmogne A, and Talla A, 2002. Measurement errors processing by covariance analysis for an improved estimation of drying characteristic curve parameters. *Drying Technology* 20(10): 1919-1939.
- Katekawa M, and Silva M, 2006. A review of drying models including shrinkage effects. *Drying Technology* 24(1): 5-20.
- Krokida M, and Marinos-Kouris D, 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering* 57(1): 1-7.
- Lee KT, Farid M, and Nguang SK, 2006. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering* 72(1): 16-23.
- Liu Y, Zhu W, Luo L, Li X, and Yu H, 2014. A mathematical model for vacuum far-infrared drying of potato slices. *Drying Technology* 32(2): 180-189.
- Maldonado S, Arnau E, and Bertuzzi M, 2010. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. *Journal of Food Engineering* 96(3): 333-341.
- Maskan M, 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48(2): 177-182.
- Mayor L, and Sereno A, 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61(3): 373-386.
- Moreira R, Figueiredo A, and Sereno A, 2000. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology* 18(1-2): 279-294.
- Nathakaranakule A, Jaiboon P, and Soponronnarit S, 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering* 100(4): 662-668.
- Nowak D, and Lewicki PP, 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5(3): 353-360.
- Nowak D, and Lewicki PP, 2005. Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology* 23(4): 831-846.
- Prothon F, Ahrné LM, Funebo T, Kidman S, Langton M, and Sjöholm I, 2001. Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT-Food Science and Technology* 34(2): 95-101.
- Reyes A, Mahn, A, and Huenlaf P, 2011. Drying of apple slices in atmospheric and vacuum freeze dryer. *Drying Technology* 29(9): 1076-1089.
- Sabbaghi H, Ziaifar, AM, and Kashaninejad M, 2017. Mechanical study for texture degradation of potato strip during frying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 13(1): 92-104.
- Sabbaghi H, Ziaifar AM, and Kashaninejad M, 2019. Design of Fuzzy System for Sensory Evaluation of Dried Apple Slices Using Infrared Radiation. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(1): 77-89.
- Sabbaghi H, Ziaifar AM, and Kashaninejad M, 2020. Textural profile analysis (TPA) of dried apple slices using infrared radiation with intermittent heating method. *Iranian Food Science and Technology Research Journal* 16(1): 57-72.
- Sabbaghi H, Ziaifar AM, Sadeghi Mahoonak A, Kashaninejad M, and Mirzaei H, 2015. Estimation of convective heat transfer coefficient as function of the water loss rate during frying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 11(4): 473-484.
- Talla A, Puiggali JR, Jomaa W, and Jannot Y, 2004. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering* 64(1): 103-109.
- Timoumi S, Mihoubi D, and Zagrouba F, 2007. Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *LWT-Food Science and Technology* 40(9): 1648-1654.
- Tran TM, Chen XD, and Southern C, 2007. Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering* 80(2): 719-726.
- Witrowa-Rajchert D, and Rząca M, 2009. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology* 27(7-8): 903-909.
- Yan Z, Sousa-Gallagher MJ, and Oliveira FA, 2008. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering* 84(3): 430-440.
- Zhu Y, and Pan Z, 2009. Processing and quality characteristics of apple slices under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with continuous heating. *Journal of Food Engineering* 90(4): 441-452.
- Zhu Y, Pan Z, McHugh TH, and Barrett DM, 2010. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. *Journal of Food Engineering* 97(1): 8-16.

Journal of Food Researches/vol.31 No.4 2021/pp 35-49
https://foodresearch.tabrizu.ac.ir
DOI: 10.22034/FR.2021.20743.1459

Estimation of shrinkage and rehydration in apple slices dried by infrared radiation using intermittent heating method

H Sabbaghi¹, A Mohammad Ziaifar^{2*} and M Kashaninejad

Received: December 20, 2017 Accepted: February 10, 2020

¹PhD Graduated, Department of Food Materials and Design Engineering, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources, Gorgan, Iran

²Associate Professor, Department of Food Materials and Design Engineering, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources, Gorgan, Iran

³Professor, Department of Food Materials and Design Engineering, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources, Gorgan, Iran

*Corresponding author: ziaifar@gmail.com

Introduction: Dehydration of fruits and vegetables is a widely used unit operation (Funebo et al., 2000). Intermittent infrared radiation, in which the product surface maintained at constant temperature, is a novel drying method to produce high quality dehydrated fruits and vegetables (Zhu and Pan, 2009; Zhu et al., 2010). During the drying, one of the most important physical changes in the quality of food is the decrease in external volume. This change in volume is called shrinkage and is an unavoidable phenomenon during the dehydration process. Shrinkage is usually expressed by the ratio between the volume of the sample after and before drying (Yan et al., 2008). Shrinkage also affects the porosity of dried materials and it is the parameter determining about the mass transfer properties, mechanical properties, and the texture of food product (Witrowa-Rajchert and Rząca, 2009). The three qualitative parameters such as the degree of shrinkage, density and firmness of the product are related to each other (Funebo et al., 2000). Maximal shrinkage and structural collapse were shown to decrease until kept quality characteristics (Barzaghi et al., 2008). The factors affecting shrinkage include volume of water extracted from the product, mechanical mobility of the solid matrix, drying rate, and process conditions such as temperature, air flow rate, and relative air humidity (Moreira et al., 2000). The mechanical mobility of texture in plant based foods during processing is affected by dry matter, starch and cell wall constituents, and it can be said that due to the high thickness of the cell wall, cell separation due to water evaporation pressure is more than cell rupture (Sabbaghi et al., 2017). The important consequences of shrinkage occurring during drying result in a loss of rehydration ability. Dehydrated products are usually rehydrated prior to their use (Krokida and Marinos-Kouris, 2003). The rehydration behavior is studied as an indicator of texture damage (Giraldo et al., 2006). Rehydration is a complex process that is intended to restore the properties of the fresh product by contacting dehydrated products with a liquid phase. This process to be composed of three simultaneous steps: (1) absorption of water into the dry material, (2) swelling of the rehydrated product, and (3) loss or diffusion of soluble components. Rehydration ability or capacity measures the ability of a dehydrated product to rehydrate (Maldonado et al., 2010). Mathematical models of rehydration will be useful in designing and optimizing this operation that have been applied as exponential models or capillary absorption theory or Fick's diffusion laws (Lee et al., 2006). In this research, the effect of this heating method on the physical-qualitative characteristics of dried apple slices, including volume, density, shrinkage and behavior of rehydration were studied.

Material and methods: Apples (Golden Delicious variety) were purchased from a local market and according to Acevedo et al., 2008 kept in $0^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ and relative humidity ranging from 90% to 95%. The samples were skinned manually and then cut into slices with different thicknesses of 5mm, 9mm and 13mm and all with 20mm in diameter. The average moisture content of apple was measured using oven (Binder FD53) at 103°C for 24 hours and it was equal to 84.11% based on wet weight (AOAC, 2000). Operation of infrared radiation with intermittent heating method was performed at three constant temperatures of 70, 75 and 80°C using the infrared dryer similar to Liu et al., 2014. Shrinkage coefficient of product was estimated with both theoretical (β_{theo}) and practical (β) methods according to Talla et al., 2004. Also, the mathematical models as Peleg (Reyes et al., 2011) and Exponential (Krokida et al., 2003) equation were compared to describe the rehydration process in dried product using adjusted R-squared (Adj.R^2) and root mean squared error (RMSE). Statistical analysis of the effect of thickness and temperature on the shrinkage coefficients (β_{theo} , β) was performed in SPSS software in version of 19. To achieve this aim, a completely randomized design (CRD) with factorial arrangement with two factors as thickness (at three levels) and temperature (at three levels) was used. Also, two methods of computing the shrinkage coefficients (theoretical and practical) were compared together with one-way F test. Mean comparison was performed by Duncan test with 95% confidence level ($P < 0.05$). All experiments were performed in three replications.

Results and discussion: The results showed that increasing of the temperature caused greater volume and density changes during rapid dehydration of the product. The density changes were more intense for the thin product (reducing the final density to about 0.6 g/cm^3). Also for thicker products, the density changes were slower during the process (reducing the final density to about 0.7 g/cm^3). During process, the variation of product shrinkage indicated an exponential rising trend which was influenced by the amount of evaporated water. Shrinkage coefficient is significantly increased at higher processing temperature and thickness of product (β equal to 0.164), representing that the product is heavily affected by the structural collapse phenomenon. The observations were similar to those reported by many researchers (Mayor and Sereno, 2004; Nowak and Lewicki, 2004; Katekawa and Silva, 2006). The temperature of 80°C showed significantly higher theoretical and practical shrinkage coefficient than the other two tested temperatures (70, 75°C). The difference between the two methods of calculation in shrinkage coefficient (theoretical and practical) was also significant and the difference increased with the increase of temperature (more than 6%). Jannot et al., 2002 reported that the error in the practical method can be due to the noisy data (deviation from the actual value). Limitation of rehydration capacity (RC) in slices with high shrinkage stress confirms the damage of the texture of the product (reduction in predicted equilibrium moisture content: X_e from 6.523 to 4.148 kg/kg, db). Rehydration process in different product thicknesses is described better using Peleg model (higher Adj.R^2 and lower RMSE) compared with the exponential one. The observations were similar to those reported by many researchers (Krokida and Marinos-Kouris, 2003; Nathakaranakule et al., 2010).

Conclusion: The physical properties including shrinkage and density in the dried product are affected by process and product conditions. The low occurred shrinkage that reflects the preservation of the internal structure of the product and will be effective in rehydration behavior. In fact, reabsorption cannot be simply defined as the returned process of dehydration. Because of moisture reabsorption is completely affected by the texture, structure and properties of the dried product. Therefore, mild thermal conditions prevent the structural breakdown of apple slices and, at low thicknesses, due to the reduced volume of water evaporated from the slices, the shrinkage coefficient is reduced, thus preserving the internal physical structure of the infrared dried product.

Keywords: Infrared, Drying, Apple, Density, Shrinkage, Rehydration